

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANES DE
MANTENIMIENTO ENFOCADO A LOS EQUIPOS
CRÍTICOS DE LA PLANTA CONCENTRADORA
DE CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE BASADO
EN EL MODELO DE MANTENIMIENTO
CENTRADO EN CONFIABILIDAD”**

JAIME ANDRÉS REYES LIRA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA.**

PROFESOR GUÍA: ING. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER
PROFESOR CORREFERENTE: DR. PEDRO SARIEGO PASTÉN

ABRIL 2019



Advertencia

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.



RESUMEN

La investigación realizada a la planta concentradora de Codelco división El Teniente reveló que el proceso de obtención de molibdenita es el de mayor riesgo económico y ambiental. El mineral procesado en las plantas de molienda autógena y convencional es tratado para separar el cobre del molibdeno y obtener el concentrado de molibdenita.

Los principales modos de falla observados en los equipos críticos de la planta de molibdeno son provocados por una combinación de deterioro mecánico y corrosivo, específicamente desgaste mecánico, corrosión, corrosión-erosión, fatiga, lubricante contaminado y acumulación de carga. Estos representan un riesgo anual de 22 millones de dólares aproximadamente, de los cuales el 35% corresponde a modos de falla sin el correcto plan de mantenimiento que controle o elimine sus consecuencias asociadas.

La aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad determinó una mayoría de actividades proactivas basadas en condición y la diferencia en actividades de sustitución o reacondicionamiento cíclico. Ambas actividades permiten mitigar un 35 % del riesgo asociado y su costo no supera los catorce mil dólares (US\$14.000) anuales.

Las tareas de condición a aplicar son análisis de lubricantes, medición de vibraciones y e inspección por ultrasonido. Estos métodos de ensayos no destructivos permiten detectar la génesis de la falla de los elementos a bajo costo.

Mediante el mantenimiento centrado en confiabilidad se logran definir los planes necesarios para el control de las consecuencias de estos modos de falla aumentando la confiabilidad de los procesos involucrados.



ABSTRACT

The investigation carried out at the concentrating plant of Codelco El Teniente division revealed that the process of obtaining molybdenite is the one with the greatest economic and environmental risk. The ore processed in the autogenous and conventional grinding plants is treated to separate the copper from the molybdenum and obtain the molybdenite concentrate.

The main failure modes observed in the critical equipment of the molybdenum plant are caused by a combination of mechanical and corrosive deterioration, specifically mechanical desgate, corrosion, corrosion-erosion, fatigue, contaminated lubricant and load accumulation. These represent an annual risk of approximately 22 million dollars, of which 35% correspond to failure modes without the correct maintenance plan that controls or eliminates their associated consequences.

The application of the maintenance methodology focused on reliability determined a majority of proactive activities based on condition and the difference in activities of substitution or cyclical reconditioning. Both activities mitigate a 35% of the associated risk and its cost does not exceed fourteen thousand dollars (US \$ 14,000) per year.

The condition tasks to be applied are lubricant analysis, vibration measurement and ultrasound inspection. These methods of non-destructive tests allow to detect the genesis of the failure of the elements at low cost.

Through maintenance focused on reliability, the necessary plans for controlling the consequences of these failure modes can be defined, increasing the reliability of the processes involved.



ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	12
OBJETIVO GENERAL	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1. MARCO TEÓRICO.....	13
1.1. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD	13
1.1.1. Funciones (primera pregunta del método).....	14
1.1.2. Contextualización (primera pregunta del método)	14
1.1.3. Fallas funcionales (segunda pregunta del método).....	17
1.1.4. Modos de falla (tercera pregunta del método).....	18
1.1.5. Efecto de falla (cuarta pregunta del método).....	20
1.1.6. Consecuencia (quinta pregunta del método)	21
1.1.7. Acciones para predecir o prevenir los modos de falla (sexta pregunta del método)	22
1.1.8. Acciones a falta de (séptima pregunta del método).....	24
1.2. ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y EFECTOS.....	25
1.3. SELECCIÓN DE TAREAS	25
1.4. HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	26
1.4.1. Hoja de información.....	26
1.4.2. Hoja de decisión	27
1.5. BENEFICIOS DEL RCM	31
1.5.1. Mayor seguridad e integridad ambiental	32
1.5.2. Mayor disponibilidad y confiabilidad de planta	32
1.5.3. Mayor costo-eficiencia.....	32
1.6. ANÁLISIS DE CRITICIDAD.....	32
2. CONTEXTO	36
2.1. IMPACTO DEL PRECIO Y EL COSTO DEL COBRE EN LA INDUSTRIA	38
2.2. MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN CODELCO	41
2.2.1. Sistema SAP PM:	42
2.3. DESCRIPCIÓN PLANTA CONCENTRADORA CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE.....	44
2.3.1. Proceso convencional	45
2.3.2. Proceso SAG	46
2.3.3. Proceso planta molibdeno.....	47
2.4. CÁLCULO INDICADORES DE MANTENIMIENTO PARA LOS PROCESOS	48
3. CONTEXTO PLANTA DE MOLIBDENO	53



3.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS PRESENTES EN LA PLANTA.....	58
3.1.1.	Espesamiento.....	58
3.1.2.	Flotación de molibeno	59
3.1.3.	Lixiviación de concentrado y filtrado.....	60
4.	ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL PROCESO DE MOLIBDENO	61
4.1.	CONSECUENCIA:	61
4.2.	Frecuencia de falla.....	63
4.3.	Resultado análisis de criticidad	64
4.4.	DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS	65
4.4.1.	Celdas de flotación Rougher	65
4.4.2.	Bomba Centrífuga 547	66
4.4.3.	Espesador P-5.....	66
4.4.4.	Estanque acondicionador.....	66
4.4.5.	Filtro Andritz.....	66
4.4.6.	Estanque lixiviación	66
5.	DESARROLLO RCM	67
5.1.	RESULTADO BOMBA CENTRÍFUGA N°547	68
5.2.	RESULTADO CELDA DE FLOTACIÓN ROUGHER.....	72
5.2.1.	Tarea Modo de falla A1 (desalineamiento).....	76
5.2.2.	Modo de falla A5 y A6 (erosión)	76
5.2.3.	Modo de falla C1 (corrosión-erosión)	77
5.2.4.	Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos.....	77
5.3.	RESULTADO FILTRO ANDRITZ	79
5.3.1.	Modo de falla B1 (corrosión)	82
5.3.2.	Modo de falla C1 (lubricante contaminado).....	82
5.3.3.	Modo de falla C3 (erosión).....	83
5.3.4.	Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos.....	83
5.4.	RESULTADO ESPESADOR DE PROCESO P-5.....	84
5.4.1.	Modo de falla A1 (descarga de canales atollada).....	88
5.4.2.	Modo de falla B1 (atollo de los conos de descarga).....	88
5.4.3.	Modo de falla B3 (lubricante contaminado).....	88
5.4.4.	Modo de falla B4 (desgaste).....	89
5.4.5.	Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos.....	89
5.5.	RESULTADO ESTANQUE ACONDICIONADOR N°601	91
5.5.1.	Modo de falla A2 (corrosión-erosión).....	94
5.5.2.	Modo de falla A3 (lubricante contaminado).....	94
5.5.3.	Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos.....	95



5.6.	RESULTADO ESTANQUE DE LIXIVIACIÓN N°1	96
5.6.1.	Modo de falla A1 (corrosión-erosión).....	99
5.6.2.	Modo de falla A2 (lubricante contaminado).....	99
5.6.3.	Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos.....	100
5.7.	SEGURIDAD	101
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	102
7.	RECOMENDACIONES	105
8.	CONCLUSIONES	106
	REFERENCIAS.....	108
	ANEXOS	109
	ANEXO A: EQUIPOS PLANTA MOLIBDENITA.....	109
	Bombas centrífugas pertenecientes a la planta de molibdenita	109
	Equipos de flotación pertenecientes a la planta de molibdenita.....	111
	Espesadores pertenecientes a la planta de molibdenita	112
	Filtro perteneciente a la planta de molibdenita	112
	ANEXO B: ANÁLISIS DE CRITICIDAD	113
	ANEXO C: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS.....	119
	Celdas de flotación Rougher	119
	Bomba Centrífuga 547	121
	Espesador P-5.....	122
	Estanque acondicionador.....	124
	Filtro Andritz.....	125
	Estanque lixiviación	126



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama entrada, proceso, salida.....	16
Figura 2 Tiempo de parada de máquina v/s tiempo de reparación	21
Figura 3 Margen de deterioro de los activos.....	22
Figura 4 Curva P-F (Margen de deterioro de los activos	24
Figura 5 Diagrama lógico de decisión	28
Figura 6 Matriz de criticidad.....	35
Figura 7 Diagrama de flujo de la actividad de extracción, mina subterránea.....	36
Figura 8 Diagrama de flujo de la planta concentradora.....	37
Figura 9 Diagrama de flujo de la fundición Caletones.....	37
Figura 10 Desglose costos C1, C2 y C3.....	39
Figura 11 Producción de cobre y molibdeno en los años 2016 y 2017.. ..	40
Figura 12 Modelo de gestión del mantenimiento de Codelco.	41
Figura 13 Tratamiento de avisos en SAP PM.....	43
Figura 14 Diagrama de flujo planta concentrado Codelco división El Teniente.....	44
Figura 15 Diagrama de flujo proceso de molibdeno.....	57
Figura 16 Representación de una alineación correcta.	76
Figura 17 Impulsor desgastado.	77
Tabla 39 Resumen del número de planes de mantenimiento faltantes y existentes.	103
Figura 18 Celda de flotación Metso RCS10.	120
Figura 19 Bomba centrífuga Vulco.	121
Figura 20 Componentes principales de un espesador de procesos.....	122
Figura 21 Reductor EIMCO de un espesador de procesos de 200 pies de diámetro.	123
Figura 22 Estanque acondicionador y sistema motorreductor.	124
Figura 23 Filtro andritz.....	125
Figura 24 Estanque y motorreductor de lixiviación.	126



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ejemplo de la hoja de información.	26
Tabla 2 Ejemplo hoja de decisión.	29
Tabla 3 Fórmulas para el cálculo de los indicadores.	48
Tabla 4 Resultado indicadores de mantenimiento por proceso.	49
Tabla 5 Cálculo del impacto en la producción por proceso.	51
Tabla 6 Cálculo de la penalización anual por falla.	51
Tabla 7 Diagrama EFS planta molibdeno.	53
Tabla 8 Símbolos diagrama de flujo planta molibdeno.	58
Tabla 9 Valor indicador consecuencia según puntaje.	63
Tabla 10 Indicador de frecuencia según la frecuencia de falla.	64
Tabla 11 Resultado número de equipos críticos.	64
Tabla 12 Resultado análisis de criticidad en equipos críticos.	65
Tabla 13 AMFE bomba centrífuga N°547.	68
Tabla 14 Hoja de decisión bomba centrífuga N°547.	69
Tabla 15 Resultado del riesgo anual por modo de falla en bomba centrífuga N°547.	70
Tabla 16 AMFE celda de flotación rougher N°663 parte I.	72
Tabla 17 AMFE celda de flotación Rougher N°663 parte II.	72
Tabla 18 Hoja de decisión celda de flotación Rougher N°663.	74
Tabla 19 Resultado del riesgo anual por modo de falla en celda de flotación Rougher N°663.	75
Tabla 20 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en celda de flotación Rougher N°663.	78
Tabla 21 AMFE filtro Andritz.	79
Tabla 22 Hoja de decisión filtro Andritz.	80
Tabla 23 Resultado del riesgo anual por modo de falla en el filtro Andritz.	81
Tabla 24 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el filtro Andritz.	83
Tabla 25 AMFE espesador de proceso P-5 parte I.	84
Tabla 26 AMFE espesador de proceso P-5 parte II.	84
Tabla 27 Hoja de decisión espesador de proceso P-5.	86
Tabla 28 Resultado del riesgo anual por modo de falla en espesador de proceso P-5.	87
Tabla 29 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el espesador de proceso P-5.	90



Tabla 30 AMFE estanque acondicionador N°601 parte I.	91
Tabla 31 AMFE estanque acondicionador N°601 parte II.	91
Tabla 32 Hoja de información estanque acondicionador N°601.	92
Tabla 33 Resultado del riesgo anual por modo de falla en estanque acondicionador N°601.....	93
Tabla 34 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el estanque acondicionador N°601.	95
Tabla 35 AMFE estanque de lixiviación N°1.....	96
Tabla 36 Hoja de decisión estanque de lixiviación N°1.	97
Tabla 37 Resultado del riesgo anual por modo de falla en estanque de lixiviación N°1.	98
Tabla 38 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el estanque acondicionador N°601.	100
Tabla 40 Bombas planta de molibdeno.	109
Tabla 41 Equipos de flotación planta de molibdeno.....	111
Tabla 42 Espesadores de proceso planta de molibdeno.....	112
Tabla 43 Especificaciones técnicas Filtro Andritz planta de molibdeno.	112
Tabla 44 Valores análisis de criticidad planta de molibdeno.	113

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Variación del precio del cobre.	38
Gráfico 2 Evolución del costo del molibdeno.....	40
Gráfico 3 Pareto de costos de penalización para los procesos de la planta concentradora.....	52
Gráfico 4 Pareto de riesgo anual por modo de falla en bomba centrífuga N°547.	70
Gráfico 5 Pareto de riesgo anual por modo de falla en celda de flotación Rougher N°663.	75
Gráfico 6 Pareto de riesgo anual por modo de falla en el filtro Andritz.....	81
Gráfico 7 Pareto de riesgo anual por modo de falla en espesador de proceso P-5.....	87
Gráfico 8 Pareto de riesgo anual por modo de falla en estanque acondicionador N°601.	93
Gráfico 9 Pareto de riesgo anual por modo de falla en estanque de lixiviación N°1.....	98
Gráfico 10 Planes de mantenimiento existentes v/s faltantes.	102
Gráfico 11 Distribución del riesgo en planes de mantenimiento existentes v/s faltantes.	103



INTRODUCCIÓN

La competitividad dentro del mercado ha obligado a las plantas productivas a implantar políticas de reducción de costos, provocando que el mantenimiento haya evolucionado aceleradamente en el último siglo para dar respuesta a las necesidades del negocio asegurando procesos más costo-eficientes.

El mantenimiento es una acción que tiene como objetivo preservar un activo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo la función requerida. Existen distintas metodologías que se crearon con el fin de preservar los activos de las plantas.

El modelo centrado en confiabilidad. Este modelo fue documentado en 1978 y nace de la necesidad que tuvo la industria de aviación de disminuir la probabilidad de la ocurrencia de una falla, ya que sus consecuencias involucran no tan solo la pérdida de activos físicos costosos, sino que también, de vidas humanas. Es así como este modelo se fue adaptando a la industria con uso intensivo de activos físicos, obteniendo como resultado la mejora de la continuidad operacional, resguardado la seguridad de las personas y el impacto al medio ambiente.

Este trabajo de título desarrolla la mejora de los planes de mantenimiento en los equipos críticos de la planta concentradora de Codelco división El Teniente, mediante el modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Con esto se busca mejorar los índices de disponibilidad de planta, disminuir los costos de mantenimiento, mitigar los riesgos ambientales y aumentar la seguridad de sus procesos.

El modelo nos permitirá evaluar el riesgo de cada modo de falla en sus equipos críticos, logrando identificar las acciones proactivas faltantes que ayudarán a aumentar la confiabilidad en sus procesos y el EBITDA de la empresa.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Mejorar los planes de mantenimiento actuales de la planta concentradora de Codelco Teniente utilizando la metodología RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad) con el fin de obtener mayor confiabilidad y disponibilidad en los procesos que engloban el chancado, la molienda y el transporte dentro de la planta. Junto con lo anterior se deberá incluir a los planes actualizados los recursos, costos y procedimientos de seguridad inherentes a la actividad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Identificar el contexto actual de la planta concentradora mediante el análisis de los diagramas de procesos junto con los índices de disponibilidad, tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparación de los equipos involucrados.
- II. Realizar un análisis funcional de la planta concentradora para establecer las funciones de los equipos involucrados en la operación.
- III. Identificar los equipos críticos presentes en la planta considerando factores de costos, impacto en la producción, mantenibilidad y efectos en el HSEC.
- IV. Realizar un análisis modal de fallos y efectos (AMFE) a los equipos críticos para determinar las acciones de mejora al plan de mantenimiento actual.
- V. Estandarizar los planes de mantenimiento definiendo los trabajos a ejecutar, recursos y procedimientos óptimos en seguridad para la correcta ejecución de las acciones de mantenimiento propuestas.



1. MARCO TEÓRICO

El método del mantenimiento centrado en confiabilidad nace mediante el esfuerzo de la industria aeronáutica y el gobierno norteamericano, a fin de establecer un proceso lógico que diseñe actividades de mantenimiento apropiadas para la función misma del equipo, aumentando la confiabilidad, algo muy necesario en la aviación.

Junto con la confiabilidad, el objetivo del método se basa en reducir los tiempos medios de reparación, reducir los costes de mantenimiento e incrementar la seguridad favoreciendo las personas y el medio ambiente.

“Cuando mantenemos un activo, el estado que queremos preservar debe ser aquel en el cual continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga.” (Moubray, 1997).[2]

1.1. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

Según Moubray (1997), el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es un método empleado para determinar las necesidades de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto de operación. El RCM sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes. Para su correcta ejecución se apoya principalmente en la definición de las funciones de los activos, de este modo la metodología propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos, a partir del análisis de las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las funciones y los estándares de ejecución asociados con el activo en su actual entorno operacional?
- ¿En qué forma falla el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
- ¿Qué causa cada fallo funcional?
- ¿Qué ocurre cuando sucede un fallo?
- ¿Cómo impacta cada fallo?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo funcional?
- ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea de prevención adecuada a este fallo?



1.1.1. Funciones (primera pregunta del método)

Para lograr definir las estrategias relacionadas al mantenimiento según los requerimientos de los usuarios, se deben definir claramente las distintas funciones que debe cumplir el activo físico en un contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento asociados. Es por esto que la primera pregunta relacionada a RCM es:

¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento del activo físico en su contexto operacional actual?[2]

La definición completa de una función consiste en un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario.

Por otro lado, un aspecto importante a considerar al momento de definir las funciones de un activo es el contexto operacional, el cual no sólo afecta las funciones, sino que influye en los modos de fallas, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con la que pueden ocurrir y qué debe hacerse para manejarlas.

1.1.2. Contextualización (primera pregunta del método)

- a) Procesos por lotes y continuos: El tipo de proceso es una característica muy importante dentro el contexto operacional. Pueden existir procesos continuos donde la falla de un activo puede parar o reducir la producción o procesos por lotes donde los activos trabajan en forma discontinua. Esto implica que los planes de mantenimiento a plantas continuas pueden ser radicalmente distintas a procesos por lotes.
- b) Redundancia: Es importante identificar los equipos redundantes o con stand by, ya que su plan de mantenimiento puede variar bastante considerando tales factores.
- c) Estándares de calidad: Este aspecto puede afectar la definición de una función y consecuentemente sus planes de mantención, como por ejemplo cuando existen tolerancias de fabricación, o granulometría de material como es el caso de la molienda



- d) Estándares medioambientales: El impacto que tiene o podría tener el activo, son aspectos muy relevantes para el contexto nacional que se está viviendo, donde se deben proteger no solo al personal directo e indirecto, sino que también, el medio ambiente. Es importante destacar que la sociedad se ha convertido en un fiscalizador agresivo.
- e) Riesgos para la seguridad: Los procesos productivos, no solo deben cumplir con los estándares de las organizaciones propiamente tal, sino que también con la legislación que protege a los trabajadores (ley 16744).
- f) Turnos de trabajo: Las plantas se pueden diferenciar por las horas de producción, donde se pueden encontrar operaciones de 8 horas al día por 5 días a la semana y en el otro extremo encontramos producciones de 24 horas al día los 7 días de la semana. En las plantas donde la producción es ininterrumpida los costos por paradas inesperadas son prácticamente irrecuperables y las pérdidas bastante mayores a otros tipos producción.
- g) Productos en proceso: Hace referencia a la materia prima que se encuentre en etapas intermedias del proceso y aún no pase a través de todo su proceso productivo. Para evaluar este punto se debe tener presente la cantidad de producto en proceso entre esa etapa y la siguiente, y así por toda la línea productiva. Además, se debe considerar la proporción en que cualquiera de los procesos afectados se vuelve cuello de botella.
- h) Tiempo de reparación: La velocidad de respuesta, el nivel del personal, y la velocidad de reparación que a su vez depende de la disponibilidad de repuestos, de herramientas y recursos humanos. Todos estos factores condicionan el tiempo de reparación.
- i) Repuestos: Adquirir repuestos toma tiempo, esto se conoce como el tiempo de reposición (lead time), y puede ser del orden de minutos a varios meses o años. El tiempo de reposición del repuesto determina cuánto tiempo tomará reparar la falla, y por lo tanto la severidad de la falla.

- j) Demanda del mercado: En épocas donde la demanda es alta, la producción debe ser alta, por lo que una falla en tiempo de máxima producción las consecuencias serían severas en términos económicos. Del mismo modo funciona con la variabilidad del precio de los commodities.

Una herramienta gráfica que facilita la visualización del contexto operacional es el *diagrama de entrada-proceso-salida (EPS)*. En estos diagramas se deben identificar las entradas, los procesos y las salidas principales del sistema.

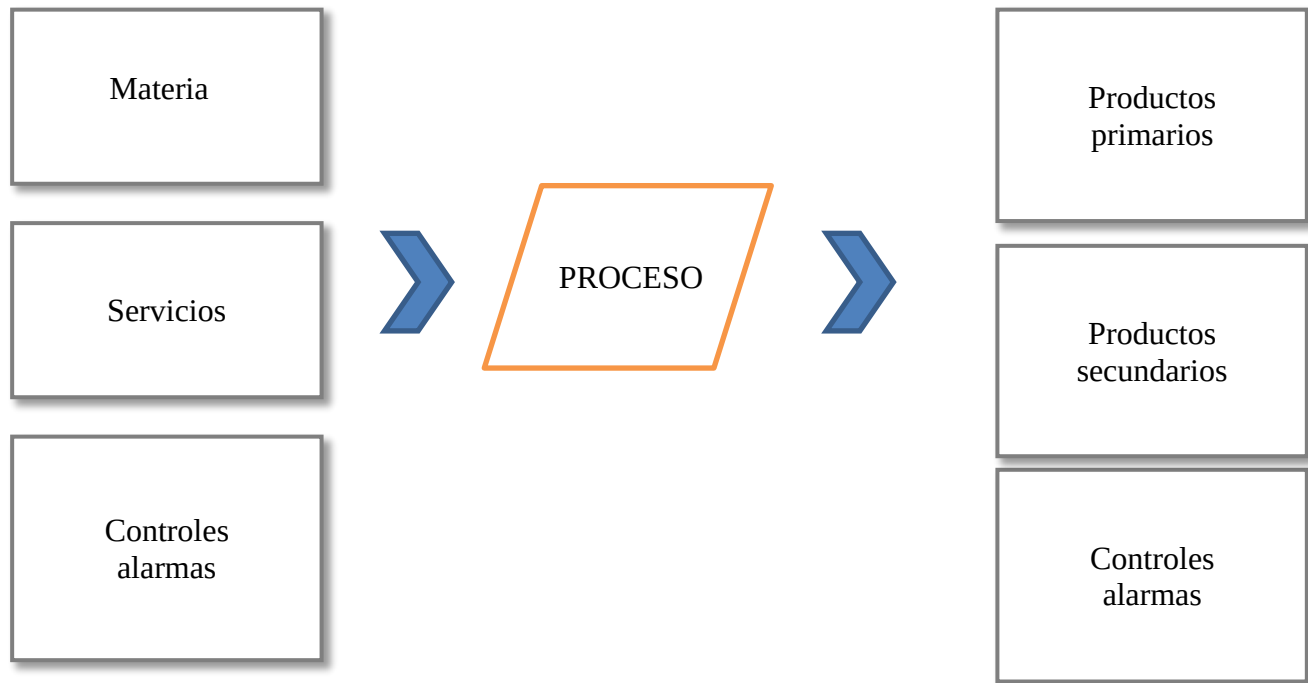


Figura 1 Diagrama entrada, proceso, salida (fuente: mantenimiento centrado en confiabilidad, Moubray, 1997).

Como se ilustra en el diagrama anterior, los factores más importantes son:

Entradas:

- Materia prima: Son los bienes utilizados por el proceso para luego transformarlos en productos finales.
- Servicios: Son los recursos utilizados para lograr la transformación de la materia prima.



- Controles alarmas: Sistemas de control y sus efectos sobre los equipos o procesos. (normalmente no necesitan ser registrados como función separada ya que su fallo va asociado a una pérdida de señal de salida.

Salidas:

- Productos primarios: Principales productos del sistema.
- Productos secundarios: Se derivan de funciones principales que cumple el sistema dentro del proceso. La pérdida de productos secundarios puede provocar en la mayoría de los casos una pérdida de funciones primarias y sus consecuencias pueden ser catastróficas.
- Controles y alarmas: Protección y control del sistema.

Por lo general existe más de una función en un activo físico, y se pueden clasificar en primarias y secundarias.

- a) Las primarias representan la razón principal por la cual el activo ha sido adquirido por lo que se debe definir con la mayor precisión posible, esto quiere decir definir el desempeño esperado del equipo como velocidad, volumen, capacidad de almacenamiento, calidad, etc.
- b) Las secundarias muestran ciertos desempeños o acciones que se esperan del activo, que si bien no son fundamentales, llegan a satisfacer necesidades secundarias como alertas de seguridad, indicadores de combustible y aceite, etc. Las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, pero una pérdida de estas funciones puede llegar a ser hasta más seria que las primarias.

“Se debe destacar que los parámetros de confiabilidad no son funciones por sí mismas, sino que es una expectativa de funcionamiento que impacta en todas las demás funciones.” (Moubray, 1997). [2]

1.1.3. Fallas funcionales (segunda pregunta del método)

“Se define una falla como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga” (Moubray, 1997) [2].

De esta forma, como se mencionó antes, un activo puede tener distintas funciones lo que provoca que a la vez existan distintas formas de fallar, ya sea una falla de función primaria o secundaria.



De esta forma es más preciso definir las distintas fallas que involucran una pérdida de función que definir la falla del activo como un todo. En base a lo anterior se puede definir la falla funcional como la incapacidad de cualquier activo de cumplir una función según los parámetros definidos por los usuarios.

Existen cuatro aspectos que engloban las fallas funcionales, falla total o parcial, límites superiores e inferiores, instrumentos de medición e indicadores y finalmente el contexto operacional.

- Falla total o parcial: falla total del activo ocurre al detenerse por completo, en cambio falla parcial ocurre cuando comienza a funcionar fuera de los parámetros deseados.
- Límites superiores e inferiores: como se mencionó anteriormente existen estándares que definen el funcionamiento del activo, en base a esto el usuario define límites superiores e inferiores que tienen que ver con la calidad del producto, el sobrepasar estos límites provocan una falla funcional.
- Instrumentos de medición e indicadores: dentro de los límites de funcionamiento también existen instrumentos de medición que indican el estado del activo, los cuales puede ser trascendentales para evitar un modo de falla. Por lo que un instrumento fuera de los parámetros de funcionamiento también puede incluirse como una falla funcional.
- Contexto operacional: la falla funcional de un activo depende en gran parte de su contexto operacional en el cual se encuentra inserto, por lo que al igual que en la definición de funciones, no se deben generalizar las fallas funcionales entre activos similares.

Se debe tener en consideración que la definición de las funciones y fallas funcionales no deben ser definidas sólo por el área de mantención, también se deben incluir los departamentos de calidad, medio ambiente y operaciones, ya que para cada uno existen distintos parámetros de evaluación.

1.1.4. Modos de falla (tercera pregunta del método)

“Un Modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional” (Moubrey, 1997) [2].

La definición del modo de falla debe ser lo suficientemente detallada para identificar de forma sencilla las acciones necesarias para prevenir la ocurrencia de este. También se debe tener en consideración que existen distintos niveles de modos de falla y se puede perder bastante tiempo en



definirlos todos e incluso llegar a su causa raíz. Para ahorrar recursos de tiempo el interesado debe definir según sus riesgos que modos de falla considerar y hasta que nivel de profundidad llegar a definir el modo de falla. Para la industria productiva un nivel medio basta, pero en la industria aeronáutica no quedarán tranquilos con los niveles medios y llegarán a la causa raíz en todos los modos de falla existentes.

Definir los modos de falla para cada falla funcional tiene como propósito especificar el correcto plan de mantenimiento ya sea correctivo, preventivo o predictivo con el fin que eviten o mitiguen el efecto de la ocurrencia de tal evento. Cuando el activo es nuevo se debe identificar los modos de falla más importantes basados en la experiencia y en el tipo de componente. Los modos de falla deben ser posteriormente complementados con su comportamiento en operación.

“Los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla” (Moubray, 1997).

Además del nivel de detalle, se debe tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia del modo de falla, si ocurre una vez cada 40 años o 3 veces al año, para descartar los que tienen menos probabilidad y de esta forma ahorrar esfuerzos de análisis. Pero si la probabilidad es baja y la consecuencia es catastrófica se debe considerar como un modo de falla y se debe definir la política de mantenimiento para mitigarla. Este análisis requiere de mucho sentido común y criterio.

Los modos de falla pueden ser clasificados en 3 grupos:

- Capacidad decreciente: cubre las situaciones en que el activo en un principio su capacidad por encima del funcionamiento deseado y una vez que es puesto en funcionamiento decae quedando por debajo de la capacidad deseada. Esto se relaciona generalmente con fallas de lubricación (falta de lubricante o lubricante inadecuado), deterioro (fatiga, corrosión, erosión, etc.), polvo o suciedad, desarme (soldadura, tuercas, etc.) o errores humanos.
- Aumento del funcionamiento deseado: el funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo físico no puede responder a él, lo que acelera el deterioro bajando la confiabilidad al punto de no ser útil. Este fenómeno se traduce como una sobrecarga del activo.
- Capacidad inicial: el activo no cumple con la capacidad deseada en alguna de sus funciones.



Una vez identificados los modos de fallos, se procede a definir el nivel de criticidad de estos. Se propone calcular el indicador de riesgo total anualizado [Carlos Parra & Adolfo Crespo, 2015], el cual se estima a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo Año} \left[\frac{\$}{\text{año}} \right] = FF \times TPDP \times IP$$

Dónde:

FF: frecuencia de fallos [fallos/año].

TPDP: tiempo promedio de parada [hr] (incluye tiempos de reparación y obtención de repuestos).

IP: impacto en la producción [USD/hr] (pérdida asociada a dejar de producir).

1.1.5. Efecto de falla (cuarta pregunta del método)

La cuarta pregunta de RCM consiste en definir qué sucede cuando se produce un modo de falla.

“Los efectos de falla describen que pasa cuando ocurre un modo de falla” (Moubray, 1997) [2].

