

**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**

Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica

**Cesar Cristian Miranda Orna**

**Código 201510103**

**Asesor**

Mg. Luis Hurtado Campos

Lima – Perú

Diciembre 2019

El trabajo de investigación

**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 aprobado

-----  
[Dr. Lucio Pareja Chávez]

-----  
[Mg. Luis Hurtado Campos]

-----  
[Ph. D Julien Noel]

*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.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
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
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>34</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>35</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1</b> Detalle de estrategias de mantenimiento .....	25

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1</b> Factores de influencia sobre indicadores de mantenimiento .....	13
<b>Figura 1.2</b> Proceso de mantenimiento: Planificación – Programación – Ejecución .....	22
<b>Figura 1.3</b> Sistema de espesamiento de relave .....	31
<b>Figura 1.4</b> Filtro prensa de discos.....	31
<b>Figura 1.5</b> Filtro Prensa de Relave Modelo Andritz 2500.....	33

# ÍNDICE DE ECUACIONES

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

## **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

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación parte de la identificación de un problema asociado al mantenimiento 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 y realizando el análisis sobre las condiciones de operación del filtro, los modos de falla identificados en el procedimiento de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) y los datos de vida del mismo, se desarrolló el plan de mantenimiento abarcando al equipo en general y sus respectivos sub - sistemas. 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

## **ABSTRACT**

This research work starts with the identification of a problem associated with the maintenance of the Andritz Model 2500 Tailings Press Filter in terms of its Overall Equipment Effectiveness (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, in accordance with the proposed methodology and performing the analysis on the operating conditions of the filter, the failure modes identified in the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) procedure and the life data of the same, the maintenance plan was developed covering the equipment in general and their respective sub-systems. 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 as availability, Mean Time Between Failures (MTBF) and Mean Time to Repair (MTTR) were also supported. 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

# 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 lo afectan directamente.

Por otro lado, se realizó un análisis comparativo cualitativo entre el escenario actual 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.

## 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 1.5yd<sup>3</sup> 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 m<sup>2</sup> 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 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 (MTBF) y tiempo promedio para reparar (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].

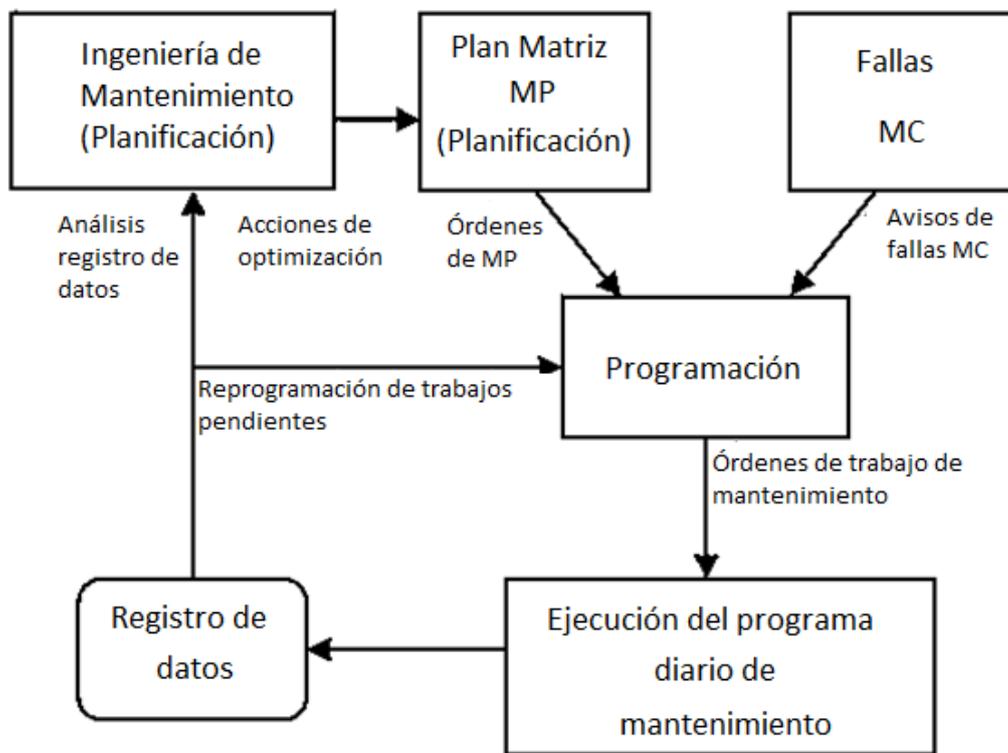
### **1.1.2.2 Mejora en indicadores de mantenimiento**

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 de 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 m<sup>2</sup> 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.

<b>Parámetro</b>	<b>CBM</b>	<b>TPM</b>	<b>RCM</b>
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 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 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 inadmisibles [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]

## 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.

## 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.

