

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC

Carrera de Ingeniería Mecánica



**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO
BASADO EN LA ESTRATEGIA RCM PARA UN
FILTRO PRENSA DE RELAVE QUE OPERA EN
UNA MINA UBICADA A 4800 M.S.N.M.**

**DESIGN OF A MAINTENANCE PLAN BASED ON
THE RCM STRATEGY FOR A TAILINGS PRESS
FILTER OPERATING IN A MINE LOCATED AT
4800 M.A.S.L**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

Cesar Cristian Miranda Orna

Código 201510103

Asesor

Mg. Luis Hurtado Campos

Lima – Perú

Diciembre 2019

La tesis

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA ESTRATEGIA
RCM PARA UN FILTRO PRENSA DE RELAVE QUE OPERA EN UNA MINA
UBICADA A 4800 M.S.N.M.**

Ha sido aprobada

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

[Mg. Luis Hurtado Campos]

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

Dedicatoria:

A mi familia, en especial a mi madre por haberme acompañado incondicionalmente a lo largo de toda mi vida.

Agradecimientos:

A mis profesores de la universidad, por haber sido excelentes formadores a lo largo de mi trayectoria universitaria. A mis compañeros, de quienes he aprendido tanto y a todos quienes me apoyaron e hicieron viable este estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	12
1.1 Gestión de mantenimiento	12
1.1.1 Indicadores en la gestión de mantenimiento.....	12
1.1.1.1 Eficacia global del equipo, Disponibilidad, MTBF y MTTR	14
1.1.1.2 Índice de mantenimiento correctivo.....	17
1.1.1.3 Costos asociados al mantenimiento correctivo	18
1.1.2 Evaluación y mejora de los indicadores de mantenimiento	20
1.1.2.1 Evaluación de indicadores de mantenimiento.....	20
1.1.2.2 Mejora en indicadores de mantenimiento	21
1.2 Planificación de mantenimiento.....	23
1.2.1 La planificación dentro de la gestión de mantenimiento.....	23
1.2.2 Diseño de un plan de mantenimiento	24
1.2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).....	26
1.2.3.1 Descripción general del RCM.....	26
1.2.3.2 Aplicación de la estrategia RCM	28
1.3 Marco operacional del filtro prensa de relave Andritz modelo 2500	30
1.3.1 Métodos de recuperación de agua de los relaves.....	30
1.3.2 Filtro prensa de placas verticales.....	32
1.3.3 Contexto operacional del filtro prensa en estudio	33
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	34
2.1 Primera etapa de la investigación	35
2.1.1 Recolección de información respecto al equipo	35
2.1.2 Evaluación de la situación inicial del equipo en cuanto a indicadores.....	37
2.1.3 Diseño del plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM	41
2.2 Segunda etapa de la investigación	43

2.2.1	Estimación de los indicadores seleccionados asumiendo la implementación del plan de mantenimiento	43
2.2.2	Comparación entre la situación inicial y las estimaciones realizadas respecto a los indicadores seleccionados	44
CAPÍTULO III RESULTADOS		46
3.1	Resultados de la primera etapa de la investigación	46
3.1.1	Información recolectada respecto al filtro prensa.....	46
3.1.2	Evaluación inicial del filtro prensa en cuanto a indicadores	54
3.1.3	Plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM	55
3.2	Resultados de la segunda etapa de la investigación.....	73
3.2.1	Estimación de los nuevos valores para los indicadores propuestos.....	73
3.2.2	Comparación entre los valores iniciales y los estimados de los indicadores de mantenimiento propuestos.....	75
CONCLUSIONES		77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		79
ANEXOS		82

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Detalle de estrategias de mantenimiento	25
Tabla 2.1 Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa	37
Tabla 2.2 Cálculo de mejora porcentual 1	44
Tabla 2.3 Cálculo de mejora porcentual 2	44
Tabla 3.1 Tareas a condición para los subsistemas del equipo.....	60
Tabla 3.2 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema hidráulico.....	63
Tabla 3.3 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de lavado de lonas	65
Tabla 3.4 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema DDP	66
Tabla 3.5 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de placas y soportes...	67
Tabla 3.6 Tareas de mantenimiento preventivo para la bandeja de descarga.....	68
Tabla 3.7 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de placa móvil	69
Tabla 3.8 Tareas de mantenimiento preventivo para la estructura principal.....	70
Tabla 3.9 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de circuito de soplado y secado	71
Tabla 3.10 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de filtrado	72
Tabla 3.11 Resultados para los valores iniciales de los indicadores propuestos	75
Tabla 3.12 Resultados para los valores estimados de los indicadores propuestos	75
Tabla 3.13 Comparación entre los valores iniciales y los valores estimados para los indicadores propuestos	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Factores de influencia sobre indicadores de mantenimiento	13
Figura 1.2 Proceso de mantenimiento: Planificación – Programación – Ejecución	22
Figura 1.3 Sistema de espesamiento de relave	31
Figura 1.4 Filtro prensa de discos.....	31
Figura 1.5 Filtro Prensa de Relave Modelo Andritz 2500.....	33
Figura 2.1 Etapas de la metodología para el desarrollo de la investigación.....	34
Figura 2.2 Interfaz de operación del Filtro Prensa Andritz modelo 2500	36
Figura 3.1 Vista lateral del canal de alimentación (2) y retorno de relave sobrante (1)	47
Figura 3.2 Canales de limpieza de alimentación (rojo) y secaje (verde).....	47
Figura 3.3 Vista lateral del canal de soplado del filtro prensa	48
Figura 3.4 Placa móvil desplazada al liberar completamente la presión.....	49
Figura 3.5 Placa de filtrado en desplazamiento, nótese la caída de torta de relave.....	50
Figura 3.6 Interfaz de usuario del Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500	51
Figura 3.7 Lona provisional (de amarillo) colocada en el filtro Andritz modelo 2500.	52
Figura 3.8 Línea de seguridad para la parada de emergencia del filtro.....	53
Figura 3.9 Señales luminosas y sonoras del filtro prensa.....	53
Figura 3.10 Modos de inclinación de la placa móvil	56
Figura 3.11 Sensor de inclinación de la placa móvil.....	56
Figura 3.12 Evidencia de daño en lonas y placas de filtrado	57
Figura 3.13 Evidencia de contracción y rotura en lonas de filtrado	57
Figura 3.14 Evidencia de pegado de relave y desprendimiento de lonas de filtrado	58
Figura 3.15 Evidencia de pegado de relave y desprendimiento de lonas de filtrado	58
Figura 3.16 Evidencia de desgaste en los rodillos del sistema DDP.....	59
Figura 3.17 Evidencia de fuga de aceite en uno de los cilindros hidráulicos.....	59

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1.1 Overall Equipment Effectiveness (OEE).....	15
Ecuación 1.2 Disponibilidad.....	16
Ecuación 1.3 Disponibilidad.....	16
Ecuación 1.4 Mean Time Between Failures (MTBF).....	17
Ecuación 1.5 Mean Time to Repair (MTTR).....	17
Ecuación 1.6 Mean Time to Repair (MTTR).....	18
Ecuación 1.7 Índice de mantenimiento correctivo.....	18
Ecuación 1.8 Costo anual de mantenimiento correctivo.....	20
Ecuación 2.1 Costo de mantenimiento correctivo.....	43

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Portada del Manual del filtro prensa Andritz modelo 2500.....	83
Anexo 2: Hoja de Decisión RCM.....	85
Anexo 3: Diagrama de Decisión RCM – parte 1	86
Anexo 4: Diagrama de Decisión RCM – parte 2.....	87
Anexo 5: Modelo de hoja de información RCM	88
Anexo 6: Componentes principales del Filtro Prensa Andritz modelo 2500	89
Anexo 7: Lista de componentes principales del Filtro Prensa Andritz modelo 2500	90
Anexo 8: Eventos de mantenimiento del filtro prensa en estudio	91
Anexo 9: Análisis de los modos y efectos de falla (AMFE)	92

GLOSARIO

AMEF: Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA en inglés)

CBM: Condition Based Maintenance – Mantenimiento basado en condición

GMAO: Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador

KPI: Key Performance Indicator – Indicador Clave de Mantenimiento

MTBF: Mean Time Between Failures – Tiempo Medio Entre Fallas

MTTF: Mean Time to Fail – Tiempo promedio para fallar

MTTR: Mean Time to Repair – Tiempo promedio para reparar

OEE: Overall Equipment Effectiveness – Eficacia Global del Equipo

PM: Preventive Maintenance – Mantenimiento preventivo

RBM: Risk Based Maintenance – Mantenimiento basado en el riesgo

RCM: Reliability Centered Maintenance – Mantenimiento Centrado en la
Confiabilidad

SMRP: Society for Maintenance and Reliability Professionals

TBM: Time Based Maintenance – Mantenimiento basado en el tiempo

TPM: Total Productive maintenance – Mantenimiento Productivo Total

TQM: Total Quality Management – Gestión de la Calidad Total

ABSTRACT

This research study starts from the identification of a problem associated with the performance of the Andritz Tailings Press Filter Model 2500 in terms of its OEE, the direct costs associated with corrective maintenance and the corrective maintenance index. In that sense, a maintenance plan based on the Reliability Centered Maintenance (RCM) strategy has been designed with the aim of improving these indicators. In the first place, the bases of the investigation were raised and the study of the state of the art was carried out as a background to later present the theoretical framework. Secondly, according to the proposed methodology, the maintenance plan was developed covering the equipment in general and its respective sub-systems having analyzed the operating conditions of the filter, the failure modes identified in the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and its lifetime performance data. Finally, an estimated comparison was made with respect to the aforementioned indicators, having as a first scenario the initial state of the equipment and as a second scenario to its final state, that is, the subsequent one to the design of the maintenance plan. At this point, the results of the comparison of KPIs such as availability, Mean Time Between Failures (MTBF) and Mean Time to Repair (MTTR) were also considered. It should be noted that these comparisons are based on reasonable estimates since the scope of this investigation does not include the implementation of the maintenance plan.

Key words:

Filter press, mining tailings filtering, Reliability Centered Maintenance, Overall Equipment Effectiveness, Availability

RESUMEN

El presente trabajo de investigación parte de la identificación de un problema asociado al desempeño del Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500 en términos de su OEE, los costos directos asociados al mantenimiento correctivo y el índice de mantenimiento correctivo. En ese sentido se ha diseñado un plan de mantenimiento basado en la estrategia del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) con el objetivo de mejorar estos indicadores. En primer lugar, se plantearon las bases de la investigación y se realizó el estudio del estado del arte a modo de antecedentes para posteriormente presentar el marco teórico. En segundo lugar, de acuerdo con la metodología planteada, se desarrolló el plan de mantenimiento abarcando al equipo en general y sus respectivos sub – sistemas habiendo analizado las condiciones de operación del filtro, los modos de falla identificados en el procedimiento de Análisis de Modos y Efectos de Falla y los datos de vida del mismo. Finalmente se realizó una comparación estimada respecto a los indicadores previamente mencionados teniendo como un primer escenario al estado inicial del equipo y como segundo escenario a su estado final, es decir, el posterior al diseño del plan de mantenimiento. En este punto, también se tuvo como sustento los resultados de la comparación de KPIs como disponibilidad, tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio para reparar (MTTR). Cabe resaltar que estas comparaciones se basan en estimaciones razonables dado que el alcance de esta investigación no incluye la implementación del plan de mantenimiento.

Palabras clave:

Filtro prensa, filtrado de relave minero, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, Eficacia Global del Equipo, Disponibilidad

INTRODUCCIÓN

A lo largo del proceso de producción de una mina se cuenta con diferentes activos los cuales, en conjunto, forman una cadena de trabajo que idealmente no debe interrumpirse para así alcanzar el mejor margen rentable. En ello se justifica la importancia de contar con óptimos valores de indicadores de mantenimiento como la Eficacia Global del Equipo, disponibilidad, utilización, tiempo medio entre fallas, tiempo medio para reparar, índice de mantenimiento preventivo, entre otros. En ese sentido, una buena gestión de mantenimiento garantiza un adecuado desempeño de los equipos. Actualmente la gran variedad de estrategias en mantenimiento y avances tecnológicos en los equipos facilitan la gestión de los mismos en la medida en que se toman decisiones en base a información fidedigna, herramientas de ingeniería y modelos de estudio ya antes aplicados. El análisis y resultados que devienen en dichas decisiones denotan tendencias, condiciones y recomendaciones sobre las cuales también es factible proyectar, principalmente en términos económicos, una determinada operación o proceso productivo.

Ahora bien, la optimización en la recuperación del agua de los relaves es un tema que ha venido tomando gran importancia para las compañías mineras dado que en muchos lugares este es un recurso escaso y, a nivel social, es un aspecto importante para las comunidades aledañas a las minas. Existen diferentes métodos para esta labor, tales como el espesamiento convencional, espesamiento de alta densidad, espesamiento en pasta y filtración del relave [1]. Cabe precisar que este proceso se realiza al final de la cadena productiva de concentrado de mineral, encargándose de recuperar la máxima cantidad de agua del relave producto del proceso de flotación para así mejorar la eficiencia del uso de este recurso.

Actualmente el método de filtración se ha convertido en una opción muy atractiva por razones como: los bajos porcentajes de agua que restan en el relave después del proceso, los grandes tonelajes que pueden ser manejados y la seguridad geotécnica en diferentes condiciones que representan los relaves filtrados.

En esta tarea se tiene a los filtros de placas verticales como los más empleados por diferentes industrias incluyendo a la industria minera dada su versatilidad para operar con diferentes productos y sus diversas capacidades de operación. Ahora bien, dado que el Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500 es el único filtro prensa vertical en su tipo dentro de la marca Andritz, las recomendaciones del manual por parte del fabricante no abarcan en profundidad aspectos específicos del contexto operacional o un historial de fallos, lo cual es importante para el diseño y aplicación de un adecuado mantenimiento.

Por este motivo el presente trabajo busca aplicar los conceptos y las herramientas pertinentes de la ingeniería de mantenimiento para la solución de un problema asociado a la Eficacia Global del Equipo y que involucra un equipo crítico dentro de la producción de concentrado de mineral como lo es el Filtro Prensa de Relaves Andritz modelo 2500. Actualmente el equipo de interés opera en una unidad minera ubicada a 4800 m.s.n.m. la cual posee una capacidad de planta de 1500 toneladas métricas por día. Los productos principales de esta mina son las barras de doré (aleación de oro y plata), el concentrado de plomo y el concentrado de zinc, teniéndose una ley de cabeza equivalente de 7.75 g/TM de oro.

El estudio plantea el diseño de un plan de mantenimiento a través de la estrategia de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para poder mejorar el desempeño del filtro prensa en estudio en términos de su OEE, los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, el índice de mantenimiento correctivo y los KPIs de disponibilidad, tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio para reparar (MTTR).

Alcance

La presente investigación abarca el diseño del plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM para el Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500 en cuanto a su sistema de control, push – button, sistema de accionamiento hidráulico, sistema de soplado para el secado del relave y el sistema de filtrado en sí. Para ello se tuvo en cuenta los datos de vida en cuanto a fallas operativas, y principalmente un Análisis de Modos de Falla y Efectos para este filtro prensa.

Cabe precisar que el funcionamiento adecuado de este equipo implica también un buen funcionamiento de sistemas como el de compresión de aire para el soplado del relave, el sistema de motores eléctricos que accionan el sistema hidráulico para el desplazamiento de placas del filtro y los tanques de almacenamiento de relave juntamente con las bombas para el mismo. Sin embargo, estos no forman parte del alcance de la presente investigación, dado que el interés principal es solucionar los problemas asociados al mantenimiento del filtro en sí y los sistemas que se asocian directamente.

Por otro lado, se realizó un análisis comparativo de tipo cualitativo entre el escenario inicial y el escenario posterior a la formulación del plan de mantenimiento en cuanto a la Eficacia Global del Equipo, los costos directos asociados al mantenimiento correctivo y el índice de mantenimiento correctivo, evaluándose así las hipótesis planteadas y concluyendo pertinentemente respecto a las mismas. Adicionalmente se analizaron los KPIs de disponibilidad, MTBF y MTTR. Es importante precisar que no se abarcaron aspectos de la implementación del plan de mantenimiento y el escenario posterior al diseño del plan se basó en estimaciones razonables teniendo en cuenta los resultados esperados.

Antecedentes

Como parte de la revisión de la literatura a nivel nacional, se encontraron investigaciones relevantes asociadas a la temática y problemática en estudio, en las cuales se demuestra el éxito de la aplicación de la estrategia RCM en el mantenimiento de equipos que operan en minas. Se resume que través de esta estrategia se alcanza un valor adecuado para la eficacia global de los mismos, reduciéndose por tanto los costos de mantenimiento y mejorando diferentes indicadores de gestión de mantenimiento.

Así, por ejemplo, Deza [2], en su investigación titulada “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el sistema de lubricación de un molino SAG de 100,000 ton/día”, aplicó la metodología RCM al sistema de lubricación de un molino SAG, logrando incrementar su disponibilidad a través de 261 tareas de mantenimiento proactivo basadas en la confiabilidad. Es así como por medio de una inversión que bordea los 100,000 dólares, se garantizó evitar una falla mayor en el sistema, lo cual significaría la pérdida de 5.3 millones de dólares por cada día de parada. De esta manera, la estrategia RCM permitió incrementar la Eficacia Global del Equipo (OEE) y evitó pérdidas económicas.

Por otro lado, Núñez [3] en su estudio titulado “RCM para optimizar la disponibilidad de los tractores D8T en la empresa Aruntani SAC – unidad Tukari”, recolectó información de documentos asociados a la operación de estos equipos y realizó un mapeo de paradas en cuanto a todos los sistemas mecánicos en estudio. Así, en el 2013 encontró una disponibilidad mecánica de 83.5%, valor que se ubicaba debajo de las exigencias de la unidad minera (85%). Posteriormente, en el año 2014, habiendo diseñado e implementado un plan de mantenimiento empleando la estrategia RCM, se alcanzó un valor mejorado de 94%. La hipótesis fue validada en base a la distribución T de Student, con lo cual se comprobó este incremento en cuanto a la disponibilidad mecánica.

Por su parte, Torres [4] en su investigación “Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para mejorar la disponibilidad de la Chancadora 60’’x113’’ de la minera Chinalco” determinó el estado inicial de este equipo encontrando un 88.91% de disponibilidad mecánica entre la mitad del año 2015 y la mitad del año 2016. Posteriormente elaboró un plan de mantenimiento para el periodo de julio de 2016 a junio del 2017. Siguió los pasos de la estrategia RCM y realizó el análisis de criticidad a todos los componentes de la chancadora, determinó las fallas con mayor número de prioridad

de riesgo (NPR) y elaboró una hoja de decisiones. La disponibilidad mecánica a lo largo de este segundo periodo ascendió a 92.08%. La validación de la hipótesis y el análisis de los datos fueron realizados mediante métodos estadísticos para muestras relacionadas.

Así mismo, Zaragoza [5] en su estudio “Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de un molino SAG de 32 x 34 pies, en una planta de lixiviación de oro en tanques” propone, a través del desarrollo de la estrategia RCM, un plan de mantenimiento eficaz y rentable que garantiza incrementar la vida útil de este activo a lo largo de su ciclo de vida. Este autor precisa que el costo de implementación de este proyecto es bajo con relación con los beneficios obtenidos ya que solo se involucra a las horas hombre (HH) empleadas por el personal y algunos equipos de mantenimiento auxiliares.

De otro lado, Córdova [6] en su estudio “Implantación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) a los hornos convertidores Peirce Smith de la fundición de cobre de Southern Perú Copper Corporation” analizó la situación inicial de los hornos estudiando los principales códigos de parada, para después proponer una solución en términos de la mejora en el plan general de mantenimiento con ayuda de la estrategia RCM. Este autor presenta un sustento del programa de mantenimiento considerando los análisis de falla realizados y el análisis económico de la implementación del estudio. Es así como en el 2004, mediante la puesta en marcha de la primera parte de proyecto, se alcanzó un incremento en la disponibilidad operacional de 3.69% en los hornos. Este incremento de disponibilidad garantizó un incremento en los ingresos de entre 6'337,105.83 US\$ y 8'225,563.36 US\$ al año debido al incremento del precio del cobre del 29.8%. El autor concluye que la implementación del RCM fomentó el trabajo en equipo, incrementó la sinergia en los diferentes grupos de trabajo y garantizó que cada colaborador forme parte de manera activa del proyecto.

Por su parte, Farfán [7] en su estudio “Realizar un plan de mantención preventiva del Chancador Primario Fuller en División Codelco Andina” realizó un plan de mantenimiento para este chancador que procesa aproximadamente el 70% del mineral que ingresa a la planta. Inicialmente presenta un estudio del equipo dividiéndolo en subsistemas, describiendo su funcionamiento y contexto de operación para posteriormente determinar los componentes críticos mediante la estrategia RCM empleando el AMEF y el diagrama de Pareto. Consecuentemente, estableció tareas de

mantenimiento en las áreas de mayor criticidad en cuanto a fallas. Después de ello modeló los modos de falla críticos a través de la distribución Weibull con ayuda del software Weibull++, realizándose así un análisis de confiabilidad. De esta manera formuló el plan de mantenimiento con el objetivo principal de reducir el costo global de mantención del equipo. La implementación de este estudio generó un ahorro neto de 435,000.00 US\$/año respecto a la política de mantenimiento inicial, lo cual garantiza la rentabilidad del proyecto.