Al describir el efecto de la falla se deben describir los siguientes aspectos:

- La evidencia de que se ha producido una falla.
- Las maneras en que la falla supone una amenaza al medio ambiente o la seguridad.
- Que debe hacerse para reparar la falla.
- Que efectos tiene sobre la operación.

Uno de los objetivos de este ejercicio es establecer si es necesario el mantenimiento proactivo. Para ello los efectos de las fallas se deben describir como si no se estuviera haciendo nada para impedirlos.

Del mismo modo la descripción debe indicar si la falla hace que se enciendan alarmas en la sala de control o en el equipo, ruidos fuertes, humo, olores extraños o manchas en el piso.

Además, se debe señalar si el riesgo de fenómenos aumenta, como el caso de incendio, escape de productos químicos peligrosos, electrocución, explosiones o exposición a materiales calientes.

Junto con esto se debe indicar cómo y durante cuánto tiempo se ve afectada la producción, esto tiene que ver con el tiempo de parada de la máquina que se muestra en la figura N°2. Por último, se debe indicar el mantenimiento correctivo para reparar la falla.

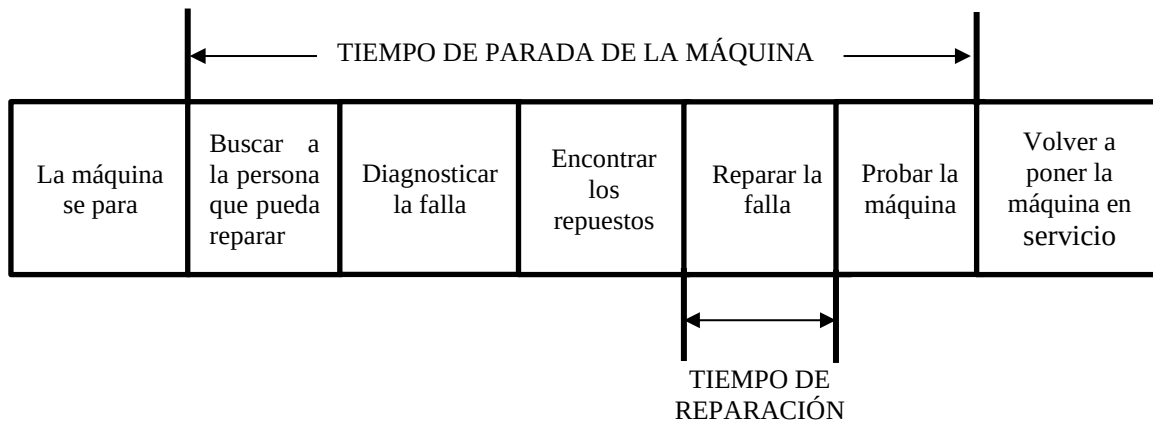


Figura 2 Tiempo de parada de máquina v/s tiempo de reparación (fuente: mantenimiento centrado en confiabilidad, Moubray, 1997).

1.1.6. Consecuencia (quinta pregunta del método)

Aquí se describe la quinta pregunta de la metodología RCM, que busca identificar de qué manera importa la falla. En otras palabras, se define la manera en que los dueños y los usuarios del activo creerán que cada falla es importante. Como se mencionó anteriormente, los efectos describen lo que sucede cuando ocurre una falla, por lo que al disminuir un efecto estaremos disminuyendo a la vez sus consecuencias. Cuando una consecuencia es muy grave, llegando a impactar el medio ambiente o la salud, entonces se harán esfuerzos considerables para evitar, eliminar o disminuir sus consecuencias. Esto también es válido para fallas que interfieren con la producción o las operaciones. Por otro lado, si la falla tiene consecuencias menores, probablemente no se tome ninguna acción proactiva, y la falla será reparada una vez que ocurra.

Este enfoque sobre las consecuencias hace que nazca el siguiente paso de encontrar tareas proactivas que sean físicamente posibles de realizar y que reduzca las consecuencias de la falla.

“Una tarea proactiva merece la pena si reduce las consecuencias del modo de falla asociado a un grado tal que justifique los costos directos e indirectos de hacerla” (Moubray, 1997) [2].

Las consecuencias se clasifican en cuatro categorías que se describen a continuación:

- Fallas no evidentes: la falla no se hará evidente a los operadores bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola. En general en estos casos, si la consecuencia es importante se debe agregar un dispositivo de protección que alerte a los operadores de una falla en el activo.
- Seguridad y medio ambiente: Una falla tiene consecuencia en la seguridad si puede lesionar o matar a alguien, en cambio tiene consecuencias ambientales si infringe alguna norma ambiental de carácter corporativo, regional o nacional.
- Operación y producción: Existen consecuencias operacionales si se ve afectada la producción por la ocurrencia de la falla (capacidad, calidad, costo operacional y costo directo de reparación).
- No operacionales: Estas fallas sólo involucran consecuencias de costos directos de reparación.

1.1.7. Acciones para predecir o prevenir los modos de falla (sexta pregunta del método)

Todo activo se ve sometido a esfuerzos que provocan su deterioro, por lo que a medida que el tiempo avanza su resistencia al esfuerzo disminuye. En base a lo anterior debe existir una tolerancia al deterioro, lo que implica que debe existir un rendimiento mayor al estándar mínimo de funcionamiento, lo que se denomina margen de deterioro y se representa en la figura N°3.

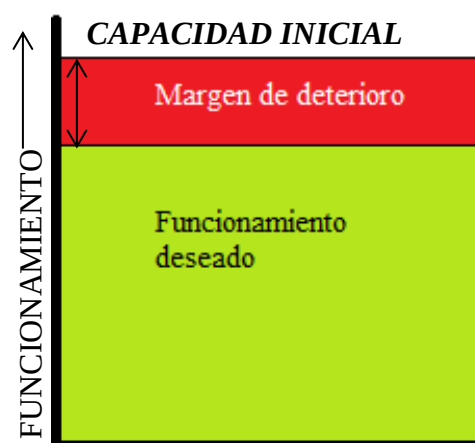


Figura 3 Margen de deterioro de los activos (fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad, Moubray, 1997).



Si se determina realizar una tarea para el manejo de un modo de falla y así recuperar su capacidad inicial, entonces estamos en la presencia del mantenimiento proactivo, este tipo de mantenimiento define acciones a ejecutar antes de la ocurrencia de la falla para prevenir que el activo llegue a un estado de falla.

“Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca las consecuencias del modo de falla asociado, a un nivel que sea aceptable al dueño o usuario del equipo” (Moubray, 1997).

El mantenimiento proactivo se puede clasificar en reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y tareas a condición, las dos primeras corresponden al tipo preventivo y la última corresponde al tipo predictivo.

1.1.7.1. Tareas preventivas

Las fallas relacionadas con la edad generalmente están asociadas con los fenómenos de corrosión, erosión, fatiga, etc., por lo cual la tarea preventiva restaura el activo en intervalos de tiempo constantes en base a su vida útil.

RCM define dos tipos de mantenimiento preventivo, el reacondicionamiento cíclico que se basa en reacondicionar el activo en el límite de edad definido, sin importar la condición de este, y, la sustitución cíclica que descarta un elemento en el límite de edad definida, independiente de su condición en ese momento.

La determinación de la frecuencia de aplicación de cualquiera de estas acciones se ve definida por el instante en que el activo aumenta rápidamente su probabilidad condicional de falla. En situaciones donde la seguridad o el medio ambiente se ve amenazado por las consecuencias del modo de falla se deben tomar tiempos menores para la aplicación de estas tareas de forma que su probabilidad de falla tienda a cero.

1.1.7.2. Tareas predictivas

Gran parte de los modos de falla entregan indicios cuando están por ocurrir, si es posible encontrar la evidencia que nos muestre que algo está por ocurrir podemos recurrir al mantenimiento por condición.

Para este tipo de mantenimiento se debe recurrir a la curva P-F que nos muestra el deterioro en el tiempo sobre el activo, donde el punto P indica el momento en que puede detectarse la falla y el punto F indica la falla funcional. La periodicidad del mantenimiento por condición se relaciona con esta curva donde los tiempos de ejecución de la tarea deben ser menores al intervalo P-F de manera de lograr detectar la falla.

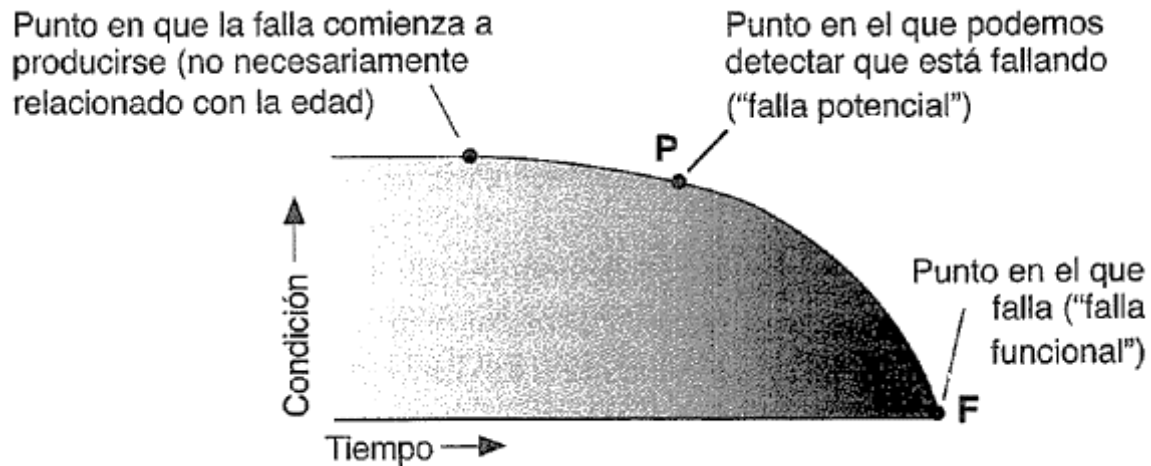


Figura 4 Curva P-F (Margen de deterioro de los activos (fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad, Moubray, 1997).

1.1.8. Acciones a falta de (séptima pregunta del método)

Cuando no es posible encontrar una tarea proactiva que disminuya las consecuencias del modo de falla a un nivel tolerable, existen acciones definidas por la metodología, las cuales varían según la consecuencia a la se está expuesto y también a si la falla es evidente u oculta. Cuando la falla no es evidente se debe realizar una tarea de búsqueda de fallas y si no se encuentra la apropiada es posible requerir un rediseño del activo. Por otro lado, cuando existe riesgo de afectar el medio ambiente o la seguridad, es obligatorio el rediseño. Finalmente, si no es posible encontrar una tarea proactiva y no existe efecto operacional, no realizar ningún mantenimiento programado es la mejor opción.



1.2. ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y EFECTOS

El análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) es la herramienta más importante que contempla el mantenimiento centrado en confiabilidad ya que permite dar respuesta a las primeras preguntas del RCM, esto asegura que se han considerado a lo largo del proceso de aplicación todas las fallas potencialmente posibles.

1.3. SELECCIÓN DE TAREAS

La metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad define los criterios para determinar si una tarea es técnicamente factible o no.

“Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca las consecuencias del modo de falla, a un nivel que sea aceptable al dueño o usuario del activo” (Moubray, 1997).

A continuación, se explica el detalle de los criterios:

- Fallas Ocultas: Una tarea proactiva es técnicamente factible si reduce de manera considerable el riesgo de falla múltiple asociado a la función que se busca resguardar. Si no se encuentra una tarea proactiva adecuada se debe usar una tarea de “búsqueda de fallas” y como una última alternativa una tarea “a falta de”.
- Fallas con consecuencias ambientales y de seguridad: Una tarea proactiva vale la pena si la posibilidad de que se presente la falla baja de manera considerable o derechamente se elimina. Si por algún motivo no se puede determinar una tarea proactiva apropiada se debe proceder a rediseñar el componente o a cambiar el proceso.
- Falla con consecuencias operacionales: Una tarea proactiva vale la pena “si el costo total de realizarla a lo largo de un cierto periodo de tiempo es menor al de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación en el mismo periodo de tiempo” (Moubray, 1991). Si se presenta esta situación la acción a seguir es “ningún mantenimiento programado” en caso de que aun así el nivel de riesgo es inaceptable se debe proceder al rediseño.

- Falla sin consecuencias operacionales: Solo vale la pena una tarea proactiva “Si el costo de la tarea a lo largo de un período de tiempo es menor al costo de reparación en el mismo tiempo”. Al igual que en el caso anterior si no se determina una tarea proactiva se debe emplear la acción “ningún mantenimiento programado” y en caso de que aún se presente un alto índice de riesgo se debe proceder al rediseño.

1.4. HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para una mejor visualización del desarrollo del RCM y su correcta aplicación se utilizan dos herramientas que son la hoja de información y la hoja de decisión.

1.4.1. Hoja de información

Esta herramienta integra la respuesta a las primeras cuatro preguntas de la metodología RCM, comenzando por la definición de funciones, siguiendo por la identificación de la falla funcional, el modo de falla probable, el efecto de la falla y finalmente la evaluación de las consecuencias del modo de falla. En la tabla N°1 se visualiza la estructura de la hoja de información con un ejemplo real.

Tabla 1 Ejemplo de la hoja de información.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencias
1	Impulsar pulpa concentrado de Cu-Mo desde el estanque mezclador hasta la flotación rougher a un caudal de 265 [m³/hr] conteniendo la carga sin generar derrames al exterior.	A	Bomba centrífuga no impulsa	1	Falla en rodamientos por excesivo desgaste.	Se generan ruidos producto de vibraciones, además aumenta la temperatura por roce lo que provoca un aumento del riesgo de incendio. Se debe cambiar conjunto eje-rodamientos lo que implica un tiempo de parada de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Bomba deja de funcionar perdiendo el proceso un 25% del transporte del concentrado Mo-Cu. Seguridad: Existe riesgo de incendio que puede afectar al personal presente.
				2	Bomba embancada por exceso de acumulación de carga en pozo	Sistema de transmisión de la bomba se contamina deteniéndose por completo. Se debe drenar pulpa del pozo, limpiar bomba y cambiar componentes externos dañados, lo que implica un tiempo de parada de 18 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Bomba deja de funcionar perdiendo un 25% del transporte del concentrado Mo-Cu.

		B	Bomba impulsa menos de 265 [m3/hr]	1	Desalineamiento.	Se producen vibraciones desgastando correa y polea de forma acelerada, además daña los acoplamientos. Se debe alinear sistema de transmisión lo que implica un tiempo muerto de 12 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen daños mayores en los acoples y el eje, lo que aumenta los costos de reparación y detiene el proceso por una mayor cantidad de horas.
				2	Erosión excesiva del impulsor	Disminuye el caudal de la bomba. Se debe reemplazar rodete lo que tiene un tiempo muerto de 24 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Riesgo de rotura del rodete lo que dañaría gran parte de los componentes internos.
				3	Polea desgastada.	Correa se desliza por tener menor agarre con la polea lo que provoca que la capacidad de bombeo de la bomba baje. Se debe cambiar polea, lo que provoca un tiempo muerto de 16 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se ve afectada la producción y la cantidad de horas de detención aumenta al ser una falla no detectada.
		C	Fugas de pulpa hacia el exterior.	1	Rotura de carcasa por erosión-corrosión.	Derrames de pulpa hacia el exterior acumulándose en el pozo. Se debe detener la bomba y cambiar revestimiento junto con carcasa, lo que tiene un tiempo de parada de 32 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Carcasa queda expuesta produciéndose corrosión en el metal. Existen pérdidas importantes de pulpa y producción.
				2	Falla del sello mecánico.	Se producen pequeñas fugas de pulpa hacia el exterior. Cambiar sello mecánico, esto provoca un tiempo muerto de 1 hora. .	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen fugas de pulpa. Puede producir daños mayores si no es reparado a tiempo.

1.4.2. Hoja de decisión

Esta herramienta integra todos los procesos de decisión en una estrategia única para la selección de tareas de mantenimientos según los criterios establecidos por la metodología y se apoya en un diagrama que se ilustra en la figura N°5.

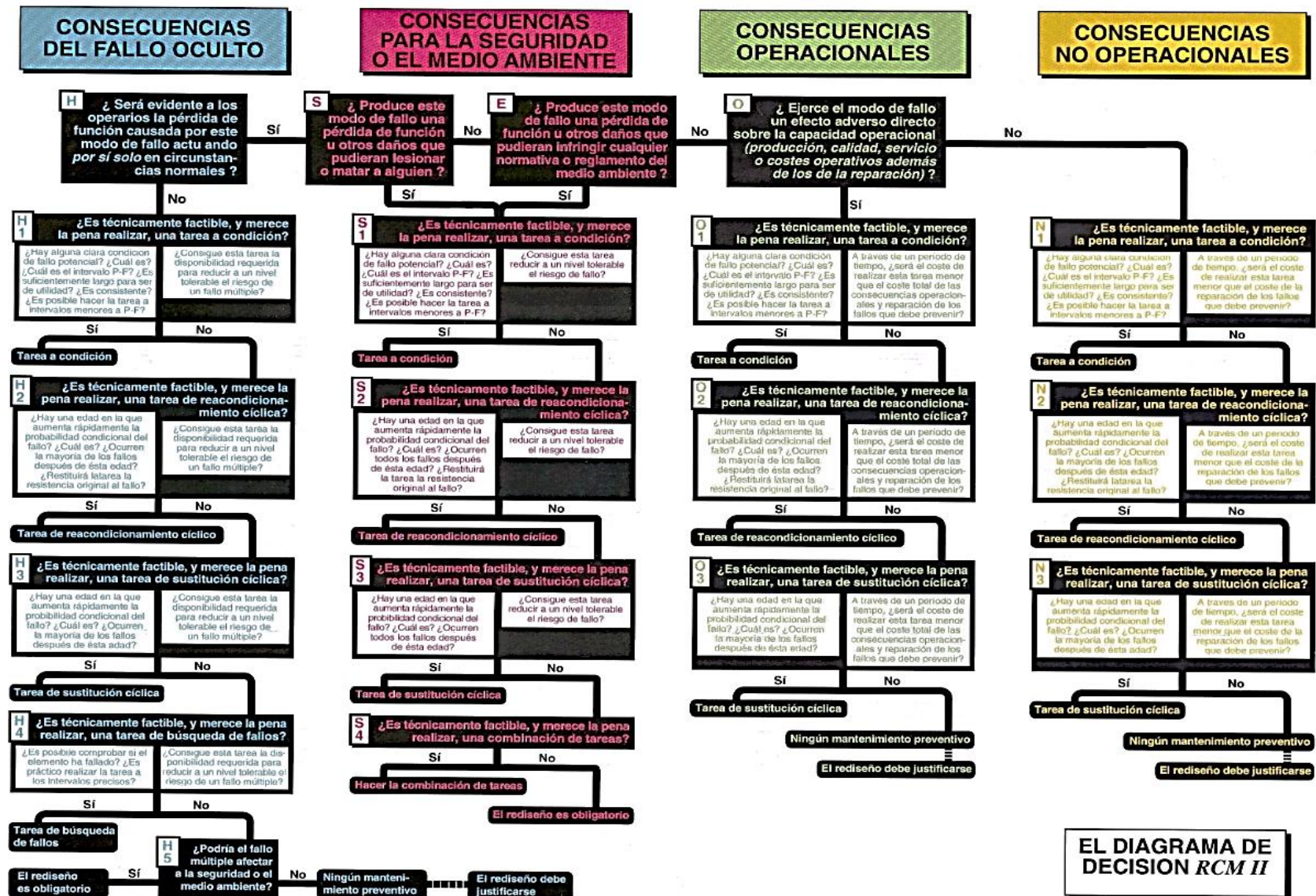


Figura 5 Diagrama lógico de decisión (fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad, Moubray, 1997).

Tabla 2 Ejemplo hoja de decisión.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	F M	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	S	S			S						Tarea a condición	Existente	
1	A	2	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento o cíclico	Existente	
1	B	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	B	2	N				N	N	S				Tarea de sustitución cíclica, se recomienda revisar todos los componentes al momento de abrir la bomba ya que la erosión es un modo de falla intrínseco de la bomba.	Faltante	6 Meses
1	B	3	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Faltante	Mensual
1	C	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	

La hoja de decisión, que se ilustra en la tabla N°2 se compone de dieciséis columnas, la columna F donde se identifica el número de la función, FF donde se identifica la letra de la falla funcional,

y MF donde se identifica el número del modo de falla, estas primeras tres se utilizan para identificar cual es el modo de falla que se está analizando. El resto de las preguntas se usan para registrar las respuestas obtenidas del diagrama de decisión RCM presentado anteriormente.

- Las columnas tituladas H, S, E, O y N se usan para las respuestas referidas a las consecuencias de cada modo de falla, en la columna H se registra si la falla es evidente o no, en las columnas S y E se registra si existe impacto en la seguridad o medio ambiente, en la columna O se registra si existe impacto operacional y finalmente en la columna N se registra si no existe impacto alguno.
- Las columnas tituladas con H1, H2, H3 registran las respuestas para las tareas proactivas, determinando que tipo de tareas se deben seguir.
- Mientras que las columnas H4, H5 y S4 se usa para registrar las respuestas sobre las acciones a falta de, como búsqueda de fallas, combinación de tareas o rediseño.

Evaluación de las consecuencias				Consecuencias
H	S	E	O	
N				Falla oculta: Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	S			Consecuencias para la seguridad: Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	N	S		Consecuencias para el medio ambiente: Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable.
S	N	N	S	Consecuencias operacionales: Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través del tiempo debe costar menor que el costo total de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación de falla que pretende intervenir
S	N	N	N	Consecuencias No Operacionales: Para que valga la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo de la reparación de las fallas que pretende prevenir

Para obtener una clasificación de los modos de falla según su riesgo, y así definir de manera adecuado su plan de mantenimiento para el manejo de la falla, existe una tabla que incluye valores de frecuencia de falla, tiempo muerto, impacto en la producción y costos directos por falla, herramienta creada por Carlos Parra, PhD [1]. Con todos estos valores se calcula cuantitativamente el riesgo por cada falla. Cabe mencionar que debido a que los costos medioambientales y sobre la seguridad son difíciles de cuantificar, sólo se menciona si el modo de falla analizado afecta de

alguna forma cualquiera de los factores que engloban el HSEC (health, security, environment, community).

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción [USD/hora]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,1	16	80.000	6.700	143.000	No
1	A	2	1	4	80.000	4.800	361.000	No
1	B	3	0,75	8	80.000	1.400	536.000	Si
1	B	4	0,5	4	80.000	500	178.000	No
1	B	1	0,5	18	80.000	14.000	810.000	Si
1	C	1	0,1	1	80.000	800	9.000	Si
1	C	2	0,2	0	80.000	150	31	Si

Para obtener buenos resultados en el análisis es necesaria la conformación de un equipo natural de trabajo que idealmente cuenta con un ingeniero de procesos (visión global del negocio), un operador (experto en manejo/operación de sistemas y equipos), un mantenedor (experto en reparación y mantenimiento), un programador (visión sistémica de la actividad), un especialista (experto en área) y un facilitador (asesor metodológico), que en conjunto definen las funciones y el contexto operacional para optimizar la fiabilidad operacional estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos, considerando los posibles efectos y consecuencias de los modos de fallo en la seguridad, el ambiente y las operaciones.

1.5. BENEFICIOS DEL RCM

El mantenimiento centrado en confiabilidad no sólo tiene beneficios directos sobre las mantenciones de los equipos, si no que va mucho más allá, mejorando la disponibilidad, aumentando la seguridad, disminuyendo el daño ambiental, bajando los costos del plan matriz, aumentando la calidad del producto y la vida útil de los activos. A continuación, se detallan los beneficios más importantes:



1.5.1. Mayor seguridad e integridad ambiental

La metodología realiza una revisión sistemática de las implicancias de seguridad y ambiente de cada falla evidente, posicionando su importancia por encima de la operacional, involucrando operadores y mantenedores que se sensibilizan aún más con los riesgos reales asociados a los activos. Además, no se tolera la inacción frente a consecuencias que puedan afectar estos factores.

1.5.2. Mayor disponibilidad y confiabilidad de planta

El desempeño de la planta se mejora reduciendo la frecuencia y consecuencia de las fallas no esperadas que tengan impactos operacionales mediante la revisión sistemática de los efectos y consecuencias de cada modo de falla, definiendo con el equipo técnico la tarea más adecuada. Junto con esto, el énfasis puesto en las tareas a condición permite detectar el comienzo del estado de una avería antes de que este se concrete, además se tendrán los recursos con anticipación para las reparaciones eliminando tiempos de parada innecesarios.

1.5.3. Mayor costo-eficiencia

El mantenimiento centrado en confiabilidad destina la mayor parte de los recursos en las actividades de mantenimiento que realmente impactan en un mejor desempeño de la planta. De esta forma se reducen los trabajos de rutina recomendados por el fabricante y se implementan los trabajos de mantenimiento relacionados con el contexto operacional del proceso.

1.6. ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Las técnicas de análisis de criticidad son metodologías que permiten jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos.

Los equipos críticos se caracterizan por que pueden afectar la continuidad del proceso productivo, la calidad del producto, la seguridad de las personas y el cuidado del medioambiente. La forma de evaluar la criticidad es la multiplicación entre la frecuencia de evento o fallas



presentadas y la consecuencia que se mide mediante el análisis del impacto y flexibilidad operacional, costos de reparación e impactos en seguridad y ambiente.

Modelo de criticidad cuantitativo “CTR” (Criticidad total por riesgo):

Este proceso consiste en un análisis semicuantitativo, bastante sencillo y práctico. A continuación, se presentan de forma detallada, las expresiones utilizadas para jerarquizar los sistemas a partir del modelo CTR:

$$CTR = FF \times C$$

Donde, CTR: Criticidad total por riesgo.

FF: Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado [fallos/año]).

C: Consecuencias de los eventos de fallos.

Además, el valor de la consecuencia se obtiene de la siguiente forma:

$$C = (IO \times FO) + CM + SHA$$

Siendo, IO: Factor de impacto en la producción.

FO: Factor de flexibilidad operacional.

CM: Factor de costes de mantenimiento.

HSEC: Factor de impacto en salud, seguridad, medioambiente, comunidad.

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados se presentan a continuación:

Factor de frecuencia de fallos (FF) (escala 1 - 4)

4: Frecuentemente (mayor a 2 eventos al año).

3: Promedio (1 y 2 eventos al año).

2: Bueno (entre 0,5 y 1 evento al año).

1: Excelente (menos de 0,5 eventos al año).



Factores de consecuencias

Impacto operacional (IO) (Escala 1- 10)

- 10: Pérdidas de producción superiores al 75%.
- 7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%.
- 5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%.
- 3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%.
- 1: Pérdidas de producción menor al 10%.

Impacto por flexibilidad operacional (FO) (escala 1 – 4)

- 4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.
- 2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.
- 1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

Impacto en costes de mantenimiento (CM) (escala 1 – 2)

- 2: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares.
- 1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares.

Impacto HSEC (escala 1 – 8)

- 8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos.
- 6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración.
- 3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.

1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.

Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo o sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4 x 5 representada en la figura N°6. El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal.

Área sistemas no críticos (NC).

Área sistemas de media criticidad (MC).

Área de sistemas críticos (C).

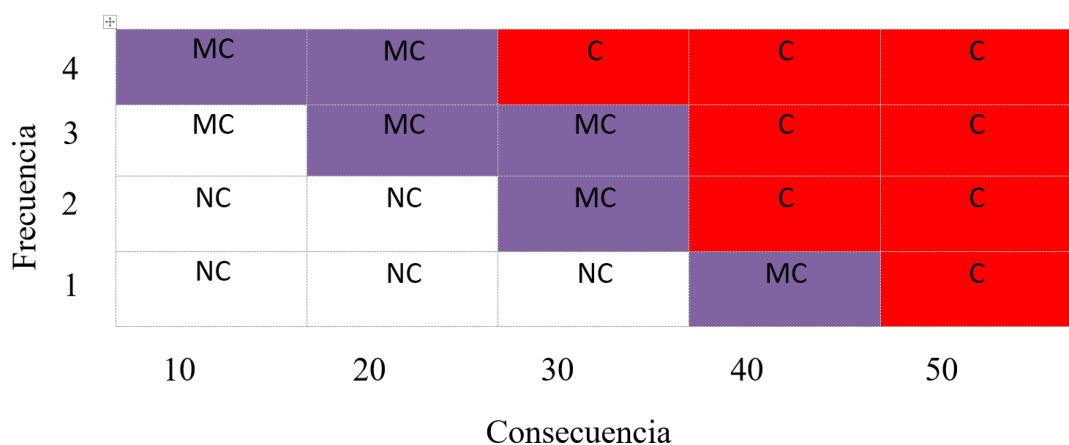


Figura 6 Matriz de criticidad (fuente: Ing. de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Parra & Crespo, 2015).

2. CONTEXTO

Codelco es una empresa perteneciente al estado de Chile que se dedica a la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros, el producto final obtenido se comercializa a clientes en todo el mundo. Dentro de sus productos se encuentran los ánodos, el concentrado de cobre y subproductos como el molibdeno y el ácido sulfúrico.

Codelco división El Teniente se encuentra ubicada en la VI región del libertador Bernardo O'Higgins, en la comuna de Machalí, donde coexisten sus operaciones de extracción, concentración y refinación. Por otro lado, se encuentran oficinas en el centro de la comuna de Rancagua donde se concentra la gerencia general, oficinas legales, centros de capacitación, y otras oficinas administrativas.

Actualmente la producción anual de El Teniente bordea las 464.000 toneladas métricas de cobre fino, con 4.535 trabajadores pertenecientes a la empresa. La División es actualmente la faena con mayor producción dentro de Codelco, y con los costos de producción más bajos de la corporación.

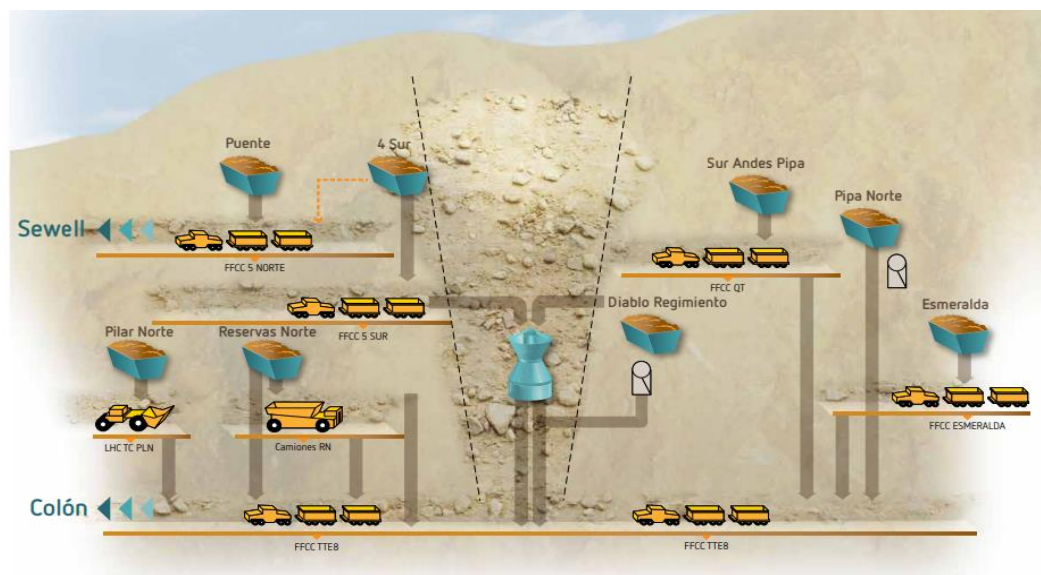


Figura 7 Diagrama de flujo de la actividad de extracción, mina subterránea (fuente: Codelco).

