

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN

**DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO/PREDICTIVO
PARA OPTIMIZAR LA EFICIENCIA Y CONFIABILIDAD DE LA CORREA
TRANSPORTADORA CM1-A EN EL PROCESO DE CHANCADO Y MOLIENDA EN
MINA LOS BRONCES.**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Ejecución Mecánica de Procesos y
Mantenimiento Industrial

Alumno: Rodolfo Garcés Carrasco

Profesor Guía: Marcelo Quiroz Neira



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo/predictivo para optimizar la eficiencia y confiabilidad de la correa transportadora CM1-A en el proceso de chancado y molienda en mina Los Bronces.

Nombre del candidato(a): Rodolfo Esteban Garcés Carrasco

Carrera / Grado: Ingeniería Ejecución Mecánica de Procesos y Mantenimiento Industrial

Campus: Concepción Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MARCOS QUIROZ NEZ, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 27/7/26

Firma: _____

MARCOS QUIROZ NEZ

27/7/26

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/07/26

Firma: _____

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

1. CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

1.1. Planteamiento del Problema 1

1.2. Justificación.....1

1.3. Objetivos.....1

 Objetivo General.....1

 Objetivos Específicos 2

1.4. Alcances y Limites 2

 Alcances.....2

 Limites 2

1.5. Metodología.....3

 Diseño de la investigación 3

 Enfoque de la investigación.....3

 Población y muestra.....3

 Herramientas 4

 Etapas de la Investigación.....4

Marco teórico 5

2. DESARROLLO.....9

2.1. Revisión de la Literatura y Diagnóstico de Fallas en la Correa Transportadora CM1-A 9

 Normativas nacionales e internacionales aplicables al mantenimiento de correas transportadoras. 10

 Especificaciones técnicas de la correa CM1-A.....12

 Análisis de Fallas Recurrentes en la Correa Transportadora CM1-A 14

 Matriz de modos de fallas críticos y efectos operacionales en correa CMI-A. 17

2.2. Análisis de Fallas y Evaluación de Criticidad mediante AMEF 19

 Identificación de las fallas en la correa CM1-A mediante AMEF 22

2.3. Diseño de Estrategias y Planificación del Mantenimiento Preventivo.....2

 Plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A 3

 Inversión inicial en repuestos y componentes críticos.....2

2.4. Diseño de un plan de mantenimiento predictivo 3

 Plan de mantenimiento predictivo para la correa transportadora CM1-A 3

2.5. Análisis de impacto de decisiones de mantenimiento basadas en datos reales. Evaluación económica y análisis de rentabilidad 10

Evaluación económica y análisis de rentabilidad de la estrategia de mantenimiento propuesta
para la correa transportadora CM1-A.....11

BIBLIOGRAFÍA.....30

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

En la minería, el transporte continuo de material es esencial para el éxito operativo. La correa transportadora CM1-A, que forma parte del proceso de chancado y molienda en Mina Los Bronces, es fundamental para garantizar un flujo constante de minerales. Sin embargo, la ausencia de un plan de mantenimiento preventivo adecuado ha dado lugar a fallas frecuentes que interrumpen el proceso productivo, generando pérdidas de tiempo y aumentando los costos operativos (Smith & Hinchcliffe, 2020). A su vez, estas interrupciones impactan la productividad y reducen la vida útil del equipo.

Actualmente, el mantenimiento de la correa se realiza principalmente de manera correctiva, lo cual implica que las fallas solo se abordan después de que ocurren, lo que resulta en pérdidas económicas y en una menor eficiencia (Blanchard, 2019). Para enfrentar estos problemas, es crucial desarrollar un plan de mantenimiento preventivo que optimice la confiabilidad de la correa CM1-A, reduciendo la incidencia de fallas y, en última instancia, mejorando la eficiencia general del sistema.

1.2. Justificación

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A permitirá mitigar riesgos operativos, reducir costos y mejorar la seguridad. Diversos estudios han demostrado que la implementación de mantenimiento preventivo incrementa significativamente la vida útil y la disponibilidad de equipos mineros, disminuyendo las intervenciones correctivas no planificadas (Pascual & Ortega, 2018). En este contexto, el desarrollo de un plan específico no solo facilitará el logro de los objetivos de producción, sino que también contribuirá a la sustentabilidad económica de la operación, al optimizar el uso de recursos y evitar paradas inesperadas (Salvendy, 2012).