Finalmente, Sandoval [8] en su investigación “Diagnóstico de estado y mantenimiento centrado en la confiabilidad de equipos de compañía minera Quiruvilca” realizó un diagnóstico inicial a través de la evaluación de diferentes KPIs de la empresa a equipos, tanto de planta como de mina. A continuación, desarrolló un AMEF completo de los subsistemas de los equipos más críticos (en su mayoría de mina) para posteriormente plantear tareas de mantenimiento en base a la estrategia RCM. Así se obtuvo la mejora en la gestión de neumáticos para Scoops de 1.5yd³ alcanzándose un ahorro de hasta 75,096.00 US\$/año, un ajuste en los horarios de trabajo de los compresores que permitió un ahorro de 63,008.90 US\$/año, una disminución en el ratio de kWh/TMS de un promedio de 134.73 hasta 129.62, entre otros logros propios del éxito de la aplicación de la estrategia RCM en la mejora de la gestión de mantenimiento.

Ahora bien, a diferencia de las investigaciones presentadas, la presente tesis tendrá como uno de sus puntos de partida la recopilación de las perspectivas, los hábitos y las consideraciones de los técnicos mecánicos del área de relaves respecto al mantenimiento del filtro prensa, ello independientemente de si esta información se encuentra formalizada o no. El objetivo es validar los datos de vida recopilados del equipo, los valores de frecuencias de tareas de mantenimiento obtenidas a lo largo de este estudio y las estimaciones a realizarse ante una futura implementación del plan de mantenimiento diseñado. Es decir, se tendrán en cuentas a las personas que interactúan con el filtro y su experiencia.

Justificación y motivación

El Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500 es un activo crítico en el proceso de producción de concentrado de plomo y zinc, dado que es el único filtro con capacidad de 2000 m² de filtrado [9] (50 toneladas de relave por ciclo) en la unidad minera donde opera; por lo cual, su correcto funcionamiento permite una producción continua de concentrado de mineral.

Ahora bien, el mantenimiento aplicado al mismo es primordialmente de tipo correctivo, representando los mantenimientos preventivo y predictivo solo alrededor de un 30% del total del número de mantenimientos realizados. Esto conlleva a sobrecostos de mano de obra, elevados costos directos de mantenimiento (incluso a ser aprobados por el jefe de mantenimiento planta), un deterioro acelerado del activo y, sobre todo, al riesgo de que una parada prolongada ocasione incluso una parada total de la planta.

Por ello, el propósito de esta investigación es poder desarrollar una propuesta de solución para los problemas asociados al mantenimiento empleando un enfoque analítico a través del diseño de un plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM, de modo que se acceda a beneficios como menos tiempos de parada, menos gestión de inventarios, un aumento en la producción, disminución de costos de mantenimiento, entre otros.

Cabe mencionar que el filtro prensa de relaves Andritz modelo 2500 es el primero en su tipo por parte de Andritz y es el filtro de mayor capacidad que se emplea en las minas a nivel nacional. Si bien existen lineamientos de mantenimiento en el manual de operación y mantenimiento, no se ha realizado un estudio a profundidad sobre el historial de fallas, ni la operación del filtro en sí bajo sus condiciones específicas de operación, por lo cual en esta investigación se suplirán aspectos no cubiertos en la gestión de mantenimiento aplicada sobre este activo.

Además, este estudio será de interés para la comunidad de ingeniería de diseño de este tipo de filtros, ya que se evidenciará con claridad las oportunidades de mejora en cuanto al rediseño a través de la identificación de fallas mecánicas presentes en el equipo bajo las condiciones operacionales de la unidad minera con miras a mejorar los posteriores modelos a fabricar.

Por otro lado, abordar este problema posee también implicancias ambientales, ya que un filtro prensa Andritz modelo 2500 permite recuperar alrededor de 4000 l de agua por ciclo de filtrado. En suma, garantizar un buen rendimiento del filtro prensa implica garantizar la seguridad en los centros de almacenamiento de relaves, dada la estabilidad geotécnica que poseen los mismos en comparación con los relaves no filtrados.

Es así como realizar esta investigación resulta ser conveniente para el área de mantenimiento de la unidad minera de interés, el área de ingeniería de diseño del fabricante brasileño Andritz, la comunidad de ingeniería de mantenimiento interesada en este tipo de estudios y los residentes cercanos a la unidad minera. Además de ello, la trascendencia de este estudio radica en la posibilidad de replicar, tanto su metodología como sus resultados, puesto que la estrategia RCM como se ha podido comprobar, presenta un alto grado de éxito en cuanto a los resultados de su implementación.

Por otro lado, en industrias como la minera, los equipos de alta criticidad requerirán poseer altos valores para sus indicadores de mantenimiento y operación durante todo el periodo de su ciclo de vida, por lo cual es recomendable aplicar justamente estrategias como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o alguna otra en función de los requerimientos de la empresa o las tendencias del desarrollo de la ingeniería del mantenimiento en minería.

Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento para el filtro prensa de relaves Andritz modelo 2500 aplicando la estrategia RCM.

Objetivos específicos

- Evaluar la situación actual respecto al filtro prensa de relave Andritz modelo 2500 en cuanto a los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, el índice de mantenimiento correctivo, la eficacia global del equipo (OEE) y los KPIs de disponibilidad, MTBF y MTTR.
- Diseñar, aplicando la estrategia RCM, un plan de mantenimiento para el filtro prensa Andritz modelo 2500 teniendo en cuenta sus modos de falla y datos de vida respectivos.
- Estimar los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, el índice de mantenimiento correctivo, la eficacia global del equipo (OEE) y los KPIs de disponibilidad, MTBF y MTTR para el equipo después del diseño del plan de mantenimiento asumiendo una implementación del mismo.
- Comparar la situación inicial con las estimaciones realizadas en cuanto a los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, el índice de mantenimiento correctivo, la eficacia global del equipo (OEE) y los KPIs de disponibilidad, MTBF y MTTR.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las bases para el desarrollo del trabajo de investigación, consultando bibliografía confiable con el objetivo de sustentar las ideas y procedimientos a seguir en el apartado de Metodología.

1.1 Gestión de mantenimiento

1.1.1 Indicadores en la gestión de mantenimiento

El mantenimiento, de acuerdo con García [10], se define como las prácticas y técnicas destinadas a conservar en funcionamiento los activos e instalaciones de una empresa durante el mayor tiempo posible y con el máximo rendimiento alcanzable. Ahora bien, dado que dentro del planeamiento, ejecución y control del mantenimiento se tienen diferentes parámetros que son cuantificables, es posible y recomendable que este sea gestionado por las siguientes razones: El crecimiento de la competencia, lo cual obliga a rebajar costes, optimizar el uso de materia prima y capacitar constantemente a la mano de obra para cumplir con el plan de producción; la aparición de multitud de técnicas y herramientas para mejorar el ciclo de vida de un equipo, como lo son el Total Productive Maintenance (TPM), Reliability Centered Maintenance (RCM), sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO), entre otros; la necesidad de estrategias en el departamento de producción y la importancia de la calidad, seguridad e interrelaciones con el medio ambiente dentro de la gestión industrial.

En la misma línea de planteamiento, Hernández y Navarrete [11] enfatizan que “del mantenimiento depende la funcionalidad, disponibilidad y conservación de la estructura productiva de una industria moderna”, por lo cual se ratifica la necesidad de gestionar el mantenimiento a través de prácticas adecuadas y que mejor se adapten al activo, proceso o instalación de interés.

Es así como en la búsqueda de la mejora continua a través de un sistema de gestión de mantenimiento se emplea diversas herramientas dependiendo del aspecto que se desee

mejorar en del mismo. Una metodología básica para la mejora de procesos o el funcionamiento de una pieza, máquina u órgano dentro de una empresa es el ciclo PDCA o ciclo de Deming, que, como bien precisan estos autores, consta de las etapas de planificar, hacer, verificar y tomar acciones. Si bien se cuenta con diferentes herramientas de mejora de este estilo en cuanto a la gestión de mantenimiento, la evaluación del desempeño de un activo físico, como lo es el filtro prensa de relave Andritz modelo 2500, requiere necesariamente la implementación de los llamados indicadores de mantenimiento para una eventual toma de decisiones, con el objetivo de incrementar la producción bajo estándares adecuados de seguridad.

De acuerdo con Zegarra [12], dentro de toda gestión es necesario contar con indicadores cuidadosamente estudiados, ya que estos permitirán evaluar objetivamente el desempeño de esta. Asimismo, los indicadores dependerán del tipo de industria, de los activos que se estén gestionando y del nivel en el que se encuentren los procesos transaccionales, de supervisión y gerenciales en la empresa.

En ese sentido, González [13] añade que para un adecuado seguimiento del desempeño del mantenimiento se debe tener en cuenta que “los indicadores a seleccionar deben englobar al máximo los diferentes aspectos que pueden afectar el desempeño global de una empresa”. Es así como, de acuerdo con este autor, estos factores vienen a ser la eficiencia y productividad, organización y recursos humanos, servicios externos, costos, calidad y percepción del cliente y resultados técnicos, tal y como se muestra en la **Figura 1.1**.



Figura 1.1 Factores de influencia sobre indicadores de mantenimiento
Fuente: Francisco González. Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión [13]

Ahora bien, García [10] precisa que los diversos indicadores de mantenimiento se obtienen a partir del procesamiento pertinente de una serie de datos de vida de los componentes o equipos en cuestión y se calculan con el objetivo de tomar decisiones acertadas en función al estado y los resultados que se tengan respecto, en este caso, al área de mantenimiento.

En ese sentido, para el desarrollo de la investigación se ha decidido evaluar los indicadores de OEE, los costos directos asociados al mantenimiento correctivo y el índice de mantenimiento correctivo, de modo que se sustente adecuadamente las ventajas de una potencial implementación del plan de mantenimiento a diseñar. En suma, respecto a los KPIs, Amendola [14] señala que la mayoría de estos se pueden aplicar a equipos individuales, subprocesos y plantas completas con el objetivo de evaluar adecuadamente su comportamiento operacional.

Ahora, dentro de los KPIs orientados a perfeccionar las labores de mantenimiento encontramos: Disponibilidad, MTBF, MTTR, MTTF, confiabilidad y utilización. Es así como también se analizará los tres primeros KPIs de esta lista, dado que representan suficiente información para el análisis del filtro prensa en cuanto a la mejora de la disponibilidad.

1.1.1.1 Eficacia global del equipo, Disponibilidad, MTBF y MTTR

A continuación, se presentará el indicador de Eficacia Global del Equipo u *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) y los KPIs de disponibilidad, MTBF y MTTR. Estos han sido agrupados en conjunto, ya que evalúan el desempeño en cuanto a operación y mantenibilidad de un equipo, proporcionando un panorama global respecto a la calidad del funcionamiento de este.

En primer lugar, de acuerdo con la Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP) [15] la OEE es una medida del rendimiento de los equipos o activos en función de la disponibilidad real, eficiencia del rendimiento y calidad del producto cuando el equipo está programado para operar. Este se expresa típicamente como un porcentaje e identifica y clasifica las principales pérdidas o razones de un rendimiento deficiente de los activos. Como indicador, fomenta la cooperación entre las operaciones, el mantenimiento y la ingeniería de equipos para identificar y reducir o

eliminar las principales causas de un desempeño deficiente. La fórmula empleada para su cálculo es:

$$OEE = Disponibilidad\% \times Rendimiento\% \times Calidad\% \quad (1.1)$$

En cuanto a los términos de esta ecuación se puede precisar que la disponibilidad, como se verá líneas más adelante, está en función del tiempo fuera de servicio y del tiempo total destinado a operar. Ello se analizará en función a la planificación de producción propuesta por el titular minero para el filtro prensa. Por su parte, el rendimiento, como precisa la SMRP [15], es una relación entre la producción real y la capacidad productiva total. Ello se determinará en función a la planificación respecto a la cantidad de relave a filtrar por turno de trabajo. Asimismo, la calidad tradicionalmente relaciona el número de unidades no defectuosas producidas y el número total de unidades producidas. En este caso se tendrá en cuenta el porcentaje de humedad deseado para el relave producto del proceso de filtrado.

En segundo lugar, la disponibilidad, de acuerdo con González [13], es el porcentaje de tiempo que el equipo está útil para la producción. Las paradas por mantenimiento correctivo o preventivo deben estar incluidas en el tiempo fuera de servicio, desde el momento en que se produzca la falla hasta que se entrega el equipo operativo. La fórmula empleada para su cálculo es:

$$Disponibilidad = \frac{TTDO - TFS}{TTDO} \quad (1.2)$$

Donde:

TTDO: Tiempo total destinado a operación (h)

TFS: Tiempo fuera de servicio (h)

Esta también puede definirse en términos de los indicadores de tiempo promedio entre fallos o *Mean Time Between Failures* (MTBF) y tiempo promedio para reparar o *Mean Time To Repair* (MTTR):

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1.3)$$

Este indicador aportará en el análisis del filtro prensa, pues nos indicará si el filtro está operando cuando está planificado que deba operar; ello en la medida en que el equipo disponga de todos los recursos necesarios para hacerlo. Es así como este KPI representa un primer acercamiento a la operación del filtro para tener una idea del porcentaje de mejora que se puede alcanzar diseñando un adecuado plan de mantenimiento.

En tercer lugar, de acuerdo con Amendola [14], el tiempo promedio entre fallos representa, además del tiempo medio entre fallos, el tiempo entre paradas (por fallos o reparaciones) que se espera que un equipo opere adecuadamente. Este indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo. Se desea que el valor del MTBF sea lo más elevado posible, dado que será mayor también la confiabilidad del equipo. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{TTD - TIF}{\text{Número de fallas}} \quad (1.4)$$

Donde:

TTD: Tiempo total disponible (h)

TIF: Tiempo de inactividad por falla/tiempo de reparación (h)

Finalmente, el MTTR es definido por el Amendola [14] como “la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema”. Este indicador mide, dentro de un periodo de tiempo determinado, la efectividad en restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento una vez que este se encuentre fuera de servicio por un fallo. Este parámetro está asociado a la mantenibilidad, la cual es una función del diseño del equipo que se define como la probabilidad de devolver al mismo a condiciones operativas en cierto periodo de tiempo. Se tienen dos enfoques para este, el primero enfocado al tiempo medio para reparar un fallo o realizar una revisión:

$$MTTR_1 = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de paradas por reparación}} \quad (1.5)$$

Y el segundo enfocado al tiempo total de indisponibilidad del sistema por fallo o revisión:

$$MTTR_2 = \frac{\text{Tiempo de reparación} + \text{Tiempos muertos de inutilización}}{\text{Número de paradas por reparación}} \quad (1.6)$$

En ese sentido, la labor del área de mantenimiento es hacer que el $MTTR_2$ tienda a ser el $MTTR_1$, para lo cual es muy recomendable analizar detenidamente los tiempos muertos durante el funcionamiento de una máquina o desarrollo de un proceso. Cabe precisar que ambas ecuaciones tienen como unidades de cálculo las horas (h) de operación.

Es así como a través del cálculo de los indicadores de MTBF y MTTR se validará el resultado obtenido para la disponibilidad del filtro prensa. Asimismo, se podrá tener una primera aproximación al tiempo empleado para las reparaciones y los periodos de tiempo en los cuales se mantiene operativo el filtro. Ello, juntamente con la eficacia global del equipo y la disponibilidad, permitirá identificar los principales aspectos de mejora en cuanto a la operación de este equipo.

1.1.1.2 Índice de mantenimiento correctivo

De acuerdo con García [10], el índice de mantenimiento correctivo es el porcentaje de horas invertidas en la realización de mantenimiento correctivo respecto al número total de horas de mantenimiento. La fórmula para su cálculo es como sigue:

$$\text{Índice de mantenimiento correctivo} = \frac{HDMC}{HTDM} \quad (1.7)$$

Donde:

HDMC: Horas dedicadas al mantenimiento correctivo

HTDM: Horas totales dedicadas al mantenimiento

García [10] precisa también que la evaluación de este parámetro es útil en el proceso de diseño e implementación de un plan de mantenimiento, así como cuando se

estén realizando cambios de gestión en el departamento de mantenimiento. Adicionalmente, su utilidad también se evidencia en el proceso de auditoría a una contratista de mantenimiento, evaluación en la cual también se puede usar el indicador de número de órdenes de trabajo correctivas en relación con el número total de órdenes de trabajo. En el caso de la presente investigación, este indicador efectivamente aportará información sobre el estado de la gestión en cuanto a la prevención de fallas en el equipo a través de número de horas que se dediquen al mantenimiento correctivo.

1.1.1.3 Costos asociados al mantenimiento correctivo

De acuerdo con Dhillon [16], los costos fundamentales asociados al mantenimiento pueden dividirse en tres áreas: Costos directos, costos por pérdida de producción y costos por devaluación.

Los costos directos incluyen la mano de obra (directa e indirecta), repuestos, servicios externos, gastos comunes (agua, energía, transporte), insumos comunes (combustibles, lubricantes), entre otros. En este punto este autor precisa que el costo de los materiales a emplearse durante la aplicación de un mantenimiento ya sea correctivo o predictivo, suelen representar el 30% a 40% del total del costo de mantenimiento. Respecto a la mano de obra, se debe tener en cuenta el número de horas hombre que se han invertido en realizar la reparación y el costo por hora hombre [16].

Los costos por pérdida de producción o también llamados lucros cesantes se deben a que el equipo averiado detiene su producción, por lo cual se deja de percibir los ingresos asociados. Dhillon [16] hace hincapié en la diferencia entre los mantenimientos correctivos y preventivos respecto a este punto, ya que, ante una falla no prevista, las pérdidas por lucro cesante serán mayores que si se hubiera evitado la falla a través de un mantenimiento preventivo.

Es así como, a pesar de que en ambos casos el equipo está detenido y, considerando que el tiempo de parada para ambos casos es el mismo, los costos por la pérdida de esa producción no impactarán de igual manera en la empresa, ya que en un caso no se planificó dicha pérdida, mientras que en otro sí. Por este motivo, las pérdidas por un mantenimiento correctivo suelen ser más elevadas que las pérdidas por un mantenimiento preventivo. Los costos por devaluación se deben a que las intervenciones

de reparación sobre el equipo generan que este se vaya deteriorando en el tiempo, limitando su desempeño máximo con cada reparación o intervención correctiva sobre el mismo [16].

Dhillon [16] presenta también una expresión para estimar el costo por mantenimiento correctivo anual, la cual requiere tener conocimiento pleno y confiable de los indicadores de MTBF, MTTR y el costo del mantenimiento correctivo por hora. La expresión es como sigue:

$$CM_{al} = \frac{SOH \times LCH \times MTTR}{MTBF} \quad (1.8)$$

Donde:

CM_{al} : Annual corrective maintenance labor cost

SOH: Annual scheduled operating hours

LCH: Corrective maintenance labor cost per hour

En la presente investigación se hará énfasis en los costos directos y los costos por pérdida de producción, teniendo en cuenta que el proceso de filtrado en sí no genera ingresos a la empresa, más bien se aporta al cuidado medioambiental y a los aspectos de trabajo seguro por la naturaleza geotécnica de los relaves filtrados. Sin embargo, una parada prolongada del filtro sí ocasionaría una parada de la planta, por tanto, una pérdida por lucro cesante. Por otro lado, no se tendrán en cuenta los costos por devaluación, dado que no se estudiará la devaluación de este activo en el tiempo.

Ahora bien, concentrándonos en los costos directos, respecto a la mano de obra González [13] precisa que esta es la remuneración que se da a cambio de esfuerzo humano y contempla la suma de salarios, seguridad social, planes de pensiones, etc. Hay que tener en cuenta que el coste del personal está ligado a la contabilidad externa, la cual se encargará de contabilizar y arbitrar documentos y sistemas de seguimiento como órdenes de trabajo, tarjetas de tiempo, controles de presencia, etc.

En cuanto a los repuestos, el mismo autor precisa que estos pueden clasificarse en materiales fungibles o materiales de inventario. Los primeros hacen referencia a aquellos

que son incorporados directamente durante la reparación, tienen corta vida útil y son meramente reemplazables; mientras que los segundos son aquellos cuya vida útil supera a los dos años y son reparables [13].

1.1.2 Evaluación y mejora de los indicadores de mantenimiento

Dentro de la gestión de mantenimiento es necesario evaluar y mejorar los valores de indicadores de mantenimiento propuestos, es por ello por lo que estas dos actividades resultan ser relevantes en el proceso de mejora en cuanto al desempeño de un equipo o proceso. A continuación, se explicará cada uno de estos procedimientos.

1.1.2.1 Evaluación de indicadores de mantenimiento

De acuerdo con González [17], la evaluación del mantenimiento en una organización permite analizar la consecución de los objetivos trazados, el estado de las labores planificadas y posibilita la identificación de aspectos que requieren ser más eficientes dentro del mantenimiento, con miras al desarrollo de acciones para la mejora continua.