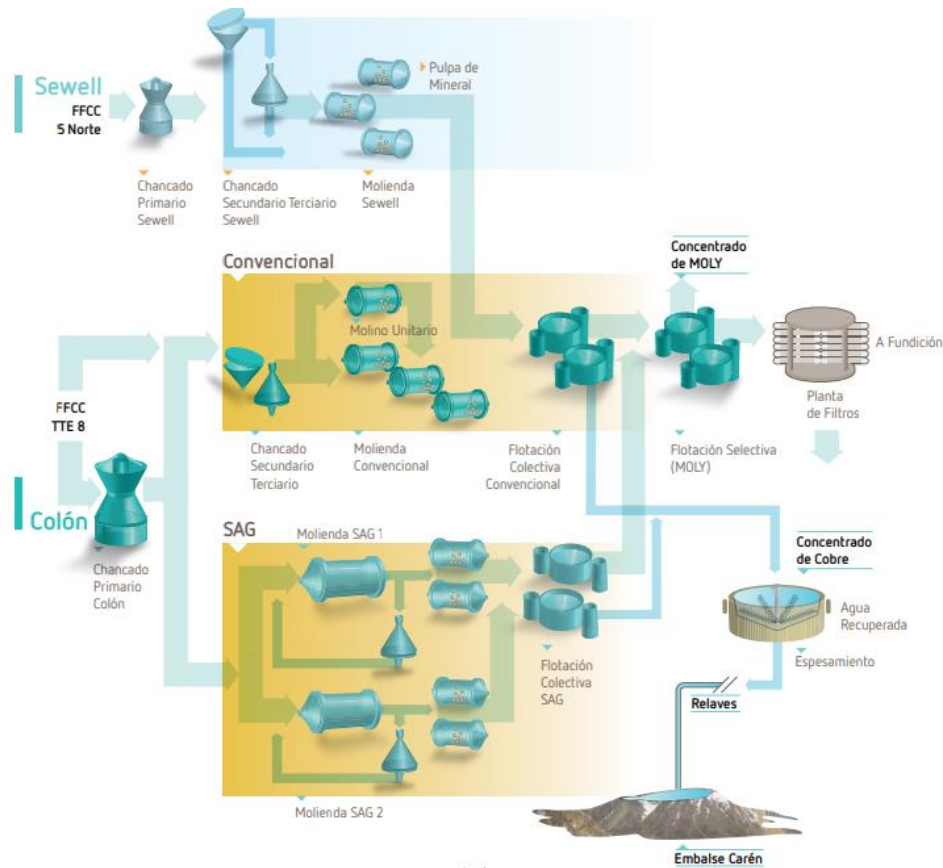


Figura 8 Diagrama de flujo de la planta concentradora (fuente: Codelco).

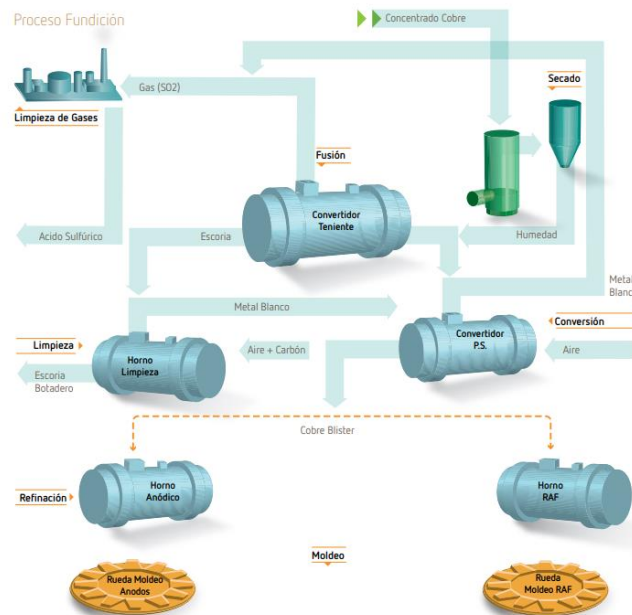


Figura 9 Diagrama de flujo de la fundición Caletones (fuente: Codelco).

2.1. IMPACTO DEL PRECIO Y EL COSTO DEL COBRE EN LA INDUSTRIA

El contexto internacional que gobierna los precios del cobre ha sido bastante complejo, durante el año 2011 el precio se elevaba a los 4,625 US\$/lb y junto con esto los costos de producción también se elevaron, esto conllevó a una crisis interna cuando el precio bajó llegando a los 2,2 US\$/lb, cercano a igualar el costo de producción. Actualmente el precio se ha recuperado llegando a los 2,85 US\$/lb pero con gran variabilidad y con tendencia a la baja. En base a lo anterior Codelco ha implementado proyectos estructurales apuntando a la reducción de costos y a la sustentabilidad del negocio creando una vicepresidencia de productividad y costos durante el año 2016.



Gráfico 1 Variación del precio del cobre. (Fuente: Cochilco).

En esta línea la gestión de la mantención comienza a cumplir un rol fundamental con impacto directo en los costos globales de producción y asegurando la disponibilidad que impacta directamente en el EBITDA de la compañía.

Uno de los proyectos liderados por la vicepresidencia de productividad y costos, es la potencialización de las plantas de molibdeno presentes en las distintas divisiones debido al término común en la industria del cobre para realizar comparaciones de la posición competitiva de las distintas faenas, este término corresponde al net direct cash cost o C1. En términos prácticos, el concepto de costo C1 agrupa los costos incurridos a través de todo el proceso minero hasta la venta

del producto comercializable (cátodo en el caso del cobre), descontando los ingresos provenientes de los subproductos en caso de que existan. La situación anterior permite que en algunos casos el indicador C1 sea negativo.

El caso del costo C2 (production cost) corresponde al mismo costo C1, pero agregando los montos dados por depreciación, amortización o agotamiento del recurso en los casos que corresponda. En este caso, la incorporación de las variables previamente mencionadas permite tener una noción del costo operacional, que a diferencia del C1 tiene una visión de sustentabilidad del negocio en un mediano plazo. Finalmente, el denominado costo C3 (fully allocated cost) incluye, además, costos indirectos, gastos, cargos financieros netos.

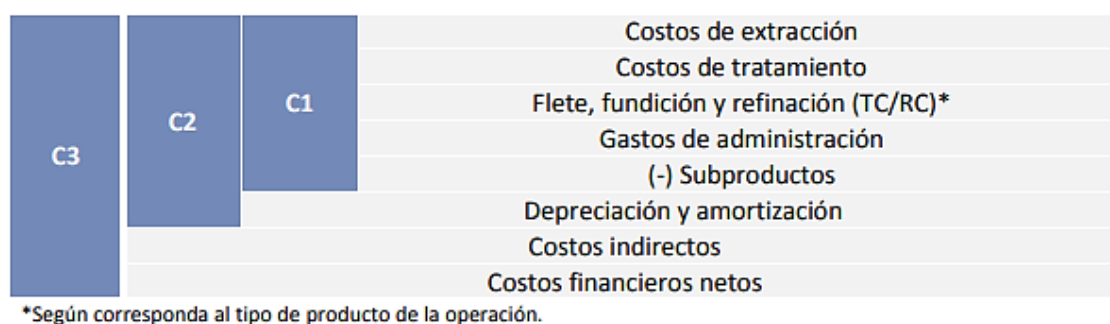


Figura 10 Desglose costos C1, C2 y C3. (Fuente: WoodMackencie).

En el mercado del molibdeno Codelco es el segundo productor mundial. En la división El Teniente esta producción le ha permitido disminuir en un 10% el costo C1 según sus estados financieros.

Producción de cobre y molibdeno 2016-2017				
(toneladas métricas finas)	Cobre		Molibdeno	
	2017	2016	2017	2016
Chuquicamata	330.910	302.010	15.518	17.392
Radomiro Tomic	318.878	318.255	1.739	1.770
Gabriela Mistral	122.737	121.712	-	-
Ministro Hales	215.086	237.020	-	-
Salvador	61.942	59.796	854	902
Andina	220.030	193.341	4.365	3.894
El Teniente	464.328	475.339	6.199	6.683
Codelco	1.733.911	1.707.474	28.674	30.641
El Abra	38.417	48.957	-	-
Anglo American Sur	69.746	70.836	-	-
Total	1.842.075	1.827.267	28.674	30.641

Figura 11 Producción de cobre y molibdeno en los años 2016 y 2017. (Fuente: Codelco).

El precio del molibdeno ha ido en aumento desde el 2016 lo que ha provocado una disminución considerable en los costos de producción para las mineras que contienen dentro de sus líneas de negocio al molibdeno como subproducto. Es por esto que la planta de molibdeno en Teniente se ha tomado una importancia mayor dentro de sus políticas de reducción de costos.

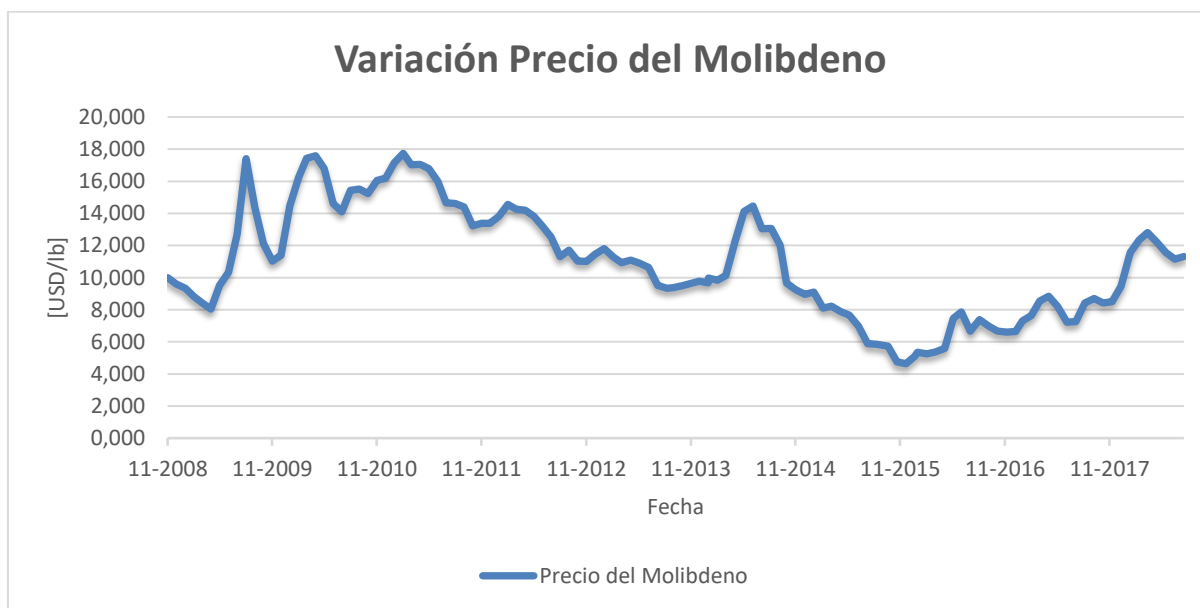


Gráfico 2 Evolución del costo del molibdeno. (Fuente: Cochilco).

2.2. MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN CODELCO

Soma o sistema operativo de mantenimiento, son un conjunto de estándares y procesos que apuntan a optimizar la gestión de los activos. Su objetivo es generar valor a Codelco a través de los activos, asegurando el cumplimiento de estrategias de mantenimiento que optimicen su rendimiento. El modelo de gestión del mantenimiento se aprecia en la figura N°12:

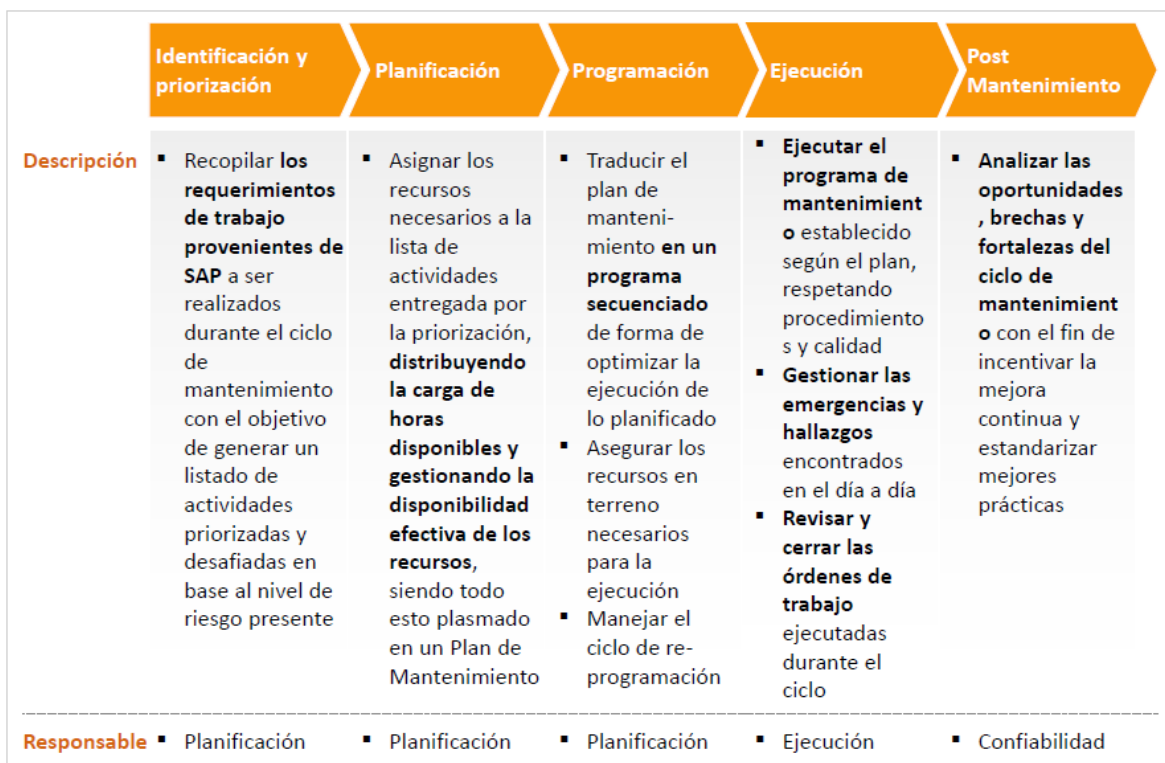


Figura 12 Modelo de gestión del mantenimiento de Codelco (fuente: Codelco).

La gestión del mantenimiento se ve englobada por 3 áreas importantes

- **Confiabilidad:** optimizar el ciclo de vida del activo, asegurando la capacidad adecuada para cumplir con las funciones para las que fue diseñado bajo el contexto operacional en el que está inmerso.
- **Planificación:** generar y habilitar planes de mantenimiento basados en estrategias seleccionadas, maximizando la continuidad operacional y utilizando de forma eficiente el tiempo de trabajo, los recursos y materiales. Además, elaborar programas que permitan mantener el equipo en un nivel que responda al desempeño para el cual fue diseñado.



- Ejecución: llevar acabo de forma eficaz y eficiente las actividades del programa de mantenimiento, respetando tiempos y recursos, además de gestionar junto a confiabilidad las actividades no planificadas que vayan surgiendo en el camino.

2.2.1. Sistema SAP PM:

Toda la información relacionada al mantenimiento, como el plan matriz, las pautas, los recursos, las órdenes de trabajo y los materiales se encuentran en el sistema informático SAP dentro del módulo PM. Este módulo permite crear avisos sobre alguna condición que se convierten en órdenes de trabajo dónde se cargan todos los recursos y se planifica la actividad.

2.2.1.1. Tipos de Avisos

- M1: Solicitud de Mantención. Estos avisos se utilizan para registrar actividades como montajes, mantenciones, servicios de ingeniería.
- M2: Aviso de Avería. Interrupción imprevista del proceso o en el funcionamiento de un equipo.
- M3: Aviso de Actividad. Avisos que documentan mantención preventiva y/o actividades detectadas predictivamente

2.2.1.2. Clase de Ordenes

- Mantenimiento no planificado (NP): Fallas producidas de manera imprevista y que afectan el normal funcionamiento de un equipo. Se subdivide en: o *Emergencia*: Fallas en equipos o instalaciones que afectan la producción, seguridad y/o medioambiente. Este tipo de órdenes se deben concretar lo más rápido posible.
 - a) *Correctivo no planificado*: Fallas que sin ser una emergencia propiamente tal, se corrigen sin pasar por un proceso planificado de programación. En esta categoría se incluyen reparaciones producto de algún hallazgo por parte del mantenimiento predictivo
- Mantenimiento Planificado (PL): Como su nombre lo indica se refiere a los trabajos que han sido planificados con anterioridad. Se subdivide en: o *Preventivo Sistemático*: Se refiere a recursos asociados a acciones de mantenimiento provenientes del plan matriz.
 - a) *Preventivo Predictivo*: Registro de recursos asociados a prevenir detenciones en base a condiciones medibles.
 - b) *Correctivo Planificado*: Incluye fallas derivadas de inspecciones previas.

- Modificación (MO): Ordenes referidas en tareas de modificación, previo estudio y análisis, asegurando su mejor funcionamiento.
- Servicios de Ingeniería de Mantenimiento (SI): Trabajo solicitado a ingeniería de mantenimiento, este puede ser en dos modalidades diferentes.
 - a) *Diagnóstico*: Cuando corresponden a acciones cuyo fin es diagnosticar el estado de algún equipo.
 - b) *Estudios*: Estudios o investigaciones para realizar alguna mejora.
- Servicio de Talleres: Este divide en cuatro categorías.
 - a) *Fabricación*: Requerimiento de fabricación de componente.
 - b) *Reparación*: Requerimiento de reparación de componente.
 - c) *Modificación*: Requerimiento de modificación de componente.
 - d) *Montaje*: Requerimiento de montaje de componente o repuesto.
- Servicio a Terceros: El requerimiento que es ejecutado por servicio a terceros.

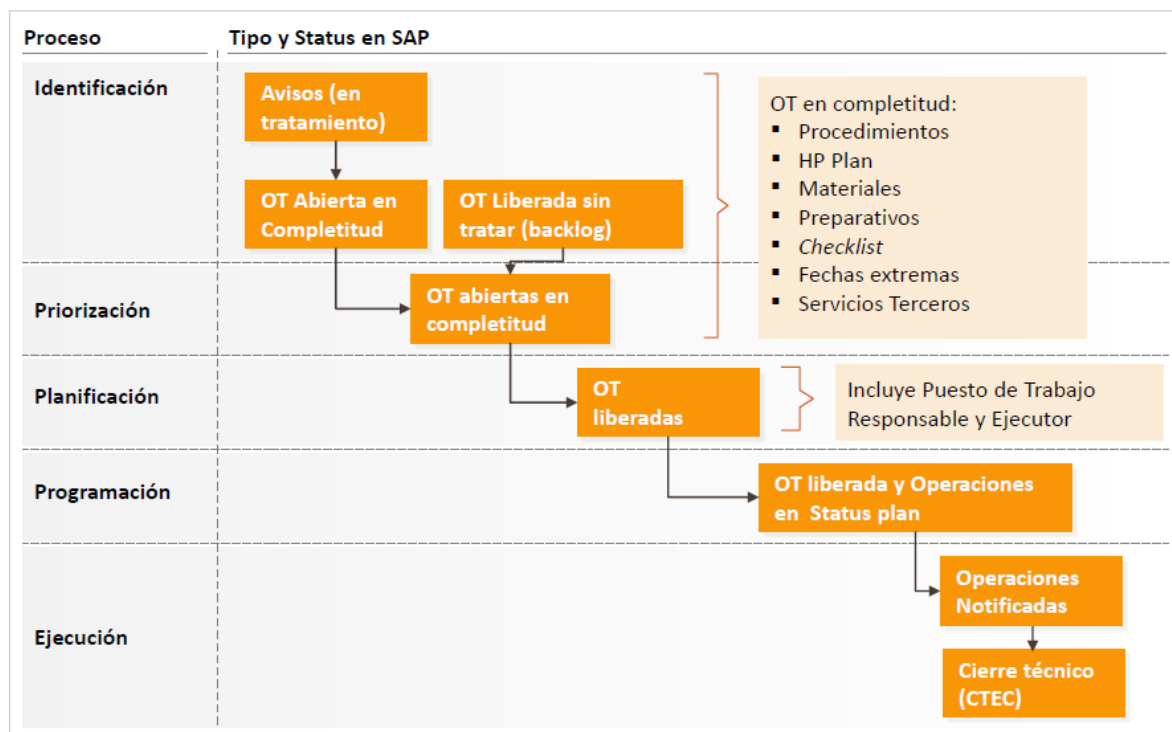


Figura 13 Tratamiento de avisos en SAP PM (fuente: Codelco).

2.3. DESCRIPCIÓN PLANTA CONCENTRADORA CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE

Dentro de la gerencia plantas existen 3 procesos enfocados a la concentración de cobre, los cuales se describen a continuación:

- Proceso SAG: se compone por las plantas SAG 1, SAG 2 y flotación colectiva, este proceso posee una capacidad de 90.000 toneladas por día, con una ley de cobre de 0,8% y una ley de molibdeno de 0,005%.
- Proceso convencional: se compone por las plantas de chancado secundario, chancado terciario, molienda convencional, y flotación convencional (colectiva), este proceso posee una capacidad de 60.000 toneladas por día con una ley de cobre de 0,8% y una ley de molibdeno de 0,005%.
- Proceso molibdeno: se compone de sucesivas etapas de flotación selectiva y espesamiento, en este proceso se separa el molibdeno del cobre y se obtiene el producto final de concentrado de molibdeno. Esta planta posee una capacidad de 4.500 toneladas por día con una ley de cobre de 29% y una ley de molibdeno de 0,5%.

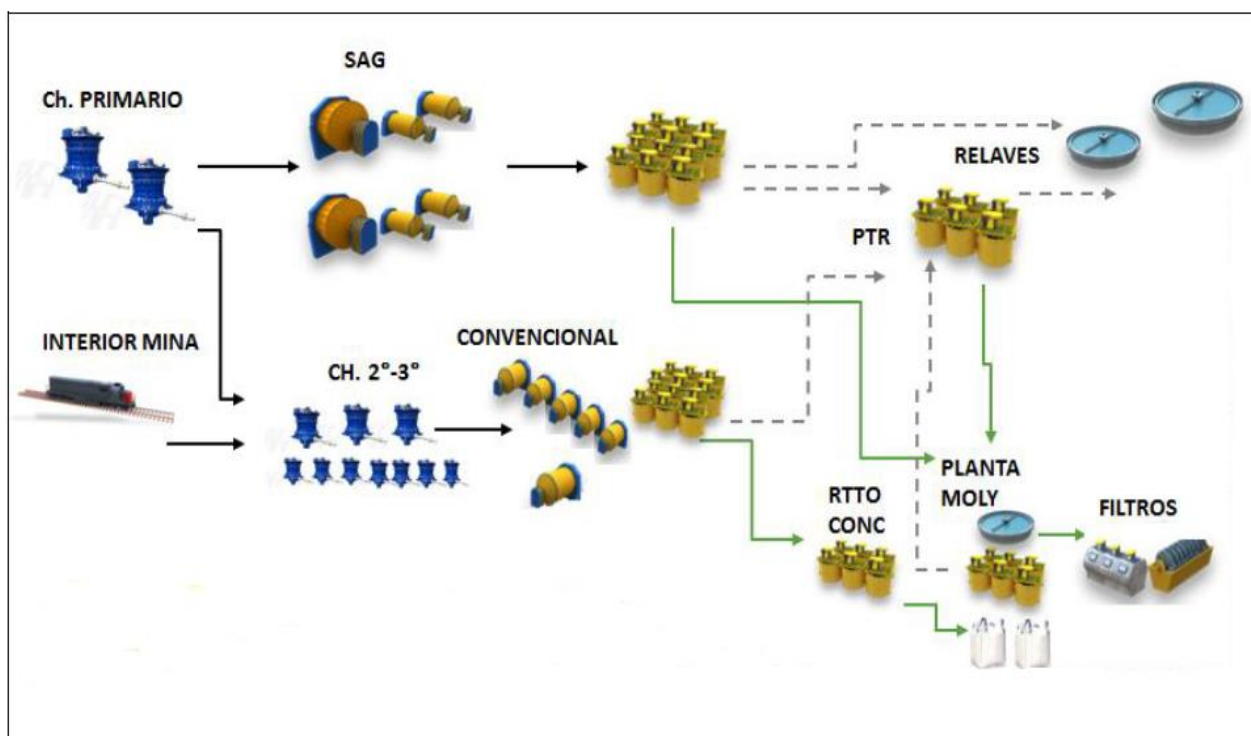


Figura 14 Diagrama de flujo planta concentradora Codelco división El Teniente (fuente: Codelco).



Además, destaca la planta de retratamiento y recuperación de agua donde un porcentaje importante del agua utilizada en los procesos es reutilizado.

A continuación, se describen en detalle las plantas presentes en los 3 procesos principales dentro de la gerencia plantas.

2.3.1. Proceso convencional

2.3.1.1. Planta Chancado 2° y 3°

El objetivo del Chancado es reducir el tamaño de los fragmentos mayores hasta obtener una distribución granulométrica adecuada a la etapa siguiente. Para lograr la distribución de tamaño deseado se utiliza la combinación de dos etapas en línea, denominada Chancado Secundario y Chancado Terciario, el primero con tres Chancadores y el segundo con ocho que permiten reducir el tamaño del mineral recepcionado a una granulometría conveniente a la etapa de Molienda. En el chancado secundario el mineral es reducido hasta obtener una granulometría menor a 2,5", esto según los requerimientos del chancado terciario. En el chancado terciario el mineral es reducido hasta alcanzar una granulometría menor a 9 mm.

2.3.1.2. Planta Molienda convencional

El proceso molienda convencional tiene como propósito efectuar las operaciones de molienda del mineral procedente del chancado secundario y terciario, para obtener una pulpa de calidad y ser enviado a la planta de flotación. Existen 12 molinos de bolas de igual tamaño y un molino unitario de mayor capacidad. Al mineral que ingresa al molino se le adiciona agua, reactivos y cal, esta última se dosifica según el pH de la mezcla. La reducción del tamaño se genera por fricción e impacto de las bolas con el mineral, la pulpa resultante se almacena en el cajón de descarga desde donde es bombeada a la batería de ciclones. En los ciclones se produce la clasificación por tamaño de la partícula, si la pulpa cumple con el tamaño de la partícula, será directamente enviada al proceso de flotación (en este punto se agrega reactivo espumante) y la pulpa que no cumple con los requerimientos es reprocesada en los molinos.

2.3.1.3. Planta Flotación convencional

La pulpa proveniente de la molienda convencional es procesada en las celdas de flotación colectiva en dos etapas, original (Rougher) y primera limpieza. El concentrado producido en esta



etapa se envía a una segunda limpieza y el material de descarte se envía como relave a la planta de PTR. La obtención de concentrado colectivo (Cu y Mo) es enviado al espesador P-4 de la planta de molibdenita.

Para el aseguramiento de la calidad en la granulometría del concentrado existen dos molinos de bolas y dos hidrociclones, después de la primera limpieza la pulpa es enviada a los hidrociclones desde donde el mineral que cumple es enviado a una segunda limpieza y el resto es enviado a la remolienda, seguido de esto lo que no cumple después de las etapas de barrido se va a la planta de PTR. La flotación de barrido son columnas de alta ley por lo tanto antes de ser descartadas es necesario que sean tratadas con circuitos agotadores y a estos se les denomina barrido.

2.3.2. Proceso SAG

2.3.2.1. Planta SAG

Existen dos molinos SAG en la planta, cada uno acompañado por 2 molinos de bolas convencionales. El molino SAG descarga pulpa (mezcla mineral agua) sobre un harnero vibratorio, el cual separa el fino que va a la cuba del molino y el grueso (pebble) que va hacia las correas transportadoras. La pulpa es impulsada hacia las baterías de hidrociclones para su clasificación, el mineral que no cumple es reprocesado en los molinos de bolas.

En el caso del pebble, éste es transportado después de harneros hacia planta centralizada de pebbles.

2.3.2.2. Planta Chancado Pebble

En esta etapa el producto del harnero del SAG (sobre tamaño) es sometido al proceso de reducción de tamaño por chancadores de cono. La planta de chancado pebbles tiene como objetivo procesar la totalidad de los pebbles generados de los molinos SAG1 y SAG2.

El producto fino de los harneros tipo “banana” es retornado a la molienda, mientras que el grueso es recirculado mediante correas transportadoras hacia los chancadores (circuito cerrado).

2.3.2.3. Planta Flotación colectiva

La pulpa proveniente de las plantas de molienda SAG, es alimentada a un cajón muestreador-distribuidor, que alimenta la etapa de flotación primaria. Los concentrados de la planta de flotación primaria son enviados a un cajón repartidor el cual alimenta 3 bombas de impulsión, estas a su vez



alimentan a los hidrociclones donde cada uno de ellos alimenta con su descarga a los molinos verticales (vertimill). El rebalse de los hidrociclones pasa a la flotación de limpieza con sus 4 celdas columnares, y la descarga (grueso) alimenta los 3 molinos verticales.

Después de la etapa de remolienda, el concentrado (proveniente de la flotación primaria y de barrido) es transportado a las 4 celdas columnares para favorecer la ley de concentrado (Cu y Mo), en donde el concentrado final es enviado al espesador de concentrado P4.

2.3.3. Proceso planta molibdeno

La pulpa de los procesos SAG y Convencional es alimentada a la planta, a través de los espesadores P-1 y P-4, donde se opera de modo de entregar una pulpa con un porcentaje de sólidos entre 45% a 52% hacia la etapa posterior de acondicionamiento, donde se agrega el reactivo colector de molibdenita.

Homogeneizada la mezcla, ésta ingresa a la flotación selectiva cuya función es separar el cobre del molibdeno mediante sucesivas etapas de limpieza, siendo su entrada al proceso en el circuito Rougher y su salida en la quinta Limpieza.

El cobre eliminado por las etapas de flotación es enviado al espesador P-5 para aumentar el porcentaje de sólido en el concentrado y luego ser despachado a la fundición.

El concentrado de quinta limpieza es almacenado en el espesador P-8, cuya función es eliminar parte del agua y enviar un concentrado con un porcentaje de sólido mayor o igual a 35% a la etapa de lixiviación.

El Concentrado es enviado a los estanques de lixiviación para bajar el contenido de Fósforo a niveles inferiores o iguales de **0,04%**. Lo obtenido de esta etapa, es filtrado en un filtro marca Andritz de placas verticales donde se obtiene un queque de 15% de humedad (sulfuro de Mo), el cual es envasado, caracterizado y despachado para su posterior comercialización.