En ese sentido Johansson [18] indica que *“cada empresa define formalmente, de acuerdo con criterios variados y verificados, el nivel para cada indicador propuesto”*, lo cual indica que dentro de la gestión de mantenimiento es menester del departamento de mantenimiento precisar los niveles óptimos, así como los mínimos aceptables, para sus indicadores de mantenimiento.

Johansson [18] también indica una herramienta que resulta ser muy útil al evaluar el desempeño de un indicador o KPI, la cual viene a ser el “Benchmark Study”. Esta herramienta se divide en tres diferentes etapas: “Data Collection”, “Data Comparison” y “Data Analysis”.

Un primer paso para el desarrollo de esta metodología es validar que la información a comparar sea fidedigna y confiable; es decir, que el valor de cada indicador de mantenimiento esté basado en datos reales y oportunamente recolectados. La “Data Collection” consiste en la recolección de información sobre el manejo y los valores de indicadores de mantenimiento de otras compañías, usualmente líderes en su rubro. Es

posible considerar la realización de entrevistas a gerentes de mantenimiento, producción o asociados [18].

En segundo lugar, la “Data Comparison” consiste en comparar los valores propios de la empresa con los valores recolectados, ello teniendo en cuenta criterios de comparabilidad de datos; es decir, que los datos sean compatibles bajo condiciones de operación, requerimientos de producción, entre otros. Finalmente, la “Data Analysis” hace referencia al análisis de los puntos de mejora en función a las diferencias entre los valores de los indicadores analizados. Es así como se pueden plantear estrategias y acciones para alcanzar el nivel más adecuado dentro de la organización respecto a los indicadores estudiados [18].

1.1.2.2 Mejora en indicadores de mantenimiento

El desempeño de la gestión de mantenimiento sobre un activo se mide en función sus los indicadores de mantenimiento y operación. Es así como Pascual [19] precisa en su libro “*El Arte de Mantener*”, que existen dos pilares fundamentales sobre los cuales se basa una buena gestión de mantenimiento: La planificación y la programación.

Ante esto, el autor añade que es necesario velar por algunos otros factores o aspectos que también influirán en el desempeño global de la gestión de mantenimiento. Dentro de estos podemos encontrar a la gestión humana y administrativa, la gestión productiva y la gestión de información. La gestión humana y administrativa abarca las mejoras en el ámbito de los recursos humanos, estructura de la organización, integración con sistemas de gestión ISO, capacitaciones con miras a la adquisición de competencias diversas y motivación del personal, formación de equipos de trabajo para actividades de mantenimiento, determinación de funciones por cargo laboral, etc. Por su parte, la gestión de producción abarca las variables del proceso productivo, por ejemplo, en el caso del filtro prensa de relave, abarca: Granulometría, caudal, la densidad, presión de alimentación, etc. La gestión de información implica el diseño y aplicación de cuadros de control, sistemas de gestión de recursos, medios de comunicación para instrucciones, seguimiento y monitoreo de diversos procesos, etc. [19]

Ahora bien, como se había precisado, si bien todos estos factores y gestiones pueden ser abordados y mejorados a través de diferentes estrategias, Pascual [19] precisa

que la planificación, al lado de la programación, son los factores que terminan definiendo el desempeño de un departamento de mantenimiento en cuanto a la gestión realizada sobre un activo. Es así como a través de la planificación se pueden conseguir mejoras haciendo uso de estadísticas de falla, registros de logística, formulación de un plan de mantenimiento, mejoras en la gestión de repuestos, planificación de tareas críticas, entre otros. Ello se debe a que todos estos factores influirán directamente sobre el mantenimiento del filtro prensa con miras a la mejora de su desempeño. Es importante recalcar que todo este proceso debe guardar coherencia con el plan estratégico de la empresa.

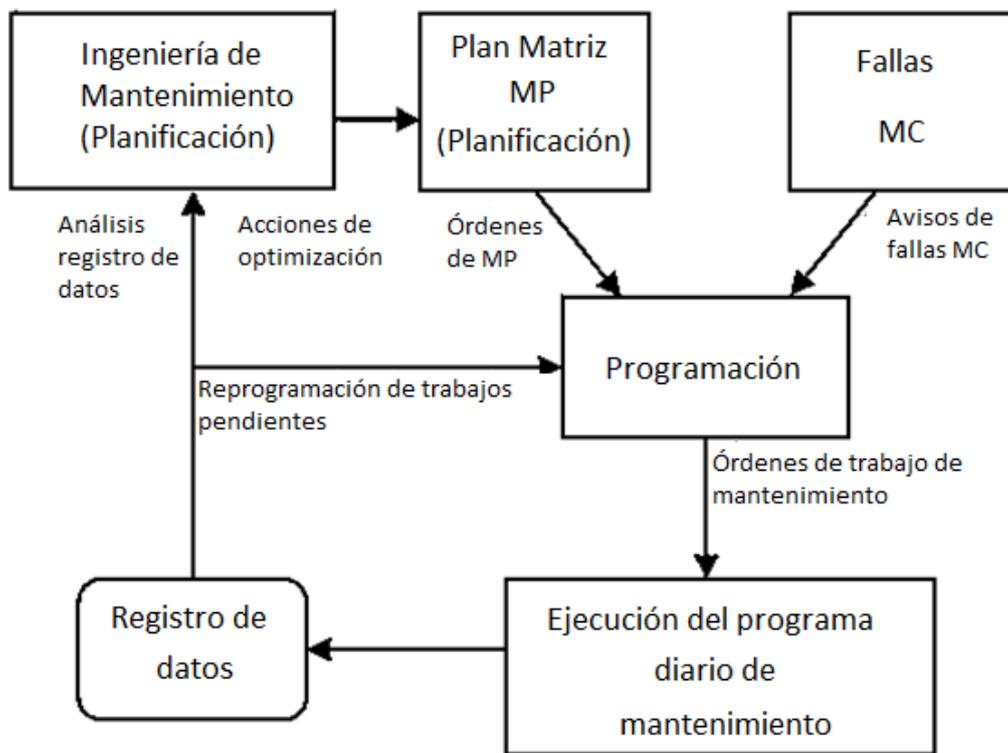


Figura 1.2 Proceso de mantenimiento: Planificación – Programación – Ejecución
Fuente: Francisco González. Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión [13]

En la **Figura 1.2** se muestra la importancia de la planificación en el diseño y aplicación del mantenimiento. De no contarse con una buena planificación para un equipo y, en su defecto, con un plan de mantenimiento; se estaría descuidado un aspecto importante en el objetivo de la mejora de los indicadores y KPIs de un activo, afectándose la calidad, rendimiento y hasta la seguridad de las personas y el medio ambiente.

1.2 Planificación de mantenimiento

1.2.1 La planificación dentro de la gestión de mantenimiento

Armstrong [20] indica que la planificación como parte de la gestión de mantenimiento es una etapa necesaria para la preparación de una actividad mantenimiento, ya que describe el “What and How” (qué y cómo) de las tareas a realizarse. Ahora bien, un trabajo de mantenimiento planificado es aquel en el que toda la información, materiales, herramientas, equipos de mantenimiento y repuestos están disponibles, las tareas se han descrito con detalles adecuados, costos y tiempo y el trabajo se puede completar según las normas requeridas sin demora y dentro del costo estimado.

De acuerdo con Armstrong [20], una buena gestión del mantenimiento permite mantener en condiciones de desempeño óptimas una planta, proceso o activo. En ese sentido, una planificación efectiva como pilar clave de la gestión minimiza el número de paradas por falla, asegura que una tarea se haga como debería hacerse y en el tiempo en el que deba ejecutarse, jerarquiza los procedimientos críticos, garantiza una programación precisa, minimiza el desperdicio de material, maximiza la productividad del mantenimiento, proporciona herramientas efectivas de comunicación entre supervisores, operadores y técnicos, entre otros. Adicionalmente, este autor resalta que la mejor manera de eliminar las causas de la falta de motivación dentro de las personas es implementar un proceso sólido de planificación y programación de trabajos de mantenimiento.

Por su parte, Palmer [21] afirma que la gestión de mantenimiento utiliza la planificación como una herramienta para reducir retrasos innecesarios en el trabajo a través de una preparación avanzada. Para preparar un trabajo por adelantado, un planificador desarrolla un plan de trabajo después de recibir una solicitud de trabajo.

El plan de trabajo recopila la información que el planificador prepara para el técnico que luego ejecutará la labor. Como mínimo, el plan de trabajo incluye el alcance del trabajo, identificación de las habilidades de artesanía requeridas y estimaciones de tiempo de trabajo. El planificador también puede incluir un procedimiento para realizar la tarea e identificar las piezas y herramientas especiales necesarias. Con la planificación o preparación adecuada para cada trabajo, se incrementará la productividad laboral [21].

Ahora bien, la planificación de mantenimiento emplea diferentes herramientas para su realización entre las cuales podemos encontrar al Análisis de Modo y Efecto de Fallas, análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA), las 5S, el Total Quality Management (TQM), metodología Scrum, plan de mantenimiento, entre otras; siendo este último, como se explicará más adelante, el que impacta directamente y de mejor manera en la búsqueda de la mejora del desempeño de un equipo [19].

1.2.2 Diseño de un plan de mantenimiento

García [10] define al plan de mantenimiento como un documento que contiene las tareas de mantenimiento programado a realizarse sobre una planta o equipo para asegurar los niveles de disponibilidad establecidos. El autor precisa que “es un documento vivo, pues sufre de continuas modificaciones, fruto del análisis de las incidencias que se van produciendo y del análisis de los diversos indicadores de gestión”.

Ahora bien, este autor indica que existen al menos tres modos diferentes para diseñar un plan de mantenimiento. El primero se basa en la recopilación de las instrucciones de los fabricantes que usualmente se incluyen en los manuales que acompañan a los equipos. Para un óptimo diseño a través de este modo, se recomienda agrupar estas instrucciones en diferentes gamas de mantenimiento (diaria, mecánica mensual, mecánica anual, eléctrica mensual, eléctrica anual). Su principal punto negativo es que no considera las condiciones de operación de la máquina ni el historial de datos de vida de esta [10].

El segundo modo se basa en el seguimiento a los protocolos genéricos de mantenimiento, que consideran que los equipos se pueden agrupar por tipos y a cada tipo le corresponde la realización de una serie de tareas independientemente de cuál sea el fabricante. Sin embargo, en el caso de esta investigación como ya se había precisado, el equipo a analizar (filtro prensa de relave Andritz modelo 2500) es el primero en su tipo dada su capacidad de filtrado de 2000 m² y no considera las condiciones de operación.

El tercer modo se basa en el empleo de diferentes métodos de carácter preventivo o predictivo, dentro de estos podemos encontrar: Análisis de modo y efecto de falla, mantenimiento basado en condición, mantenimiento basado en el riesgo, mantenimiento productivo total, mantenimiento centrado en la confiabilidad, mantenimiento basado en

el tiempo, técnicas de mantenimiento preventivo, entre otros. Este tercer modo, que se basa justamente en el empleo de diferentes métodos preventivos o predictivos, es el más completo y eficaz para realizar un plan de mantenimiento y puede apoyarse en los dos anteriores para su desarrollo.

Ahora bien, Prabhakar [22] como parte de su estudio “*CBM, TPM and RCM – A Qualitative Comparison of Maintenance Management Strategies*” plantea en la **Tabla 1.1** una comparación de las estrategias mencionadas.

Parámetro	CBM	TPM	RCM
Intención principal	Detección de la falla	Cambio Cultural	Prevención de la falla
Foco de la implementación	Realizar monitoreo continuo	Planear para diferentes condiciones	Cubrir todos los posibles modos de falla
Iniciación del programa	Selección de parámetros, adquisición de equipos	Anuncio de la alta dirección, inicio de programa de entrenamiento	Conformación de equipos, capacitación
Programa de apoyo	Sección separada para monitorear y recomendar acciones	Creación de estructura de apoyo organizacional, políticas.	La implementación posterior a la capacitación puede comenzar de inmediato
Cambios de proceso	La sección CBM se convierte en iniciadora de trabajos de mantenimiento	Mantenimiento autónomo por operadores	Generación del plan preventivo y/o predictivo basado en el resultado RCM
Actividad más importante de mantenimiento	Mantenimiento predictivo	Mantenimiento preventivo. Evaluación al operador	Mantenimiento preventivo y predictivo, rediseño si no se puede aplicar ninguna
Medidas de efectividad	Número de fallas sin aviso	Eficacia del equipo	Mean time between Failures (MTBF)

Tabla 1.1 Detalle de estrategias de mantenimiento

Fuente: Prabhakar P. y Jagaty V. CBM, TPM, RCM and A-RCM – A Qualitative comparison of maintenance management strategies [22]

Como se aprecia en la **Tabla 1.1**, la estrategia CBM se centra en la detección de la falla a través de estrategias de monitoreo, lo cual puede resultar costoso. Por su parte el TPM se enfoca en un cambio cultural, basándose en políticas y estructuras organizacionales, lo cual no influencia directamente en los valores para los indicadores de desempeño de un activo crítico [22].

A esto se puede agregar que el RBM se concentra en analizar las condiciones y las conductas de riesgo para planificar las intervenciones al equipo y la distribución de recursos de mantenimiento, con lo cual se descuida el estudio de los modos de fallas críticos para la mejora del desempeño de este [22].

Es así como la estrategia RCM es la única en su tipo enfocada en la prevención de fallas, así como en el estudio de todos los posibles modos de falla, determinación de las tareas de mantenimiento fundamentales y jerarquización de estas por su grado de criticidad y el sistema al que pertenecen dentro del equipo. Por lo tanto, un plan de mantenimiento diseñado a través de esta estrategia impacta significativamente en el equipo, mejorando sus indicadores y KPIs de mantenimiento y, por tanto, su desempeño. Cabe resaltar que los antecedentes presentados en esta investigación reflejan también el éxito intrínseco de la aplicación de esta estrategia en la tarea de mejorar el desempeño de uno o de un conjunto de activos, ello se evidencia en los incrementos de disponibilidad mecánica y el ahorro monetario propiciado.

1.2.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un proceso sistemático empleado para determinar las tareas requeridas para garantizar que cualquier instalación física o equipo pueda cumplir continuamente con las funciones establecidas en su contexto operativo respectivo. La estrategia RCM conduce a un programa de mantenimiento que enfoca el mantenimiento preventivo (PM) en modos de falla específicos que pueden ocurrir. Su aplicación radica en la determinación de las tareas de mantenimiento particulares que deben realizarse, así como para influir en la fiabilidad y la capacidad de mantenimiento de los elementos durante el diseño [23].

1.2.3.1 Descripción general del RCM

De acuerdo con Siddiqui, A. W. y Ben-Daya, M. [24], la filosofía del mantenimiento centrado en la confiabilidad se basa en la mejora del desempeño de un equipo a través de un método rentable, al mismo tiempo que se identifican y diseñan políticas y estrategias operativas y de mantenimiento. Ello se realiza para administrar los riesgos de la falla funcional de un equipo o sistema de manera económicamente efectiva.

El enfoque principal de la estrategia RCM es mantener la función de un equipo a un determinado nivel deseado en el contexto operacional actual. Cabe destacar que esta estrategia prioriza aquellos sistemas o equipos que posean un grado de criticidad elevado en función de las consecuencias de las fallas que puedan darse [24].

Estos autores precisan también los principios o características clave de la estrategia RCM de acuerdo con cuatro puntos principales:

1. Preservar la función del sistema. En este punto surge la cuestión de qué es relevante para mantener dicha función a un nivel determinado y asegurar la disponibilidad de ese mismo nivel en el tiempo [24].

2. Identificar los modos de falla particulares que potencialmente puedan causar una falla funcional. Esta información es crucial, ya sea que se requiera una modificación de diseño u operación o, si se debe diseñar un plan de mantenimiento [24].

3. Priorizar las fallas funcionales clave. Ello implica que los esfuerzos se enfoquen en abordar equipos que presenten funciones críticas y cuya falta de disponibilidad significaría una mayor degradación de la planta hasta un cierre total [24].

4. Plantear y seleccionar las tareas de mantenimiento aplicables y efectivas para los ítems de alta prioridad. Ello con el objetivo de hacer un uso eficiente y rentable de los recursos disponibles para el mantenimiento [24].

Por su parte, Bloom [25] añade que la estrategia RCM posee tres pilares fundamentales para su desarrollo, los cuales son: Saber cuándo un análisis de falla única es aceptable y cuándo no es aceptable, saber identificar fallas ocultas y saber cuándo se requiere realizar un análisis de fallas múltiples. Además, este mismo autor precisa que la aplicación de esta estrategia implica diferentes beneficios: En primer lugar, ayuda a determinar el programa de mantenimiento óptimo; en segundo lugar, optimiza los esfuerzos de mantenimiento, tanto en términos de eficiencia operativa como de rentabilidad; y, en tercer lugar, ayuda a mantener el foco en la preservación de las funciones más importantes del sistema, mientras evita acciones de mantenimiento que no son particularmente necesarias. En esencia, se esfuerza por lograr la confiabilidad

requerida del sistema al menor costo posible, sin tener que olvidar los problemas relacionados con la seguridad y el medio ambiente.

1.2.3.2 Aplicación de la estrategia RCM

La aplicación del proceso RCM está reglado a través de la norma SAE-JA1011 y SAE-JA1012. Hay que considerar que uno de los principales requerimientos para el desarrollo de la estrategia RCM son los datos de vida del equipo o el componente que deseamos analizar. Ahora bien, de acuerdo con Moubray [23], para el desarrollo de la estrategia RCM se deben formular siete preguntas iniciales acerca del activo que se intenta abordar:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Es necesario responder estas preguntas para conocer mejor al equipo, sus funciones y las fallas que podría sufrir en su contexto operacional. Posteriormente, como primer paso del desarrollo del RCM, se deben definir las funciones del equipo en su contexto operacional juntamente con los parámetros de funcionamiento deseados. En ese sentido, las funciones pueden ser de dos tipos:

1. Funciones primarias: Responden al por qué de la posesión del activo. Se abarcan temas de velocidad, producción, capacidad, entre otros [23].
2. Funciones secundarias: Representa lo que se requiere además de las funciones primarias. Se basa en las expectativas sobre control, contención, confort, integridad, rentabilidad, protección, eficacia, entre otras [23].

Ahora, en segundo lugar, se introduce el concepto de *falla funcional*, la cual ocurre cuando el activo no cumple una función respecto al parámetro de funcionamiento

que se considera aceptable y se define como la incapacidad total de funcionar o, en su defecto, hacerlo con un nivel de desempeño inadmisible [23].

Por otro lado, como tercer punto, se identifican los *modos de falla*, lo cuales son hechos que de manera sensatamente posible pueden haber ocasionado cada estado de falla. Se deben tener como referencia a aquellos que hayan ocurrido en equipos parecidos que operen en condiciones similares, fallas que estén siendo prevenidas por políticas actuales de mantenimiento, incluyéndose también a las fallas que probablemente vayan a ocurrir [23].

En general, las listas habituales de modos de falla consideran al deterioro o desgaste como el modo de falla más importante; sin embargo, debería considerarse también fallas causadas por errores humanos y hasta errores de fabricación o diseño. Es recomendable detallar adecuadamente cada modo de falla y jerarquizarlos en base a su grado de criticidad, pero sin malgastar tiempo en el análisis de detalles triviales [23].

Como cuarto punto a tratar dentro del análisis a través de la estrategia RCM se tiene a los *efectos de falla*, que refieren lo que ocurre con cada modo de falla para evaluar sus consecuencias. Es recomendable incluir detalles como: Qué evidencia existe, de qué modo afecta a la seguridad, de qué manera interfiere en la producción, qué daños físicos han sido originados por la falla y qué se debe hacer para reparar la falla [23].

Como quinto punto tenemos a las *consecuencias de la falla*, donde se evalúan las fallas con las consecuencias más relevantes dentro de la empresa. Cabe destacar que las consecuencias de las fallas son más significativas que sus características técnicas, el cual es un punto fuerte que reconoce la estrategia RCM. En esta metodología se clasifican las consecuencias en cuatro grupos [23]:

1. Consecuencias de fallas ocultas: No impactan directamente, pero pueden generar múltiples fallas con consecuencias graves.
2. Consecuencias ambientales y para la seguridad: Se dan cuando pueden causar un daño potencial o una muerte accidental, o si infringen una normativa ambiental a nivel corporativo, regional, nacional o internacional.
3. Consecuencias operacionales: Se dan si impactan en la producción en sus diferentes características.

4. Consecuencias no-operacionales: Solo se asocian a los costos de reparación.

Es así como la estrategia RCM resta importancia a las tareas de mantenimiento que tienen resultados irrelevantes y enfoca la atención sobre aquellas que tienen mayor efecto sobre el desempeño de la organización. Estas tareas, conforme a la estrategia RCM, se dividen en *tareas proactivas* y *acciones a falta de* [23].

Las “tareas proactivas” se inician antes de que se dé la falla; es decir, conforman al mantenimiento preventivo y predictivo. Estas, a su vez, pueden dividirse en tareas de reacondicionamiento cíclicas, tareas de sustitución cíclicas y tareas a condición. Por otro lado, las “acciones a falta de” lidian directamente con el estado de la falla e incluyen búsqueda de falla, rediseño y mantenimiento a rotura [23].

Ahora bien, la selección de políticas de mantenimiento en el RCM está gobernada por tres categorías a la que puede pertenecer una falla: Falla con consecuencias ocultas, falla con consecuencias de seguridad o medio ambiente y fallas con consecuencias económicas. En el caso de la primera categoría será el diseño de una tarea óptima el que consiga la disponibilidad requerida del dispositivo que evite la falla, en el caso de la segunda la tarea óptima es aquella que consigue reducir la probabilidad de la falla hasta un nivel tolerable y en el caso de la tercera la tarea óptima es aquella que minimiza los costos totales para la empresa [23].

1.3 Marco operacional del filtro prensa de relave Andritz modelo 2500

1.3.1 Métodos de recuperación de agua de los relaves

Lara [26] explica que la recuperación del agua de los relaves es una tarea necesaria por diferentes razones que abarcan desde aspectos de inversión en depósitos de relave o relaveras (Capex) hasta el cuidado medioambiental. Este autor precisa que tradicionalmente el proceso se realiza a través de dos procedimientos: Espesamiento y filtrado.

En el caso del espesamiento, se emplean espesadores para obtener un porcentaje final de sólidos con valores de entre 65 a 75%, este sistema se muestra la **Figura 1.3**. Por

su parte el filtrado puede darse a través de diferentes tipos de filtros como: Filtros de bandas, filtros de discos, filtros prensas o filtrados in situ [26]. La concentración final de sólidos en este caso es de alrededor de 20%. En la **Figura 1.4** se presenta un ejemplo de filtro de discos. Cabe precisar que estos dos procesos también pueden trabajar conjuntamente dependiendo de las disposiciones de la compañía minera y de las necesidades del contexto de trabajo.



Figura 1.3 Sistema de espesamiento de relave

Fuente: Company Outotec. Thickeners or thickener plants – optimizing the performance and cost of thickened tailings [27]



Figura 1.4 Filtro prensa de discos

Fuente: OBL Asociados. Lonas para filtro de disco [28]

El trabajo con relaves filtrados o espesados aporta diversos beneficios al proceso productivo, tales como: Garantizar un depósito homogéneo, minimizar o eliminar el requerimiento de muros de confinamiento y de lagunas de decantación, reducción de riesgos de contaminación de napas y cauces naturales, entre otros. Cabe precisar que el agua remanente que queda en el relave filtrado se seca por evaporación en las chanchas de relave, alcanzándose así el valor ideal de concentración de sólidos, teniéndose finalmente un estado geotécnico denso, no licuable y sísmicamente estable [26].

1.3.2 Filtro prensa de placas verticales

Capone [29] en su tesis titulada “Filtros de prensa para relaves” explica que un filtro de prensa de placas verticales, como lo es el Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500, está compuesto por placas verticales de polipropileno acopladas a un sistema de desplazamiento para su traslado durante el proceso de filtrado. El sistema es activado a través de un accionamiento hidráulico que aporta la presión requerida para el soplado del relave una vez que este ha ingresado por medio de un canal pasante a lo largo de todas las placas. Ello permite una distribución adecuada de la presión, el flujo y la distribución del relave entre placa y placa.

Se tiene lonas que cubren a las placas y evitan que estas se dañen durante el soplado de las tortas de relave. Finalmente, el relave filtrado resulta en una pasta con baja humedad que se descarga en una zona segura al retirarse el sistema hidráulico y al activarse el sistema de accionamiento hidráulico [29].

El filtrado de prensa es un proceso discontinuo que opera en ciclos los que se pueden resumir en [29]:

- Cerrado: Cuando el filtro está limpio y vacío.
- Llenado: Con las cámaras cerradas se llena de relaves para su filtración.
- Filtración: Aumento de presión en las cámaras una vez que se encuentran llenas.
- Apertura: Se separan las placas permitiendo que el relave filtrado se descargue.
- Limpieza: Se limpian las cámaras con sistemas de agua presurizada.

Los principales beneficios de esta tecnología implican grandes áreas de filtración, bajas humedades en el relave filtrado, cortos ciclos de filtrado, bajo consumo de energía, descarga de torta segura [29].

1.3.3 Contexto operacional del filtro prensa en estudio

La unidad minera en la que se encuentra el activo a analizar (Filtro Prensa de Relaves Andritz modelo 2500) está ubicada a 4800 m.s.n.m. Sus productos principales son el doré, el concentrado de plomo y el concentrado de zinc con una capacidad nominal de planta de 1500 toneladas métricas por día.

La temperatura promedio anual es de 4°C, descendiendo hasta -8°C durante las noches a lo largo de todo el año. Usualmente se presentan nevadas y granizadas dos veces al día, teniéndose también un panorama con neblina desde la media noche hasta aproximadamente las 05:00 de la mañana [30]. El exceso de humedad ha venido generado una corrosión superficial en algunas zonas del filtro y dado que la estructura de reposo del filtro es la nave industrial misma en la cual se encuentra, este se ve parcialmente más afectado por las vibraciones mismas de su funcionamiento [31]. En la **Figura 1.5** se muestra una fotografía del equipo en análisis, el Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500, en su área de operación dentro de la unidad minera.



Figura 1.5 Filtro Prensa de Relave Modelo Andritz 2500
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta los métodos, técnicas y procedimientos en general para el desarrollo de la investigación. Se tiene dos principales etapas en la misma y cada una se divide en partes diferentes como se muestra en la **Figura 2.1**. Cabe precisar que cada parte se desarrolla en función al Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500, activo en estudio en esta tesis.

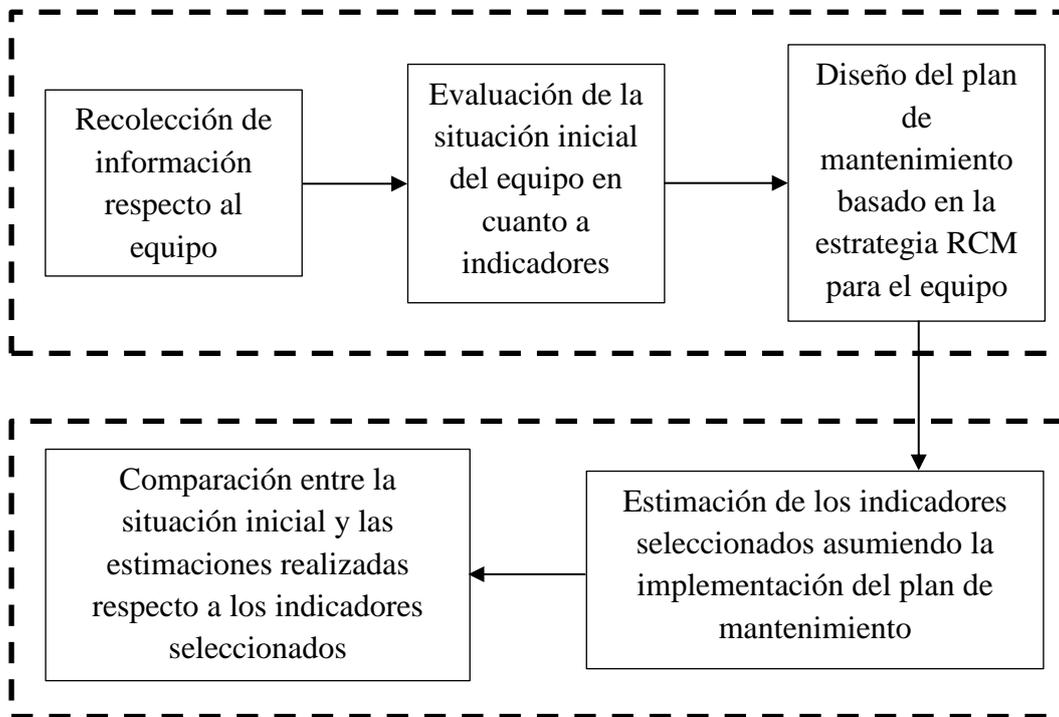


Figura 2.1 Etapas de la metodología para el desarrollo de la investigación
Fuente: Elaboración Propia

El primer recuadro rectangular delineado especifica la primera etapa de la investigación, la cual abarca hasta el desarrollo del plan de mantenimiento en sí. Por su parte, la segunda etapa, se enfoca en el análisis posterior al diseño del plan en cuanto a los indicadores propuestos y la comparación respecto a los efectos de su implementación. Cada una de estas etapas se explicará a detalle en las siguientes líneas.

2.1 Primera etapa de la investigación

2.1.1 Recolección de información respecto al equipo

Entre la información recolectada con respecto al Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500 se encuentra su manual de operación y mantenimiento, la documentación de operación y mantenimiento registrada por la unidad minera (especialmente los datos de vida), videograbaciones y fotografías para el análisis de funcionamiento y los testimonios por parte de los técnicos y operadores encargados del equipo.

En primer lugar, el manual a tener en cuenta se titula “Andritz Separation – Operación y Mantenimiento Filtro Prensa 2500 x 2500 mm” [32] y es proporcionado justamente por el fabricante Andritz para su empleo en la unidad minera. Es así como este documento es propiedad de la empresa, el acceso al mismo se da con fines académicos para el desarrollo de la presente investigación y bajo la venia del jefe de mantenimiento de planta de la mina. A partir de este se obtuvo información respecto a las generalidades para la puesta en marcha, especificaciones técnicas, parámetros de funcionamiento, listas de piezas y componentes y alcances básicos de mantenimiento del equipo. La portada del manual se muestra en el **Anexo 1**.

En segundo lugar, la documentación de operación y mantenimiento registrada por la unidad minera respecto al filtro prensa es propia del equipo de trabajo asignado a velar por una buena operación y mantención del mismo, y pertenece al área denominada “Filtrado de relaves”. Dentro de los formatos que se emplean encontramos al documento titulado “Reporte Diario de Trabajos”, el cual contiene a detalle las actividades realizadas cada día en el filtro prensa; estas incluyen las tareas correctivas, preventivas y predictivas. Para cada una se precisa el tiempo de ejecución y el número de personas que intervienen. También se cuenta con un conjunto de reportes presentados al jefe de mantenimiento planta, los cuales precisan los trabajos mayores desarrollados sobre el equipo, ya sean modificaciones estructurales o alteraciones en el funcionamiento.

Adicionalmente, se cuenta con un “Cuaderno de operación” que especifica los eventos acontecidos respecto al filtro prensa día a día. Por su parte, la interfaz de control del filtro prensa muestra los eventos ocurridos respecto a su operación (en un periodo de tiempo no mayor a 8 h), incluyendo a las paradas y un registro de averías y fallas. Toda

esta documentación ha sido recopilada a partir de junio del año 2018 hasta el mes de junio de 2019, lo cual abarca un periodo total de 12 meses. Los datos de vida de los subsistemas, componentes o piezas se presentan a modo de “cambios” o “reparaciones” dentro del reporte diario de trabajos y las paradas por falla se obtienen de la interfaz del equipo, el cuaderno de operación o también el reporte diario de trabajos.

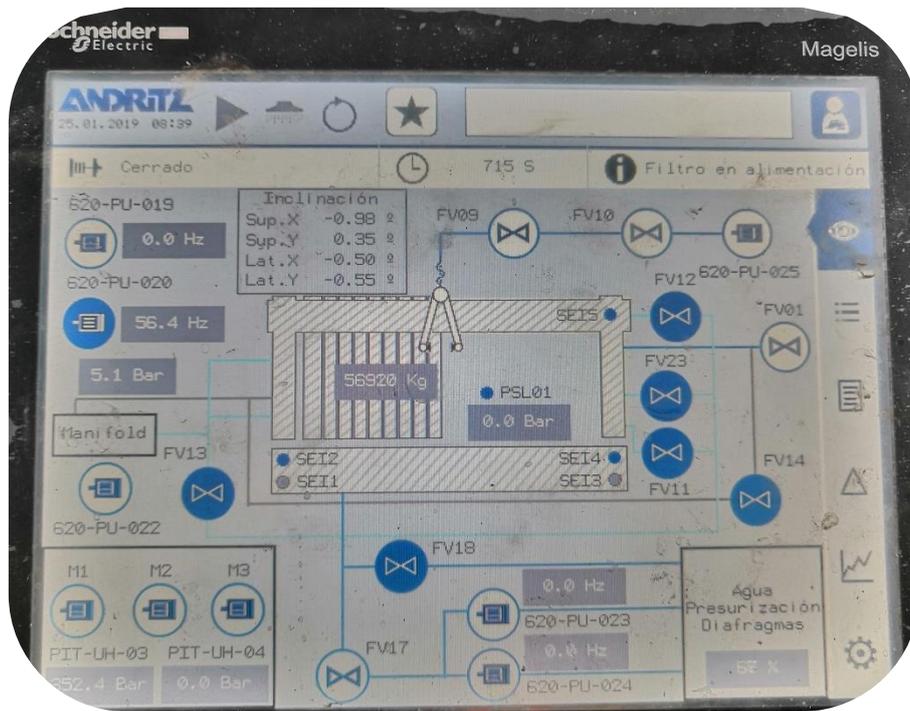


Figura 2.2 Interfaz de operación del Filtro Prensa Andritz modelo 2500
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

En tercer lugar, las videograbaciones y fotografías han sido obtenidas de manera directa a través de la funcionalidad de la cámara de un teléfono celular. En estas se describe gráficamente el funcionamiento del filtro prensa, incluyendo sus procesos más críticos. Asimismo, es factible también identificar ciertas paradas por falla de determinadas piezas o componentes durante el ciclo de filtrado por medio de estos archivos multimedia. Esta información permite contar con más elementos de análisis para el desarrollo del plan de mantenimiento del equipo. Finalmente, los testimonios por parte de técnicos y operadores fueron registrados como archivos de audio a través de un teléfono celular. Estos permiten contrastar y validar las tareas propuestas en el plan de mantenimiento con la experiencia de trabajo que se tiene respecto al equipo. Toda esta

información o data recolectada ha sido validada y cuenta con el respaldo de una carta de autorización por parte de la unidad minera.

Ahora bien, la

Tabla 2.1 es parte de una tabla maestra de mi autoría la cual resume el reporte diario de trabajos, los registros del cuaderno de operación y las fallas inscritas en la interfaz de control del equipo en términos su operación e intervenciones de mantenimiento. En base a esta se trabajan los indicadores previamente mencionados teniendo en consideración las columnas de “estado”, “descripción estado”, “# personal involucrado”, “comentarios” y “tiempo del evento”. En el **Anexo 8** se muestra una versión más amplia de esta tabla; sin embargo, no se presenta la versión completa por su gran extensión y por ser propiamente data de la unidad minera, por lo cual esta solo se empleó para identificar los datos necesarios para el cálculo de indicadores, las fallas y los modos de falla. Cabe precisar que esta tabla evidente en el **Anexo 8** no se encuentra en orden cronológico con la intención de mostrar la mayor cantidad de eventos posibles en cuanto a las acciones exclusivamente correctivas.

Fecha	Equipo	Hora Inicio	Hora Fin	Estado	Descripción estado	Razón	# Técnicos Involucrados	Comentarios	T. Evento (horas)
14/11/2018	F.P. Andritz 2500	19:16	19:40	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reparación	2	Cambio rodamiento del sistema DDP	0.40
14/11/2018	F.P. Andritz 2500	19:40	22:00	Operación normal	Producción	Tiempo neto operativo	0	Equipo en operación normal	2.33
14/11/2018	F.P. Andritz 2500	22:00	22:10	Operación - demora	Cambio de Guardia	Demora operativa programada	0	Cambio de guardia	0.17
14/11/2018	F.P. Andritz 2500	22:10	22:14	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reactivar el ciclo de filtrado	1	Se censa desnivel de placa móvil	0.06

Tabla 2.1 Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

2.1.2 Evaluación de la situación inicial del equipo en cuanto a indicadores

La situación inicial del filtro prensa está definida en cuanto a la determinación de los indicadores previamente presentados, los cuales son los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, índice de mantenimiento correctivo, eficacia global del equipo (OEE), disponibilidad, tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)

y tiempo medio para reparar (Mean Time To Repair - MTTR). El método de cálculo para cada uno de estos indicadores se ha presentado en el *Marco Teórico* de esta investigación.

Los parámetros de entrada requeridos para los cálculos se determinan a partir de los datos recolectados a priori y que están resumidos en la “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa” (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En primer lugar, en el caso de los costos directos asociados al mantenimiento, se puede precisar que involucran a la mano de obra, repuestos, servicios externos, gastos comunes (agua, energía, transporte), insumos comunes (combustibles, lubricantes), entre otros [16]. Adicionalmente se considera el costo por pérdida de producción o lucro cesante asociado a la parada de planta (a consecuencia de una parada prolongada en el filtro), el cual es una constante en la unidad minera. Ahora bien, el valor inicial de los costos en cuanto al mantenimiento del filtro prensa (asociado justamente a la condición actual del equipo) es un dato fijo proporcionado por la mina y determinado de forma anual, este se presenta el apartado de resultados. Hay que tener en cuenta que actualmente el mantenimiento correctivo predomina sobre el preventivo.

En segundo lugar, la ecuación para el cálculo del índice de mantenimiento correctivo, el cual es el porcentaje de horas invertidas en realización de mantenimiento correctivo respecto al número de horas totales dedicadas al mantenimiento, presenta la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de mantenimiento correctivo} = \frac{HDMC}{HTDM}$$

Donde:

HDMC: Horas dedicadas al mantenimiento correctivo

HTDM: Horas totales dedicadas al mantenimiento

Estas dos variables son definidas de acuerdo “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa”. El periodo por considerar para su determinación será de un año (junio de 2018 a junio de 2019).

En tercer lugar, la eficacia global del equipo (OEE), la cual evidencia un valor que refleja el desempeño global de un activo, posee la siguiente ecuación de cálculo [15]:

$$OEE = Disponibilidad\% \times Rendimiento\% \times Calidad\%$$

Respeto a esta ecuación, el cálculo para el valor de la disponibilidad se presenta líneas más adelante. Por otra parte, el rendimiento, como precisa la SMRP [15], es una relación entre la producción real y la capacidad productiva total, esta variable se ve afectada principalmente por los ritmos reducidos o las demoras operativas que también se evidencian en la “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa”. La capacidad productiva total se determinará en función a la planificación respecto a la cantidad de relave a filtrar por turno de trabajo, que también se presenta en el apartado de resultados. Asimismo, la calidad tradicionalmente relaciona el número de unidades no defectuosas producidas y el número total de unidades producidas. En el caso de este estudio se tendrá en cuenta el porcentaje de humedad deseado para el relave producto del proceso de filtrado, el cual es 17%, para compararlo con el porcentaje de humedad real obtenido (dato operativo por parte de la unidad minera).

En cuarto lugar, la ecuación de cálculo para la disponibilidad, como también se presentó anteriormente en el *Marco Teórico* [13], es:

$$Disponibilidad = \frac{TTDO - TFS}{TTDO}$$

Donde:

TTDO: Tiempo total destinado a operación (h)

TFS: Tiempo fuera de servicio (h)

El tiempo total destinado a operación está definido por el área de operaciones y el tiempo fuera de servicio es registrado por el área de mantenimiento, este último a ser obtenido a partir de la “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa”. En el caso del filtro, el tiempo fuera de servicio se asocia únicamente a las paradas por falla. Cabe resaltar que esta disponibilidad se mide de manera mensual, siendo factible obtener un promedio anual.

En quinto lugar, se tiene al tiempo promedio entre fallos (MTBF) que representa el tiempo entre paradas por fallos o reparaciones que se espera que un equipo opere

adecuadamente [14]. Como se precisó, se busca que este tiempo sea el más elevado posible, su fórmula de cálculo es como sigue:

$$MTBF = \frac{TTD - TIF}{\text{Número de fallas}}$$

Donde:

TTD: Tiempo total disponible (h)

TIF: Tiempo de inactividad por falla (h)

El tiempo total disponible es definido por el área de mantenimiento de, el tiempo que el equipo está parado por reparaciones lo determina el equipo de mantenimiento a través de la suma de los tiempos de reparación total (evidente en la “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa”). Por su parte, dentro del tiempo de inactividad es factible incluir los tiempos muertos de inutilización, evidentes también en la tabla mencionada, y estos obedecen a las paradas de planta totales o parciales que no hayan sido ocasionadas por alguna falla del filtro. Todos estos periodos de tiempo y números de falla se consideran para periodos mensuales, pudiéndose obtener un promedio anual.

Finalmente, el tiempo promedio para reparar (MTTR) mide la efectividad en restituir el equipo a condiciones óptimas de funcionamiento una vez que este se encuentre fuera de servicio por un fallo. Este parámetro está asociado a la mantenibilidad, la cual es una función del diseño del equipo que se define como la probabilidad de devolver al mismo a condiciones operativas en cierto periodo de tiempo [14]. Su fórmula de cálculo a emplear en el estudio es:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de paradas por reparación}}$$

Ambos valores de la ecuación son definidos por el departamento de mantenimiento de acuerdo a la “Tabla de eventos operativos y de mantenimiento del filtro prensa” y realizando un análisis, nuevamente, mensual. Es importante mencionar que

asociando el MTBF y el MTTR se puede determinar y validar el valor calculado para la disponibilidad de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Una vez determinados los indicadores se procede a evaluar aquellos que pueden ser comparados con sus homólogos considerados valores ideales o muy aceptables planteados por el autor Johansson [18]. De acuerdo a él, el índice de mantenimiento correctivo debería alcanzar el 30%, la eficacia global del equipo (OEE) debería alcanzar un valor de entre el 75% al 85% (valores muy aceptables) y la disponibilidad de un equipo crítico debería alcanzar un valor de entre 85% a 90%. Por su parte, los demás indicadores (costos directos, MTBF y MTTR) no pueden ser evaluados puesto que dependen meramente de la operación y sus valores son propios y singulares, pero es deseable que su tendencia sea de mejora continua.