2.4. CÁLCULO INDICADORES DE MANTENIMIENTO PARA LOS PROCESOS

Para contextualizar el estado actual de los procesos en base al mantenimiento, existen 3 indicadores importantes que son la disponibilidad, la mantenibilidad y el tiempo medio entre fallas, con los cuales se determinará donde enfocar el modelo de mantenimiento basado en confiabilidad. La forma de cálculo de estos indicadores se explica en la tabla N°3 y sus resultados en la tabla N°4.

Tabla 3 Fórmulas para el cálculo de los indicadores.

Indicador	Forma de cálculo	Fuentes de información
Confiabilidad	$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo entre fallas}_i}{n}$	Avisos SAP PM (transacción IW29)
Mantenibilidad	$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo de reparación}_i}{n}$	Avisos SAP PM (transacción IW29)
Disponibilidad	$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	SAP PM

Fuente: El Arte de Mantener, Pascual, 2005.

Tabla 4 Resultado indicadores de mantenimiento por proceso.

INDICADORES MANTENIMIENTO PERIODO ENERO 2015 HASTA AGOSTO 2018							
Proceso	Denominación	N° de Detenciones por Falla	Sumatoria Tiempo de reparación	Sumatoria Tiempo entre fallas	MTTR [hr]	MTBF [hr]	Disponibilidad [-]
Proceso Convencional	Flotación Convencional	37	267				
	Molino Unitario	12	163				
	Molienda Convencional	75	1218				
	Planta Finos	49	435	30.736	10,06	197,03	0,95
	Planta Harneado	31	146				
	Chancado Secundario	145	1508				
	Chancado Terciario	172	1756				
Proceso SAG	Flotación SAG	1	9				
	Molienda SAG I y II	75	1029	31.000	13,66	407,92	0,96
Proceso molibdeno	Molibdenita	183	1498	30.541	8,19	166,89	0,95

Fuente: SAP PM, módulo de avisos (IW29).

El proceso SAG tiene la mayor disponibilidad, junto con un alto tiempo medio entre fallas, esto se produce debido a sus molinos semi-autógenos minimizan la interacción metal-metal y por lo tanto sus probabilidades de falla son menores, además existe una gran cantidad de recursos entregados a los circuitos de los molinos SAG por su alta criticidad con respecto a la producción, ya que en sólo dos molinos se concentra el 50% del procesamiento del mineral. En el proceso Convencional se aprecia una disponibilidad de un punto menor provocada su menor tiempo medio entre fallas, esto es debido a que existen 13 molinos convencionales con interacción metal-metal que aumenta su probabilidad de falla, además los recursos empleados en este proceso son menores ya que la falla de un molino no impacta de sobremanera en la producción, aunque también el



proceso representa el 50% del procesamiento del mineral. El proceso de molibdeno tiene el MTBF más bajo debido a la gran cantidad de fallas ocurridas en el periodo analizado, cabe destacar que es el proceso responsable de recepcionar todo el concentrado Cu-Mo de los procesos SAG y Covencional, por lo que es la planta con mayor riesgo y menor confiabilidad donde existen claras oportunidades de mejora.

Para visualizar de mejor manera cuál es el proceso que genera un mayor impacto en los costos por indisponibilidad, evaluaremos la penalización anual por falla que se define de la siguiente manera:

$$\text{Penalización anual por falla} = MTTR [hr] * IP \left[\frac{USD\$}{hr} \right] * FF \left[\frac{\text{Fallas}}{\text{año}} \right]$$

- MTTR: tiempo medio entre fallas.
- IP: impacto en la producción por hora.
- FF: frecuencia de fallos.

El valor de MTTR y FF se encuentran dados en la tabla anterior, los cuales fueron extraídos desde SAP PM, para calcular el impacto en la producción se requieren los datos de producción de la planta, la ley de cobre y molibdeno, junto con el precio actual internacional de cada uno.

$$IP = LPH * Ley\ cobre * precio\ cobre + LPH * Ley\ molibdeno * Precio\ molibdeno$$

- LPH: libras por hora. (Se calcula convirtiendo las toneladas por día a libras y dividiendo por las 24 horas del día)
- Ley cobre: corresponde al porcentaje de cobre contenido en una determinada muestra.



- Ley molibdeno: corresponde al porcentaje de molibdeno contenido en una determinada muestra.

Tabla 5 Cálculo del impacto en la producción por proceso. (Fuente precios metales: Cochilco).

Proceso	TPD	Ley Cu	Ley Mo	Precio cobre [USD/lb]	Impacto en la producción [USD\$/hr]
SAG	90.000	0,8%	0,005%	\$ 2,77	\$ 188.160,18
Convencional	60.000	0,8%	0,005%	Precio Molibdeno [USD/lb]	\$ 125.440,12
Molibdeno	4.500	29%	0,5%	\$ 11,99	\$ 356.838,42

Fuente precios metales: Cochilco.

Tabla 6 Cálculo de la penalización anual por falla.

Proceso	MTTR [hr]	Impacto Producción [USD\$/hr]	Frecuencia de Fallas [fallas/año]	Penalización anual por fallo [USD\$]
SAG	13,66	\$ 188.160,18	19	\$ 48.835.093
Convencional	10,06	\$ 125.440,12	43	\$ 54.262.888
Molibdeno	8,19	\$ 356.838,42	51	\$ 149.047.837

Fuente: Elaboración propia.

Con esta evaluación de costos se observa el proceso de molibdeno obtiene el mayor costo de penalización por fallo, esto se explica debido a que este proceso recibe la totalidad del mineral de la faena. Para evaluar el riesgo, se plasma el resultado en un gráfico de Pareto.

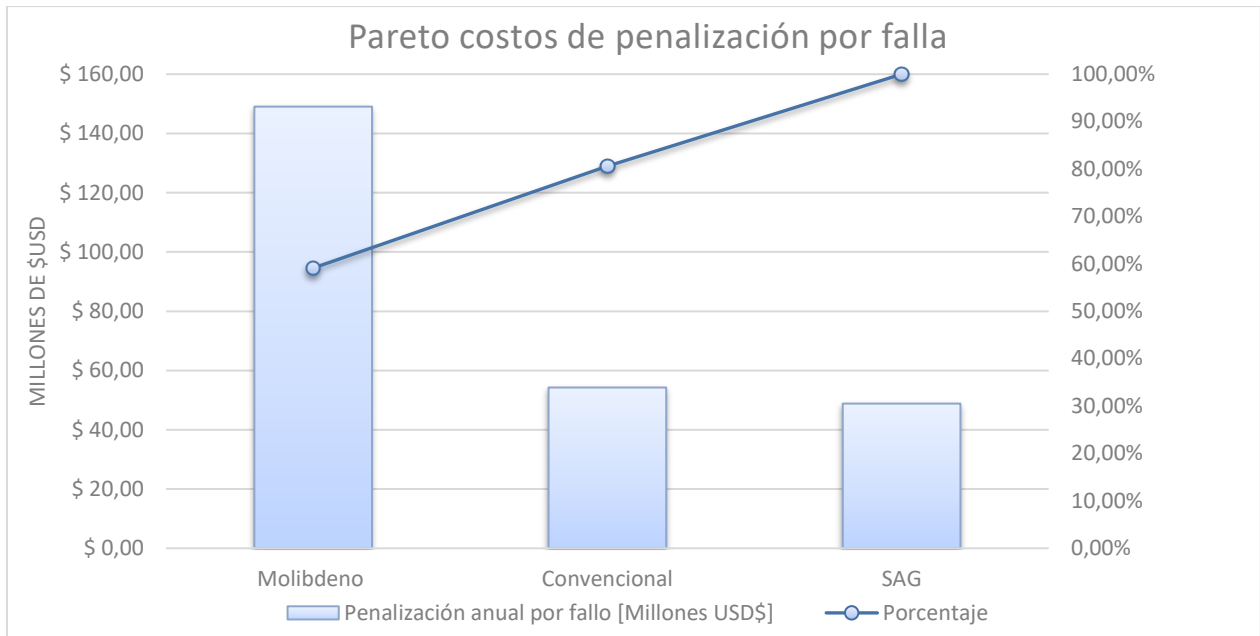


Gráfico 3 Pareto de costos de penalización para los procesos de la planta concentradora (fuente: elaboración propia).

Como se observa en el gráfico N°3 la planta de molibdeno representa el 60% del riesgo total de la planta concentradora, esto en base a los indicadores actuales que posee el proceso.

Se debe aclarar que el hecho de que el proceso molibdeno posea la mayor pérdida por ineficiencia, no implica que los procesos SAG o Convencional sean menos críticos, es más se depende de ellas para obtener producción en el proceso molibdeno, pero el contexto actual debido a fallas presentes, baja disponibilidad y la políticas implementadas de reducción de costos, provoca que el proceso molibdeno sea el de mayor importancia, y por lo tanto los recursos deben enfocarse a la mejora y aseguramiento de sus sistemas.

3. CONTEXTO PLANTA DE MOLIBDENO

Para contextualizar el proceso se utilizará una herramienta gráfica denominada EFS por sus siglas que significan Entrada – Función – Salida (EFS). Identificando estas variables se podrá comprender con mayor claridad el propósito, la descripción de los sistemas y las variables más importantes del proceso.

Tabla 7 Diagrama EFS planta molibdeno.

Entrada	Función	Salida
➤ Concentrado Cu-Mo.	• Recuperar agua del proceso.	➤ Concentrado de
➤ Kerosene (Colector Mo).	• Maximizar recuperación de Mo.	molibdeno.
➤ T10FOS 80-20 y NASH (Depresante Cu).	• Minimizar presencia de Mo en relave.	➤ Concentrado de cobre.
➤ Aire-Nitrógeno.	• Acondicionar pulpa eliminando reactivos de flotación colectiva.	➤ Agua clara.
➤ CO ₂ .	• Mezclar kerosene para colectar Mo y T10FOS 80-20 y NASH para depresar Cu.	➤ Relave.
➤ Carbón activado.		➤ Basura industrial.
➤ Floculante.		
➤ Lechada de cal	• Separar Cu de Mo mediante sucesivas etapas de limpieza.	
➤ Ácido sulfúrico.		
➤ Agua.	• Lixiviar la pulpa para eliminar fósforo con un pH de 1,5 a 1,7, obteniendo un concentrado con una cantidad de fósforo menor al 0,04%.	
➤ Energía eléctrica.		
➤ Maxisacos.		
➤ Tarjetas de identificación.		
➤ Mantenimientos.	• Eliminar humedad de pulpa hasta obtener un 15% de humedad relativa.	
➤ Repuestos.	• Separar agua de sólidos.	

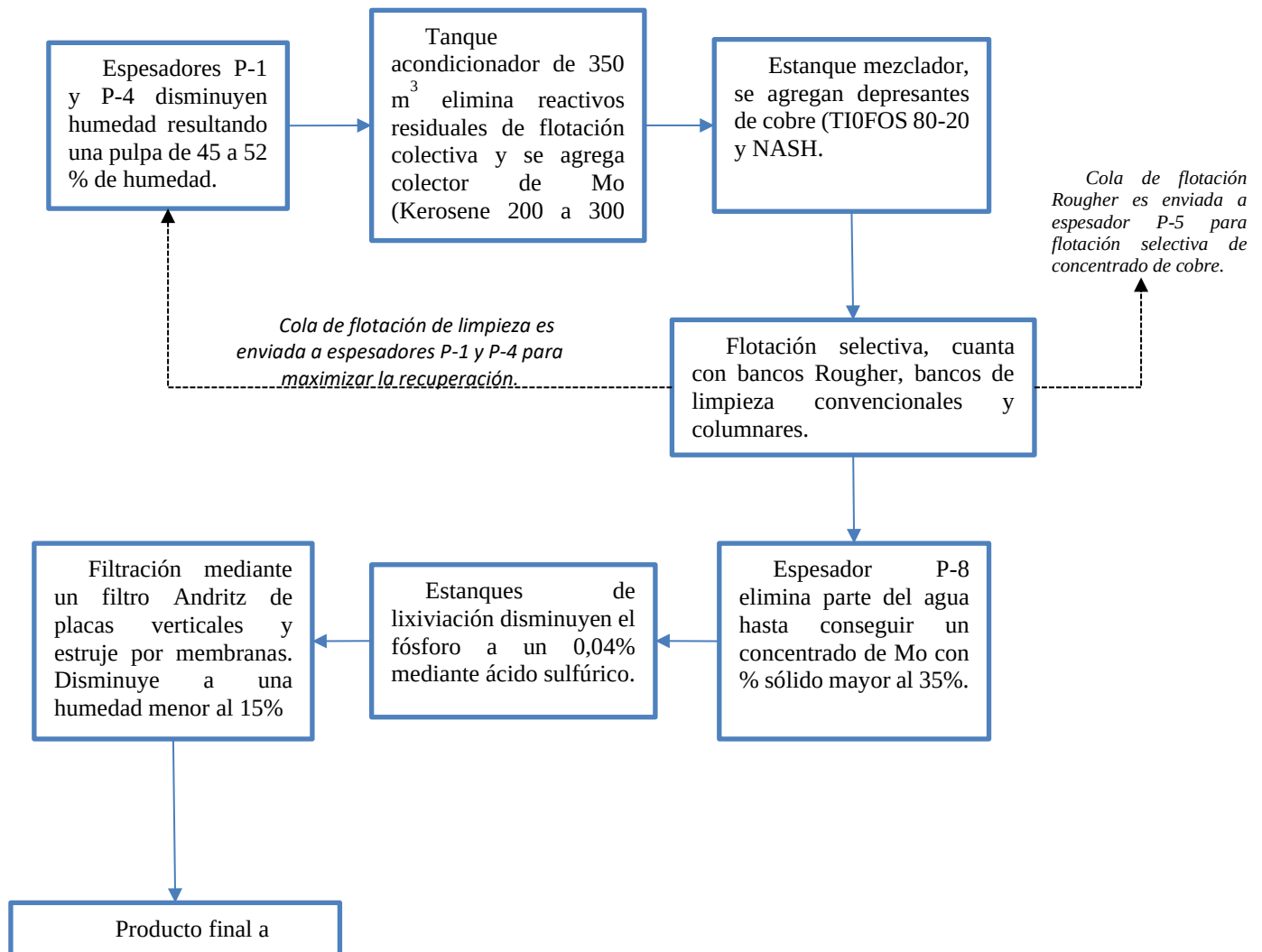
. Fuente: Control operacional planta Moly Codelco Teniente.



Según el diagrama EFS descrito en la tabla N°7, se puede obtener el mapa descriptivo donde se involucran los siguientes procesos:

- Espesamiento
- Acondicionamiento
- Flotación
 - Circuito Rougher
 - Circuito 1^{era} Limpieza
 - Circuito 2^{da} limpieza
 - Flotación Columnas tercera limpieza
 - Circuito 4^{ta} limpieza
 - Circuito 5^{ta} limpieza (convencional contra corriente)
- Lixiviación de Concentrado
- Filtrado
- Envasado, Identificación y Despacho de Concentrado de Molibdeno

Todos estos procesos son necesarios para resguardar el medioambiente eliminando el molibdeno de los relaves, separar el cobre del molibdeno y obtener concentrado de molibdenita como producto final como aspectos de mayor importancia. A continuación, se describe el mapa descriptivo forma secuencial:



Con el diagrama EFS y el mapa descriptivo del proceso se puede realizar el diagrama de flujo del proceso de molibdeno, pero antes se deben considerar los siguientes equipos presentes en la planta:

- Celdas de flotación de 355 pie³.
- Celdas de flotación de 175 pie³.
- Celdas de flotación de 100 pie³.
- Celdas de flotación de 50 pie³.
- Celdas columnas de 72" x 72" x 12 m.
- Espesadores de proceso de diversos tamaños.
- Filtro de Placa.



- Bombas de impulsión de pulpa.
- Bombas de recirculación de Concentrado.
- Bombas de pozo.
- Conjuntos Sensores/Transmisores de nivel.
- Flujómetros y densímetros.
- Sistema de suministro eléctrico.
- Red de suministro de aire comprimido.
- Red de gas de celdas de flotación (aire o nitrógeno).
- Red de aire de instrumentación.
- Válvulas.
- Motores eléctricos.
- Sistemas de transmisión.
- Sistema de dosificación de Reactivos.

El diagrama de flujo que de los equipos antes mencionados se detallan en la figura N°15 y el significado de los símbolos se detalla en la tabla N°8:

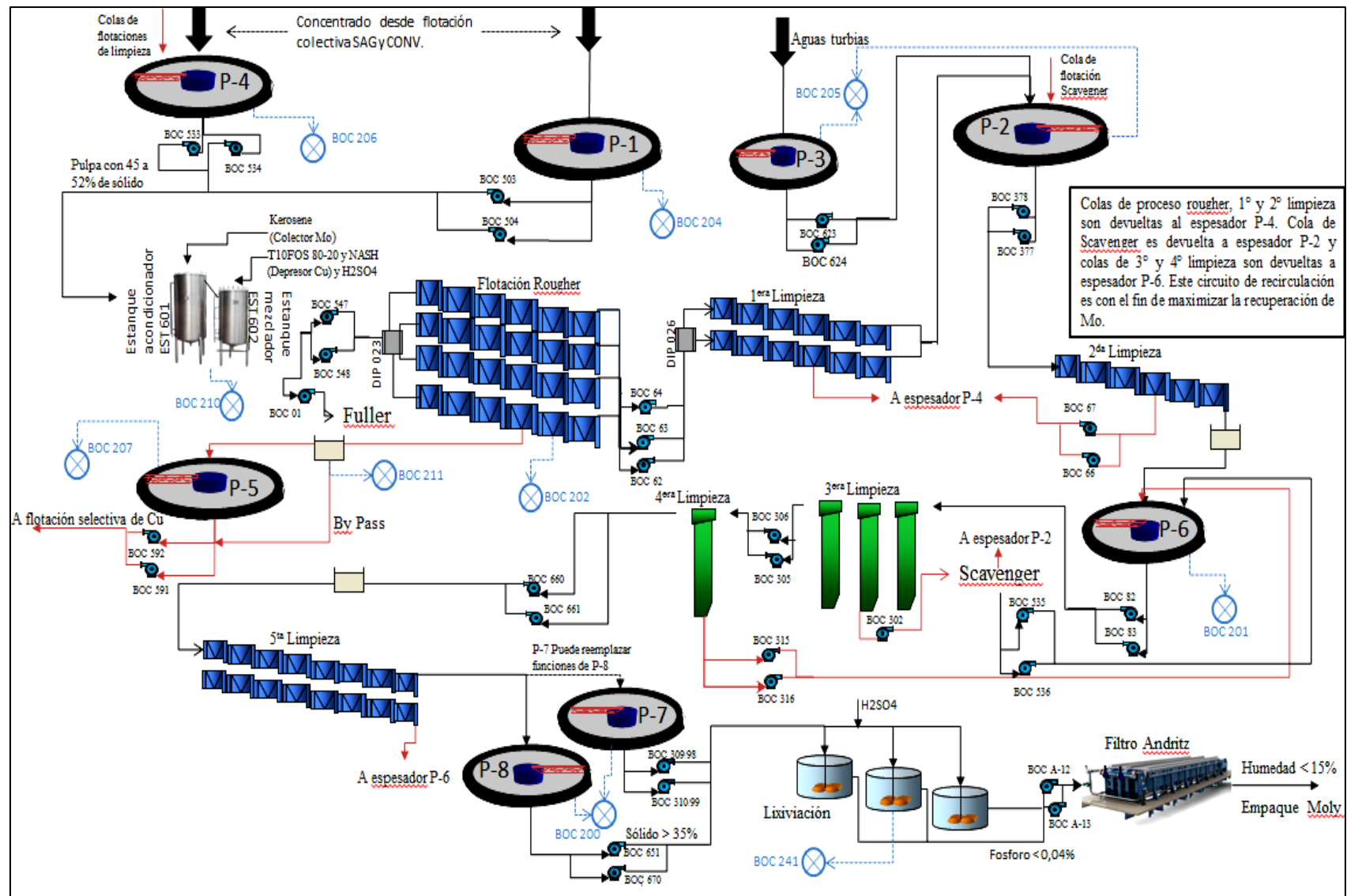


Figura 15 Diagrama de flujo proceso de molibdeno (fuente: elaboración propia).

Tabla 8 Símbolos diagrama de flujo planta molibdeno.

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
	Línea de proceso		Bomba Centrífuga
	Línea de colas		Columna de flotación
	Repartidor de carga		Celda de flotación
	Cajón		Espesador
	Bomba de pozo		

Fuente: Elaboración propia.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS PRESENTES EN LA PLANTA

3.1.1. Espesamiento

Los espesadores P-4 y P-1 tienen la función de concentrar sólidos en suspensión por sedimentación gravitacional, hasta lograr una concentración entre 45% a 52% de sólidos y un rebose de agua clara. Desde estos espesadores se alimenta el estanque acondicionador.

La función del acondicionamiento es dar un tiempo de residencia a la pulpa, utilizando un estanque de 350 m³ con agitación de aproximadamente 45 minutos con el objetivo de producir la desorción, quitar los reactivos residuales como colectores y espumantes provenientes de la flotación colectiva. Junto con lo anterior, en esta etapa se adiciona el colector de molibdeno (kerosén), en razón de 200 a 300 gr/ton de mineral tratado y H₂SO₄. El estanque mezclador es alimentado por rebose desde el estanque acondicionador. Finalmente, la Mezcla es alimentada hacia los 4 bancos Rougher mediante un distribuidor de cargas.



3.1.2. Flotación de molibdeno

En este proceso el cobre es precipitado y el molibdeno extraído mediante flotación, esto se logra con la adición de reactivos depresantes y colectores. Las celdas se caracterizan por tener elementos mecánicos móviles e inyección de gas forzado (aire o nitrógeno). La distribución del nitrógeno es en baja y alta presión, para reemplazar el aire de las celdas de flotación convencionales y celdas de columnas, respectivamente.

La distribución del gas N_2 en baja presión (>13 psi), se hace utilizando la actual cañería de aire de los sopladores, para llegar a todas las celdas convencionales, mientras que la distribución a las columnas es de alta presión (80 psi), mediante una cañería de 2" que se encuentra conectada a la alimentación de aire desde los compresores, quedando en stand by.

La flotación convencional es utilizada en las primeras etapas del proceso y su función es maximizar la recuperación de molibdeno y por consiguiente minimizar el fino de Mo en los relaves. Estas celdas son utilizadas en los circuitos Rougher, circuito 1^{era} limpieza, circuito 2^{da} limpieza y circuito 5^{ta} limpieza.

- a) Circuito 1^{era} limpieza: Los concentradores del circuito Rougher, más las colas del circuito 2^{da} limpieza, alimentan a dos bancos Metso de 6 celdas de 355 pies³ cada una, en arreglos 2/2/2, cuya finalidad es limpiar estos concentrados subiendo la ley de molibdeno, para luego ser enviados al espesador P-2,
- b) Circuito 2^{da} limpieza: recibe alimentación del espesador P-2, trabaja con un banco de 6 celdas de 355 pie³ cada una, en arreglo 2/2/2, las colas llegan al cajón distribuidor de la 1^{era} limpieza y los concentrados son enviados al espesador P-6.



- c) Circuito 5^{ta} limpieza: recibe los concentrados provenientes de la etapa de cuarta limpieza cuya descarga es alimentada al circuito de quinta limpieza, el que consta de 2 bancos de 8 celdas Metso de 50 pies³ en contracorriente, en arreglos 2/3/3, operando en forma normal con banco N°2, quedando el N°1 en stand by.

La flotación columnar es utilizada para producir concentrado de molibdeno por flotación, inyectando un flujo de gas ascendente adecuado en su extremo inferior y aprovechando su gran altura. Este gas interactúa a contracorriente con la pulpa (esta alimenta a la celda a $\frac{3}{4}$ partes de su altura de 12 metros) colectando las partículas hidrófobas. El flujo ascendente de gas también arrastra partículas no deseadas para lo cual se utiliza agua de lavado en su extremo superior (en forma de lluvia), lo cual elimina las partículas no deseadas de la burbuja.

3.1.3. Lixiviación de concentrado y filtrado

La lixiviación cumple la función de lixiviar el fósforo presente en los concentrados de molibdeno, esto se realiza mediante estanques donde se agrega ácido sulfúrico hasta obtener un pH de 1.5 a 1.7. Logrado el pH deseado se debe agitar la pulpa entre 15 a 20 minutos para luego proceder a su filtrado y envasado.

En el filtrado básicamente se separa la fase líquida de la sólida, para este fin existen un filtro de placas verticales y estruje por membranas modelo ANDRITZ. Después de esta etapa se obtiene un concentrado con humedad menor al 15%.

Para más información sobre datos técnicos de los equipos, revisar anexo A.



4. ANÁLISIS DE CRITICIDAD DEL PROCESO DE MOLIBDENO

Para determinar los equipos en los cuales vale la pena dirigir recursos, se determinará la criticidad mediante un análisis semi-cuantitativo de criticidad total por riesgo (CTR), soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo (FF) por la severidad del mismo (C).

$$CTR = FF \times C$$

Las variables a considerar en la severidad de la falla son las siguientes:

- Impacto en la producción: evaluado mediante el diagrama de la planta y mediante la consulta al jefe de unidad del proceso.
- Flexibilidad operacional: evaluado mediante la contextualización de capacidades y equipos existentes en stand by y paralelo.
- Costes de mantenimiento: obtenidos desde SAP PM, en la transacción de OT's IW39.
- Impacto en el HSEC: evaluado mediante la ayuda del jefe de unidad del proceso.

Codelco división El Teniente, mediante su sistema operativo del mantenimiento (SOMA), definió un modelo del análisis de criticidad semi-cuantitativo basado en el anterior, donde definen los puntajes según el contexto operacional de la empresa, sus variables se describen a continuación:

4.1. CONSECUENCIA:

- Seguridad (P1): Consecuencias potenciales que podría tener una falla para la seguridad de las personas y comunidades.
 - a) 40 puntos - Riesgo de accidente con fatalidades múltiples.
 - b) 38 puntos – Riesgo de accidente con una fatalidad.
 - c) 30 puntos – Riesgo de accidente con discapacidad permanente.
 - d) 12 puntos – Riesgo de accidente con tiempo perdido.
 - e) 0 puntos – Sin riesgo para las personas.



- Medio ambiente (P2): consecuencias sobre el medio ambiente – en las instalaciones de Codelco o áreas próximas- para el aire, el agua y/o la tierra.
 - a) 40 puntos – Riesgo de daño medioambiental severo y de largo plazo.
 - b) 32 puntos – Riesgo de daño de largo plazo.
 - c) 28 puntos – Riesgo de daño de corto plazo.
 - d) 10 puntos – Riesgo de daño medioambiental menor.
 - e) 0 puntos – Sin daño al medio ambiente.
- Producción (P3): Pérdidas o paradas de producción que pueden ocurrir como consecuencias potenciales de una falla.
 - a) 12 puntos – Pérdida de producción mayor a 1 día.
 - b) 8 puntos – Pérdida de producción entre 12 horas y 1 día.
 - c) 4 puntos – Pérdida de producción entre 2 y 12 horas.
 - d) 2 puntos – Pérdida de producción de hasta 2 horas.
 - e) 0 puntos – Sin pérdida de producción.
- Costos de mantenimiento (P4): Costos de mantenimiento en los cuales se incurre para restituir la función afectada por la ocurrencia de la falla.
 - a) 10 puntos – Costos muy altos, sobre los 500.000 USD.
 - b) 8 puntos – Costos altos, entre 100.000 y 500.000 USD.
 - c) 5 puntos – Costos medios, entre 50.000 y 100.000 USD.
 - d) 2 puntos – Costos bajos, entre 10.000 y 50.000 USD.
 - e) 1 punto – Costos muy bajos, menores a 10.000 USD.

Además de estas cuatro variables, se agrega una quinta que representa la redundancia o el modo stand by que puedan presentar los equipos, el criterio de esta variable se presenta a continuación.



- Flexibilidad operacional (P5):
 - a) 1 punto: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.
 - b) 0,5 puntos: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.
 - c) 0,1 puntos: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

Finalmente, la fórmula para calcular el total del puntaje correspondiente a la consecuencia es el siguiente:

$$\text{Puntaje consecuencia} = P1 + P2 + (P3 * P5) + P4$$

Este puntaje se relaciona con un indicador de consecuencia que se encuentra en la tabla N°9.

Tabla 9 Valor indicador consecuencia según puntaje.

Puntaje consecuencia	Indicador de consecuencia
Consecuencia total sobre 38	6
Consecuencia total entre 28 y 38	5
Consecuencia total entre 20 y 28	4
Consecuencia total entre 10 y 20	3
Consecuencia total entre 4 y 10	2
Consecuencia total inferior a 4	1

Fuente: Modelo de gestión del mantenimiento, Codelco.

4.2. Frecuencia de falla

La forma de cálculo para el valor del indicador de la frecuencia de falla se presenta en la tabla N°10.



Tabla 10 Indicador de frecuencia según la frecuencia de falla.

Frecuencia de ocurrencia de la falla	Indicador de frecuencia
Ocurren fallas diariamente	6
Ocurren fallas una vez por semana	5
Ocurren fallas una vez al mes	4
Ocurren fallas una vez cada 6 meses	3
Ocurren fallas una vez al año	2
Ocurren fallas cada 10 años	1

Fuente: Modelo de gestión del mantenimiento, Codelco.

4.3. Resultado análisis de criticidad

Finalmente, para obtener el indicador de criticidad se multiplica el indicador de frecuencia por el de consecuencia, obteniendo un resultado que será crítico, medio o de criticidad baja según los siguientes criterios definidos por el área corporativa.

- $\text{Consecuencia} \times \text{Frecuencia} < 10$; Criticidad Baja
- $10 < \text{Consecuencia} \times \text{Frecuencia} \leq 20$; Criticidad Media
- $\text{Consecuencia} \times \text{Frecuencia} > 20$; Criticidad Alta

La evaluación se realizó a los 87 equipos pertenecientes al proceso molibdeno de los cuales 24 obtuvieron una criticidad alta. En la tabla N°11 se resumen los resultados:

Tabla 11 Resultado número de equipos críticos.

Criticidad	Nº Equipos	Porcentaje de equipos
Alta	24	28%
Media	58	66%
Baja	5	6%

Fuente: Elaboración propia.

Los siguientes equipos resultaron de alta criticidad y sus valores de consecuencia y frecuencia de la falla se resumen en la tabla N°12: **(Para más información revisar anexo B)**

Tabla 12 Resultado análisis de criticidad en equipos críticos.

N°	Sistema	Indicador de consecuencia	Indicador frecuencia de falla	Puntaje Criticidad	Tipo de Criticidad
1	Espesador P5	6	5	30	C. ALTA
2	Estanque acondicionador	6	5	30	C. ALTA
3	Estanque de lixiviación N°1	6	5	30	C. ALTA
4	Estanque de lixiviación N°2	6	5	30	C. ALTA
5	Filtro Andritz	6	5	30	C. ALTA
6	Flotación Rougher Banco N°1 (4 celdas)	6	5	30	C. ALTA
7	Flotación Rougher Banco N°2 (4 celdas)	6	5	30	C. ALTA
8	Flotación Rougher Banco N°3 (4 celdas)	6	4	24	C. ALTA
9	Flotación Rougher Banco N°4 (4 celdas)	6	4	24	C. ALTA
10	Estanque Mezclador	6	4	24	C. ALTA
11	Bomba 534	6	4	24	C. ALTA
12	Bomba 547	6	4	24	C. ALTA

Fuente: Elaboración propia.

Estos sistemas son los que se deberán analizar mediante la metodología RCM de forma de asegurar la confiabilidad operacional por medio del mantenimiento. Debido a que los equipos son redundantes en algunos casos y con contextos operacionales iguales, los siguientes equipos son los que se analizarán específicamente:

- Flotación Rougher Banco N°1.
- Filtro Andritz.
- Espesador P-5.
- Estanque de Lixiviación N°1.
- Estanque Acondicionador.
- Bomba 547.

4.4. DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS

4.4.1. Celdas de flotación Rougher

En lo que respecta a los Rougher, estos son celdas de flotación convencional, su función es la separación de la molibdenita del concentrado de cobre proveniente de la flotación colectiva de los procesos SAG y Convencional. Para más información revisar anexo C.



4.4.2. Bomba Centrífuga 547

Las bombas críticas de la planta de molibdeno son del tipo centrífugas horizontal con sello seco. Su función es recepcionar la carga de concentrado Cu-Mo desde el estanque mezclador e impulsarla hacia las celdas de flotación Rougher. Para más información revisar anexo C.

4.4.3. Espesador P-5

La función general de los espesadores es separar el sólido del líquido mediante gravedad y recuperar parte del agua, obteniendo un concentrado de cobre de entre 60 y 65% sólido. El espesador P-5 recibe las colas de la flotación Rougher que corresponden al concentrado de cobre, además su tamaño o diámetro es de 200 [ft]. Para más información revisar anexo C.

4.4.4. Estanque acondicionador

La función del Estanque Acondicionador es envejecer o acondicionar la pulpa de alimentación para facilitar la función de los reactivos depresantes de Cu; además de adicionar los reactivos Kerosén (colector de sulfuros de molibdeno), H_2SO_4 (Ácido Sulfúrico) como modificador de pH. Para más información revisar anexo C.

4.4.5. Filtro Andritz

Este sistema es la última etapa del proceso molibdeno, aquí se recepciona el concentrado desde los estanques de lixiviación. Su función principal es secar el concentrado hasta obtener tortas con una humedad menor al 15%. Para más información revisar anexo C.

4.4.6. Estanque lixiviación

La función del estanque de lixiviación es bajar la concentración de fósforo en el concentrado de molibdeno, para esto se adiciona ácido sulfúrico a los estanques hasta obtener un pH de 1.5 a 1.7. Para más información revisar anexo C.



5. DESARROLLO RCM

Para aplicar la metodología se deben responder preguntas basadas en la definición de funciones, fallas funcionales, modos de fallas, efectos de la falla, definición de actividades que prevengan la falla o rediseñar en caso no ser posible evitar la falla. De modo de ordenar la información y obtener resultados con mayor facilidad en la aplicación RCM existe el análisis AMFE o AMEF en español, donde se responden las 4 primeras preguntas, función, falla funcional, modo de falla y efecto de la falla. Luego con el diagrama de decisión RCM se responden las últimas 3 preguntas del modelo.

Para evaluar el riesgo inherente a cada modo de falla existe la metodología de “riesgo económico por modo de falla”, el cual se basa en determinar la frecuencia de fallo por año [Fallas/año] (FF), el tiempo promedio de parada [hr] (TPDP) y el impacto en la producción por hora que tiene el equipo cuando deja de funcionar [\$/hr] (IP) basado en el precio de venta referencial: cobre 2,82 [\$/lb], Molibdeno 11,99 [\$/lb].

$$Riesgo \text{ Año } \left[\frac{\$}{\text{año}} \right] = FF \times TPDP \times IP$$

5.1. RESULTADO BOMBA CENTRÍFUGA N°547

Tabla 13 AMFE bomba centrífuga N°547.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencias
1	Impulsar concentrado de Cu-Mo desde el estanque mezclador hasta la flotación Rougher a un caudal de 265 [m³/hr] conteniendo la carga sin generar derrames al exterior.	A	Bomba centrífuga no impulsa	1	Falla en rodamientos por excesivo desgaste.	Se generan ruidos producto de las vibraciones, además aumenta la temperatura por roce lo que provoca un aumento del riesgo de incendio. Se funden rodamientos y se debe cambiar conjunto eje-rodamientos lo que implica un tiempo de parada de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Bomba deja de funcionar perdiendo el proceso un 25% del transporte del concentrado Mo-Cu. Seguridad: Existe riesgo de incendio que puede afectar al personal presente.
				2	Bomba embancada por exceso de acumulación de carga en pozo	Sistema de transmisión se contamina deteniéndose por completo. Se debe drenar pulpa del pozo, limpiar bomba y cambiar componentes externos dañados, lo que implica un tiempo de parada de 18 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Bomba deja de funcionar perdiendo un 25% del transporte del concentrado Mo-Cu.
		B	Bomba impulsa menos de 265 [m³/hr]	1	Desalineamiento.	Se producen vibraciones desgastando correa y patea de forma acelerada, además daña los acoplamientos. Se debe alinear sistema de transmisión y cambiar componentes dañados lo que implica un tiempo muerto de 12 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen daños mayores en los acoples y el eje, lo que aumenta los costos de reparación y detiene el proceso por una mayor cantidad de horas.
				2	Erosión excesiva del impulsor	Disminuye el caudal de la bomba. Se debe reemplazar rodete lo que tiene un tiempo muerto de 24 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Riesgo de rotura del rodete lo que dañaría gran parte de los componentes internos.
				3	Patea desgastada.	Correa se desliza por tener menor superficie de contacto con la patea lo que provoca que la capacidad de bombeo baje. Se debe cambiar patea, lo que provoca un tiempo muerto de 16 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se ve afectada la producción y la cantidad de horas de detención aumenta al ser una falla no detectada.
		C	Fugas de pulpa hacia el exterior.	1	Rotura de carcasa por erosión-corrosión.	Derrames de pulpa hacia el exterior acumulándose en el pozo. Se debe detener la bomba para trasladarla al taller y cambiar revestimiento junto con carcasa, lo que tiene un tiempo de parada de 32 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Carcasa queda expuesta produciéndose corrosión en el metal. Existen pérdidas importantes de pulpa y producción.
				2	Falla del sello mecánico.	Se producen pequeñas fugas de pulpa hacia el exterior de la carcasa. Detener bomba y cambiar sello mecánico, esto provoca un tiempo muerto de 1 hora. .	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen fugas de pulpa. Puede producir daños mayores si no es reparado a tiempo.

Tabla 14 Hoja de decisión bomba centrífuga N°547.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	S	S			S						Tarea a condición	Existente	
1	A	2	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Existente	
1	B	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	B	2	N				N	N	S				Tarea a condición: Medición de vibraciones.	Existente	
1	B	3	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	S	N	N	S	S						Tarea a condición: Inspección visual.	Existente	
1	C	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas: Se recomienda inspeccionar además todos los componentes de la bomba, ya que estos se ven sometidos a constante erosión.	Existente	

Tabla 15 Resultado del riesgo anual por modo de falla en bomba centrífuga N°547.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción. [USD/hr]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo anual [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,8	16	89.209	6242	1146.876	Si
1	A	2	0,5	18	89.209	526	803.149	No
1	B	1	0,2	12	89.209	108	214.124	No
1	B	2	1,5	24	89.209	2466	3.215.244	No
1	B	3	0,5	16	89.209	180	713.766	No
1	C	1	0,2	32	89.209	7850	572.511	No
1	C	2	1	1	89.209	380	89.589	No

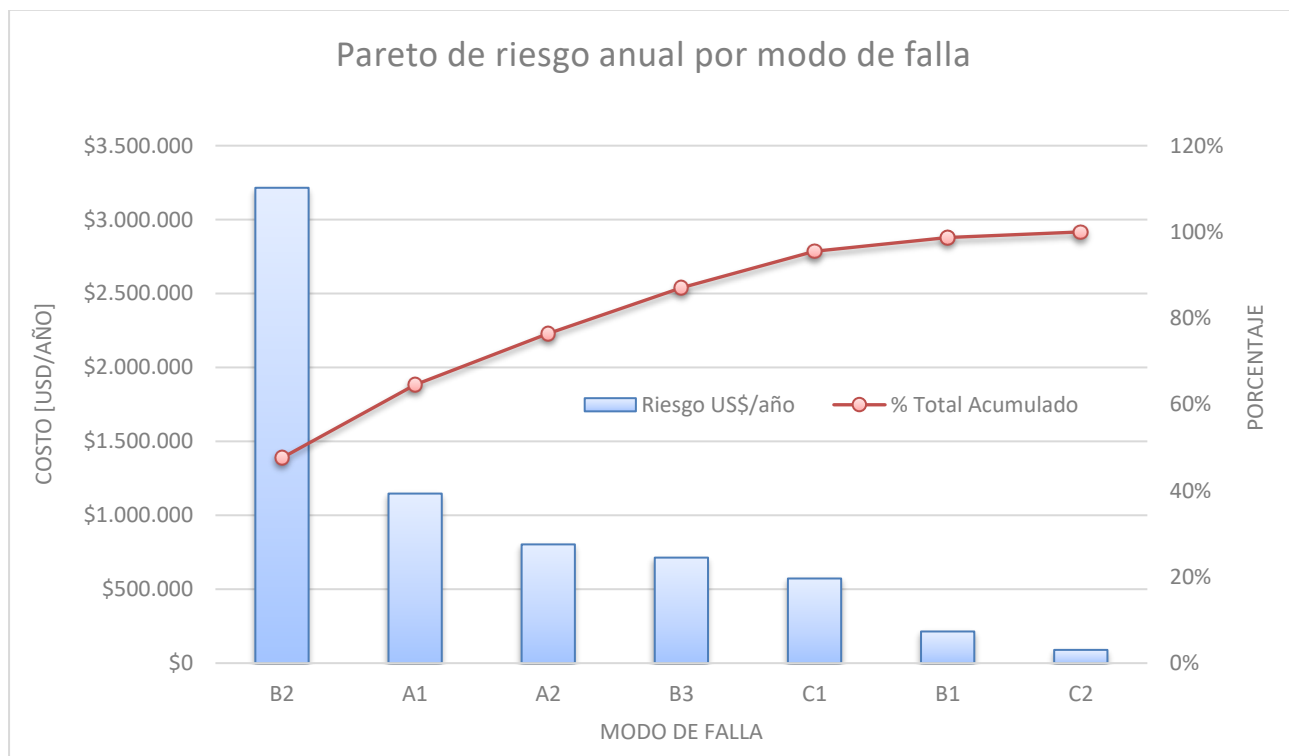


Gráfico 4 Pareto de riesgo anual por modo de falla en bomba centrífuga N°547.

Como se observa en el gráfico N°4, el mayor riesgo anual lo obtiene el modo de falla B2 que representa la erosión del impulsor, algo que es inherente a la operación de la bomba. Para este modo



de falla ya existe un plan de mantenimiento que mitiga las consecuencias. También existe para el resto de los modos de falla de la bomba.

A modo de recomendación se propone estandarizar el almacenamiento de las bombas que se encuentran en reparación, para proteger completamente las partes metálicas, elastómeros y componentes suministrados con la bomba durante su almacenamiento.

Las bombas almacenadas en exterior deben ser protegidas de elementos externos como lluvia, polvo, condensación, temperaturas altas, vibraciones etc. Para lo cual se debe:

- a) Purgar laberinto con grasa cada 6 meses.
- b) Orificios de succión y descarga deben estar cubiertos.
- c) En caso de ambientes muy desfavorables cubrir con tela alquitranada.
- d) Rotar eje cada 5 semanas.
- e) Cubrir zonas donde el eje se encuentra expuesto (anterior y posterior al portarodamiento).
- f) Revisar estado de empaquetadura antes de su uso.

5.2. RESULTADO CELDA DE FLOTACIÓN ROUGHER

Tabla 16 AMFE celda de flotación rougher N°663 parte I.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Separar el Molibdeno del Cobre mediante la inyección de nitrógeno a baja presión, no menor a 13 psi, recuperando un 89,4% de Mo, sin producir derrames de carga y conteniendo la pulpa.	A	No se logra separar el cobre del molibdeno.	1	Des alineamiento	Se producen vibraciones desgastando correa y polea de forma acelerada, además dañan los acoplamientos. Se debe alinear sistema de transmisión y cambiar componentes dañados lo que implica un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen daños mayores en los acoples y el eje, lo que aumenta los costos de reparación y detiene el proceso por una mayor cantidad de horas.
				2	Falla de sellos en junta rotatoria.	Espuma se vuelve estática por la pérdida de nitrógeno al ambiente. Se deben cambiar sellos y rodamientos lo que provoca un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia evidente Operacional: La flotación de mineral se ve afectada por la interrupción del suministro de gas lo que impacta en la nula recuperación de mineral en la celda.
				3	Stand Pipe afectado por corrosión.	Se deja de producir espuma por fugas y soltura de estator, la espuma se percibe estática en la superficie del estanque. Se debe detener celda y reparar revestimiento de stand pipe, junto con soldar estator. Esto provoca un tiempo muerto de 16 horas	Consecuencia evidente Operacional: Celda deja de funcionar perdiendo un 12,5% de la flotación selectiva del concentrado Mo-Cu. Además, la soltura del estator puede provocar daños en el impulsor.
				4	Sistema control de nivel con vástago desgastado.	Nivel de la celda comienza a disminuir deteniendo el proceso. Se debe desconectar sistema y efectuar control de nivel de celda manualmente mientras se reemplaza boya y vástago, esto provoca un tiempo muerto de 1 hora.	Consecuencia evidente Operacional: Celda deja de funcionar perdiendo un 12,5% de la flotación selectiva del concentrado Mo-Cu.
				5	Impulsor con rotura por ingreso de elementos extraños.	Espuma se vuelve estática en la superficie del estanque. Se debe detener celda y vaciar para el cambio de componentes lo que implica una detención de 24 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Se pierde un 12,5% de la producción de Cu-Mo.
				6	Difusor con rotura por ingreso de elementos extraños.	Espuma se vuelve estática en la superficie del estanque. Se debe detener celda y vaciar para el cambio de componentes lo que implica una detención de 24 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Se pierde un 12,5% de la producción de Cu-Mo.

Tabla 17 AMFE celda de flotación Rougher N°663 parte II.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Separar el Molibdeno del Cobre mediante la inyección de nitrógeno a baja presión, no menor a 13 psi, recuperando un 89,4% de Mo, sin producir derrames de carga y conteniendo la pulpa.	B	Recuperación de molibdeno menor al 89,4%.	1	Polea desgastada.	Correa se desliza por tener menor área de contacto con la polea lo que provoca que la generación de burbujas disminuya. Se debe cambiar polea, lo que provoca un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se ve afectada la producción y la cantidad de horas de detención aumenta al ser una falla no detectada.
				2	Válvula tapón desgastada.	Flujo de descarga de colas comienza a aumentar. Se debe vaciar celda y reparar tapones lo que produce un tiempo muerto de 4 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen fugas de material por los tapones por lo cual se recupera menor cantidad de molibdeno en la celda, Seguridad y ambiente: existe una mayor presencia de Mo en el relave afectando el medio ambiente.
		C	Derrames de pulpa al exterior.	1	Estanque afectado por corrosión y erosión.	Se presentan derrame de pulpa hacia el suelo. Existe riesgo de contaminación. Se debe detener banco completo y reemplazar celda provocando una detención de 48 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Se presentan roturas en la celda lo que implica una pérdida del 25% de producción. Seguridad y ambiente: suelo de concreto detiene filtración, pero existe riesgo de ser conducido por agua lluvia hacia cauces naturales.

Tabla 18 Hoja de decisión celda de flotación Rougher N°663.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	N	S			Tarea de sustitución cíclica de la correa.	Faltante	18 Meses
1	A	2	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Existente	
1	A	3	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Existente	
1	A	4	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Existente	
1	A	5	S	N	N	S	N	N	N				Rediseño: para evitar el ingreso de objetos extraños como pernos u otros, se propone la instalación de una malla que contenga todo objeto que no pertenezca a la operación, lo que provocará un costo de operación mucho más bajo.	Faltante	
1	A	6	S	N	N	S	N	N	N				Rediseño: para evitar el ingreso de objetos extraños como pernos u otros, se propone la instalación de una malla que contenga todo objeto que no pertenezca a la operación, lo que provocará un costo de operación mucho más bajo.	Faltante	
1	B	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	B	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	S	N	S		S						Tarea a condición: Revisar espesor de estanque mediante ultrasonido. Además, se recomienda cada vez que se reemplaza el revestimiento contar con un inspector en terreno que supervise la correcta postura.	Faltante	12 Meses

Tabla 19 Resultado del riesgo anual por modo de falla en celda de flotación Rougher N°663.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción. [USD/hr]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo anual [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,2	8	\$ 22.302	850	\$ 35.853	No
1	A	2	2	8	\$ 5.575	115	\$ 89.438	No
1	A	3	0,2	16	\$ 22.302	1.000	\$ 71.567	No
1	A	4	0,5	1	\$ 22.302	214	\$ 11.258	No
1	A	5	0,5	24	\$ 22.302	2.200	\$ 268.020	No
1	A	6	0,4	24	\$ 22.302	788	\$ 214.416	No
1	B	1	0,4	8	\$ 22.302	153	\$ 71.428	No
1	B	2	1	4	\$ 22.302	500	\$ 89.708	Si
1	C	1	0,2	48	\$ 89.209	12.000	\$ 858.812	Si

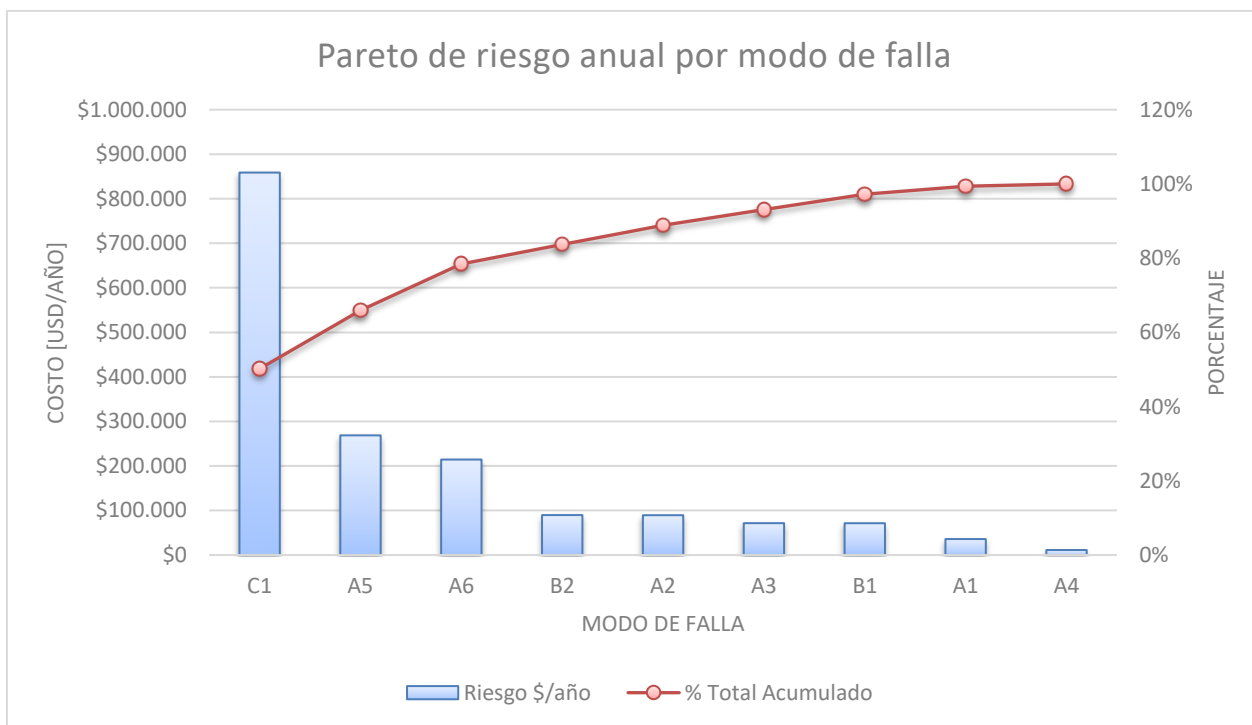


Gráfico 5 Pareto de riesgo anual por modo de falla en celda de flotación Rougher N°663.

El mayor riesgo observado en el gráfico N°5 es provocado por el modo de falla C1 el cual está asociado a un fenómeno de corrosión y erosión en el estanque el cual provoca una acelerada pérdida del espesor de pared, generando fugas que afectan el medio ambiente y la operación. Para este modo de falla no existe una acción que prevenga o disminuya las consecuencias. Además, este equipo es afectado por dos modos de falla adicional que son A5 y A6 y en ambos casos tampoco tienen acciones que mitiguen sus consecuencias: Es importante destacar que el riesgo asociado a los modos de falla C1, A5 y A6 representan el 78% del riesgo total del activo y todos se encuentran inexistentes. Las tareas para los modos de falla. se definen a continuación:

5.2.1. Tarea Modo de falla A1 (desalineamiento)

Considerando el bajo riesgo de este tipo de falla se propone sustituir la correa cada 18 meses.

Realizando esta tarea se pretende obtener los siguientes beneficios:

- Incrementar el tiempo operativo, la eficacia y la productividad.
- Reducir la fricción y, por lo tanto, el consumo energético.
- Reducir el ruido y la vibración.
- Reducir los costos derivados de la sustitución de componentes y las paradas no planificadas.

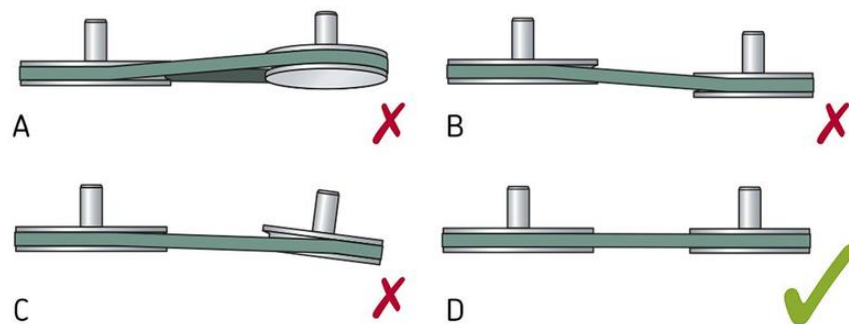


Figura 16 Representación de una alineación correcta.

5.2.2. Modo de falla A5 y A6 (erosión)

La rotura del revestimiento del impulsor y difusor es provocada por objetos extraños provenientes de otras etapas del proceso. Esto permite que el fenómeno corrosivo debilite el cuerpo de acero estructural, fallando prematuramente. La rotura del impulsor se puede observar en la figura N°17.

Debido que a que las tareas de mantenimiento no permiten mitigar las consecuencias se debe acudir al rediseño por el alto riesgo operacional que representa la falla de estos componentes.



Figura 17 Impulsor roto.

5.2.3. Modo de falla C1 (corrosión-erosión)

Si bien el estanque posee recubrimiento de goma, han existido fallas debido al desprendimiento de las puntas provocando que la pulpa comience a ingresar entre la goma y el estanque. Debido a esto se han producido roturas y pequeñas filtraciones que en algunos casos han derivado en derrames mayores.

Considerando que estamos ante un riesgo medio ambiental, cuya ocurrencia debiera ser cercana a cero, se ha determinado realizar una inspección mediante ultrasonido cada 12 meses a todo el perímetro superior del estanque. Esta inspección permitirá descubrir los sectores donde el revestimiento está dañado o inexistente.

5.2.4. Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos

En la tabla N°20 se resumen los costos que engloban la realización de la actividad de mantenimiento propuesta, además se incluye el costo del riesgo anual de la falla asociado a no realizar ninguna actividad para fines comparativos.



Tabla 20 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en celda de flotación Rougher N°663.

Modo de falla	Actividad	Costo de la actividad [USD]	Pérdida de producción por parada [USD/año]	Costo anual total de la actividad [USD]	Riesgo anual si no se realiza ningún mantenimiento proactivo [USD]
A1	Sustitución de la correa	60	14868	40	35.853
A5	Rediseño				268.020
A6	Rediseño				214.416
C1	Inspección ultrasónica en el estanque	500	0	500	858.812

Los costos de la actividad fueron obtenidos de órdenes de trabajo existentes en SAP donde se realizaron acciones similares. Los valores entregados son solo referenciales.

5.3. RESULTADO FILTRO ANDRITZ

Tabla 21 AMFE filtro Andritz.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Eliminar el agua del concentrado de molibdeno, pasando de entre un 30 - 45% a un 15% de humedad. Conteniendo el molibdeno y descargándolo hacia los sacos de comercialización.	A	Humedad del concentrado es mayor a un 15%.	1	Cilindro hidráulico con baja presión por falla de presostato.	Mayor presencia de humedad en las tortas de molibdeno. Se debe detener sistema y cambiar presostato.	Consecuencia no evidente Operacional: Calidad del producto final disminuye por mayor presencia de humedad.
				2	Circuito hidráulico con fugas.	Se visualizan manchas de aceite bajo las líneas hidráulicas. Se deben reemplazar componentes que presentan fuga, con un tiempo medio de detención de 6 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Presurización de membranas y levante de compuertas con funcionamiento deficiente lo que implica una baja en la calidad del producto. Si no es reparado, la lubricación de componentes del sistema se vuelve deficiente generando fallas de otros componentes.
				3	Cilindros de cierre y apertura de compuertas trabados.	Compuertas se traban. Se deben revisar válvulas direccionales y limpiar cilindro de la presencia de elementos extraños. La reparación tiene una duración de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Al imposibilitar el cierre de las compuertas, se contamina el concentrado con agua lo que impacta en la calidad del producto. Además de la pérdida de producción inherente a la detención.
		B	Fuga de molibdeno en la tolva.	1	Tolva con rotura por corrosión.	Se detectan fugas de carga por la tolva. Se deben reemplazar planchas dañadas.	Consecuencia evidente Operacional: Disminuye la cantidad de producto enviado a envasado. Seguridad y ambiente: Aumenta riesgo de contaminación de ríos al mezclarse con el agua lluvia.
		C	Molibdeno no logra ser descargado del filtro hacia los sacos de comercialización.	1	Reductor rompebóvedas con desgaste acelerado por lubricante contaminado.	Se produce un desgaste acelerado de los componentes. Se deben cambiar piezas con desgaste con desgaste, lo que provoca un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: El desgaste acelerado provoca un aumento en los costos del mantenimiento por un mayor uso de repuestos.
				2	Tornillo con álabes desgastados.	Se produce acumulación de carga en la tolva. Se debe cambiar tornillo lo que implica una detención de 36 horas.	Consecuencia evidente Operacional: No se logra descargar producto final de molibdeno generando un atollo en la línea, lo que impacta directamente la comercialización de la molibdenita.
				3	Rompebóvedas erosionado.	Se produce acumulación de carga en la tolva. Se debe cambiar rompebóvedas lo que implica una detención de 36 horas.	Consecuencia evidente Operacional: No se logra descargar producto final de molibdeno generando un atollo en la línea, lo que impacta directamente la comercialización de la molibdenita.

Tabla 22 Hoja de decisión filtro Andritz.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	A	2	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Existente	
1	A	3	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Existente	
1	B	1	S	N	S		S						Tarea a condición: Ultrasonido a tolva del filtro para detectar zonas críticas de corrosión y erosión.	Faltante	3 Meses
1	C	1	N				S						Tarea a condición: Análisis de lubricantes.	Faltante	2 Semanas
1	C	2	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Existente	
1	C	3	S	N	N	S	N	S					Tarea a condición: Inspección visual del componente y análisis de partículas magnetizables mediante el uso de personal experto, para detectar fallas de material en el rompebóvedas.	Faltante	12 Meses

Tabla 23 Resultado del riesgo anual por modo de falla en el filtro Andritz.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción. [USD/hr]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo anual [USD/año]	HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,8	2	15.419	860	25.359	No
1	A	2	0,25	6	61.678	845	92.728	No
1	A	3	0,4	16	61.678	2145	395.596	No
1	B	1	0,4	8	61.677	480	197.561	Si
1	C	1	0,25	8	61.677	18000	127.855	No
1	C	2	0,5	36	61.677	12218	1.116.311	No
1	C	3	0,2	36	61.677	23150	448.711	No

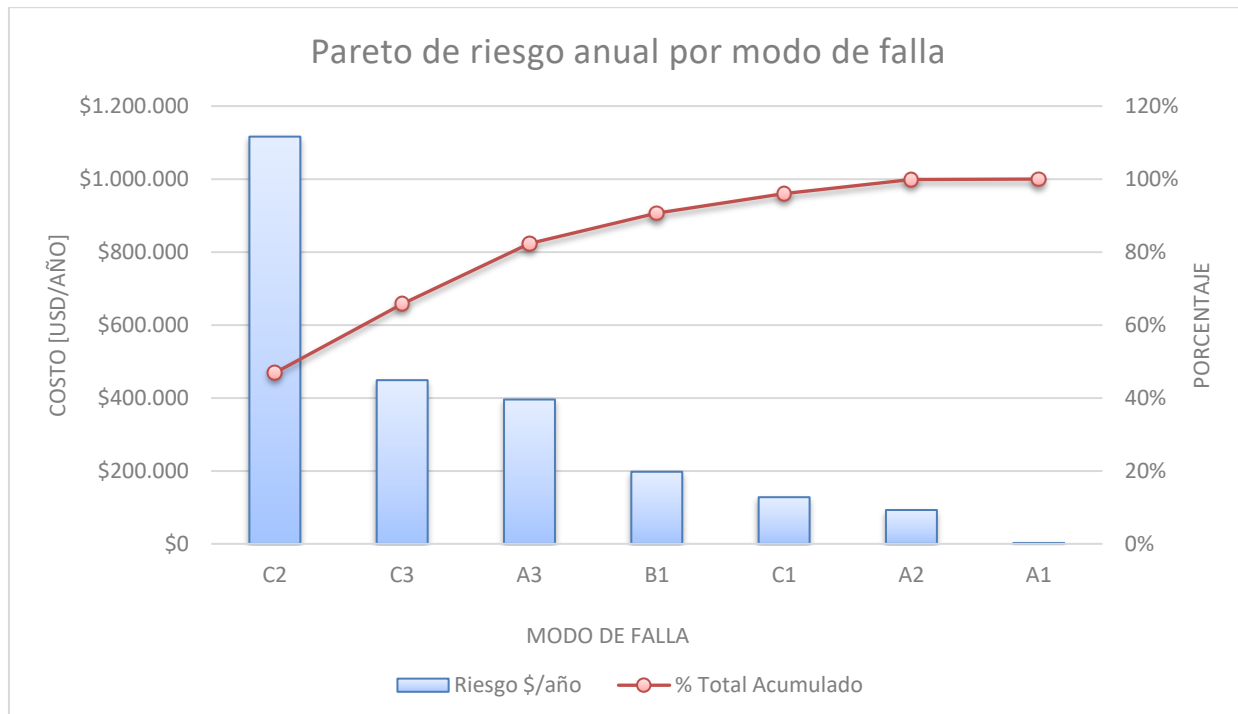


Gráfico 6 Pareto de riesgo anual por modo de falla en el filtro Andritz.