Ahora bien, en esta etapa, al evaluar los indicadores, no solo se evalúa el grado de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad del filtro prensa; sino que se determina también los puntos de mejora más álgidos en cuanto al desempeño del equipo, independientemente de la mejora global de desempeño que se busca alcanzar a través del diseño del plan de mantenimiento. Adicionalmente, las videograbaciones y fotografías registradas también evidencian parte de las condiciones físicas iniciales del filtro, dentro de las cuales se puede incluir las fugas de aceite, corrosión, entre otras.

2.1.3 Diseño del plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM

El diseño del plan de mantenimiento aplicando la estrategia RCM implica una serie de pasos que, desarrollados adecuadamente, nos permiten alcanzar un mejor funcionamiento operacional, una mejor relación costos – eficacia del mantenimiento, mayor seguridad para las personas y el ambiente y un mejor trabajo en equipo con miras a la mejora del desempeño de un activo [23].

En ese sentido, el proceso comienza con el desarrollo del Análisis de los Modos y Efectos de falla (AMEF), a través de la definición de las funciones principales y secundarias del equipo, para lo cual se puede tomar como guía las especificaciones

señaladas por el fabricante. En seguida se definen las fallas funcionales (o anti-funciones), aquellas que ocurren cuando un activo no puede cumplir su función principal o no lo hace a un nivel mínimo requerido (se tiene un fallo por cada función) [23]. Una vez definidas las fallas funcionales se procede con la identificación de los modos de falla (o “causas de falla”), es decir, los hechos que pudieron haber causado la falla (puede haber más de 1 modo de falla por cada falla). Finalmente, se precisan los efectos que se presentan al evidenciarse dichos modos de falla, es decir, aquellas evidencias auditivas, visuales, térmicas, hidráulicas, entre otros, que pueden sobrevenir en el equipo [23].

Una vez culminado este procedimiento se determinan y jerarquizan las consecuencias de los modos de falla teniendo en cuenta sus impactos en los costos (pérdidas económicas directas y por lucro cesante), la seguridad, el ambiente, la producción y la calidad del procesado. Para esta jerarquización se considera también a cuán probable es que cada modo de falla se dé, qué tan evidente es cuando se da (facilidad para detectar el modo de falla) y su grado de riesgo asociado (teniendo en cuenta su frecuencia y severidad) [23]. Es después de esto que se plantean tareas de mantenimiento, ya sean “proactivas” (antes de que ocurra la falla - tareas de reacondicionamiento cíclicas, tareas de sustitución cíclicas y tareas a condición) o “acciones a falta de” (tratan el estado de falla - búsqueda de falla, rediseño y mantenimiento a rotura). Ello se realiza justamente priorizando las consecuencias más relevantes y teniendo en cuenta el análisis a los datos de vida de cada subsistema, componente o pieza del equipo, que, de la mano con criterios tradicionales, definirán la frecuencias de las tareas propuestas [23].

Cabe resaltar que estas acciones o tareas pueden plantearse a través de las herramientas que proporciona la estrategia RCM, las cuales permiten precisar y organizar qué mantenimiento de rutina será realizado, con qué frecuencia será realizado y quién lo hará; qué fallas son lo suficientemente serias como para justificar un rediseño y qué fallas se dejarán que ocurran (tolerables). Dentro de estas herramientas se tiene a la Hoja de información RCM (ver **Anexo 2**), al Diagrama de decisión RCM (ver **Anexo 3** y **Anexo 4**) y a la Hoja de decisión RCM (ver **Anexo 5**).

El Diagrama de decisión integra todos los procesos de decisión en una estructura estratégica única que se aplica a cada uno de los modos de falla listados en la Hoja de información RCM. Por su parte, la hoja de decisión nos proporciona el esquema para

referenciar a los modos de fallas estudiados, su respectiva evaluación de consecuencias y el tipo de tarea propuesta con el intervalo o frecuencias de realización y la persona encargada de la tarea.

2.2 Segunda etapa de la investigación

2.2.1 Estimación de los indicadores seleccionados asumiendo la implementación del plan de mantenimiento

Los indicadores presentados en los *Objetivos* de esta investigación y evaluados en la primera etapa de la misma se calculan nuevamente en este punto, bajo las mismas fórmulas o métodos de cálculo, al asumir una implementación del plan diseñado. En el caso específico de los costos directos asociados al mantenimiento (sumándose también la pérdida por lucro cesante) esta vez se calculan a través del análisis sobre los costos individuales de las fallas y modos de falla previamente determinados y que resultan más sensibles o influyentes en la operación del filtro prensa. En otras palabras, el análisis se enfoca sobre los mantenimientos correctivos.

La **Ecuación 2.1** presenta la fórmula de cálculo para determinar los costos anuales de la aplicación de un mantenimiento correctivo sobre una falla:

$$C_{\text{mtto correctivo}} = ((C.M.O. + C.Rep.In) + (C.P.P.* Factor P.L.C.)) * \text{frec. anual} \quad (2.1)$$

Donde:

- C.M.O: Costo de mano de obra (asocia al número de personas que realizan el mantenimiento, el tiempo que invierte cada persona en la labor de mantenimiento y el salario por hora de cada persona)
- C. Rep. In: Costos de los repuestos e insumos a emplear
- C.P.P: Costos por pérdida de producción por parada de planta, asocia a la pérdida monetaria por hora (valor constante en la unidad minera) y al número de horas de parada.
- Factor P.L.C: Factor de pérdida por lucro cesante. Define el grado en el cual para la planta (posee valores entre 0 y 1).

El cálculo de los demás indicadores se realiza a través de parámetros estimados razonablemente, los cuales están basados en los efectos y mejoras que se obtendrían a partir de la incorporación de las tareas de mantenimiento sugeridas dentro de las actividades del equipo de mantenimiento encargado del área de filtrado de relave. Se tendrá en cuenta principalmente las tareas que más impacto generarían, es decir, aquellas que ataquen directamente a los modos de falla más álgidos y repercutan directamente en la mejora del desempeño y sobre los costos de mantenimiento del filtro prensa.

2.2.2 Comparación entre la situación inicial y las estimaciones realizadas respecto a los indicadores seleccionados

La comparación se realizó directamente entre el resultado obtenido para un determinado indicador en la etapa inicial y su homólogo estimado después de haber diseñado el plan. Las mejoras para los costos directos asociados al mantenimiento correctivo y los indicadores de tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio para reparar (MTTR) ser plantearon como incrementos porcentuales a través de variaciones porcentuales como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Variable	Valor inicial	Valor final
Indicador A	X	Y
Variación porcentual caso 1	$VP_1\% = \frac{Y - X}{X} * 100$	

Tabla 2.2 Cálculo de mejora porcentual 1
Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, las mejoras para los indicadores de eficacia global del equipo (OEE), disponibilidad e índice de mantenimiento correctivo se plantearon como incrementos porcentuales a través de restas directas como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Variable	Valor inicial	Valor final
Indicador A	X	Y
Variación porcentual caso 2	$VP_2 = Y - X$	

Tabla 2.3 Cálculo de mejora porcentual 2
Fuente: Elaboración Propia

Se realizó también una comparación entre las grabaciones recopiladas que demarcan los conocimientos empíricos o basados en la experiencia y tengan que ver con

el mantenimiento del equipo (en especial las frecuencias de cambio y los componentes que estén asociados a modos de falla críticos) con el plan de mantenimiento diseñado, lo cual permite validar el plan a través de un contraste con el Know How de los técnicos y operadores.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

En este capítulo se presenta el desarrollo y resultados de la investigación. Este se divide en dos partes de acuerdo con la metodología planteada; en la primera parte se abarcan los aspectos de recolección de información, el estado inicial en cuanto a indicadores de costos directos asociados al mantenimiento correctivo, índice de mantenimiento correctivo, eficacia global del equipo (OEE), disponibilidad, MTBF, MTTR; y el diseño del plan de mantenimiento para el filtro prensa. En la segunda parte, se expone, asumiendo la implementación del plan de mantenimiento diseñado, la estimación razonable de los nuevos valores para los indicadores propuestos y se comparan estos valores con los de la situación inicial del filtro.

3.1 Resultados de la primera etapa de la investigación

3.1.1 Información recolectada respecto al filtro prensa

En base a la información recolectada respecto al Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500, se precisan los siguientes puntos relevantes:

- a) El proceso de funcionamiento cíclico del filtro sigue las siguientes etapas:
 - Filtro en alimentación: Se introduce el relave al equipo alcanzándose una presión de alimentación de 5 bar. Esta alimentación se da por el canal número (2), denotado en rojo en la **Figura 3.1**. La conexión del canal número (1) se bloquea a través de una válvula de cuchilla para permitir el paso ininterrumpido de relave (la funcionalidad de esta se explica en el siguiente inciso).



Figura 3.1 Vista lateral del canal de alimentación (2) y retorno de relave sobrante (1)
 Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- Soplado del canal de alimentación – primera etapa: se limpia el canal de alimentación de relave a través del soplado de aire presurizado y el retorno del relave sobrante se da por la tubería denotada en rojo con el número (1) en la **Figura 3.1**, esta es adyacente a la tubería de admisión. Para llevar a cabo este procedimiento se bloquea la válvula del canal de alimentación (2). En la **Figura 3.2** y **Figura 3.3** se muestra la tubería de soplado, la cual ingresa por el lado de la placa opuesta a la de admisión y retorno de relave, esta se encuentra denotada en rojo con el número (1) en ambas figuras.



Figura 3.2 Canales de limpieza de alimentación (rojo) y secaje (verde)
 Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.3 Vista lateral del canal de soplado del filtro prensa

Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- Secaje de tortas – primera etapa: se da el soplado de aire presurizado a través de dos de los cuatro canales ubicados tanto en las esquinas de la placa móvil, como en las esquinas de las placas de filtración (estas se muestran en verde en la **Figura 3.2**). Esta primera etapa de alimentación sopla a través del par de conductos del lado izquierdo, los cuales están alineados verticalmente.
- Secaje de tortas – segunda etapa: se realiza el secado por otro par de canales ubicados en las esquinas del equipo, como se ilustran en verde en la **Figura 3.2**. En esta etapa se invierte más tiempo que en la primera, ya que los ensayos han demostrado que el soplado a través de este par de canales es más eficiente en la tarea de extraer el agua de los relaves.
- Soplado del canal de alimentación – segunda etapa: se limpia nuevamente el canal de alimentación de relave a través mismo del canal denotado con el número (1) en la **Figura 3.3**.
- Despresurización de los diafragmas: se apertura ligeramente la placa móvil disminuyendo la presión en las placas de filtrado.

- Espera apertura del filtro - apertura del filtro: la placa móvil libera totalmente la presión y se desplaza hasta el extremo opuesto, como se aprecia en la **Figura 3.4**.



Figura 3.4 Placa móvil desplazada al liberar completamente la presión
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- Apertura de bandeja: las compuertas inferiores se abren para dejar el paso a la caída del relave filtrado, como se puede observar en la **Figura 3.5**. Cada bloque se denomina “torta”.
- Desplazamiento de las placas (un total de 127 placas): cada placa se desplaza dejando caer así las tortas de relave filtrado.



Figura 3.5 Placa de filtrado en desplazamiento, nótese la caída de torta de relave
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- Cierre del filtro: la placa móvil se desplaza nuevamente para el cierre del filtro, llegando a generar una presión de hasta 330 bares sobre las placas en su cierre total.
- Cierre de la bandeja o compuertas inferiores: se cierran las bandejas que se abrieron para permitir la caída de las tortas de relave filtrado. En este punto se repite el ciclo. Su desarrollo completo tarda aproximadamente 35 minutos en realizarse y puede monitorearse y controlarse desde una interfaz táctil. En esta también se registran las averías y fallas del equipo. Un esquema general del equipo y su lista de componentes principales se muestra en el **Anexo 6** y **Anexo 7**.

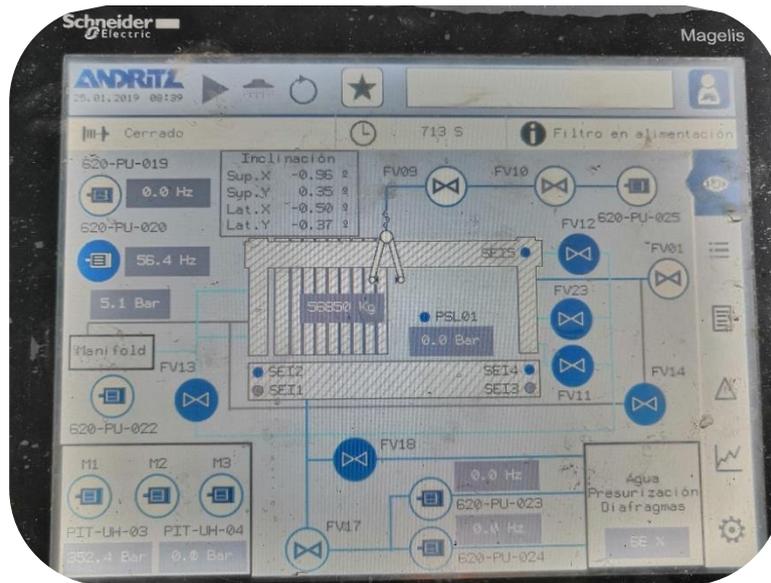


Figura 3.6 Interfaz de usuario del Filtro Prensa de relave Andritz modelo 2500
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- b) Las lonas, uno de los elementos más críticos del filtro por su alta rotación y desgaste constante, pueden estar en operación, de acuerdo al testimonio de los mismo técnicos de mantenimiento del área, durante un tiempo máximo de 3 meses (siendo estas las lonas originales de la marca Andritz), “ello siempre bajo un cuidado de lavado durante el día y la noche” (algo que no siempre se realiza). Adicionalmente señalan que: “Lonas de cualquier otra marca pueden funcionar como máximo durante 1 mes, con el riesgo constante de que el relave filtrado se quede pegado a las mismas en cada ciclo de filtrado”. Si cualquiera de estos periodos de cambio se ve afectado, entonces la integridad física del equipo también se verá afectada; pueden darse situaciones tales como el agujeramiento de las placas de filtrado (que son de polipropileno).

Cuando no se tiene el stock adecuado de las lonas se hace el reemplazo con lonas no adecuadas (de solo 1 mes de duración), las cuales quitan confiabilidad al sistema y hacen que el técnico realice doble trabajo al tener que colocar muy pronto las lonas nuevas. Un cambio de lonas para una placa se da en 2 horas hombre en total; es decir, si participaran 2 técnicos, el cambio se realizaría en 1 hora, si participaran 4, en media hora. Hay que recordar que se tienen 127 placas en total.



Figura 3.7 Lona provisional (de amarillo) colocada en el filtro Andritz modelo 2500
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

- c) La densidad del relave de alimentación debe mantenerse entre los valores de 1500 y 1550 kg/m³, de lo contrario se presentará un inevitable desgaste e incluso una rotura prematura en las lonas aledañas a la zona de alimentación. La presión durante este proceso, como se precisó anteriormente, alcanza el valor de 5.5 bar y dura en total 300 s. Por otro lado, el proceso de secado de relave tal y como fue previsto de fábrica se da por dos medios consecutivos: Presurización con solución de placas de diafragma y, por otro lado, inyección o secado con aire (como se precisó en el inciso “a” - punto 3).

Nominalmente, y de acuerdo al diseño del equipo, ambos sistemas deberían funcionar. Cada uno conforma una etapa diferente en el proceso regulado por válvulas, pero el filtro en análisis que opera en la mina solo seca por aire, ya que los ensayos con la solución para la presurización de las placas de diafragma demuestran que esta no regresa totalmente al tanque y/o se queda en las placas, tuberías o plataforma de apertura. Por otro lado, cabe precisar que la bomba hidráulica de alta presión para aceite hidráulico alcanza un valor de 270 bar y la de baja presión 10 bar, ellas se accionan durante los procesos de desplazamiento de la placa móvil.

d) En cuanto a la seguridad, el Filtro de relave Andritz modelo 2500 posee un sistema que consta de una línea de seguridad que al jalarse desactiva totalmente el sistema, como un botón de parada de emergencia. Esta línea de seguridad color naranja se muestra en la **Figura 3.8**. Además, se tiene un botón propio de parada de emergencia en la interfaz de mando Andritz y también se tienen señales luminosas y sonoras de acuerdo con la **Figura 3.9**. Por otro lado, para darse una parada de planta es necesario que el filtro prensa esté parado, o en estado de falla, al menos 14 h seguidas, que es el tiempo que los holdings de relave tardarían para llegar del 30% al 90% de su capacidad nominal.



Figura 3.8 Línea de seguridad para la parada de emergencia del filtro
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

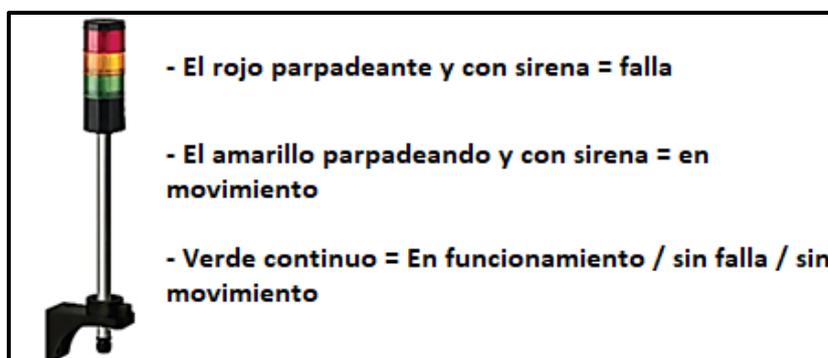


Figura 3.9 Señales luminosas y sonoras del filtro prensa
Fuente: Andritz Separation. Manual de operación y mantenimiento filtro Andritz 2500 [32]

3.1.2 Evaluación inicial del filtro prensa en cuanto a indicadores

A continuación, se presenta los valores iniciales respecto a los indicadores seleccionados para el filtro prensa. Estos han sido evaluados en función a la versión completa de la tabla de eventos operativos y de mantenimiento presentada en el **Anexo 8** y a los métodos de cálculo presentados en el marco teórico y especificados en la metodología.

- **Costo global asociado al mantenimiento del filtro prensa**

El valor inicial del costo anual asociado al mantenimiento correctivo aplicado sobre el equipo asciende hasta alrededor de \$531.500,00 USD

- **Índice de mantenimiento correctivo**

El índice de mantenimiento correctivo se encuentra en 62%

- **Eficacia global del equipo (OEE)**

La eficacia global del equipo actualmente es de 49%, teniéndose un valor de rendimiento de 82% y valor para la calidad de 85%

- **Disponibilidad**

El valor actual de la disponibilidad del filtro se encuentra en 71%

- **Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)**

El tiempo medio entre fallas tiene un valor de 4.8 h

- **Tiempo medio para reparar (Mean Time to Repair - MTTR)**

El tiempo medio para reparar posee un valor de 2.7 h

Los valores encontrados para el índice de mantenimiento correctivo, la disponibilidad y la eficacia global del equipo se evalúan contrastándolos con los precisados por Johansson [18]. El índice de mantenimiento correctivo idealmente se encuentra en 30%, pero el valor inicial encontrado es de 62%, lo cual requiere que idealmente este valor descienda 32 puntos porcentuales. Por su parte, el valor de la

disponibilidad idealmente se encuentra entre 85% al 90%, el valor inicial encontrado es de 71%, lo cual requiere un ascenso ideal de 14 puntos porcentuales. Finalmente, un valor muy aceptable para la eficacia global del equipo idealmente se encuentra entre 75% a 85%, el valor inicial encontrado es de 49%, lo cual requiere idealmente que este valor ascienda 26 puntos porcentuales.

3.1.3 Plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM

En este apartado se sigue el procedimiento de la estrategia del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para el diseño del plan de mantenimiento. En primer lugar, se desarrolla el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) a través de los siguientes puntos:

- a) Función: Filtrar relave a un ratio de 1.43 toneladas por minuto, entregando un producto con 17% de humedad y una granulometría con un mínimo de 75 micrones.
- b) Fallas funcionales:
 - El equipo no filtra el relave
 - El relave no se filtra a un ratio de 1.43 toneladas por minuto
 - El relave filtrado no posee un porcentaje de humedad igual o menor al 17%
 - El relave filtrado no posee una granulometría con un mínimo de 75 micrones
- c) Modos y Efectos de Falla: Tanto los modos como los efectos de falla se presentan en la tabla completa del procedimiento AMFE en el **Anexo 9**.