El mayor riesgo observado en el gráfico N°6 es provocado por el modo de falla C2. Este modo de falla involucra erosión en los álabes del tornillo por la caída y el movimiento del concentrado de molibdeno. Sin embargo, para este modo de falla ya existe una acción a condición que disminuye sus consecuencias. Adicionalmente en este equipo coexisten los modos de falla B1, C1 y C3 que no tienen acciones que mitiguen sus consecuencias, y juntos representan el 32% del riesgo anual, por lo que a continuación detallaremos las tareas a realizar.

5.3.1. Modo de falla B1 (corrosión)

La tolva es de acero carbono y recibe concentrado de molibdeno con un 15% de humedad. La acumulación de humedad en las zonas bajas provoca corrosión y roturas en el tiempo.

Para evitar las consecuencias de este modo de falla se ha determinado realizar una inspección mediante ultrasonido cada 12 meses en la zona con mayor probabilidad de ataque corrosivo (sectores bajo del equipo).

5.3.2. Modo de falla C1 (lubricante contaminado)

El lubricante cumple una función vital en los elementos rotatorios que se encuentran en contacto, ya que forman una película de protección evitando la interacción directa metal-metal y por consiguiente disminuyendo el desgaste, el calor y aumentando la vida útil de los componentes. La caja reductora del rompebóvedas en el filtro cumple una función trascendental rompiendo las tortas de molibdeno, permitiendo la descarga del producto final a los sacos de comercialización. Para disminuir el riesgo de este modo de falla se propone realizar un análisis tribológico del lubricante cada 2 semanas y así determinar cuándo se debe intervenir el equipo.

El análisis tribológico permite deducir entre otras cosas lo siguiente:

- Degradación del lubricante: Mediante el estudio de la degradación del aceite se puede programar la sustitución del lubricante y así aplazar la sustitución de aceites en buen estado o adelantar la sustitución de aceites deteriorados que no cuentan con la viscosidad suficiente para una lubricación eficaz, de manera que se eviten averías prematuras.
- Desgaste de componentes de la máquina: El estudio de los componentes de desgaste férricos y no férricos permite localizar con mayor antelación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, piñones y otros componentes.

5.3.3. Modo de falla C3 (erosión)

El rompebóvedas, como se dijo antes cumple la función de romper la torta de molibdeno, por lo que se ve afectada por erosión constante junto a esfuerzos de flexión, que con el tiempo provocan grietas de fatiga en su soldadura de unión con el eje. Para aumentar la durabilidad del componente se decide desarrollar una tarea a condición cada 12 meses que se basa en realizar una inspección visual y métodos superficiales (partículas magnetizables a los sectores propensos a desarrollar grietas por fatiga) con personal especializado en el tema, con el fin de restituir la funcionalidad del equipo.

Con esta tarea se aumenta la confiabilidad, disminuyen los costos mantenimiento y aumenta la disponibilidad de equipo al eliminar paradas imprevistas.

5.3.4. Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos

En la tabla N°24 se resumen los costos que engloban la realización de la actividad de mantenimiento propuesta, además se incluye el costo del riesgo anual de la falla cuando no se realiza ningún mantenimiento proactivo con fines comparativos.

Tabla 24 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el filtro Andritz.

Modo de falla	Actividad	Costo de la actividad [USD]	Pérdida de producción por parada [USD/año]	Costo anual total de la actividad [USD]	Riesgo anual si no se realiza ningún mantenimiento proactivo [USD]
B1	Ultrasonido en la tolva.	500	0	2.000	197.561
C1	Análisis del lubricante.	20	0	360	127.855
C3	Inspección visual del rompebóvedas	800	123.000	123.800	448.711

Los costos de la actividad fueron obtenidos de órdenes de trabajo donde se realizaban actividades similares, por lo que deben ser considerados como referencia, nunca como un valor exacto.

5.4. RESULTADO ESPESADOR DE PROCESO P-5

Tabla 25 AMFE espesador de proceso P-5 parte I.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Disminuir la cantidad de agua presente en la pulpa decantando el sólido mediante un giro constante de rastras permitiendo una descarga permanente, el agua extraída se recupera mediante canales de descarga. Se debe activar una alarma en caso de superar el 15% de torque o superar niveles de llenado. Además, debe contener concentrado sin generar derrames.	A	No se recupera agua.	1	Descarga de canaletas atollada.	Canaletas se encuentran con carga acumulada. Se deben Limpiar, no implica una detención del espesador.	Consecuencia no evidente Seguridad y ambiente: La recuperación de agua en el espesador se detiene, imposibilitando la recirculación del recurso hídrico.
		B	Árbol central se detiene.	1	Rastras embancadas por conos atollados.	Se acumula carga en el fondo comenzando a aumentar el torque de las rastras, activándose una alarma. Se debe detener espesador y limpiar la acumulación de carga, lo que provoca un tiempo muerto de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Si no es detectada la falla a tiempo, las rastras pueden fracturarse por flexión generando costos importantes por repuestos, además disminuye el nivel de producción.
				2	Rastras dañadas por corrosión y flexión.	Rastras pierden su recubrimiento y se dañan. Esto provoca acumulación de carga en el fondo y se activa alarma de torque. Se debe vaciar espesador y reparar rastras lo que implica un tiempo muerto de 114 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Disminuye la producción de concentrado de cobre. Sedimentos comienza a acumularse generando un embancamiento de las rastras, pudiendo estas fallar por flexión y generar costos importantes por reparación.
				3	Reductor con falla por lubricante contaminado.	Se producen ruidos anormales. Se debe desarmar caja reductora y cambiar componentes con desgaste, lo que provoca un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: El desgaste acelerado provoca un aumento en los costos del mantenimiento por un mayor uso de repuestos.
				4	Rodamientos desgastados. (graseras)	Se producen ruidos anormales, además aumenta la temperatura y el riesgo de incendio. Se funden rodamientos por lo que se debe cambiar conjunto eje-rodamientos provocando un tiempo de parada de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Espesador deja de funcionar perdiendo el proceso un 25% de la producción de cobre. Seguridad y ambiente: Existe riesgo de incendio que puede afectar al personal presente.
				5	Poleas desgastadas.	Correa se desliza lo que provoca que la velocidad de giro de las rastras baje. Se debe cambiar polea, con un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Menor velocidad de giro puede provocar el embancamiento y por ende un impacto en la producción.
				6	Desalineamiento	Se producen vibraciones desgastando correa y polea de forma acelerada. Se debe alinear sistema y cambiar componentes dañados lo que implica un tiempo muerto de 6 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Se producen daños en los acoples y el eje, lo que aumenta los costos de reparación y se detiene el proceso por una mayor cantidad de horas.

Tabla 26 AMFE espesador de proceso P-5 parte II.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Disminuir la cantidad de agua presente en la pulpa decantando el sólido mediante un giro constante de rastras permitiendo una descarga permanente, el agua extraída se recupera mediante canales de descarga. Se debe activar una alarma en caso de superar el 15% de torque o superar niveles de llenado. Además, debe contener concentrado sin generar derrames.	C	No se activan alarmas al superar niveles de llenado o torque.	1	Control torque descalibrado.	Medidor de torque no señala valores correctos. Se debe calibrar control de torque y comprobar funcionamiento.	Consecuencia no evidente Operacional: Una deficiente medición de torque puede originar fractura por flexión en las rastras. Rastras se rompen y espesador se detiene disminuyendo la producción de cobre en un 25%.
				2	Control de nivel descalibrado.	Medidor de nivel no señala valores correctos. Peligro de derrames al exterior. Se debe calibrar control de nivel.	Consecuencia no evidente Seguridad y ambiente: Sistema de control de nivel no logra identificar el nivel de llenado del espesador, por lo cual se pueden producir derrames al suelo contaminando napas subterráneas y cauces naturales.

Tabla 27 Hoja de decisión espesor de proceso P-5.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas: Revisar que canales de descarga de agua clara esten libres de carga.	Faltante	12 Meses
1	B	1	S	N	N	S	N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico: Limpiar conos de descarga.	Faltante	6 Meses
1	B	2	N				N	S					Tarea de reacondicionamiento cíclico	Existente	
1	B	3	N				S						Tarea a condición: Análisis de lubricantes.	Faltante	2 Semanas
1	B	4	S	N	N	S	S						Tarea a condición: Medición de vibraciones en rodamientos.	Faltante	2 Meses
1	B	5	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	B	6	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	

Tabla 28 Resultado del riesgo anual por modo de falla en espesador de proceso P-5.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción [USD/hora]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo anual [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,1	0	81.989	500	50	Si
1	B	1	0,2	16	81.989	480	262.463	No
1	B	2	0,4	114	81.989	4.400	3.740.491	No
1	B	3	0,5	34	81.989	1.117	1.394.383	No
1	B	4	0,25	32	81.989	2.472	656.535	Si
1	B	5	0,2	8	81.989	468	131.277	No
1	B	6	0,5	2	81.989	295	82.137	No
1	C	1	0,25	0	81.989	58	14	No
1	C	2	0,25	0	81.989	82	20	Si

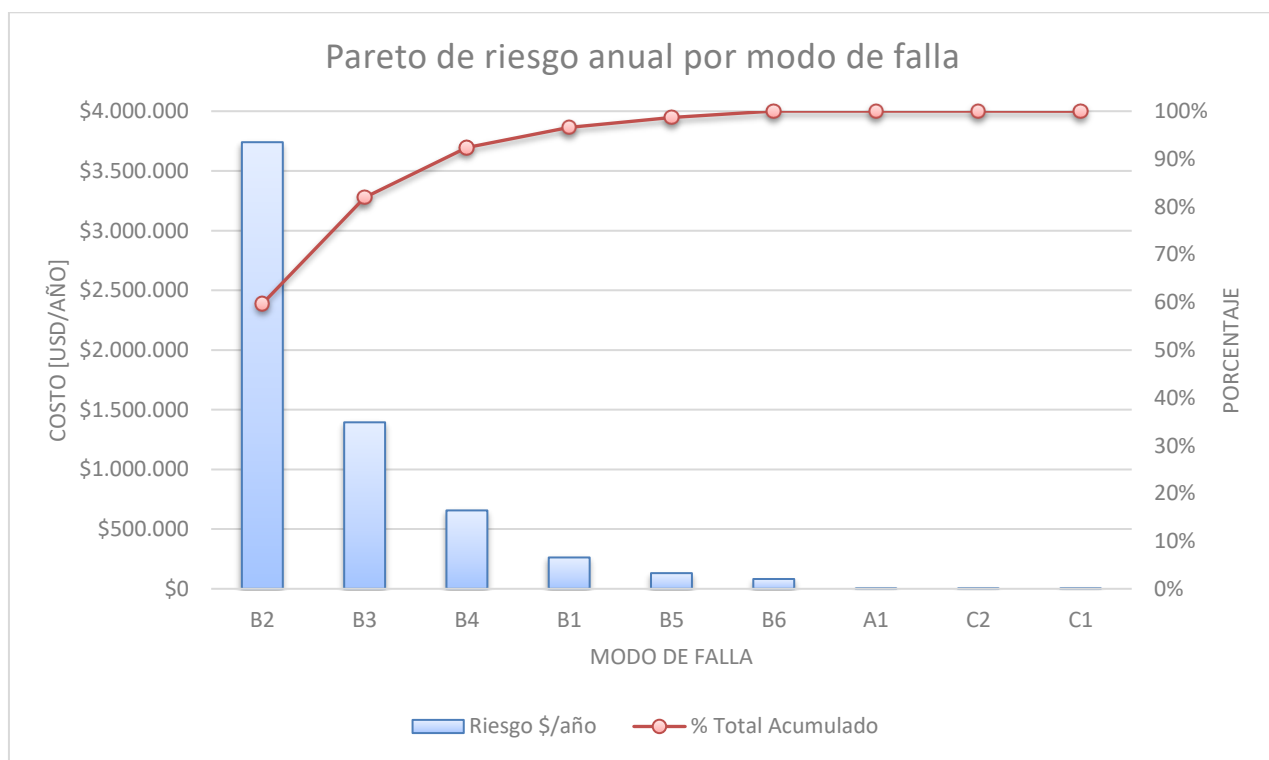


Gráfico 7 Pareto de riesgo anual por modo de falla en espesador de proceso P-5.



El mayor riesgo observado en el gráfico N°7 es provocado por el modo de falla B2 que representa el daño de las rastras por fatiga y corrosión en sus uniones soldadas generando acumulación de concentrado en el fondo e imposibilitando su descarga por los conos, sin embargo, este modo de falla posee una tarea de reacondicionamiento cíclico que disminuye sus consecuencias. Por otro lado, existen los modos de falla A1, B1, B3 y B4 que no tienen acciones que mitiguen sus consecuencias, y juntos, representan el 37% del riesgo anual. Las tareas para reducir el riesgo son las siguientes:

5.4.1. Modo de falla A1 (descarga de canales atollada)

El recurso hídrico en las faenas mineras es vital para esta industria y combinado con el contexto actual de sequía, se convierte en un insumo de alto costo.

El agua en el espesador es recuperada por rebose en canales que lo rodean y desembocan en un cono que envía el recurso a la planta de retratamiento. El agua recuperada no se encuentra libre de sedimentos, por lo que estos comienzan a decantar por acción del roce y la gravedad generando acumulación de carga en las canales que imposibilita el libre flujo. Para mitigar estas consecuencias se propone una tarea de búsqueda de fallas anual para verificar visualmente el estado de las canaletas y limpiar de ser necesario mediante la extracción de la carga acumulada.

5.4.2. Modo de falla B1 (atollo de los conos de descarga)

El atollo en los conos de descarga se debe a la decantación de los sólidos en las tuberías horizontales, acumulándose material y finalmente impidiendo el libre flujo del concentrado. Para mitigar las consecuencias se propone una tarea de reacondicionamiento cíclico semestral que consiste en la limpieza de los conos y tuberías mediante introduciendo mangueras de agua a presión por las tuberías desde la zona inferior del espesador.

5.4.3. Modo de falla B3 (lubricante contaminado)

El lubricante cumple una función vital en los elementos rotatorios que se encuentran en contacto, ya que forman una película de protección evitando la interacción directa metal-metal y por consiguiente disminuyendo el desgaste, el calor y aumentando la vida útil de los componentes. El espesador cuenta con dos reductores de 3 etapas, los cuales mantienen el movimiento de la pulpa facilitando la descarga del concentrado. Para disminuir el riesgo de este modo de falla se propone



realizar un análisis tribológico del lubricante cada 2 semanas y así determinar cuándo se debe intervenir el equipo.

El análisis tribológico permite deducir entre otras cosas lo siguiente:

- **Degradación del lubricante:** Mediante el estudio de la degradación del aceite se pueden programar la sustitución del lubricante y así aplazar la sustitución de aceites en buen estado o adelantar la sustitución de aceites deteriorados que no cuentan con la viscosidad suficiente para una lubricación eficaz, de manera que se eviten averías prematuras.
- **Desgaste de componentes de la máquina:** El estudio de los componentes de desgaste férricos y no férricos permite localizar con la mayor antelación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, piñones y otros componentes.

5.4.4. Modo de falla B4 (desgaste)

Los rodamientos se ven sometidos a un desgaste natural por fatiga de las superficies de contacto, sin embargo, gran parte de los motivos de falla se deben a lubricación deficiente o contaminantes presentes dentro del sistema, es por esto que para detectar una posible falla antes de que ocurra se propone realizar mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones cada dos meses, este método es el más adecuado para detectar un mal funcionamiento de manera temprana en el caso de rodamiento de alta velocidad de rotación, sobre los 300 RPM.

Todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla, y se debe programar una revisión del sistema.

5.4.5. Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos

En la tabla N°29 se resumen los costos que engloban la realización de la actividad de mantenimiento propuesta, además se incluye el costo del riesgo anual de la falla cuando no se realiza ningún mantenimiento proactivo con fines comparativos.



Tabla 29 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el espesador de proceso P-5.

Modo de falla	Actividad	Costo de la actividad [USD]	Pérdida de producción por parada [USD/año]	Costo anual total de la actividad [USD]	Riesgo anual si no se realiza ningún mantenimiento proactivo [USD]
A1	Reacondicionamiento cíclico de las canales de descarga de agua.	50	0	50	COSTO MEDIOAMBIENTAL
B1	Reacondicionamiento cíclico conos de descarga de pulpa.	150	0	300	262.463
B3	Análisis del lubricante	15	0	360	1.394.383
B4	Análisis de vibraciones en los descansos del eje	150	0	900	656.535

Si bien la actividad propuesta para el modo de falla A1 tiene un costo mayor al riesgo, esto se justifica debido a su impacto ambiental.

Los costos de la actividad fueron obtenidos de órdenes de trabajo donde se realizaban actividades similares, por lo que deben ser considerados como referencia, nunca como un valor exacto.

5.5. RESULTADO ESTANQUE ACONDICIONADOR N°601

Tabla 30 AMFE estanque acondicionador N°601 parte I.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Acondicionar pulpa de concentrado colectivo para flotación rougher y resto del proceso molibdeno, minimizando la posibilidad de daño a personas o incidente con el medio ambiente. Se deben activar alarmas en caso de emanación de gas sulfídrico y pH se debe mantener entre 8,7-9,5.	A	Pérdida de función.	1	Deflectores de turbulencia erosionados.	Concentraciones de reactivos no son adecuados alertando la sala de control de operaciones. Se deben reemplazar deflectores lo que provoca una detención de 16 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: La mezcla no es adecuada lo que afecta los índices de recuperación. El reemplazo de los deflectores provoca una detención de la producción Cu-Mo.
				2	Hélices con corrosión-erosión.	Concentraciones de reactivos no son adecuados alertando la sala de control de operaciones. Se deben reemplazar hélices lo que provoca una detención de 16 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: La mezcla no es adecuada lo que afecta los índices de recuperación. El reemplazo de las hélices provoca una detención de la producción Cu-Mo.
				3	Reductor con falla por lubricante contaminado.	Se producen ruido fuerte continuo y anormal. Se debe desarmar caja reductora y cambiar componentes con desgaste, lo que provoca un tiempo muerto de 8 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: El desgaste acelerado provoca un aumento en los costos del mantenimiento por un mayor uso de repuestos.
				4	Rodamientos desgastados.	Se generan ruidos producto de vibraciones, además aumenta la temperatura por roce lo que provoca un aumento del riesgo de incendio. Se funden rodamientos por lo que se debe cambiar conjunto eje-rodamientos lo que implica un tiempo de parada de 16 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Estanque acondicionadores deja de funcionar afectando la línea de procesamiento Cu-Mo. Seguridad y ambiente: Existe riesgo de incendio que puede afectar al personal presente.
		B	Fugas de pulpa o reactivos hacia el exterior.	1	Revestimiento erosionado.	Se presentan fugas por el estanque. Se debe reparar estructura de la celda. Su reparación implica una detención de 18 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Carcasa queda en contacto directo con la pulpa, provocando corrosión en el estanque y roturas en su estructura. Su reparación provoca una detención de la línea de procesamiento Cu-Mo.
				2	Líneas de alimentación de reactivos con fugas.	Se presentan manchas en el suelo debajo de la filtración y fugas por mangueras. Entrar en contacto con estos reactivos provoca daños en la piel. Se debe detener alimentación de reactivos y reemplazar tuberías dañadas. Su reparación implica una detención de 1 hora.	Consecuencia no evidente Operacional: Separación Cu-Mo aguas abajo es deficiente. Seguridad y ambiente: Existe riesgo de quemaduras a personas expuestas en el sector de las fugas.

Tabla 31 AMFE estanque acondicionador N°601 parte II.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencia
1	Acondicionar pulpa de concentrado colectivo para flotación Rougher y resto del proceso molibdeno, minimizando la posibilidad de daño a personas o incidente con el medio ambiente. Se deben activar alarmas en caso de emanación de gas sulfídico y pH se debe mantener entre 8,7-9,5.	C	PH fuera de los rangos y alarma de gas sulfídico no se activa en presencia del gas.	1	PH meter descalibrado.	Medidor de pH no señala valores correctos. Se debe calibrar instrumento y comprobar funcionamiento.	Consecuencia no evidente Operacional: La medición de pH será errónea, lo que generará una variabilidad en el pH de la pulpa, afectando en la recuperación de molibdeno en la flotación selectiva.
				2	Falla de los detectores de gas sulfídico.	Detectores de gas sulfídico no señala valores correctos. El gas representa un serio peligro para la salud. Se debe calibrar instrumento.	Consecuencia no evidente Seguridad y ambiente: Gas sulfídico no será detectado en el caso de generarse, lo que provocaría riesgo de muerte a personas cercanas al gas.

Tabla 32 Hoja de información estanque acondicionador N°601.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	A	2	N				N	N	S				Tarea a condición: Inspección visual de las hélices y realización de Spark Test que identifica grietas o discontinuidades en el revestimiento.	Faltante	12 Meses
1	A	3	N				S						Tarea a condición: Análisis de lubricantes.	Faltante	2 Semanas
1	A	4	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Existente	
1	B	1	S	N	N	S	S						Tarea a condición	Existente	
1	B	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	

Tabla 33 Resultado del riesgo anual por modo de falla en estanque acondicionador N°601.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción [USD/hora]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo anual [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,1	16	89.209	6.700	143.405	No
1	A	2	0,8	24	89.209	4.893	2.145.923	No
1	A	3	0,75	8	89.209	1.400	536.307	No
1	A	4	0,5	4	89.209	570	178.704	Si
1	B	1	0,5	18	89.209	14.929	810.350	No
1	B	2	0,1	1	89.209	897	9.010	Si
1	C	1	0,5	0	89.209	126	63	No
1	C	2	0,2	0	89.209	158	31	Si

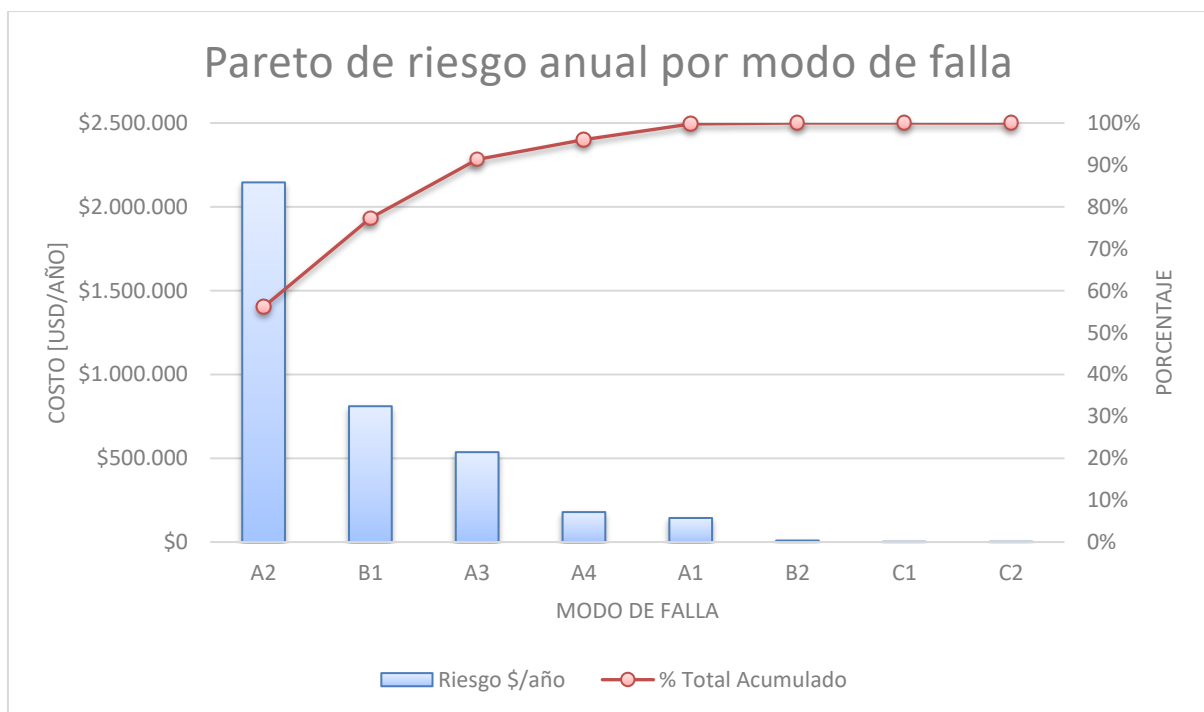


Gráfico 8 Pareto de riesgo anual por modo de falla en estanque acondicionador N°601.



El mayor riesgo observado en el gráfico N°8 es provocado por el modo de falla A2 que representa el daño de las hélices por corrosión y erosión, esto provoca que la pulpa no logre acondicionarse provocando un impacto directo en la recuperación de mineral en las etapas de flotación que le siguen. Siendo el modo de falla con mayor riesgo, no posee un plan de mantenimiento que disminuya sus consecuencias. Por otro lado, existe el modo de falla A3 que tampoco tiene acciones que mitiguen sus consecuencias, y juntos, representan el 70% del riesgo anual por lo que a continuación detallaremos las tareas a realizar.

5.5.1. Modo de falla A2 (corrosión-erosión)

Las hélices son las encargadas de mantener la pulpa en movimiento para su acondicionamiento, por lo que una falla de estas impacta directamente en la recuperación de mineral en etapas posteriores. La falla de este componente se debe principalmente a la corrosión debido a los reactivos que ingresan al estanque. Este equipo también es afectado por fenómeno erosivo corrosivo provocando un adelgazamiento prematuro de la pared del equipo.

El alto costo de reparación de este equipo hace indispensable un estudio de causa raíz (ACR) para mitigar el riesgo. Los datos extraídos de SAP y la información obtenida en terreno no permiten una comprensión clara del modo de falla. Para el presente estudio se consideró como mitigación inspección visual y revisión de continuidad anual del revestimiento mediante un Spark Test que detecta grietas mediante el salto de una chispa en las discontinuidades.

5.5.2. Modo de falla A3 (lubricante contaminado)

El lubricante cumple una función vital en los elementos rotatorios que se encuentran en contacto, ya que forman una película de protección evitando la interacción directa metal-metal y por consiguiente disminuyendo el desgaste, el calor y aumentando la vida útil de los componentes. El acondicionador cuenta con un reductor de una etapa, el cual cumple la función de mantener en movimiento la hélice para un correcto acondicionamiento de la pulpa. Para disminuir el riesgo de este modo de falla se propone realizar un análisis tribológico del lubricante cada 2 semanas y así determinar cuándo se debe intervenir el equipo.

El análisis tribológico permite deducir entre otras cosas lo siguiente:



- **Degradación del lubricante.** Mediante el estudio de la degradación del aceite se puede programar la sustitución del lubricante y así aplazar la sustitución del aceite en buen estado o adelantar la sustitución del aceite deteriorado que no cuenta con la viscosidad suficiente para una lubricación eficaz, de manera que se eviten averías prematuras.
- **Desgaste de componentes de la máquina.** El estudio de los componentes de desgaste férricos y no férricos permite localizar con la mayor antelación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, piñones y otros componentes.

5.5.3. Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos

En la tabla N°34 se resumen los costos que engloban la realización de la actividad de mantenimiento propuesta, además se incluye el costo del riesgo anual de la falla cuando no se realiza ningún mantenimiento proactivo con fines comparativos.

Tabla 34 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el estanque acondicionador N°601.

Modo de falla	Actividad	Costo de la actividad [USD]	Pérdida de producción por parada [USD/año]	Costo anual total de la actividad [USD]	Riesgo anual si no se realiza ningún mantenimiento proactivo [USD]
A2	Inspección visual de las hélices y detección de grietas mediante sparktest	300	89.209	89.509	2.145.923
A3	Análisis del lubricante	20	0	360	536.307

Los costos de la actividad fueron obtenidos de órdenes de trabajo donde se realizaban actividades similares, por lo que deben ser considerados como referencia, nunca como un valor exacto.

5.6. RESULTADO ESTANQUE DE LIXIVIACIÓN N°1

Tabla 35 AMFE estanque de lixiviación N°1.

#	Función del equipo o sistema	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Efecto de Falla	Consecuencias
1	Lixiviar concentrado de molibdeno, minimizando daños a las personas y el medio ambiente. Se deben activar alarmas en caso de producirse gas sulfhídrico y pH se debe mantener entre 1,5-2,0.	A	Pérdida de función.	1	Hélices con corrosión-erosión.	Mayor presencia de fósforo en el concentrado de molibdeno. Se deben reemplazar hélices lo que provoca una detención de 16 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: Lixiviación no es adecuada resultando molibdeno con presencia de fósforo, lo que impacta la calidad del producto.
				2	Reductor con lubricante contaminado.	Se producen ruidos anormales. Se debe desarmar reductor y cambiar componentes con desgaste. Esto que provoca un tiempo muerto de 28 horas.	Consecuencia no evidente Operacional: El desgaste acelerado provoca un aumento en los costos del mantenimiento por un mayor uso de repuestos.
				3	Rodamientos desgastados.	Se producen vibraciones anormales y aumenta la temperatura. Aumenta el riesgo de incendio. Se debe cambiar conjunto eje-rodamientos lo que implica un tiempo de parada de 25 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Estanque acondicionadores deja de funcionar afectando la línea de procesamiento de Mo. Seguridad y ambiente: Existe riesgo de incendio que puede afectar al personal presente.
		B	Fugas de pulpa hacia el exterior.	1	Revestimiento erosionado.	Se presentan fugas por el estanque. Pulpa se encuentra con un pH riesgoso para el ser humano. Se debe reparar estructura de la celda, provocando una detención de 18 horas.	Consecuencia evidente Operacional: Carcasa queda en contacto directo con la pulpa, esto provoca corrosión y roturas en su estructura. Su reparación implica una detención parcial de la línea. Seguridad y ambiente: Se pueden provocar quemaduras en personas expuestas.
				2	Líneas de alimentación de reactivos de H ₂ SO ₄ con fugas.	Se presenta fósforo en el concentrado de molibdeno Existe peligro de quemaduras al entrar en contacto con la fuga. Se debe detener alimentación de reactivos y reemplazar tuberías dañadas.	Consecuencia no evidente Operacional: Lixiviación es deficiente impactando en la calidad del producto final. Seguridad y ambiente: Existe riesgo de quemaduras sobre personas expuestas.
		C	PH fuera de los rangos y alarma de gas sulfhídrico no se activa en presencia del gas.	1	PH meter descalibrado.	Medidor de pH no señala valores correctos. Se debe calibrar instrumento y comprobar funcionamiento.	Consecuencia no evidente Operacional: Las mediciones de pH son erróneas, afectando la recuperación de molibdeno en la flotación selectiva.
				2	Falla del detector de gas sulfhídrico.	Detectores de gas sulfhídrico no señalan valores correctos. El gas no detectado es tóxico. Se debe calibrar instrumento.	Consecuencia no evidente Seguridad y ambiente: Gas sulfhídrico no será detectado, lo que provocaría riesgo de muerte en personas cercanas a la fuente.

Tabla 36 Hoja de decisión estanque de lixiviación N°1.

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Estado	Intervalo inicial
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
1	A	1	N				N	N	S				Tarea de sustitución cíclica: Reemplazar hélices.	Faltante	96 Meses
1	A	2	N				S						Tarea a condición: Análisis de lubricantes.	Faltante	2 Semanas
1	A	3	S	S			S						Tarea a condición	Existente	
1	B	1	S	S			S						Tarea a condición	Existente	
1	B	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	1	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	
1	C	2	N				N	N	N	S			Tarea de búsqueda de fallas	Existente	

Tabla 37 Resultado del riesgo anual por modo de falla en estanque de lixiviación N°1.

Referencia de información			Frecuencia de eventos por año [fallas/año]	Tiempo Muerto [hr]	Impacto en la Producción [USD/hora]	Costos directos por falla [USD/falla]	Riesgo [USD/año]	Afecta HSEC
F	FF	FM						
1	A	1	0,1	16	89.209	6.700	143.405	No
1	A	2	1	4	89.209	4.893	361.731	No
1	A	3	0,75	8	89.209	1.400	536.307	Si
1	A	4	0,5	4	89.209	570	178.704	No
1	B	1	0,5	18	89.209	14.929	810.350	Si
1	B	2	0,1	1	89.209	897	9.010	Si
1	C	1	0,5	0	89.209	126	63	No
1	C	2	0,2	0	89.209	158	31	Si

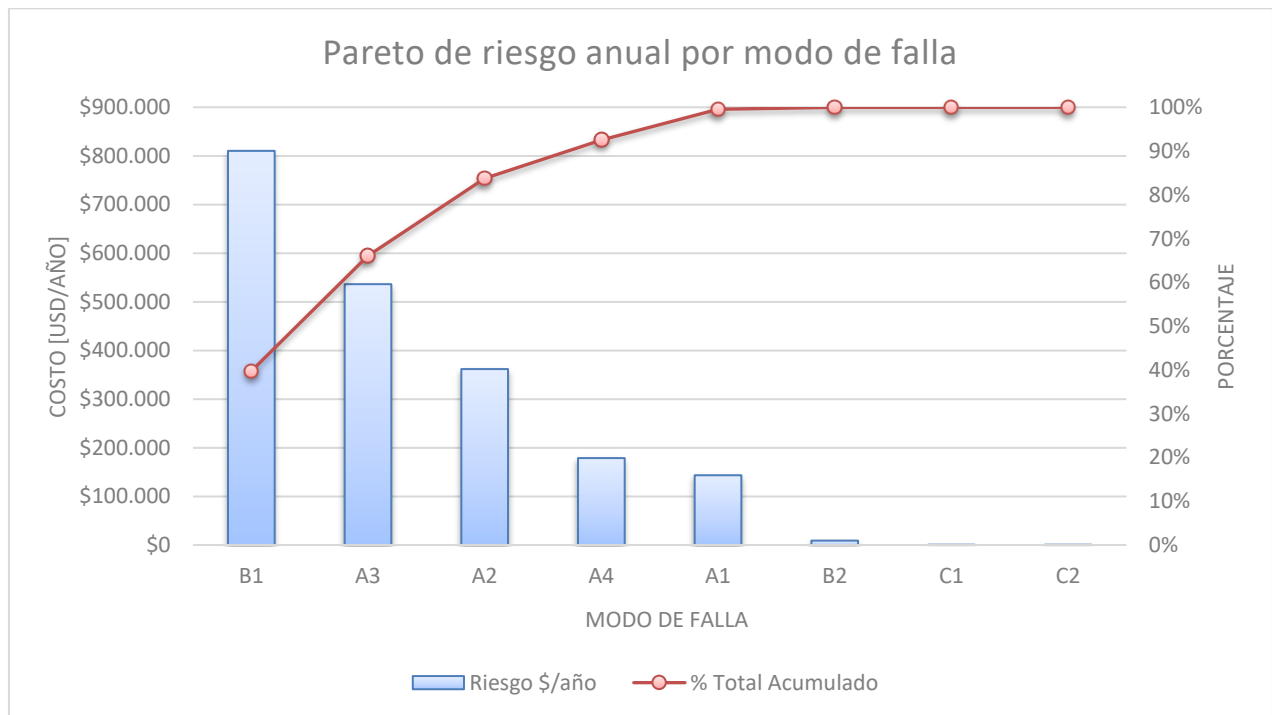


Gráfico 9 Pareto de riesgo anual por modo de falla en estanque de lixiviación N°1.



El mayor riesgo observado en el gráfico N°9 es provocado por el modo de falla B1 que representa el daño en el estanque afectado por corrosión debido a falla del revestimiento. El contacto con este electrolito es nocivo para la salud por tratarse de electrolitos ácidos. Este modo de falla posee una tarea a condición existente que mitiga sus consecuencias. Por otro lado, existen los modos de falla A1 y A2 que no tienen acciones que mitiguen sus consecuencias, y juntos representan el 34% del riesgo anual. Las tareas a realizar son las siguientes:

5.6.1. Modo de falla A1 (corrosión-erosión)

Las hélices son las encargadas de mantener la pulpa en movimiento, por lo que una falla de estas impacta directamente en la calidad del concentrado de molibdeno debido a la incapacidad de eliminar el fósforo contenido. La avería de este componente se debe principalmente a la corrosión debido a los reactivos que ingresan al estanque, además la erosión presente acelera el proceso de adelgazamiento por corrosión.

No existe ningún mantenimiento a condición adecuado para evaluar la hélice en operación. El alto costo de reparación de este equipo hace indispensable un estudio de causa raíz (ACR) para mitigar el riesgo. Los datos extraídos de SAP y la información obtenida en terreno no permiten una comprensión clara del modo de falla. Para el presente estudio se consideró como mitigación una sustitución cíclica del componente cada 12 meses en base al registro histórico de cambio por falla. La sustitución cíclica permite adaptar el cambio de la hélice en los momentos en que la demanda del equipo sea menor o cuando exista una parada de planta programada. La pérdida de vida útil se ve mitigada por el riesgo que supone una falla no prevista.

5.6.2. Modo de falla A2 (lubricante contaminado)

El lubricante cumple una función vital en los elementos rotatorios que se encuentran en contacto, ya que forman una película de protección evitando la interacción directa metal-metal y por consiguiente disminuyendo el desgaste, el calor y aumentando la vida útil de los componentes. El estanque de lixiviación cuenta con un reductor de una etapa, el cual cumple la función de mantener en movimiento la hélice para una correcta lixiviación de la pulpa. Para disminuir el riesgo de este modo de falla se propone realizar un análisis tribológico del lubricante cada 2 semanas y así determinar cuándo se debe intervenir el equipo.

El análisis tribológico permite deducir entre otras cosas lo siguiente:

- **Degradación del lubricante.** Mediante el estudio de la degradación del aceite se puede programar la sustitución del lubricante y así aplazar la sustitución del aceite en buen estado o adelantar la sustitución del aceite deteriorado que no cuenta con la viscosidad suficiente para una lubricación eficaz, de manera que se eviten averías prematuras.
- **Desgaste de componentes de la máquina.** El estudio de los componentes de desgaste férricos y no férricos permite localizar con la mayor antelación el desgaste de cojinetes, rodamientos, engranajes, obturaciones y otros componentes.

5.6.3. Estimación de costos para los planes de mantenimiento propuestos

En la tabla N°38 se resumen los costos que engloban la realización de la actividad de mantenimiento propuesta, además se incluye el costo del riesgo anual de la falla cuando no se realiza ningún mantenimiento proactivo con fines comparativos.

Tabla 38 Costos para las actividades de mantenimiento propuestas en el estanque acondicionador N°601.

Modo de falla	Actividad	Costo de la actividad [USD]	Pérdida de producción por parada [USD/año]	Costo anual total de la actividad [USD]	Riesgo anual si no se realiza ningún mantenimiento proactivo [USD]
A1	Sustitución cíclica de las hélices.	6700	89.202	96.572	143.405
A2	Análisis del lubricante	15	0	360	361.731

Los costos de la actividad fueron obtenidos de órdenes de trabajo donde se realizaban actividades similares, por lo que deben ser considerados como referencia, nunca como un valor exacto.



5.7. SEGURIDAD

Para cada uno de los planes de mantenimientos obtenidos, se deben establecer las medidas de seguridad que permitan realizar las actividades sin imprevistos. Las barreras mínimas contra el peligro que debe poseer cada trabajador son:

- Zapatos de seguridad.
- Lentes de protección.
- Chaleco reflectante.
- Casco.
- Mascarilla para polvo en suspensión.
- Tapones para oídos.
- Detectores de oxígenos y gas sulfhídrico.

Junto con lo anterior se debe realizar un análisis de riesgo de la tarea (ART) que evalúa los riesgos presentes en la actividad mediante la identificación de los peligros y la condición psicológica del trabajador. En la hoja de ART se deben ingresar los procedimientos, los permisos de trabajo en el área, además de indicar si se dispone de los equipos y herramientas en buen estado.

Seguido de esto se deben identificar los peligros que se detallan a continuación:

- Trabajo con equipo energizado.
- Caída distinto nivel.
- Exposición a cargas suspendidas.
- Contacto con energías peligrosas por liberación controlada.
- Caída de rocas.
- Incendio.
- Contacto con ácido sulfúrico.
- Exposición a explosivos.
- Atrapamiento con piezas móviles.
- Conducción insegura de vehículos.
- Exposición a atmósferas peligrosas.
- Caída de objetos desde distinto nivel.
- Exposición a polvo con contenido de sílice.
- Exposición a arsénico inorgánico.

Dentro de estos peligros, existen 2 en los que se debe llenar una hoja anexa en caso de estar en presencia de ellos. Estos peligros son exposición a cargas suspendidas y trabajo en equipo energizados. Para ambos se debe hacer un análisis de riesgo previo a efectuar las operaciones.

Es importante mencionar que en caso de trabajar en altura (más de 1,8 [m]), se debe seleccionar el arnés adecuado dentro de dos tipos, de posicionamiento y caída. Aunque actualmente existen del tipo mixto, que están desplazando los anteriores.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizaron seis equipos críticos pertenecientes a la planta de molibdeno mediante metodología RCM, y en total se identificaron 47 modos de fallas de los cuales 15 no poseen una actividad de mantenimiento proactivo que disminuya o elimine sus consecuencias. En el caso de la celda Rougher, existen 16 celdas iguales trabajando en conjunto a las cuales se deben extrapolar las actividades proactivas obtenidas, de igual forma para el estanque de lixiviación que trabaja de forma paralela con 2 estanques de lixiviación y la bomba de proceso que también es redundante con una bomba homóloga. En el gráfico N°10 se visualiza el resultado obtenido.

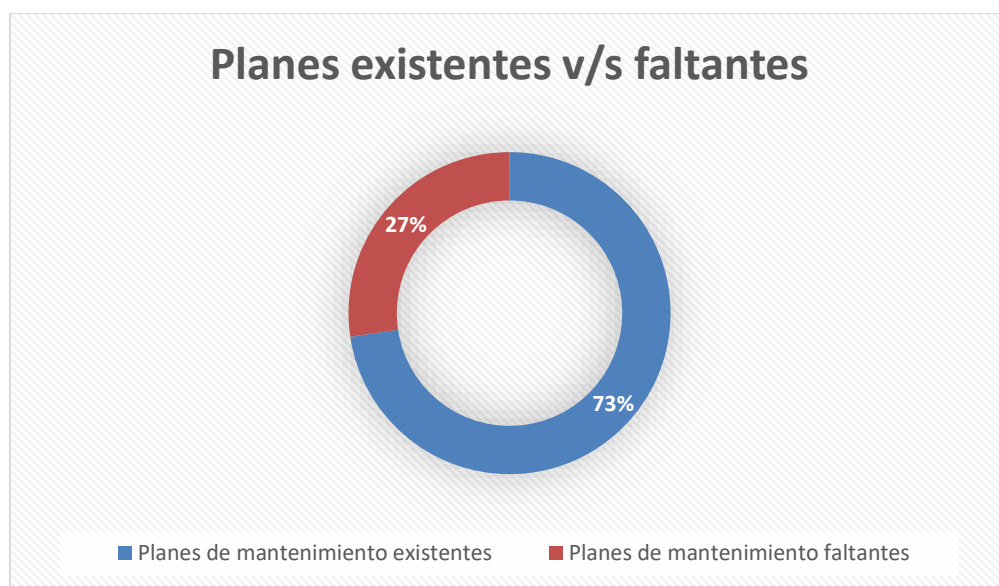


Gráfico 10 Planes de mantenimiento existentes v/s faltantes.

El riesgo anual de los modos de falla analizados suman un total de \$53.070.000 USD, de los cuales \$25.100.000 corresponden al riesgo de planes de mantenimiento inexistentes, que a su vez comparativamente representan el 0,92% del EBITDA anual de la compañía. En el gráfico N°11 se visualizan los porcentajes que representa cada grupo.

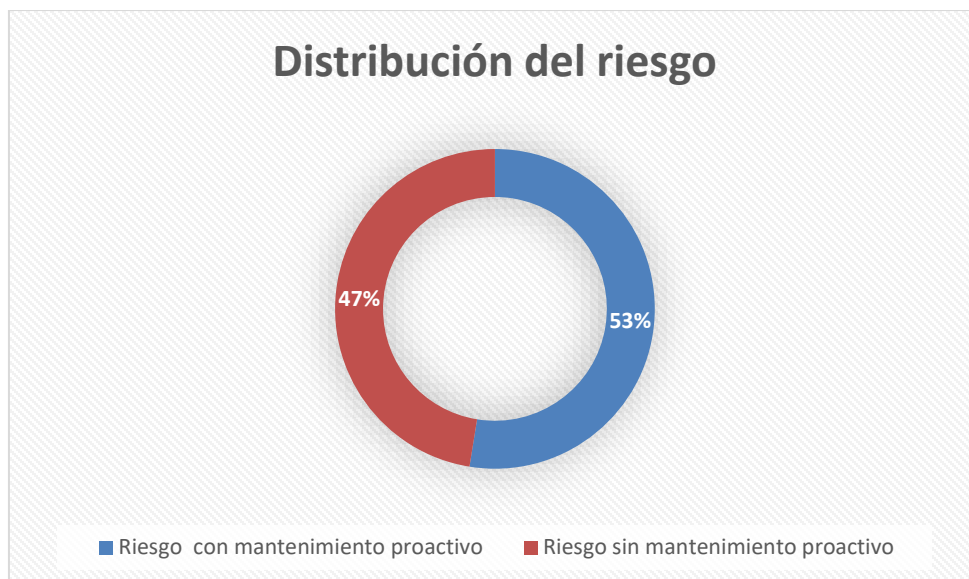


Gráfico 11 Distribución del riesgo en planes de mantenimiento existentes v/s faltantes.

Por otro lado, se debe destacar que de los 67 planes de mantenimiento faltantes, 16 tienen consecuencias que puede afectar la salud, la seguridad, el medio ambiente o las comunidades (HSEC), con mayor o menor riesgo.

Cabe destacar que gran parte de los modos de falla con baja frecuencia de ocurrencia no se encuentran mitigados en los planes de mantenimiento actuales de la planta de Codelco en estudio, lo que deja entrever que el plan matriz actual existente en la planta solo mitiga las consecuencias de las fallas que ocurren con mayor frecuencia. El estado del arte en mantenimiento no está solo determinado por la frecuencia de fallas, sino que también por las consecuencias de las mismas.

Tabla 39 Resumen del número de planes de mantenimiento faltantes y existentes por equipo.

Equipo	Plan de mantenimiento existente	Plan de mantenimiento faltante	Total
Bomba centrífuga Vulco N°547	7	0	7
Celda de flotación Metso RCS10 N°663	5	4	9
Filtro Andritz	4	3	7
Espesador de proceso P-5	5	4	9
Estanque acondicionador N°601	6	2	8
Estanque de lixiviación N°1	5	2	7



Como se puede observar en la tabla N°39 es espesador de proceso P-5 es el equipo con mayor cantidad de actividades proactivas faltante, junto con la celda de flotación Rougher N°663. En el caso del espesador se puede explicar por el bypass presente capaz de saltarse el equipo en caso de falla, esto provoca que no sea gran problema trabajar con mayor cantidad de fallas, sin embargo se debe considerar que al saltar el espesador el concentrado llegará a la planta de filtro y secado con mayor cantidad de humedad, provocando una sobre exigencia de los equipos aguas abajo, lo que a su vez provoca un mayor uso de repuestos y una demora en secar el concentrado de cobre.

En relación con la celda de flotación Rougher, la cantidad de planes de mantenimiento faltantes se puede explicar por los cuatro bancos que existen trabajando en paralelo, donde la detención de uno no afecta los otros equipos. Sin embargo, se debe considerar que las metas productivas son cada vez más ambiciosas y el desafío mayor debido a la constante caída de la ley del mineral, por lo que se vuelve necesario mantener una alta disponibilidad en todas sus celdas.

El estanque acondicionador y de lixiviación son los que poseen la menor cantidad de actividades proactivas faltantes, lo que se explica por el peligro ambiental y de seguridad que representan estos procesos al trabajar con ácido sulfúrico y otros reactivos.

El costo total de las actividades de mantenimiento proactivas propuestas suman un total anual de \$213.000 USD versus los \$23.500.000 USD que corresponden al riesgo anual por no realizar ningún mantenimiento proactivo. El costo calculado de las actividades de mantenimiento considera las situaciones más desfavorables, ya que en la gran mayoría de los casos los mantenimientos se programan en días de menor demanda o cuando existen paradas de plantas programadas.



7. RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de este trabajo en la división El Teniente de Codelco, se encontraron distintas oportunidades de mejora, las cuales se detallan a continuación:

- La planta de molienda convencional no fue analizada dentro de los alcances de esta investigación debido a que no representa el mayor riesgo en el contexto actual de la planta concentradora, sin embargo, sus indicadores muestran una oportunidad de mejora en sus procesos. Si bien, esta planta no es tratada de forma crítica debido a la cantidad de molinos convencionales que se encuentran trabajando en paralelo, su frecuencia de falla es alta impactando directamente en los costos de la planta.
- Se recomienda implementar los planes de mantenimiento propuestos en el análisis de confiabilidad, es especial los que tienen relación con la seguridad y la integridad ambiental, para así mantenerse alineados con sus políticas de cero daños y evitar los costos asociados en caso de producirse la falla.
- Debido a que las metas de productividad y costos cambian año a año, los planes de mantenimiento no solo se deben revisar si conversan al contexto operacional, sino que también deben estar en proceso de mejora continua.
- SAP PM incorpora dentro de sus avisos de mantenimiento una pestaña donde se pueden indicar los síntomas y causas de una falla. Dentro de los avisos creados para la planta de molibdenita se detectó la inexistencia de esta información, lo que dificulta poder determinar qué tipo de mantenimiento implementar para el manejo de la falla. Se recomienda capacitar a los mantenedores y/o jefe de mantención del área para que ingrese este tipo de información en los avisos creados para cada avería o contar con especialista que complete la información por tratarse de datos estratégicos para el correcto diseño de los planes de mantenimiento.
- SAP permite distinguir entre las órdenes de trabajo correspondientes a mantenimientos planificados y no planificados, dentro de los no planificados existen muchas actividades ejecutadas que corresponden a mantenimientos proactivos que no se encuentran incluidos en el plan matriz. Por lo que se deben integrar todas estas actividades como mantenimiento planificado y asegurar su correcta programación junto con los recursos necesarios para realizar estas tareas.

8. CONCLUSIONES

En el análisis a los equipos críticos de la planta de obtención de molibdenita permitió determinar que un 27% de sus modos de falla no contaban con planes de mantenimiento proactivos y casi el 24% de este, incluye dentro de sus consecuencias, un riesgo ambiental o impacto en la seguridad de las personas.

Lo mencionado en el párrafo precedente logra ser mitigado a través de la metodología implementada, aumentando la confiabilidad de la planta.

El mantenimiento centrado en confiabilidad tiene la cualidad de enfocar sus actividades de mantenimiento a las consecuencias que implica su modo de falla y no en sus efectos, de esta forma se evalúa el riesgo real de la falla definiendo las actividades proactivas más adecuadas. Además, al definir el contexto en el cual se encuentra inmerso el proceso productivo, se crean planes de mantenimiento que se alinean con las necesidades del negocio, enfocando los recursos a equipos críticos que impacten en mayor medida en el EBITDA de la compañía.

Cabe destacar que al realizar el análisis de los modos de falla, los principales procesos de deterioro que provocan la falla funcional del activo, están asociados a fenómenos de corrosión erosión, desgaste y fatiga mecánica.

Por otro lado, el equipo técnico requerido para realizar estos análisis obliga la coexistencia de las distintas visiones en la definición de los planes de mantenimiento, satisfaciendo los requerimientos de calidad, seguridad, ambiente, operaciones y mantenimiento. Esto no sólo genera la correcta determinación de las tareas a realizar, si no que fomenta el entendimiento de los distintos pilares que se deben alinear para cumplir con las metas de la empresa.

El análisis de criticidad viene a dar solución al problema que provoca el tener recursos escasos y necesidades ilimitadas, para esto se identifican los equipos de mayor riesgo ambiental, seguridad, costos, impacto en la producción, mantenibilidad y frecuencia de falla. De esta forma se obtienen los equipos que mayor influencia tienen en la producción, por lo cual al enfocar la mayor parte de los recursos en estos activos se estará logrando aumentar la confiabilidad, disminuir los costos, aumentar la vida útil, aumentar la calidad del producto y eliminar el impacto en el HSEC.

Una desventaja del modelo se basa en el análisis funcional que deja fuera fallas que puedan ser provocadas por equipos que se encuentran en los alrededores, como es el caso de incendio en activos cercanos. Una manera de dar respuesta a este problema es realizar el análisis en sistemas



que abarquen gran parte del proceso, sin embargo, existe el riesgo de obviar modos de fallas importantes. Para evitar lo anterior se debe definir correctamente el nivel de análisis en el AMFE, ya que debe considerar los modos de falla con la profundidad necesaria para obtener un plan de mantenimiento que prevenga sus consecuencias en forma equilibrada, es decir, no se puede gastar recursos en una falla de bajo riesgo (fundamental la experiencia del equipo RCM).

Además, es importante destacar que, para la correcta aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad, se requiere información de calidad, registros históricos y personal técnico experto. Por lo que aplicar el método en compañías que no tienen un correcto manejo de la información requiere varios ciclos de mejora continua para definir planes de mantenimiento con baja incertidumbre. Por esto, la compañía debe, como primer paso, tener un sólido modelo de gestión de mantenimiento (MGM) que defina en sus pilares los tratamientos de los avisos, generando órdenes de trabajo que incluyan recursos, costos y motivos.

La definición del contexto, el enfoque de recursos en los activos críticos, la definición de funciones con sus modos de fallas y consecuencias, además de la importancia entregada a los factores de seguridad y medio ambiente, aseguran una correcta elección de estrategias de mantenimiento e impactan de manera positiva en el EBITDA de la compañía.



REFERENCIAS

- [1] Carlos Parra & Adolfo Crespo, eds. 2015, Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos, Sevilla, España, segunda edición.
- [2] John Moubray, eds. 1997, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Asheville, North Carolina, USA, segunda edición.
- [3] Rodrigo Pascual, eds. 2005, El Arte de Mantener, Santiago, Chile, primera edición.
- [4] Codelco, Procedimiento control operacional planta molibdeno, Rancagua, Chile.
- [5] Codelco, Procedimiento control operacional planta molienda semiautógena, Rancagua, Chile.
- [6] Codelco, Procedimiento control operacional planta chancado primario y secundario, Rancagua, Chile.
- [7] Codelco, Procedimiento control operacional planta molienda convencional, Rancagua, Chile.
- [8] Codelco, Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA), Rancagua, Chile.
- [9] José Aguilar & Rocío Torres & Diana Magaña, eds. 2010, Análisis de modos de falla efectos y criticidad para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad, Saltillo, México, Volumen 25.
- [10] Andritz, Manual operación filtro andritz, Brasil.
- [11] Metso, Manual operación celdas de flotación Metso RCS, Chile.
- [12] EIMCO, Manual operación espesadores de proceso EIMCO, USA.
- [13] Vulco, Manual operación bombas centrífugas Vulco, Chile.



ANEXOS

ANEXO A: EQUIPOS PLANTA MOLIBDENITA

Bombas centrífugas pertenecientes a la planta de molibdenita

Tabla 40 Bombas planta de molibdeno.

EQUIPO	MARCA	TAMAÑO	DÓNDE	POTENCIA
BBA 001	ASH VULCO SRC	6X6	TITANIC	50 [HP]
BBA 002	ASH VULCO SRC	5x4	DOR OLIVER	50 [HP]
BBA 004	ASH VULCO SRC	6x6	DOR OLIVER	40 [HP]
BBA 007	ASH VULCO SRC	8x8	COLAS 1ª LIMPIEZA	50 [HP]
BBA 008	ASH VULCO SRC	8x8	COLAS 1ª LIMPIEZA	50 [HP]
BBA 009	G. ELECTRIC		BBA POZO COLAS 1ª LIMPIEZA	20 [HP]
BBA 010	ASH VULCO SRC	6x6	CTDOS FULLER	50 [HP]
BBA 012	METSO	5x4	COLAS FULLER	125 [HP]
BBA 062	ASH VULCO SRC	10x10	CAJON CONCENTRADOS ROUGHER	150 [HP]
BBA 063	ASH VULCO SRC	8x8	CAJON CONCENTRADOS ROUGHER	200 [HP]
BBA.064	ASH VULCO SRC	10x10	CAJON CONCENTRADOS ROUGHER	150 [HP]
BBA 066	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON COLAS 2ª LIMP	30 [HP]
BBA 067	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON COLAS 2ª LIMP	30 [HP]
BBA 082	ASH VULCO SRC	4x5	P 6	20 [HP]
BBA 083	ASH VULCO SRC	4x5	P 6	30 [HP]
BBA 098	ASH VULCO SRC	4x5	P 7	15 [HP]
BBA 099	ASH VULCO SRC	4x5	P 7	15 [HP]
BBA 112	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON ALIMENTACION SCAVENGER	15 [HP]
BBA 113	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON ALIMENTACION SCAVENGER	15 [HP]
BBA 200	SALA VASA G-120	4X4	BBA POZO P7/ P8	20 [HP]
BBA 201	SALA VASA G-120	4X4	BBA POZO P7/ P6	15 [HP]
BBA 205	SALA VASA G-120	4X4	pozo (P2/P3)	15 [HP]
BBA 206	SALA VASA G-120	4X4	pozo (P4)	15 [HP]
BBA 241	SALA VASA G-120	4X4	BBA POZO CAJON SCAVENGER	15 [HP]
BBA 301	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON ALIMENTACION SCAVENGER	125 [HP]



BBA 302	ASH VULCO SRC	6x6	CAJON ALIMENTACION SCAVENGER	75 [HP]
BBA 305	ASH VULCO SRC	4x3	COLUMNAS MOLY	20 [HP]
BBA 306	ASH VULCO SRC	4x3	COLUMNAS MOLY	20 [HP]
BBA 309	ASH VULCO SRC	6x6	P 7	25 [HP]
BBA 310	ASH VULCO SRC	6x6	P 7	25 [HP]
BBA 315	ASH VULCO SRC	4x3	COLUMNAS MOLY	15 [HP]
BBA 316	ASH VULCO SRC	4x3	COLUMNAS MOLY	15 [HP]
BBA 323	SALA VASA G-120	4X4	pozo Columnas	50 [HP]
BBA 324	SALA VASA G-120	4X4	pozo Columnas	50 [HP]
BBA 377	ASH VULCO SRC	6x6	P 2	150 [HP]
BBA 378	ASH VULCO SRC	6x6	P 2	150 [HP]
BBA 503	ASH VULCO SRC	8x8	P 1	125 [HP]
BBA 504	ASH VULCO SRC	8x8	P 1	125 [HP]
BBA 535	ASH VULCO SRC	6x6	SCAVENGER	60 [HP]
BBA 536	ASH VULCO SRC	8x8	SCAVENGER	75 [HP]
BBA 533	ASH VULCO SRC	8x8	P 4	125 [HP]
BBA 534	ASH VULCO SRC	8x8	P4	125 [HP]
BBA 547	ASH VULCO SRC	10x10	TITANIC	150 [HP]
BBA 548	ASH VULCO SRC	10x10	TITANIC	150 [HP]
BBA 591	ASH VULCO SRC	8x8	TUNEL P 5	75 [HP]
BBA 592	ASH VULCO SRC	8x8	TUNEL P 5	75 [HP]
BBA 619	ASH VULCO SRC	4x3	ALIMENTACION AL FILTRO 602	15 [HP]
BBA 623	ASH VULCO SRC	4x3	DESCARGA P 3	20 [HP]
BBA 651	ASH VULCO SRC	4x3	DESCARGA P 8	20 [HP]
BBA 657	ASH VULCO SRC	6x6	324-T	30 [HP]
BBA 658	ASH VULCO SRC	6x6	324-T	30 [HP]
BBA 660	ASH VULCO SRC	4x3	DESCARGA MOLINO	10 [HP]
BBA 661	ASH VULCO SRC	4x3	DESCARGA MOLINO	10 [HP]
BBA 12-A	ASH VULCO SRH	4x3	DESCARGA LIXIVIACIÓN	
BBA 12-B	ASH VULCO SRH	4x3	DESCARGA LIXIVIACIÓN	



Equipos de flotación pertenecientes a la planta de molibdenita

Tabla 41 Equipos de flotación planta de molibdeno.

Banco N°	Circuito	Fabricante	Modelo	Capacidad	Tamaño	Arreglo	N° Celdas	Recibe desde	Enviado hacia
663	Rougher	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Estanque acondicionador	Flotación 1° limpieza
664	Rougher	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Estanque acondicionador	Flotación 1° limpieza
665	Rougher	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Estanque acondicionador	Flotación 1° limpieza
666	1° Limpieza	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Flotación Rougher	Espesador P-2
667	1° Limpieza	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Flotación Rougher	Espesador P-2
668	2° Limpieza	Metso	RCS 10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Espesador P-2	Espesador P-6
669	Scavenger	Metso	RCS 5	4,95 [m3]	2 x 2,08 [m]	2 / 2 / 2	6	Colas flotación 3° Limpieza	Espesador P-6
670	5° Limpieza	Metso	DR24	1,42 [m3]	1,14 x 1,46 [m]	2 / 3 / 3	8	Flotación 4° Limpieza	Espesadores P-7 / P-8
671	5° Limpieza	Metso	DR24	1,42 [m3]	1,14 x 1,46 [m]	2 / 3 / 3	8	Flotación 4° Limpieza	Espesadores P-7 / P-8
672	Rougher	Outotec	CellTank-10	10,05 [m3]	2,6 x 2,45 [m]	2 / 2 / 2	6	Estanque acondicionador	Flotación 1° limpieza



Espesadores pertenecientes a la planta de molibdenita

Tabla 42 Espesadores de proceso planta de molibdeno.