A continuación, se presenta como ejemplo de este procedimiento al caso de la inclinación de la placa móvil durante su desplazamiento de apertura o cierre, el cual es un modo de falla que genera la primera falla funcional: el equipo no filtra el relave (justamente por estar parado). Este modo de falla se puede deber al aire retenido dentro de los cilindros hidráulicos de desplazamiento o a una falla del sensor de medición de inclinación. Este fenómeno se muestra en la **Figura 3.10** y el sistema se ilustra en la **Figura 3.11**

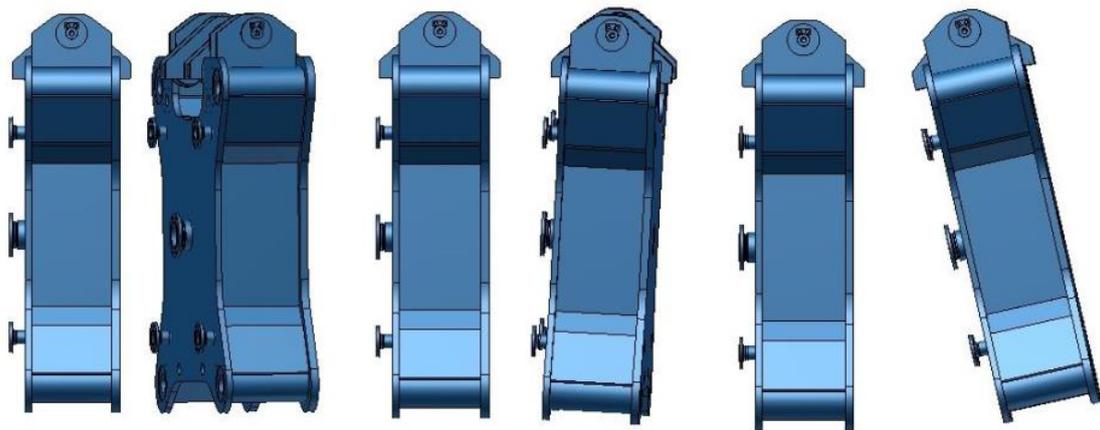


Figura 3.10 Modos de inclinación de la placa móvil

Fuente: Andritz Separation. Manual de operación y mantenimiento filtro Andritz 2500 [32]



Figura 3.11 Sensor de inclinación de la placa móvil

Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

Los efectos que produce este modo de falla son la parada del sistema de filtrado (para del equipo), la iluminación en color rojo de las señales luminosas del filtro, una amenaza media de parada de planta (el tiempo de reparación o cambio de cilindros hidráulicos puede ascender a 8 h), una amenaza baja sobre la seguridad geotécnica de la relavera ya que la parada no conlleva a trasladar relave no filtrado y un riesgo bajo para el operador o técnico. Se requiere controlar manualmente el desplazamiento de la placa

de filtrado en caso de falla del sensor de inclinación, lo cual implica también el cambio del mismo, o realizar el purgado de los cilindros hidráulicos.

Las siguientes figuras retratan gráficamente las evidencias de algunos modos de falla identificados y precisados en el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:

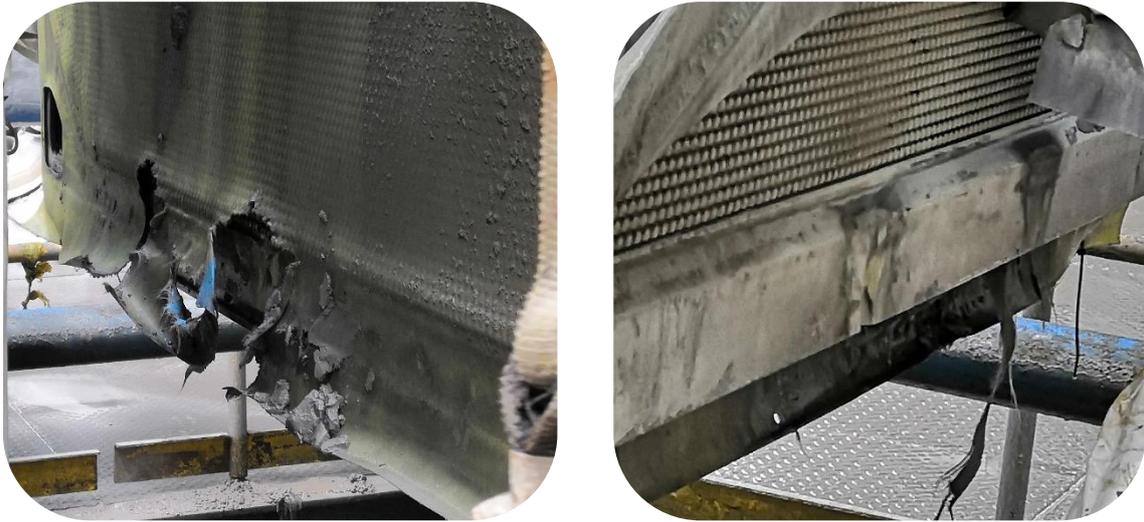


Figura 3.12 Evidencia de daño en lonas y placas de filtrado
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.13 Evidencia de contracción y rotura en lonas de filtrado
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.14 Evidencia de pegado de relave y desprendimiento de lonas de filtrado
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.15 Evidencia de pegado de relave y desprendimiento de lonas de filtrado
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.16 Evidencia de desgaste en los rodillos del sistema DDP
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]



Figura 3.17 Evidencia de fuga de aceite en uno de los cilindros hidráulicos
Fuente: Cesar Miranda. Visita a planta de procesamiento de mineral [31]

A continuación, la **Tabla 3.1** presenta las tareas de mantenimiento a condición en función a los modos de falla encontrados en el Análisis de Modos y Efectos de Falla y de acuerdo a la valorización realizada respecto a las consecuencias que generan los mismos:

Sistema general	Sub - Sistema	Tarea a condición
Sistema de lavado de lonas	Sensores de posicionamiento	Reactivación manual del sistema de lavado de lonas
		Cambio de sensor de posicionamiento
Placa Móvil	Placa móvil	Reactivación manual del sistema por inclinación de la placa móvil
		Purga a los cilindros hidráulicos de la placa móvil
Sistema DDP	Cadena	Destrabe de cadenas del sistema DDP
		Cambio de eslabones por corrosión del sistema DDP
		Correctivo sobre partes corroídas del sistema DDP
Bandeja de descarga	Sensores de posicionamiento	Corrección del sensor de la bandeja con herramienta auxiliar (forma de espátula)
Sistema hidráulico	Cilindros hidráulicos	Reparación de cilindro hidráulico de placa móvil
		Cambio de cilindro hidráulico de placa móvil
Sistema de lavado de lonas	Ruedas de desplazamiento	Cambio de ruedas del sistema de lavado de lonas
Sistema hidráulico	Cilindros hidráulicos	Reparación de vástago de cilindro de desplazamiento de placa móvil
		Cambio de vástago de cilindro de desplazamiento de placa móvil
		Aperturar o cerrar válvulas de alivio
		Acción correctiva sobre la bomba hidráulica de aceite
Sistema de filtrado	Placas de filtrado	Reparación de placa de filtrado (polipropileno)
		Cambio de placa de filtrado (polipropileno)

Tabla 3.1 Tareas a condición para los subsistemas del equipo
Fuente: Elaboración Propia

Ahora bien, se plantean las siguientes tareas de mantenimiento preventivo para el equipo a través de la división de los sistemas que lo componen:

- Sistema Hidráulico:

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD						
			Diario	Semanal	Quincenal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
SISTEMA HIDRAULICO	Motor eléctrico	Inspección, limpieza, ajuste, engrase			X				
		Monitoreo de condición por vibración / temperatura					X		
	Bomba hidráulica de alta presión	Inspección, limpieza, ajuste, engrase			X				
		Desmontaje, inspección de pistones, resortes, válvula check, retén					X		
		Inspección de acoplamientos y conectores						X	
	Bomba hidráulica de baja presión	Inspección, limpieza, ajuste, engrase				X			
		Desmontaje, inspección de álabes, cámara, retenes.					X		
		Inspección de acoplamientos y conectores					X		
	Bloque hidráulico	Inspección, limpieza y ajuste.		X					
		Desmontaje y limpieza de conducto internos.					X		
	Válvulas hidráulicas	Inspección, limpieza					X		
		Ajuste, engrase		X					
		Revisión de la cubierta térmica por la baja temperatura		X					

		Desmontaje inspección de estado interno.					X			
		Regular caudal y presión			X					
	Filtro de retorno		Limpieza y ajuste				X			
			Cambio de filtro					X		
	Manómetros		Ajuste y limpieza				X			
	Presostatos		Ajuste y limpieza				X			
	Motor eléctrico		Inspección, limpieza, ajuste, engrase		X					
			Monitoreo de condición vibración / temperatura.					X		
	Cierre hidráulico principal		Inspección, ajuste, limpieza, engrase	X						
			Cambio de retenes						X	
			Inspección de vástagos / Ensayos no destructivos							X
			Inspección de cilindro interno							X
			Cambio de retenes, sellos, empaques							X
			Ajuste de pernos de sujeción						X	
			Ajuste y retorqueo de pernos de tapas						X	
			Inspección y ajuste de mangas y guardas de vástago.				X			
		Mangueras hidráulicas		Inspección de fugas y reajuste				X		
			Cambio							X
	Tuberías hidráulicas		Ajuste de pernos del sistema de alimentación de relave		X					

	Aceite hidráulico	Limpieza de las tuberías hidráulicas de admisión y retorno de relave				X				
		Inspección de nivel / inspección de estado suciedad y densidad				X				
		Cambio						X		
	Cilindros hidráulicos		Inspección de fugas	X						
			Limpieza superficial		X					
			Cambio de sellos y retenes de los cilindros hidráulicos de la placa móvil				X			
			Verificación y ajuste del nivel de líquido en el tanque de aceite		X					
			Verificación de las presiones alcanzadas		X					
			Ajuste de acoples y conexiones hidráulicas de los cilindros y el sistema de alimentación				X			
		Monitorear la condición del relave de entrada al filtro (composición, densidad, etc.)		X						

Tabla 3.2 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema hidráulico
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de lavado de lonas

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD						
			Diario	Semanal	Quincenal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
SISTEMA DE LAVADO DE LONAS	Bomba de pistones pretissoli	Inspección, limpieza, ajustes	X						
		Monitoreo de condición, vibración/ temperatura				X			
		Inspección de válvulas check en cámara de bombeo				X			
		Cambio de válvulas check de cámara de bombeo					X		
		Inspección de acoplamiento.			X				
		Cambio de retenes, sellos, empaques					X		
		Cambio de aceite en cámara de pistones					X		
	Válvula de tres vías - diafragma	Inspección, limpieza, reajustes	X						
		Inspección de mecanismo de accionamiento y diafragma		X					
		Cambio de aceite					X		
		Cambio de válvula						X	
	Compensador de nitrógeno	Inspección, reajuste, limpieza		X					
		cambio o recarga						X	
	Línea / tubería de agua	Inspección, ajuste, reposición de abrazaderas Ubol.			X				
Flasheado / Limpieza interna			X						

	Válvula de esfera 1 1/4	Inspección, limpieza, ajuste				X			
		Cambio							X
	Reductores velocidad	Inspección, limpieza, ajuste		X					
		Limpieza y lubricación de sistema de frenado			X				
	Chumaceras	Limpieza, ajuste, engrase		X					
		Cambio						X	
	Garruchas y ruedas	Limpieza, engrase	X						
		Cambio					X		
	Polines - guía	Inspección		X					
		Limpieza, engrase					X		
		Cambio						X	
	Eslingas / cinta poliuretano	Limpieza			X				
		Cambio.						X	
	Estructura porta toberas	Flasheado / Limpieza interna		X					
		Cambio					X		
	Toberas	Limpieza		X					
	Bloque / contrapeso	Limpieza, engrase, ajuste		X					
		Cambio de placas de baquelita (guías)							X
	Columna guía vertical	Limpieza, reajuste, engrase			X				
	Bandeja cadena	Inspección, limpieza		X					
Cambio								X	
Mangueras de alta presión	Inspección, reajuste			X					
	Cambio							X	

Tabla 3.3 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de lavado de lonas
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de desplazamiento de placas (DDP)

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD				
			Diario	Semanal	Quincenal	Semestral	Anual
SISTEMA DDP	Cadena	Inspección	X				
		Limpieza, engrase		X			
		Cambio					X
	Gatillos	Limpieza, engrase		X			
		Cambio					X
	Pines, bocinas y ruedas guía	Limpieza, engrase				X	
		Cambio				X	
	Sproquet / eje transmisión	Limpieza, engrase	X				
		Cambio					X
	Motor hidráulico	Limpieza, reajuste		X			
		Cambio					X
	Chumaceras	Limpieza, engrase			X		
		Cambio					X

Tabla 3.4 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema DDP
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de placas y soportes

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD				
			Diario	Quincenal	Mensual	Semestral	Anual
PLACAS Y SOPORTES	Soportes de placa (gaviota)	Limpieza, engrase, reajuste			X		
		Cambio de rodamientos y ruedas				X	
		Cambio					X
	Placas rígidas	Inspección y limpieza	X				
		Cambio					3 años
	Placas diafragma	Limpieza	X				
		Cambio					3 años
	Guía de desplazamiento	Limpieza, engrase		X			
	Guías laterales	Limpieza, engrase, alineamiento		X			
		Cambio					X

Tabla 3.5 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de placas y soportes
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de bandeja de descarga

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD				
			Semanal	Quincenal	Trimestral	Semestral	Anual
BANDEJA DE DESCARGA	Bandejas	Inspección, limpieza	X				
	Eje	Inspección, engrase	X				
	Pistones hidráulicos	Inspección, reajuste	X				
		Cambio de retenes			X		
	Chumaceras	Cambio					X
		Limpieza, engrase, reajuste		X			
	Sensores	Cambio					X
		Inspección, limpieza, ajuste		X			
		Análisis del efecto de las vibraciones sobre el sensor de la bandeja de descarga			X		
		Monitoreo de las vibraciones respecto a la bandeja de descarga				X	

Tabla 3.6 Tareas de mantenimiento preventivo para la bandeja de descarga
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de placa móvil

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD					
			Semanal	Quincenal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
PLACA MÓVIL	Soporte de placa	Limpieza, reajuste, engrase	X					
		Cambio de rodamientos				X		
		Cambio de ruedas y eje						X
	Sensor de inclinación	Inspección y limpieza	X					
	Guía de soportes	Limpieza, engrase		X				
	Placa móvil	Inspección, limpieza			X			
	Extensiones - bastidores	Inspección, limpieza	X					
	Soporte de extensiones	Inspección, limpieza, engrase	X					
		Cambio de rodamientos					X	
		Cambio de soporte					X	

Tabla 3.7 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de placa móvil
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de estructura principal

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD		
			Quincenal	Mensual	Semestral
ESTRUCTURA PRINCIPAL	Placa fija de apoyo	Inspección, limpieza, lubricación		X	
		Reajuste de pernos de sujeción de base principal			X
	Viga superior principal	Inspección, limpieza, lubricación	X		
		Reajuste de pernos de sujeción de base principal			X
	Traviesa con patas"y"	Inspección, limpieza, lubricación		X	
		Reajuste de pernos de sujeción de base principal			X

Tabla 3.8 Tareas de mantenimiento preventivo para la estructura principal
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de circuito de soplado y secado

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD				
			Diario	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
CIRCUITO DE SOPLADO Y SECADO	Válvulas mariposa con actuador	Inspección, limpieza, lubricación		X			
		Desmontaje, inspección de mariposa, eje, sellos, elastómeros			X		
		Desmontaje de actuador, inspección y engrase.				X	
		Cambio					X
	Válvula pinch	Inspección, limpieza, lubricación	X				
		Desmontaje, inspección de mariposa, eje, sellos, elastómeros			X		
		Desmontaje de actuador, inspección y engrase.				X	
		Cambio					X
	Mangueras neumáticas	Inspección, ajuste			X		
		Cambio				X	
	Válvulas de control	Inspección, limpieza, lubricación		X			
		Desmontaje, inspección de mariposa, eje, sellos, elastómeros				X	
		Desmontaje de actuador, inspección y engrase.		X			
	Manómetros	Cambio			X		
Limpieza, ajuste			X				

Tabla 3.9 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de circuito de soplado y secado
Fuente: Elaboración Propia

- Sistema de filtrado

SISTEMA / COMPONENTE	PARTE / SUB COMPONENTE	ACTIVIDAD	PERIODICIDAD			
			Diario	Semanal	Mensual	Trimestral
SISTEMA DE FILTRADO	Lonas de filtrado	Inspección de condición		X		
		Cambio de lona de filtrado original				X
		Cambio de lona de filtrado provisional			X	
		Limpieza de la acumulación de relave	X			
		Verificación la presión de alimentación del filtro	X			
	Placas de filtrado	Inspección	X			
		Ajuste respecto a los marcos de una placa de filtrado		X		
		Limpieza por relave acumulado		X		
		Comprobar la presión del aire comprimido de secado		X		

Tabla 3.10 Tareas de mantenimiento preventivo para el sistema de filtrado
Fuente: Elaboración Propia

Estas tareas de mantenimiento preventivo se han propuesto con ayuda del diagrama de decisión RCM y la hoja de decisión RCM como se precisó en el capítulo de *Metodología*. Al contar con las tareas de mantenimiento ya diseñadas y especificadas en cuanto a frecuencia es factible asumir su aplicación durante un periodo anual, lo cual evitaría la realización de una gran cantidad de labores estrictamente correctivas que venían realizándose; sin embargo, algunas de estas aún se desarrollarán obedeciendo principalmente a los imprevistos climatológicos, de variación de factores de producción o como resultados de cargas de fatigas térmicas o mecánicas que puedan presentarse.

3.2 Resultados de la segunda etapa de la investigación

3.2.1 Estimación de los nuevos valores para los indicadores propuestos

En este apartado se estiman razonablemente los nuevos valores para los indicadores de mantenimiento previamente planteados, asumiendo una implementación del plan.

- **Costo global asociado al mantenimiento del filtro prensa**

El valor estimado del costo anual asociado al mantenimiento correctivo asumiendo la aplicación del plan de mantenimiento asciende hasta alrededor de \$114.000,00 USD.

- **Índice de mantenimiento correctivo**

El índice de mantenimiento correctivo adopta un valor de 39%

- **Eficacia global del equipo (OEE)**

La eficacia global del equipo adopta un valor de 64%, teniéndose un valor adoptado de rendimiento de 86% y un valor adoptado para la calidad del 88%.

- **Disponibilidad**

El valor adoptado para la disponibilidad del filtro se encuentra en 84%.

- **Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)**

El tiempo medio entre fallas tiene un valor de 20.1 h.

- **Tiempo medio para reparar (Mean Time to Repair - MTTR)**

El tiempo medio para reparar posee un valor de 1.8 h.

Estos nuevos valores estimados para el índice de mantenimiento correctivo, la disponibilidad y la eficacia global del equipo se evalúan también contrastándolos con los precisados por Johansson [18]. El índice de mantenimiento correctivo idealmente se encuentra en 30%, pero el valor estimado encontrado es de 39%, lo cual requiere que idealmente este valor se mejore aún más hasta descender 9 puntos porcentuales

adicionales. Por su parte, el valor de la disponibilidad idealmente se encuentra entre 85% al 90%, el valor estimado encontrado es de 84%, lo cual requiere un ascenso adicional de 1 punto porcentual. Finalmente, un valor muy aceptable para la eficacia global del equipo idealmente se encuentra entre 75% a 85%, el valor estimado encontrado es de 64%, lo cual requiere idealmente que este valor siga ascendiendo 11 puntos porcentuales más.

Es importante mencionar que el valor estimado para los costos asociados al mantenimiento correctivo ha sido calculado como el resultado de la diferencia entre el valor inicial para esta misma categoría de costos y los costos determinados a partir de la **Ecuación 2.1** sobre los modos de falla más significativos que se determinaron a partir del procedimiento AMEF, considerando también su respectiva frecuencia de incidencia anual. Ello debido a que estos serían los valores monetarios que se estarían ahorrando al implementarse las tareas de mantenimiento preventivo propuestas.

$$C_{mtto\ correctivo} = ((C.M.O. + C.Rep.In.) + (C.P.P.* Factor\ P.L.C.)) * frec.\ anual$$

Además de ello, el valor para la pérdida por lucro cesante solo se ha considerado para el cálculo del valor de los costos iniciales (5h de parada registradas a lo largo del año en estudio) y no para el de los costos estimados ya que no se considera que haya una parada de planta por falla del filtro posteriormente a la implementación del plan diseñado. Los trabajos mayores o asociados a algún overhaul se desarrollarán en las paradas de planta planificadas. Cabe precisar que el costo por hora por parada de planta es de \$75.000,00 USD.

Ahora bien, de acuerdo a las consideraciones para el plan de mantenimiento propuesto, cualquier tarea de mantenimiento mayor que supere las 14 h de duración, y no represente una amenaza alta en cuanto a una obligada parada de planta, se desarrollarán también en las paradas de planta planificadas. Los valores para los salarios horarios de los técnicos/operadores, los costos de los repuestos y los insumos se determinaron a partir de los registros propios de la unidad minera.