Espesador	Marca	Reductor	Diámetro [ft]	Capacidad [m ³]	Recibe Desde	Enviado Hacia
P-01	EIMCO	C108BX2	200'	8600	Flotación Colectiva de los procesos SAG y Convencional	Estanque Acondicionador
P-02	EIMCO	C60P-2	150'	6450	Espeador P-03 y colas flotación 1° limpieza	Flotación 2° Limpieza
P-03	EIMCO	C60P-2	80'	3440	Aguas turbias	Espeador P-02
P-04	EIMCO	C108BX2	200'	8600	Flotación Colectiva y colas flotación de Limpieza	Estanque Acondicionador
P-05	EIMCO	C108BX2	200'	8600	Flotación Rougher	Filtro y secado de cobre
P-06	EIMCO	W36PLDM	30'	1290	Flotación 2° Limpieza	Flotación columnar
P-07	EIMCO	W36PLDM	30'	1290	Flotación 5° Limpieza	Lixiviación de concentrado de molibdeno
P-08	EIMCO	W36PLDM	30'	1290	Flotación 5° Limpieza	Lixiviación de concentrado de molibdeno

Filtro perteneciente a la planta de molibdenita

Tabla 43 Especificaciones técnicas Filtro Andritz planta de molibdeno.

FILTRO DE MEMBRANAS ANDRITZ	
Modelo:	SE1200MZD15
Capacidad [m ³]:	0.589
Tamaño [m]:	L: 6.8; Ancho: 1.7; Altura: 2.35
N° de Placas:	7 de diafragma; 6 rígidas; 2 medias placas.
Recibe desde:	Espeadores P7 o P-8 mediante impulsión de bombas Vulco sello húmedo A-12 y B-12.
Envía hacia:	Envasado producto final.
Producto:	Concentrado pulpa molibdeno con humedad menor al 15%.



ANEXO B: ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Tabla 44 Valores análisis de criticidad planta de molibdeno.

Nº	Equipo	Impacto en la producción	Flexibilidad operacional	Costes de mantenimiento	Impacto en la salud y seguridad	Impacto en el medio ambiente y comunidad	Total	Indicador de consecuencia	Indicador frecuencia de falla	Puntaje Criticidad	Tipo de Criticidad
1	Flotación Rougher Banco N°1	4,0	0,5	5,0	12,0	10,0	29,0	5,0	5	25	C. ALTA
2	Flotación Rougher Banco N°2	4,0	0,5	5,0	12,0	10,0	29,0	5,0	5	25	C. ALTA
3	Flotación Rougher Banco N°3	4,0	0,5	5,0	12,0	10,0	29,0	5,0	5	25	C. ALTA
4	Flotación Rougher Banco N°4	4,0	0,5	5,0	12,0	10,0	29,0	5,0	5	25	C. ALTA
5	Flotación 1° Limpieza Banco N°1	4,0	0,1	2,0	12,0	10,0	24,4	4,0	4	16	C. MEDIA
6	Flotación 1° Limpieza Banco N°2	4,0	0,1	2,0	12,0	10,0	24,4	4,0	4	16	C. MEDIA
7	Flotación 2° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	4	16	C. MEDIA
8	Flotación columnar 3° Limpieza Banco N°301	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
9	Flotación columnar 3° Limpieza Banco N°302	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
10	Flotación columnar 3° Limpieza Banco N°303	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
11	Flotación columnar 4° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
12	Flotación 5° Limpieza Banco N°1	4,0	1,0	5,0	12,0	10,0	31,0	5,0	3	15	C. MEDIA



Trabajo de titulación
Ingeniería Civil Mecánica

13	Scavenger	4,0	1,0	1,0	12,0	10,0	27,0	4,0	3	12	C. MEDIA
14	Espesador P1	12,0	0,1	8,0	30,0	28,0	67,2	6,0	3	18	C. MEDIA
15	Espesador P2	4,0	0,5	8,0	30,0	28,0	68,0	6,0	3	18	C. MEDIA
16	Espesador P3	4,0	0,5	8,0	30,0	28,0	68,0	6,0	3	18	C. MEDIA
17	Espesador P4	12,0	0,1	8,0	30,0	28,0	67,2	6,0	3	18	C. MEDIA
18	Espesador P5	12,0	1,0	10,0	30,0	28,0	80,0	6,0	5	30	C. ALTA
19	Espesador P6	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	4	16	C. MEDIA
20	Espesador P7	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	4	16	C. MEDIA
21	Espesador P8	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	4	16	C. MEDIA
22	Cajón distribuidor Rougher	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
23	Cajón distribuidor 1° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
24	Cajón distribuidor 3° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
25	Cajón distribuidor 5° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	3	12	C. MEDIA
26	Repartidor Rougher	4,0	0,1	5,0	12,0	10,0	27,4	4,0	2	8	C. MEDIA



Trabajo de titulación
Ingeniería Civil Mecánica

27	Repartidor 1° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	2	8	C. MEDIA
28	Repartidor 3° Limpieza	4,0	0,1	1,0	12,0	10,0	23,4	4,0	2	8	C. MEDIA
29	Estanque acondicionador	4,0	0,1	5,0	12,0	40,0	57,4	6,0	5	30	C. ALTA
30	Estanque Mezclador	8,0	0,1	5,0	12,0	40,0	57,8	6,0	4	24	C. ALTA
31	Estanque de lixiviación N°1	8,0	0,5	2,0	40,0	32,0	78,0	6,0	5	30	C. ALTA
32	Estanque de lixiviación N°2	8,0	0,5	2,0	40,0	32,0	78,0	6,0	5	30	C. ALTA
33	Filtro Andritz	4,0	0,5	5,0	30,0	28,0	65,0	6,0	5	30	C. ALTA
34	Bomba 503	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
35	Bomba 504	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
36	Bomba 533	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
37	Bomba 534	8,0	1,0	5,0	0,0	10,0	23,0	4,0	5	20	C. ALTA
38	Bomba 547	8,0	1,0	5,0	0,0	10,0	23,0	4,0	5	20	C. ALTA
39	Bomba 548	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
40	Bomba 001	2,0	0,5	1,0	0,0	10,0	12,0	3,0	3	9	C. MEDIA



Trabajo de titulación
Ingeniería Civil Mecánica

42	Bomba 063	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
43	Bomba 062	8,0	1,0	2,0	0,0	10,0	20,0	4,0	4	16	C. MEDIA
44	Bomba 623	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
45	Bomba 624	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	4	12	C. MEDIA
46	Bomba 378	4,0	1,0	2,0	0,0	10,0	16,0	3,0	4	12	C. MEDIA
47	Bomba 377	4,0	1,0	2,0	0,0	10,0	16,0	3,0	4	12	C. MEDIA
48	Bomba 067	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
49	Bomba 066	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	4	12	C. MEDIA
50	Bomba 082	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	4	12	C. MEDIA
51	Bomba 083	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	4	12	C. MEDIA
52	Bomba 535	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	2	6	C. MEDIA
53	Bomba 536	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	2	6	C. MEDIA
54	Bomba 306	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
55	Bomba 305	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA



Trabajo de titulación
Ingeniería Civil Mecánica

56	Bomba 315	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
57	Bomba 316	4,0	1,0	2,0	0,0	10,0	16,0	3,0	3	9	C. MEDIA
58	Bomba 660	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
59	Bomba 661	8,0	1,0	1,0	0,0	10,0	19,0	3,0	3	9	C. MEDIA
60	Bomba 651	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
61	Bomba 309	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	3	9	C. MEDIA
62	Bomba 591	8,0	1,0	5,0	0,0	10,0	23,0	4,0	4	16	C. MEDIA
63	Bomba 592	8,0	1,0	5,0	0,0	10,0	23,0	4,0	4	16	C. MEDIA
64	Bomba 310	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	4	12	C. MEDIA
65	Bomba A-12	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	1	3	C. BAJA
66	Bomba B-12	4,0	1,0	1,0	0,0	10,0	15,0	3,0	1	3	C. BAJA
67	Bomba de pozo 200	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	3	3	C. BAJA
68	Bomba de pozo 201	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	3	3	C. BAJA
69	Bomba de pozo 202	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA



Trabajo de titulación
Ingeniería Civil Mecánica

70	Bomba de pozo 204	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA
71	Bomba de pozo 205	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA
72	Bomba de pozo 206	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	3	3	C. BAJA
73	Bomba de pozo 207	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA
74	Bomba de pozo 210	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA
75	Bomba de pozo 211	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA
76	Bomba de pozo 241	4,0	0,1	1,0	0,0	0,0	1,4	1,0	4	4	C. MEDIA



ANEXO C: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS

Celdas de flotación Rougher

En lo que respecta a los Rougher, estos son celdas de flotación convencional, su función es la separación, en cantidad y calidad, de la molibdenita del concentrado de cobre proveniente de la flotación colectiva de los procesos SAG y Convencional. Son marca Metso RCS 10 de 10,05 [m³] de capacidad. Cada mecanismo de flotación es de tipo suspendido e incluye una caja de eje de rodamientos fabricada de acero, con rodamientos de bolas o rodillos cónicos sellados por arriba y abajo, que soporta un eje hueco de acero rotando en un standpipe de acero dulce. La transmisión se realiza a través de poleas y fajas (correas) en “V” y un motor eléctrico montado verticalmente.

El difusor, el cual está cubierto en poliuretano de alto grado alrededor de un esqueleto fabricado de acero, es atornillado a la parte inferior del standpipe. Un impulsor con 8 aspas está también cubierto en poliuretano de alto grado alrededor de un esqueleto fabricado de acero y es atornillado al reborde inferior del eje de la transmisión. Una junta rotativa es instalada en el extremo superior del eje para admitir el ingreso de aire hacia el impulsor.

El nivel de la pulpa en la celda de flotación es regulado por dos válvulas de dardo (una automática y otra manual) instalados en cada una de las cajas intermedias y de descarga. El nivel de pulpa es monitoreado por un sistema de flotador ultrasónico, el cual controla un actuador neumático conectado al eje de la válvula de dardo con operación automática. El sistema incluye los asientos de las válvulas de dardo de poliuretano, válvulas de dardo, ejes de válvula, actuadores neumáticos (cilindro con posicionador), gabinete de control y emisor/detector de ultrasonido con un flotador con placa objetivo. El sistema de control de flujo de aire consiste en una válvula de globo operada manualmente. El flujo de aire es controlado en cada celda.

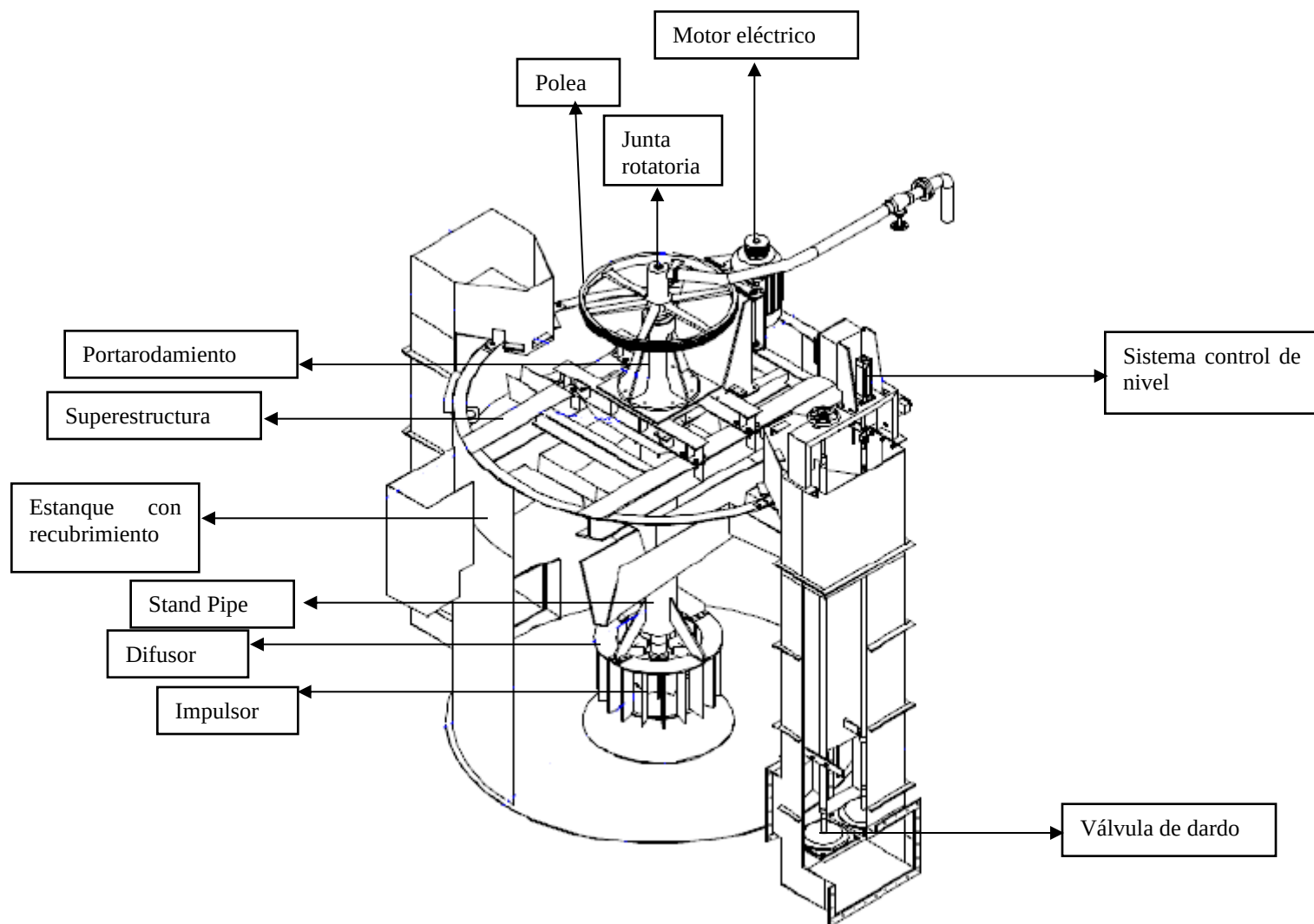


Figura 18 Celda de flotación Metso RCS10.

Bomba Centrífuga 547

Las bombas críticas de la planta de molibdeno son del tipo centrífugas horizontal con sello seco, todas las bombas del proceso son marca Vulco y su tamaño es de 10x10. Su función es recepcionar la carga de concentrado Cu-Mo desde el estanque mezclador e impulsarla hacia las celdas de flotación Rougher.

Estas bombas son revestidas con goma en el interior de la carcasa, además contienen un impulsor que se encarga de entregar la energía al fluido y un expulsor que mediante su giro provoca una diferencia de presión que sella la bomba para que los fluidos no puedan salir ni agentes externos puedan entrar. Además incluye una caja de eje de rodamientos, con rodamientos de bolas o rodillos cónicos con graseras automáticas.

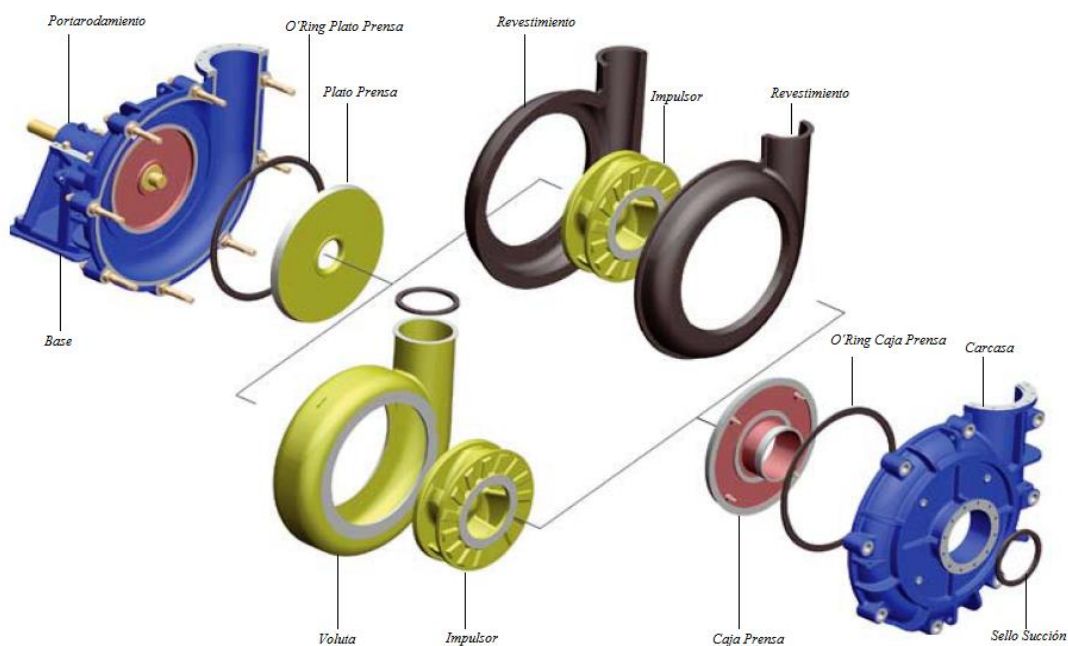


Figura 19 Bomba centrífuga Vulco.

Espesador P-5

La función general de los espesadores es separar el sólido del líquido mediante gravedad y recuperar parte del agua, obteniendo un concentrado de cobre de entre 60 y 65% sólido. El espesador P-5 recibe las colas de la flotación Rougher que corresponden al concentrado de cobre, además su tamaño o diámetro es de 200 [ft] de marca EIMCO.

Este se compone por un sistema motriz o drive que a su vez se compone de dos reductores que transfieren el movimiento a los brazos mediante una corona. El espesador contiene sensores de torque para evitar que las rastras se rompan. Las rastras o raspadores tienen la función de mantener la carga en movimiento para evitar el atollo del cono en la descarga.

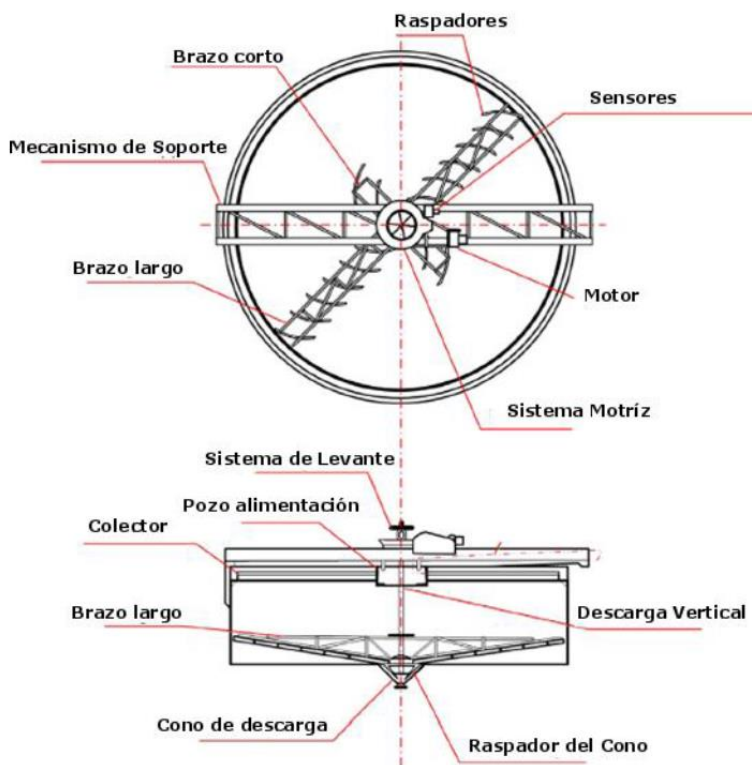


Figura 20 Componentes principales de un espesador de procesos.

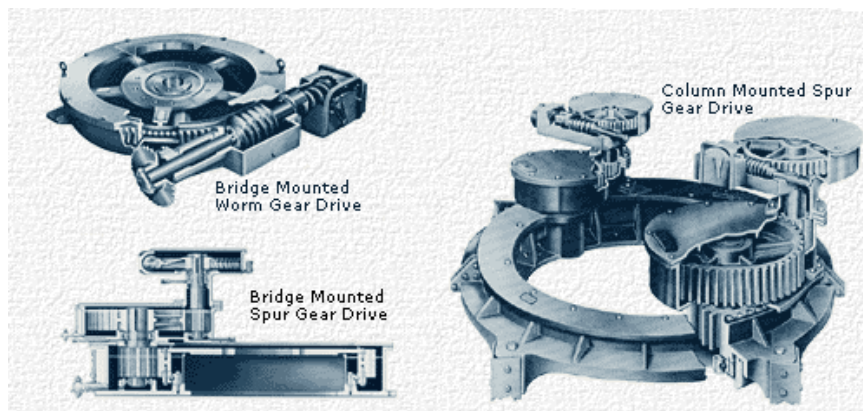


Figura 21 Reductor EIMCO de un espesador de procesos de 200 pies de diámetro.

Estanque acondicionador

La función del Estanque Acondicionador (vol. 350 m³) es envejecer o acondicionar la pulpa de alimentación para facilitar la función de los reactivos depresantes de Cu; además de adicionar los reactivos Kerosén (colector de sulfuros de molibdeno), H₂SO₄ (Ácido Sulfúrico) como modificador de pH. Para el acondicionamiento existe una hélice conectada a un motorreductor que mantiene en constante movimiento la pulpa, además cuenta con deflectores en su interior que aumentan la turbulencia del fluido.



Figura 22 Estanque acondicionador y sistema motorreductor.

Filtro Andritz

Este sistema tiene una capacidad de $0,589 \text{ [m}^3\text{]}$ y es la última etapa del proceso molibdeno, aquí se recepciona el concentrado desde los estanques de lixiviación. Su función principal es secar el concentrado hasta obtener tortas con una humedad menor al 15%, para esto cuenta con membranas que son presionadas mediante un cilindro hidráulico y una vez que abren la torta cae hacia una tolva donde es triturada por un rompeterrones, seguido es esto existe un tornillo sin fin que mueve la carga hacia la salida para su envasado y comercialización.

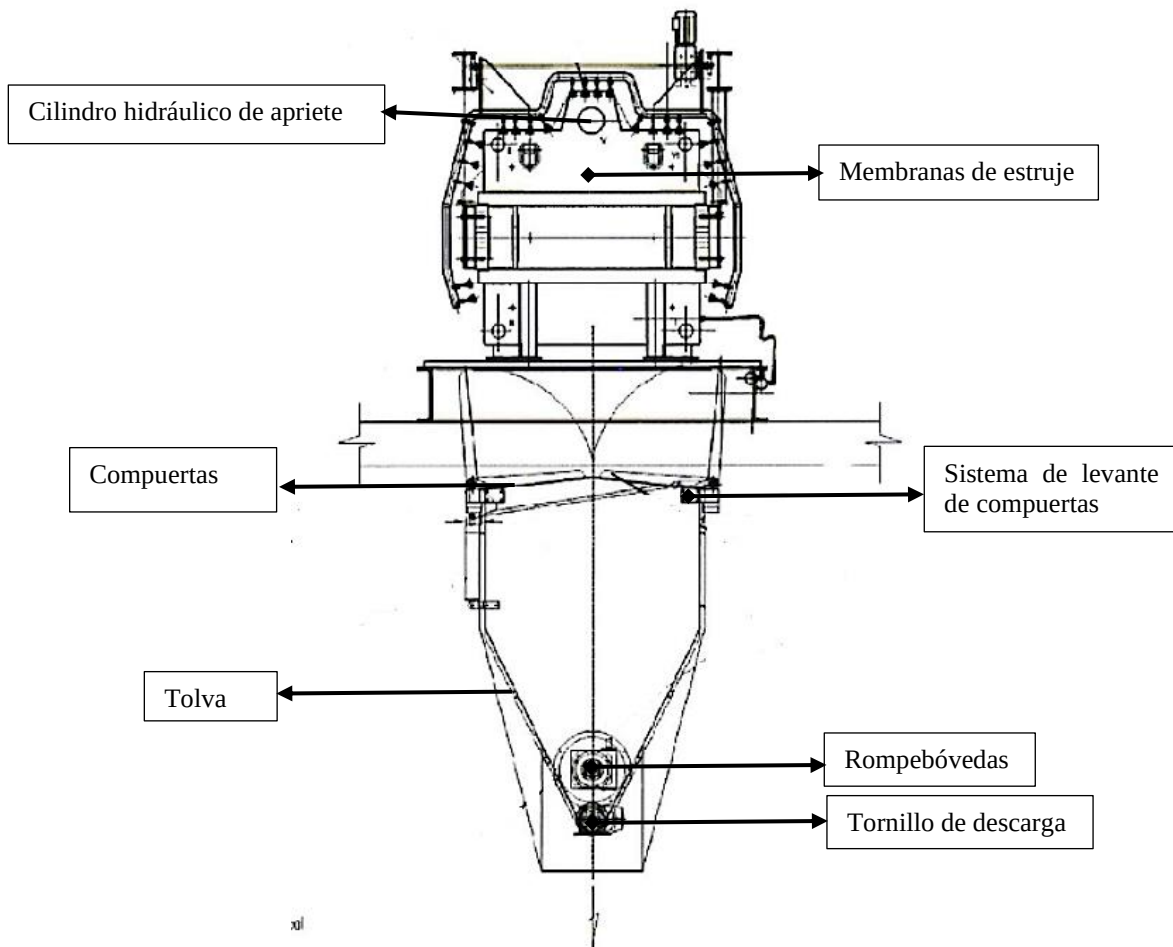


Figura 23 Filtro andritz.

Estanque lixiviación

La función del estanque de lixiviación es bajar la concentración de fósforo en el concentrado de molibdeno, para esto se adiciona ácido sulfúrico a los estanques hasta obtener un pH de 1.5 a 1.7, luego se debe agitar la pulpa por 15 minutos mínimos mediante hélices conectadas a un motorreductor, para luego enviar el concentrado al filtro Andritz.



Figura 24 Estanque y motorreductor de lixiviación.



ANEXO D: ESTADO DE RESULTADO CODELCO ENTRE ENERRO Y DICIEMBRE 2017

de 01/01/2017 a 31/12/2017											
Segmentos	Chuquicamata MUS\$	R. Tomic MUS\$	Salvador MUS\$	Andina MUS\$	El Teniente MUS\$	Ventanas MUS\$	G. Mistral MUS\$	M. Hales MUS\$	Total Segmentos MUS\$	Neto afiliadas, asociadas y Casa Matriz MUS\$	Total Consolidado MUS\$
Ingresos por ventas de cobre	2.823.439	2.009.715	502.181	1.326.314	2.850.926	12.206	798.407	1.344.509	11.667.697	(31.418)	11.636.279
Ingresos por ventas de cobre comprado a terceros	(1.165)	-	(104)	-	-	32.392	-	237.708	268.831	1.737.143	2.005.974
Ingresos por ventas molibdeno	276.868	40.654	16.005	65.908	101.571	-	-	-	501.006	1.376	502.382
Ingresos por venta otros productos	128.696	-	44.254	7.500	69.083	196.513	-	52.161	498.207	-	498.207
Ingresos mercado futuro	(124)	40	29	35	571	(1.772)	42	(111)	(1.290)	3	(1.287)
Ingresos entre segmentos	117.638	-	82.308	801	194	102.564	-	-	303.505	(303.505)	-
Ingresos de actividades ordinarias	3.345.352	2.050.409	644.673	1.400.558	3.022.345	341.903	798.449	1.634.267	13.237.956	1.403.599	14.641.555
Costo de venta de cobre propio	(2.063.065)	(1.290.391)	(440.523)	(937.786)	(1.562.246)	(9.193)	(546.845)	(970.282)	(7.820.331)	27.456	(7.792.875)
Costo de cobre comprado a terceros	-	-	-	-	-	(32.961)	-	(237.770)	(270.731)	(1.728.913)	(1.999.644)
Costo venta molibdeno	(84.777)	(28.807)	(9.656)	(24.030)	(40.445)	-	-	-	(187.715)	(1.345)	(189.060)
Costo venta otros productos	(72.475)	-	(22.953)	(814)	(84.159)	(206.512)	-	(11.900)	(398.813)	(11)	(398.824)
Costos entre segmentos	(283.468)	80.943	(58.990)	16.388	11.131	(125.547)	-	56.038	(303.505)	303.505	-
Costo de ventas	(2.503.785)	(1.238.255)	(532.122)	(946.242)	(1.675.719)	(374.213)	(546.845)	(1.163.914)	(8.981.095)	(1.399.308)	(10.380.403)
Ganancia bruta	841.567	812.154	112.551	454.316	1.346.626	(32.310)	251.604	470.353	4.256.861	4.291	4.261.152
Otros ingresos, por función	17.249	22.136	18.044	14.861	28.357	1.361	4.174	5.645	111.827	42.505	154.332
Costos de distribución	(1.614)	(186)	(610)	(299)	(561)	(560)	-	(960)	(4.790)	(5.613)	(10.403)
Gasto de administración	(46.703)	(26.316)	(16.763)	(24.352)	(63.480)	(10.201)	(25.947)	(20.419)	(234.181)	(193.959)	(428.140)
Otros gastos, por función	(96.986)	(18.370)	(49.178)	(77.191)	(50.258)	(11.176)	(5.583)	(6.546)	(315.288)	(143.629)	(458.917)
Ley 13.196	(269.112)	(196.289)	(51.423)	(124.627)	(255.957)	(15.459)	(76.530)	(109.159)	(1.098.556)		(1.098.556)
Otras ganancias (pérdidas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.605	32.605
Ingresos financieros	1.083	549	381	139	2.518	313	393	305	5.681	24.155	29.836
Costos financieros	(116.215)	(53.270)	(16.894)	(105.146)	(215.611)	(10.012)	(13.626)	(56.324)	(587.098)	(57.512)	(644.610)
Participación en las ganancias (pérdidas) de asociadas y negocios conjuntos que se contabilicen utilizando el método de la participación	529	-	427	(585)	413	-	-	-	784	184.644	185.428
Diferencias de cambio, neto	(64.137)	(60.635)	(19.278)	(19.500)	(68.197)	(9.067)	(8.686)	(7.838)	(257.338)	51.280	(206.058)
Ganancia (pérdida), antes de impuestos	265.661	479.773	(22.743)	117.616	723.850	(87.111)	125.799	275.057	1.877.902	(61.233)	1.816.669
Gasto por impuestos a las ganancias	(189.709)	(320.426)	18.324	(91.965)	(485.743)	57.108	(81.170)	(194.326)	(1.287.907)	94.840	(1.193.067)
(Pérdida) Ganancia	75.952	159.347	(4.419)	25.651	238.107	(30.003)	44.629	80.731	589.995	33.607	623.602