3.2.2 Comparación entre los valores iniciales y los estimados de los indicadores de mantenimiento propuestos

En este apartado se compara los valores de los indicadores calculados en el estado inicial y los valores estimados asumiendo la implementación de las tareas propuestas por sistemas en el plan de mantenimiento diseñado.

- Resumen de resultados para los valores iniciales:

Eficacia global del equipo (OEE)	Disponibilidad	71%	49%
	Rendimiento	82%	
	Calidad	85%	
Índice de mantenimiento correctivo			62%
Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)			4.8 h
Tiempo medio para reparar (Mean Time to Repair - MTTR)			2.7 h

Tabla 3.11 Resultados para los valores iniciales de los indicadores propuestos
Fuente: Elaboración Propia

- Resumen de resultados para los valores estimados:

Eficacia global del equipo (OEE)	Disponibilidad	84%	64%
	Rendimiento	86%	
	Calidad	88%	
Índice de mantenimiento correctivo			39%
Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)			20.1 h
Tiempo medio para reparar (Mean Time to Repair - MTTR)			1.8 h

Tabla 3.12 Resultados para los valores estimados de los indicadores propuestos
Fuente: Elaboración Propia

- Comparación entre los indicadores iniciales y los estimados

	Valor inicial	Valor estimado	Porcentaje de mejora
Costos asociados al mantenimiento correctivo	\$531.500,00	\$114.000,00	79%
Eficacia global del equipo (OEE)	49%	64%	15%
Disponibilidad	71%	84%	12%
Índice de mantenimiento correctivo	62%	39%	23%
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	4.8 h	20.1h	319%
Tiempo medio para reparar (MTTR)	2.7 h	1.8h	33%

Tabla 3.13 Comparación entre los valores iniciales y los valores estimados para los indicadores propuestos

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que se tienen mejoras sustanciales en cuanto a los indicadores propuestos para el filtro prensa, obteniéndose desde un incremento en la disponibilidad de 12% hasta un incremento en el tiempo medio entre fallas (MTBF) de 319%. Cabe precisar que aun asumiendo una implementación del plan de mantenimiento diseñado los valores de los indicadores de eficacia global del equipo, disponibilidad e índice de mantenimiento correctivo pueden mejorarse más para alcanzar los valores ideales propuestos por Johansson [18].

CONCLUSIONES

1. La relevancia de esta investigación radica en que a través del diseño de un plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM no solo se mejoran los indicadores de desempeño del filtro prensa en estudio, tales como el OEE, los costos directos asociados al mantenimiento correctivo, la disponibilidad, entre otros; sino que también se genera un impacto sobre aspectos asociados a la ingeniería de diseño, ingeniería de mantenimiento, cuidado ambiental, seguridad y salud ocupacional y relaciones sociales entre un titular minero y la comunidad.
2. En el presente trabajo de investigación se ha encontrado que la mejora del desempeño de uno o un conjunto de activos en términos de sus indicadores de operación y mantenimiento se logra contundentemente a través de la aplicación de la estrategia RCM. Ello se evidencia no solo en las ventajas que presenta respecto a otras metodologías de mantenimiento en cuanto al estudio de las fallas funcionales de un equipo, sino también en las mejoras sustanciales comprobadas por otros investigadores en cuanto a la disponibilidad mecánica y el incremento de la rentabilidad al evitar pérdidas por lucro cesante en equipos que también forman parte de la cadena productiva de una mina.
3. Se ha calculado y evaluado los valores iniciales para los indicadores propuestos, encontrándose que el valor inicial para los costos anuales asociados al mantenimiento correctivo del filtro es de \$531.500,00 USD, el valor inicial del índice de mantenimiento correctivo es de 62%, el valor inicial para la eficacia global del equipo (OEE) es de 49%, el valor inicial para la disponibilidad es de 71%, el valor inicial para el tiempo medio entre fallas es de 4.8 h y el valor inicial para el tiempo medio para reparar es de 2.7 h.
4. Para resolver la problemática planteada se ha diseñado un plan de mantenimiento basado en la estrategia RCM que aborde directamente los indicadores propuestos a través del diseño de tareas de mantenimiento para cada sistema del equipo

respectando el procedimiento mencionado. Para ello se determinó la función principal del filtro y se desarrolló el Análisis de los Modos y Efectos de falla. Se categorizaron los modos de falla por sus consecuencias para posteriormente agruparlos y proponer las medidas preventivas que mitiguen sus efectos en cuanto a la frecuencia de mantenimientos correctivos. Posteriormente se agruparon las tareas de mantenimiento por cada subsistema del equipo y se precisó su frecuencia de aplicación, precisándose también las tareas a condición necesarias a aplicar.

5. Se ha calculado y evaluado los valores estimados para los indicadores propuestos asumiendo la implementación del plan de mantenimiento, encontrándose que el valor estimado para los costos anuales asociados al mantenimiento correctivo del filtro es de \$114.000,00 USD, el valor estimado del índice de mantenimiento correctivo es de 39%, el valor estimado para la eficacia global del equipo (OEE) es de 64%, el valor estimado para la disponibilidad es de 84%, el valor estimado para el tiempo medio entre fallas es de 20.1 h y el valor estimado para el tiempo medio para reparar es de 1.8 h. Estos valores fueron contrastados con los valores iniciales revelándose mejoras sustanciales en cada uno de ellos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Prado, «Optimizando la recuperación de agua desde relaves,» Minería Chilena. Información confiable y oportuna, 13 abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/optimizando-la-recuperacion-de-agua-desde-relaves/#>. [Último acceso: 12 abril 2019].
- [2] R. A. Deza Vargas, «Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el sistema de lubricación de un molino SAG de 100 000 ton/día,» Informe de suficiencia profesional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2012.
- [3] C. M. Núñez Ingaroca, «RCM para optimizar la disponibilidad de los tractores D8T en la empresa Aruntani SAC - Unidad Tukari,» Informe de suficiencia profesional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2016.
- [4] Á. M. Torres Raymundo, «Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de la chancadora 60" x 113" de minera Chinalco,» Tesis de grado Bsc, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2017.
- [5] S. A. Zaragosa Balmaceda, «Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de un Molino SAG de 32 x 34 pies, en una planta de lixiviación de oro en tanques,» Informe de suficiencia profesional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2008.
- [6] C. R. Córdova Morales, «Implantación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) a los hornos convertidores Peirce Smith de la fundición de cobre de Southern Perú Copper Corporation,» Tesis de grado Bsc, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2005.
- [7] F. M. Farfán Bertín, «Realizar un plan de mantención preventiva del Chancado Primario Fuller en División Codelco Andina,» Tesis de grado profesional, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2014.
- [8] L. A. Sandoval Tomas, «Diagnóstico de estado y mantenimiento centrado en la confiabilidad de equipos de la compañía minera Quiruvilca,» Informe de suficiencia profesional, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2016.

- [9] Andritz AG, «Separation. Breaking ground for the digitalized future. Andritz sidebar and overhead filterpresses,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.andritz.com/resource/blob/258372/63d5aa48a8d2f4b8e647adcc83d160f2/andritz-sidebar-and-overhead-filter-presses-data.pdf>. [Último acceso: 11 mayo 2019].
- [10] S. García Garrido, Organización y gestión integral del mantenimiento, Madrid: Díaz de Santos, 2003.
- [11] E. Hernández Cruz y E. Navarrete Pérez, «Sistema de Cálculo de Indicadores para el mantenimiento,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 4, pp. 15-20, 2001.
- [12] M. Zegarra, «Indicadores para la gestión de mantenimiento de equipos pesados,» *Ciencia y Desarrollo. Universidad Alas Peruanas*, vol. 19, pp. 25-37, 2016.
- [13] F. J. González Fernández, Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión, Madrid: FC Editorial, 2004.
- [14] L. Amendola, «Indicadores de confiabilidad. Propulsores en la gestión del mantenimiento,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [15] Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP), SMRP Best Practices. 4th Ed, 2009.
- [16] B. S. Dhillon, Engineering Maintenance. A modern approach., New York: CRC Press LLC, 2002.
- [17] C. Gonzalez, «Determinación de la disponibilidad de las cosechadoras de arroz New Holland TC- 57 en las condiciones del CAI Arrocero - Los Palacios,» Universidad Agraria de la Habana, La Habana, 2012.
- [18] M. Johansson, «Maintenance Performance Assessment. Strategies and Indicators,» Master's Thesis. Departments of Production Economics, Swedish, 2002.
- [19] R. Pascual, El arte de mantener, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2008.
- [20] D. Armstrong, Maintenance Planning and Scheduling, North Carolina: Idcon Inc, 2006.
- [21] R. Palmer, Maintenance Planning and Scheduling Handbook. 2nd Ed, New York: McGraw-Hill, 2006.

- [22] P. Deepak Prabhakar y J. R. V.P., «CBM, TPM and RCM – A Qualitative Comparison of Maintenance Management Strategies,» *International Journal of management and business studies*, vol. 4, n° 3, pp. 49 - 56, 2014.
- [23] J. Moubray, *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. 2nd Ed, London: Aladon Ltd, 1997.
- [24] A. Siddiqui y M. Ben-Daya, «Reliability Centered Maintenance,» London, Springer, 2009, pp. 397-415.
- [25] N. Bloom, *Reliability Centered Maintenance. Implementation made simple*, New York: McGraw - Hill, 2006.
- [26] J. L. Lara, «Experiencias de operación de depósitos de relaves espesados y filtrado,» Golder Associates, 2013.
- [27] O. Company, «Outotec. Thickeners or thickener plants – optimizing the performance and cost of thickened tailings,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.outotec.com/company/newsletters/minerva/minerva-issue-3--2017/thickeners-or-thickener-plants--optimizing-the-performance-and-cost-of-thickened-tailings>. [Último acceso: 5 septiembre 2019].
- [28] O. Asociados, «OBL. Lonas para Filtro Disco,» 2017. [En línea]. Available: <http://obl.com.pe/filtracion/lonas-para-filtro-disco/>. [Último acceso: 5 setiembre 2019].
- [29] M. E. Capone Barraza, «Filtros de Prensa para Relaves,» Master's Thesis, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2016.
- [30] ClimateData, «es.climate-data.org, Clima Caylloma,» 2018. [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/arequipa/caylloma-26421/>. [Último acceso: 5 setiembre 2019].
- [31] C. C. Miranda Orna, «Informe Técnico. Visita Planta de procesamiento de mineral,» s/n, Lima, 2019.
- [32] A. Separation, *Operación y Mantenimiento - Filtro Prensa 2500 x 2500 mm*, Lima: Andritz, 2016.

ANEXOS

Anexo 1: Portada del Manual del filtro prensa Andritz modelo 2500

ANDRITZ
Separation

Operación y Mantenimiento

ANDRITZ – Filtro Prensa

Tamaño: 2500 x 2500 mm

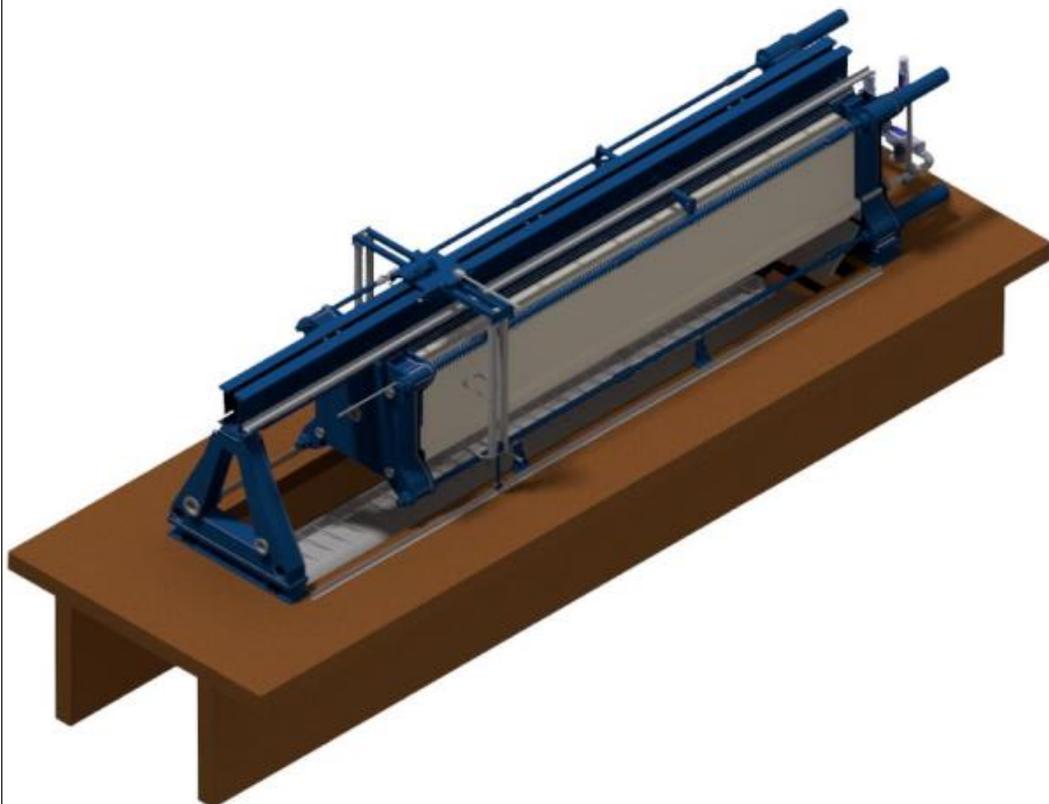
Tipo: AE2500MCWDL16

ORDEN DE COMPRA: 132928543

NÚMERO DE SERIE: F-3385

Confirmación del pedido No.: C39-828327-517-4600-020

CIA DE MINAS BUENAVENTURA



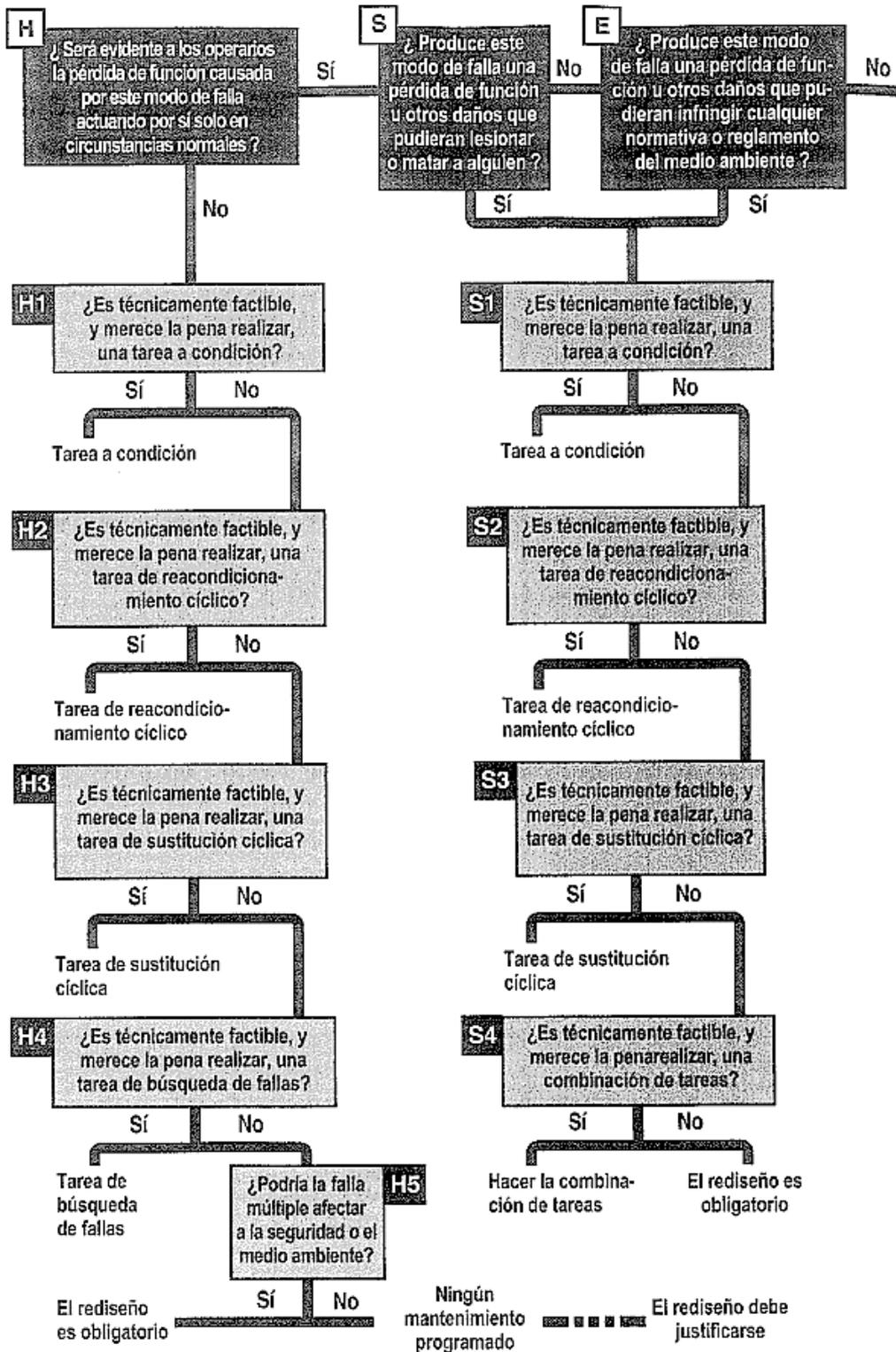
Anexo 2: Hoja de Decisión RCM

HOJA DE DECISIÓN RCMII

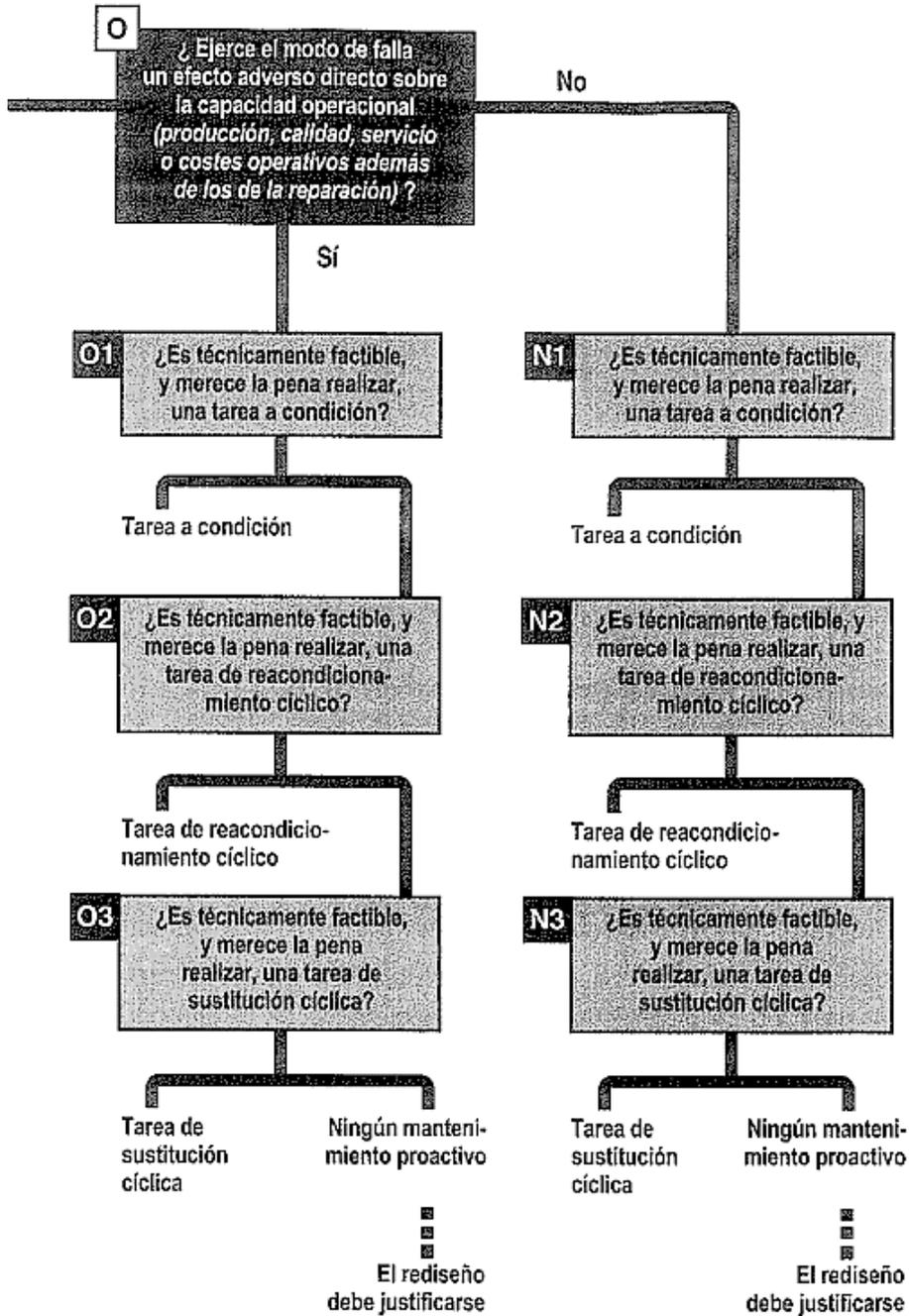
© 1990 ALADON LTD

SISTEMA													Sistema N°	Facilitador:	Fecha	Hoja N°
SUBSISTEMA													Subsistema N°	Auditor:	Fecha	de
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	FM	H	S	E	O	O1 N1	O1 N2	O3 N3	H4	H5	S4				

Anexo 3: Diagrama de Decisión RCM – parte 1



Anexo 4: Diagrama de Decisión RCM – parte 2



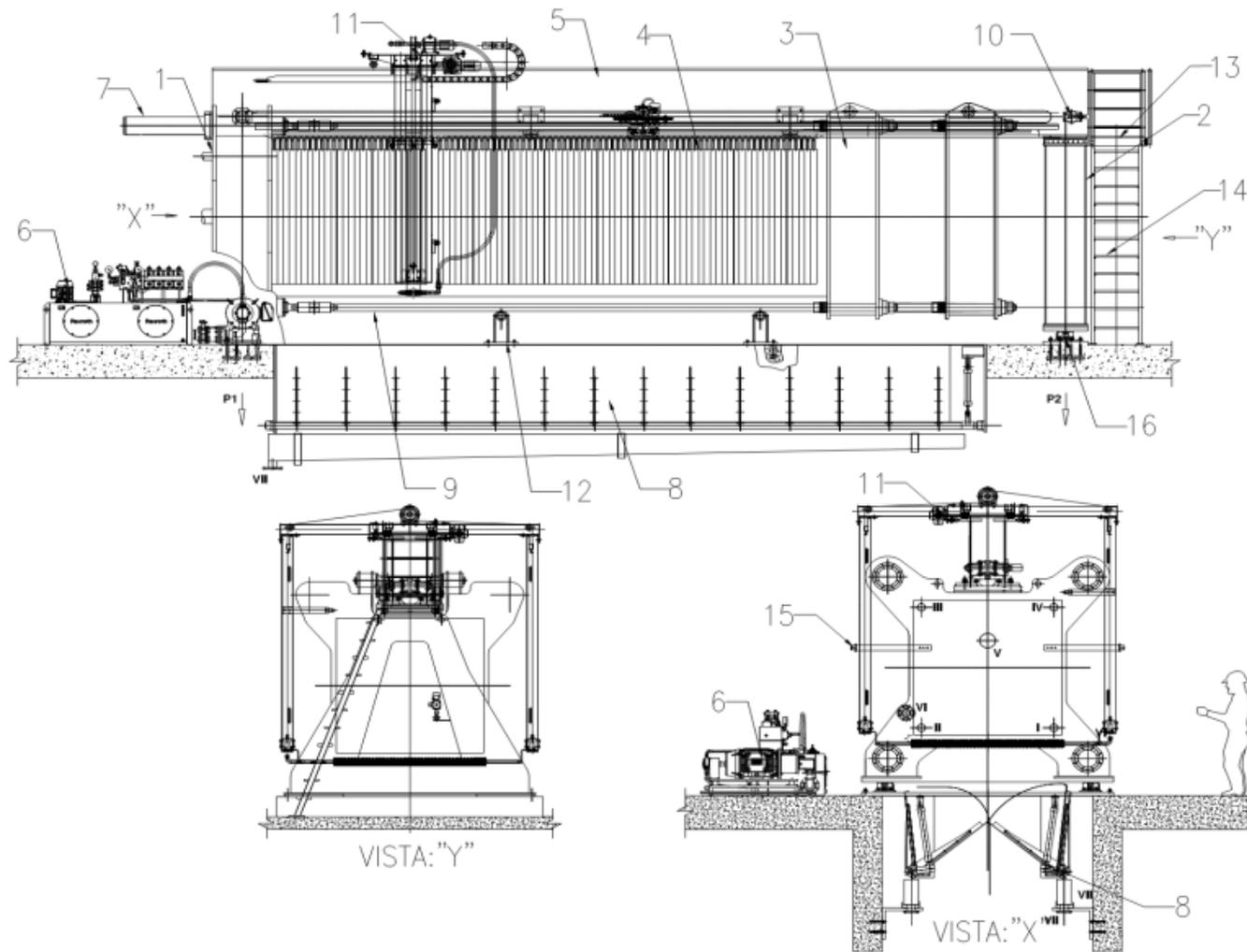
Anexo 5: Modelo de hoja de información RCM

HOJA DE INFORMACIÓN RCMII
© 1998 ALADON LTD

SISTEMA	Turbina a gas de 5MW	SISTEMA N° 216 - 05	Facilitador: N Smith	Fecha 07 - 07 - 1998	Hoja N° 1
SUBSISTEMA	Sistema de Escape	SUBSISTEMA N° 216 - 05 - 11	Auditor: P Jones	Fecha 07 - 08 - 1998	de 3

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)
1 Conducir sin restricciones todos los gases calientes de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros encima del techo de la sala de turbinas.	A. Incapaz de canalizar los gases	1 Montantes del silenciador corroidos	El ensamble del silenciador colapsa y cae al fondo del conducto. La contrapresión hace que la turbina se acelere violentamente y se pare a una alta temperatura de escape. Tiempo de parada de máquina para reemplazar el silenciador, hasta cuatro semanas.
	B. Flujo de gases restringido	1 Se desprende parte del silenciador por fatiga	Según la naturaleza del atasco, la temperatura de escape puede subir hasta parar la turbina. Partículas de deshecho sueltas podrían dañar partes de la turbina. Tiempo de parada de máquina para reparar el silenciador, 4 semanas.
	C. No puede contener los gases	1 Se agujerea la junta flexible por corrosión	La junta flexible está dentro de la campana de la turbina, de modo que la mayor parte de la fuga de los gases de escape sería evacuada por el sistema de extracción de la campana. No es probable que los mecanismos existentes de detección de incendio y gases dentro de la campana detecten una fuga de gases de escape, y es improbable que la temperatura suba lo suficiente como para hacer disparar la alarma detectora de fuego. Una pérdida grave puede hacer que se sobrecaliente el separador de partículas sólidas y líquidas en los gases, así como fundir la alarma de control situada cerca de la fuga, con consecuencias imprevisibles. Los equilibrios de presión dentro de la campana son tales que es probable que poco, o ningún, gas pueda escapar por una fuga pequeña, de manera que es posible que no se detecte una fuga pequeña por el olfato o el oído. Tiempo de parada de máquina para reemplazar la junta, hasta 3 días.
			2 Junta del conducto colocada incorrectamente
		3 Fuelle superior agujereado por corrosión	Los fuelles superiores están situados fuera de la sala de turbinas, de manera que los gases procedentes de una fuga aquí se dispersarían a la atmósfera. Puede que suba el nivel de ruido del ambiente. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta 1 semana.
		1 Bulones de montaje de la chimenea de escape cortadas por oxidación	Probablemente la chimenea comience a inclinarse, y sea sostenida por los cables de anclaje por un tiempo, antes de derrumbarse. Si cayera, existe una gran posibilidad de que dañe una estructura ocupada por personas. Tiempo de parada de máquina para reparar, entre varios días y varias semanas.
	D. No puede transportar los gases a un punto situado a 10 metros encima del techo	2 Chimenea de escape derribada por vientos fuertes	La estructura del conducto está diseñada para soportar vientos de hasta 350 Km/h, por lo que solo tiene posibilidades de caerse durante una tormenta si los cables de anclaje han sido debilitados, quizá por corrosión. De ocurrir, podría caer sobre un módulo de viviendas. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta varias semanas.
		1 Malla de retención de material del silenciador corroida	La mayoría del material se volaría hacia afuera, pero es posible que parte de él caiga al fondo del conducto y obstruya la salida de la turbina, causando una alta temperatura de gases de escape y posible interrupción en el servicio de la turbina. Los niveles de ruido subirían progresivamente. Tiempo de parada de máquina para reparar, alrededor de 2 semanas.
2 Reducir el nivel de ruido del escape a Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 metros	A. El nivel de ruido excede el Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 metros	2 Fugas del conducto fuera de la sala de turbinas	..., etc.

Anexo 6: Componentes principales del Filtro Prensa Andritz modelo 2500



Anexo 7: Lista de componentes principales del Filtro Prensa Andritz modelo 2500

1	Placa de apoyo
2	Traviesa con patas
3	Placa móvil
4	Paquete de placas
5	Viga superior
6	Unidad hidráulica
7	Cierre hidráulico
8	Bandeja de recojimiento
9	Bastidor
10	Dispositivo desplazador de placas
11	Dispositivo de enjuague de las lonas.
12	Apoyo para bastidor
13	Plataforma para mantenimiento
14	Escalera
15	Dispositivo de seguridad
16	Celda de carga

Anexo 8: Eventos de mantenimiento del filtro prensa en estudio

Fecha	Equipo	Hora Inicio	Hora Fin	Estado	Descripción estado	Razón	# Técnicos Involucrados	Comentarios	T. Evento (horas)
N/D	F.P. Andritz 2500	19:16	19:20	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reactivar el ciclo de filtrado	1	Reactivación manual del sistema de lavado de lonas	0.07
N/D	F.P. Andritz 2500	12:00	12:40	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reparación	3	Reparación de placa de filtrado (polipropileno)	0.67
N/D	F.P. Andritz 2500	22:10	22:12	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reactivar el ciclo de filtrado	1	Se censa desnivel de placa móvil	0.04
N/D	F.P. Andritz 2500	14:44	15:24	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reparación	2	Destruye de cadenas del sistema DDP	0.5
N/D	F.P. Andritz 2500	16:00	16:35	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Cambio	4	Cambio de eslabones por corrosión del sistema DDP	0.58
N/D	F.P. Andritz 2500	16:23	21:45	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Cambio	4	Cambio de cilindro hidráulico de placa móvil	5.37
N/D	F.P. Andritz 2500	09:44	10:04	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Cambio	3	Cambio de lona de filtrado de placa de membrana	0.33
N/D	F.P. Andritz 2500	11:33	11:40	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Limpieza	1	Limpieza de la acumulación de relave en las lonas	0.12
N/D	F.P. Andritz 2500	06:21	06:50	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Reparación	2	Reparación de placa de polipropileno	0.48
N/D	F.P. Andritz 2500	15:44	16:34	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Cambio	3	Cambio de ruedas del sistema de lavado de lonas	0.83
N/D	F.P. Andritz 2500	22:08	22:30	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Revisión	1	Revisión de la cubierta térmica de las válvulas más afectadas por la baja temperatura	0.37
N/D	F.P. Andritz 2500	18:55	19:20	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Ajustes	2	Ajuste de pernos del sistema de alimentación de relave	0.42
N/D	F.P. Andritz 2500	14:33	17:12	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Cambio	3	Cambio de sellos y retenes de los cilindros hidráulicos de la placa móvil	2.67
N/D	F.P. Andritz 2500	16:31	17:29	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Limpieza	1	Limpieza de las tuberías hidráulicas de admisión y retorno de relave	0.98
N/D	F.P. Andritz 2500	11:33	12:00	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Ajustes	2	Verificación y ajuste del nivel de líquido en el tanque de aceite	0.45
N/D	F.P. Andritz 2500	07:17	07:52	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Ajustes	1	Ajuste de acoples y conexiones hidráulicas de los cilindros y el sistema de alimentación	0.58
N/D	F.P. Andritz 2500	09:46	12:05	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Limpieza	2	Limpieza de corrosión de la viga superior principal	2.33
N/D	F.P. Andritz 2500	15:32	15:45	Mantenimiento	Mantenimiento Correctivo	Ajustes	2	Ajuste de las lonas respecto a los marcos de una placa de filtrado	0.22

Anexo 9: Análisis de los modos y efectos de falla (AMFE)

Función principal	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
<p>1 Filtrar relave a un ratio de 1.43 toneladas por minuto, entregando un producto con 17% de humedad y una granulometría con un mínimo de 75 micrones</p>	<p>A No se filtran los relaves</p>	<p>1 Levantamiento de las placas de filtrado a causa de la falla de sensores de posicionamiento del sistema de lavado</p>	<p>Parada del sistema. Amenaza baja de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo mínimo para el operador. Se debe controlar manualmente el desplazamiento de la placa de filtrado.</p>
		<p>2 Inclinación de la placa móvil por falla de medición en el sensor de inclinación</p>	<p>Parada del sistema. Amenaza baja de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo mínimo para el operador. Se debe controlar manualmente el sistema de lavado o desplazar la placa de filtrado.</p>
		<p>3 Inclinación de la placa móvil por acumulación de aire en los pistones de los cilindros hidráulicos</p>	<p>Parada del sistema. Amenaza media de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo mínimo para el operador. Se debe purgar los cilindros hidráulicos.</p>
		<p>4 Trabe de cadenas del sistema de desplazamiento de placas a causa de corrosión</p>	<p>Parada del ciclo automático. Amenaza media de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo medio para el operador. Se debe destrabar las cadenas y lubricarlas. Trabajar la corrosión a través de pulido y pintura.</p>
		<p>5 Trabe de cadenas de desplazamiento de placas por falta de lubricación</p>	<p>Parada del ciclo automático. Amenaza media de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo medio para el operador. Se debe destrabar las cadenas y lubricarlas.</p>

	6	Falla de los sensores de proximidad (platina) de la bandeja de descarga por constantes vibraciones Parada del ciclo automático. No se apertura las bandejas de descarga. Amenaza media de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo medio para el operador. Se acerca una herramienta con forma de espátula al sensor.
	7	Flexión o rotura de cilindro hidráulico Parada del ciclo automático. Se rompe o flexiona cilindro hidráulico. Amenaza alta de parada de planta. Impacto en la seguridad geotécnica de la relavera. Riesgo medio alto para el operador. Se cambia todo el cilindro hidráulico.
El relave no se filtra a un ratio de 1.43 toneladas por minuto	1	La fatiga térmica/mecánica en las lonas genera contracción, arrugas y/o rotura en las mismas Rotura o contracción en las lonas. Los agujeros de las lonas y las placas no coinciden. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de lona.
	2	El constante contacto con el relave (el cual es abrasivo y corrosivo) genera desgaste y rotura en las lonas Rotura o contracción en las lonas. Los agujeros de las lonas y las placas no coinciden. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de lona.
	3	Lonas rotas por acumulación de relave en su superficie Rotura en las lonas. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de lona.
	4	El constante contacto con el relave (el cual es abrasivo y corrosivo) genera desgaste y rotura en las placas de filtrado (polipropileno) Rotura o desgaste en las placas de filtrado. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere reparación de placa y lona de filtrado.

- | | | |
|-----------|---|--|
| 5 | Sobrepresión en el proceso de secado genera desgaste y rotura en las placas de filtrado (polipropileno) | Rotura o desgaste en las placas de filtrado. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere reparación de placa y lona de filtrado. Se debe comprobar la presión de aire comprimido y el sensor de presión |
| 6 | Sobrepresión de alimentación genera desgaste y rotura en las lonas de filtrado (polipropileno) | Rotura o desgaste en las lonas. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de lona y ajuste en la presión de alimentación |
| 7 | Desgaste en las gomas de las ruedas de desplazamiento de sistema de lavado. | Pérdida de agarre. Desplazamiento anormal o desnivelado del sistema de lavado. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de ruedas del sistema de lavado. |
| 8 | Falla interna en los rodamientos de agujas de las ruedas de las gaviotas del sistema DDP | Desplazamiento anormal o desnivelado de las placas de filtrado. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere cambio de ruedas del sistema de lavado. |
| 9 | La bomba de alta presión no llega a 270 bar por fugas de aceite en los sistemas hidráulicos. | Las placas de filtrado no se cierran de manera adecuada. Manómetro no marca la presión indicada. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere solucionar fugas cambiando accesorios hidráulicos y revisando la presión determinada para el sistema. |
| 10 | Las válvulas del sistema hidráulico no apertura o lo hacen parcialmente dado el apelmazamiento de cargas por las bajas temperaturas | Desplazamiento lento del sistema o parada del sistema automático. Amenaza media de parada. Riesgo bajo para el operador. Se requiere realizar limpieza a través de aire o modificar los valores de presión. |

- | | | |
|-----------|--|--|
| 11 | Fallas de hermetización o desajuste de pernos en tuberías hidráulicas. | Se evidencian filtraciones. Amenaza baja de parada. Riesgo bajo para el operador. Se requiere realizar ajustes de pernos, cambios de sellos, limpieza general. |
| 12 | Desgaste o fisuramiento de retenes y vástagos de los cilindros hidráulicos | Fugas de aceite. Accionamiento no adecuado de los cilindros. Amenaza baja de parada. Riesgo bajo para el operador. Se requiere realizar cambios de retenes y reparación o cambio de vástagos en mal estado. |
| 13 | Malfuncionamiento de cilindros por excesivamente bajo o excesivamente elevado nivel de aceite en el tanque | Parada del sistema o desplazamiento nulo o lento de los cilindros (no se retrae ni contrae). Amenaza alta de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere realizar la verificación y ajuste del nivel de líquido en el tanque de aceite. |
| 14 | Malfuncionamiento de cilindros hidráulicos por válvula de alivio abierta o válvula de alivio cerrada | Parada del sistema o desplazamiento nulo o lento de los cilindros. Amenaza baja de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere realizar verificación de estado de válvula de alivio. |
| 15 | Malfuncionamiento de cilindros hidráulicos por acoples, sellos y conexiones sueltas. | Parada del sistema, desplazamiento lento de los cilindros o falta de presión en los mismos. Amenaza baja de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere realizar verificación de acoples, sellos y conexiones que pudieran estar sueltas. |
| 16 | Malfuncionamiento de cilindros hidráulicos por carga demasiado pesada (densidad de relave) | Parada del sistema o desplazamiento lento de los cilindros. Amenaza media de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere modificar la densidad de entrada de relave o la carga a procesar en el filtro. |
| 17 | Malfuncionamiento de cilindros hidráulicos por aire retenido en el sistema | Parada del sistema, los cilindros se desplazan lentamente o no lo hacen. Amenaza media de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere inspeccionar y purgar los cilindros hidráulicos. |

		<p>Malfuncionamiento de cilindros hidráulicos por fuga interna en la bomba hidráulica de aceite.</p> <p>Las presiones en los cilindros no llegan al nivel adecuado por fugas de aceite, fallas de válvulas o accesorios de seguridad</p> <p>Fuga en el canal de alimentación por desperfecto en el acople de tuberías o apelmazamiento de cargas</p> <p>Desgaste superficial de la viga superior principal debido a la corrosión</p> <p>Fricción entre dos placas adyacentes por desprendimiento de marcos</p>	<p>Los cilindros se extienden, pero no tienen la presión necesaria. Amenaza media de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere inspeccionar y reparar la bomba hidráulica de aceite.</p> <p>El sistema no se cierra correctamente. Existen desniveles en las placas. Amenaza media de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere inspeccionar y purgar los cilindros hidráulicos.</p> <p>Fugas en el sistema. Llenado lento de las placas de filtrado. Amenaza media de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere limpiar y, de ser necesario, reparar o cambiar el canal de alimentación.</p> <p>Desplazamiento lento de sistema de desplazamiento de placas. Amenaza baja de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere limpiar y actuar sobre la superficie corroída.</p> <p>Desprendimiento de las telas de filtrado. Presencia de fugas. Amenaza baja de parada. Riesgo medio para el operador. Se requiere limpiar y actuar sobre la superficie corroída.</p>
C	<p>El relave filtrado no posee un porcentaje de humedad igual o menor al 17%</p>	<p>1 Se ha añadido algún componente químico o espumante que genera contracción/arrugas en las lonas de filtrado</p>	<p>Los agujeros de las lonas de filtrado y de las placas de filtrado no coinciden. Existen fugas. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere ajustar el espumante y cambiar de lonas.</p>

<p>D El relave filtrado no posee una granulometría con un mínimo de 75 micrones</p>	<p>2 Escurre aire de secado por presión central de cerrado insuficiente</p>	<p>Fuga de aire. Relave con humedad por encima de la deseada. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere ajustar el valor de la presión de secado e inspeccionar lonas.</p>
	<p>3 Escurre aire de secado por excesiva suciedad en las placas de filtrado</p>	<p>Fugas de aire. Relave con humedad por encima de la deseada. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere limpiar las placas de filtrado.</p>
	<p>4 Flexiones o deformaciones en las placas de filtrado dada la acumulación de relave o la fatiga térmica/mecánica</p>	<p>Fugas. Relave con humedad por encima de la deseada. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere reparar o cambiar las placas de filtrado de acuerdo a condición.</p>
	<p>1 Falta de presión de cerrado de filtro</p>	<p>Fuga de relave sin filtrar. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere ajustar el valor de la presión de cierre de placas e inspeccionar el estado de los cilindros hidráulicos.</p>
<p>2 Presión de secado inferior a la nominal por fugas de aire en placas o lonas rotas</p>	<p>No se alcanza el nivel de secado necesario y hay fuga de relave sin filtrar. Amenaza baja de parada de planta. Riesgo bajo para el operador. Se requiere verificar la condición de lonas y placas de filtrado y ajustar la presión de secado.</p>	