Además, este estudio incluye la incorporación de tecnologías avanzadas de monitoreo, como sensores de vibración y análisis de temperatura, los cuales permitirán una detección temprana de problemas y una mejor planificación de intervenciones preventivas (Mobley, 2019). Por lo tanto, el plan de mantenimiento preventivo para la correa CM1-A proporcionará beneficios significativos tanto en términos de rendimiento operativo como de seguridad y sostenibilidad.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para la correa transportadora CM1-A en Mina Los Bronces, con el fin de mejorar su confiabilidad y eficiencia en el proceso de chancado y molienda.

Objetivos Específicos

- Diagnosticar el comportamiento histórico y operacional de la correa transportadora CM1-A, identificando los modos de falla recurrentes que generan indisponibilidad en la línea de producción.
- Determinar la criticidad de los componentes del sistema mediante un Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).
- Desarrollar pautas de mantenimiento preventivo y estrategias de monitoreo predictivo basadas en la condición.
- Evaluar la viabilidad económica y la rentabilidad financiera del plan propuesto a través de un análisis de flujo de caja (OPEX), demostrando el impacto positivo de la estrategia en los costos operativos.

1.4. Alcances y Limites

Alcances

La presente investigación se enfocará en la identificación y el análisis exhaustivo de las fallas recurrentes en la correa transportadora CM1-A de Mina Los Bronces, con el objetivo de diseñar un plan de mantenimiento preventivo específicamente dirigido a sus componentes más críticos. Este análisis detallado permitirá reconocer los factores y patrones que afectan la confiabilidad de la correa transportadora, estableciendo estrategias de intervención que reduzcan las paradas inesperadas y aumenten la eficiencia operativa del equipo.

Además, se incluirá el uso de herramientas avanzadas para el monitoreo y la evaluación de la condición de los componentes de la correa. Tecnologías como el análisis vibracional y el monitoreo de temperatura se aplicarán a las piezas clave del sistema de transporte para detectar de manera temprana los signos de desgaste o mal funcionamiento. El empleo de estos métodos permitirá anticipar problemas y facilitar un mantenimiento preventivo eficaz, acorde con las condiciones operativas de la mina.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis económico que proyectará tanto los costos como los beneficios de implementar el plan de mantenimiento preventivo. Este análisis incluirá una evaluación del retorno de inversión (ROI), proporcionando un marco de referencia para valorar el impacto financiero y la rentabilidad del plan propuesto, conforme a metodologías de evaluación de mantenimiento preventivo recomendadas (Blanchard, 2019).

Limites

El alcance de este proyecto estará exclusivamente limitado a la correa transportadora CM1-A, sin abarcar otros sistemas de transporte o equipos en Mina Los Bronces. Este enfoque delimitado permitirá concentrar los recursos y esfuerzos en el análisis específico de la CM1-A, lo cual es necesario para desarrollar un plan de mantenimiento preventivo adaptado a las características y necesidades de esta correa en particular.

Asimismo, el desarrollo de este plan se limitará a una proyección teórica de los procedimientos, actividades y frecuencias de mantenimiento recomendadas, sin considerar una implementación práctica ni un seguimiento posterior de los resultados. Esta limitación implica que, aunque se ofrecerá una planificación detallada y fundamentada, no se contempla en el alcance del estudio una validación en condiciones reales ni una evaluación continua del desempeño del plan preventivo. Esto representa un enfoque inicial que podría servir como base para una futura implementación y análisis en terreno.

1.5. Metodología

Para cumplir los objetivos del estudio y desarrollar un plan de mantenimiento preventivo efectivo para la correa transportadora CM1-A, se plantea una metodología estructurada que permitirá obtener datos relevantes, analizarlos y aplicarlos en el diseño de un plan detallado. Esta metodología se divide en varias fases que abordan desde la revisión bibliográfica y diagnóstico preliminar hasta el análisis económico final del plan propuesto. A continuación, se presenta el diseño de la investigación, el enfoque de esta, los detalles sobre la población y la muestra, las herramientas utilizadas y una descripción de las fases de trabajo.

Diseño de la investigación

El diseño de la investigación será de tipo descriptivo y proyectivo. Se describirá la situación actual de la correa transportadora CM1-A a través de la identificación de sus fallas recurrentes y se proyectará un plan de mantenimiento preventivo basado en el análisis de los datos obtenidos. Además, se incluye un análisis económico para evaluar la viabilidad del plan propuesto en términos de costos y beneficios.

Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación será mixto (cualitativo y cuantitativo). El análisis cualitativo se realizará a partir de la revisión de la literatura y los informes de fallas para identificar patrones y causas raíz en las fallas recurrentes de la correa transportadora. En la fase cuantitativa, se evaluarán los datos históricos de fallas y se emplearán herramientas como el AMEF para clasificar las fallas según su criticidad. Asimismo, se utilizarán métricas económicas para comparar los costos y beneficios del plan de mantenimiento preventivo.

Población y muestra

La población del estudio está compuesta por los sistemas de transporte de materiales en Mina Los Bronces. La muestra específica se centra en la correa transportadora CM1-A, seleccionada debido a su relevancia en el proceso de chancado y molienda y su incidencia en la eficiencia de la operación. Para el análisis, se considerarán datos históricos de fallas y mantenimiento de esta correa en un periodo de tres años.

Herramientas

Se utilizarán varias herramientas para alcanzar los objetivos planteados en la investigación. Entre ellas:

- **AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallas):** Herramienta de análisis para identificar y clasificar las causas de las fallas según su impacto y frecuencia.
- **Sensores de monitoreo de condición:** Sensores de vibración, análisis termográfico y monitoreo de desgaste para evaluar el estado de los componentes de la correa.
- **Análisis económico:** Modelo de evaluación financiera para proyectar costos y beneficios, así como el retorno de inversión (ROI) del plan propuesto.

Etapas de la Investigación

Tabla 1. Plan de Etapas de la Investigación

Fase	Actividades	Herramientas
Revisión de la literatura y diagnóstico preliminar	Revisión bibliográfica de estudios previos, recopilación y análisis de datos históricos de fallas	Informes de fallas, bases de datos técnicas
Aplicación de AMEF	Identificación de fallas más frecuentes y análisis de causas raíz usando AMEF	AMEF, datos de fallas históricos
Diseño del plan de mantenimiento preventivo	Desarrollo de estrategias preventivas y programación de intervenciones específicas	Documentación técnica
Diseño del plan de mantenimiento predictivo	Evaluación y selección de sensores para el monitoreo de condición	Sensores de vibración, termografía, análisis de desgaste
Análisis económico	Evaluación de costos y beneficios, estimación de retorno de inversión (ROI)	Modelo de análisis económico, calculadora ROI

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla anterior, la metodología se realizará en cinco fases, que se describen a continuación:

La primera fase consiste en una revisión bibliográfica y un diagnóstico preliminar, donde se examinan estudios previos sobre mantenimiento preventivo y tecnologías de monitoreo en minería, recopilando también datos históricos sobre fallas en la correa CM1-A. Esta fase es fundamental para comprender la situación actual y establecer un punto de partida para el análisis.

En la segunda fase, se aplica el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) para identificar y clasificar las fallas de acuerdo con su criticidad. Esta herramienta permite identificar las causas raíz de las fallas y su impacto potencial, lo cual facilita la planificación de acciones preventivas adecuadas.

La tercera fase implica el diseño detallado del plan de mantenimiento preventivo, en el cual se establecen actividades específicas, la frecuencia de intervenciones y los recursos necesarios. Este plan estará diseñado en función de los datos obtenidos en las fases anteriores, y su objetivo es maximizar la vida útil de los componentes y reducir las fallas imprevistas.

En la cuarta fase, se desarrolla el mantenimiento predictivo, escogiendo tecnologías como sensores de vibración y termografía infrarroja, que permitan realizar un seguimiento continuo del estado de los componentes de la correa. Estas tecnologías serán elegidas según su compatibilidad con las condiciones operativas y sus costos de implementación.

Finalmente, la quinta fase corresponde al análisis económico, donde se realiza una comparación de los costos de implementación del plan preventivo y sus beneficios esperados en términos de reducción de fallas y ahorro en mantenimiento correctivo. En esta fase también se estima el retorno de inversión (ROI) del proyecto, proporcionando una visión de la viabilidad económica del plan propuesto.

MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico expone los fundamentos científicos, metodologías de ingeniería y estándares internacionales que sustentan el diseño del mantenimiento para la correa transportadora

CM1-A. A través de esta revisión bibliográfica, se delimitan los principios de la gestión de activos, las técnicas de monitoreo predictivo mediante IOT y las métricas operacionales necesarias para validar la continuidad operativa y la viabilidad económica del proyecto.

2.1 Mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial comprende el conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión orientadas a conservar los equipos e instalaciones en condiciones óptimas de funcionamiento, asegurando su disponibilidad, confiabilidad y seguridad durante su ciclo de vida. En la industria minera, el mantenimiento cumple un rol estratégico debido a su impacto directo en la continuidad operativa y los costos.

2.2 Tipos de mantenimiento

El mantenimiento industrial se clasifica principalmente en mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, cada uno con características y aplicaciones particulares según el nivel de criticidad de los equipos.

2.2.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se ejecuta después de ocurrida una falla con el objetivo de restablecer la operatividad del equipo. Este enfoque genera altos costos asociados a detenciones no programadas.

2.2.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo corresponde a actividades planificadas orientadas a evitar fallas, tales como inspecciones, lubricación y reemplazos programados.

2.2.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se basa en el monitoreo del estado real de los equipos mediante tecnologías como vibraciones y termografía, permitiendo anticipar fallas.

2.3 Mantenimiento preventivo en minería

En minería, el mantenimiento preventivo es fundamental para asegurar la confiabilidad de equipos críticos como correas transportadoras, reduciendo riesgos operacionales.

El mantenimiento de sistemas de transporte continuo de material en minería de alta densidad exige transitar desde estrategias reactivas hacia modelos de prevención basados en la criticidad del activo. Debido a que las correas operan bajo condiciones ambientales extremas como es la polución (polvo), humedad y cargas de impacto variables, las rutinas preventivas deben estandarizarse mediante cartillas de inspección que aseguren la estabilidad geométrica de la estructura, la alineación de la banda y el estado de la matriz de polines, minimizando así la probabilidad de detenciones imprevistas en la línea de producción.

2.4 Monitoreo de condición y Mantenimiento Predictivo (Remoto e IOT)

El monitoreo de condición constituye un pilar tecnológico estratégico dentro de la gestión de activos modernos. Sustituye las frecuencias rígidas del mantenimiento preventivo tradicional por intervenciones basadas en el estado real y dinámico del equipo. Consiste en la recolección, procesamiento y análisis continuo de variables físicas correlacionadas de manera directa con modos de falla mecánicos, eléctricos o térmicos. En el contexto de la minería de alta exigencia, la integración de la Internet de las Cosas de la Industria (IIoT) y arquitecturas de monitorización en tiempo real permite mitigar errores de diagnóstico humanos, centralizando lecturas de campo a través de redes industriales confiables para predecir anomalías estructurales antes de que estas muten a una detención catastrófica.

Análisis Vibracional: Considerada la técnica fundamental para el diagnóstico de maquinaria rotativa. Se basa en capturar las oscilaciones mecánicas mediante acelerómetros piezoeléctricos montados rígidamente en las zonas de carga de los rodamientos y acoplamientos. El análisis se ejecuta en el dominio del tiempo y de la frecuencia; este último utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para segregar el espectro vibratorio e identificar armónicos específicos vinculados a desalineaciones, desbalanceo dinámicos o fallas tempranas en las pistas de los rodamientos, bajo las tolerancias cinemáticas fijadas por la norma internacional ISO 10816-3.

Termografía Infrarroja: Técnica no destructiva ni invasiva basada en la captación de la radiación electromagnética en el espectro infrarrojo emitida por los cuerpos con temperatura superior al cero absoluto. Permite convertir la energía radiante en patrones térmicos bidimensionales (termogramas). En sistemas de transmisión de potencia pesada, como motorreductores de correas transportadoras. Es vital para cartografiar sobrecalentamientos localizados producidos por fricción anormal por falta de lubricante, desalineación geométrica de piñones o fatiga en devanados estatóricos.

2.5 Indicadores Claves de Desempeño en Mantenimiento (KPIS Operacionales)

La evaluación científica y auditable de un plan de mantenimiento se realiza mediante la modelación de indicadores claves de desempeño (KPIS), los cuales proporcionan métricas normalizadas para cuantificar la eficiencia técnica y el impacto financiero de las estrategias de confiabilidad. Para activos de transporte crítico en minería, se establecen matemáticamente las siguientes variables de control operacional.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF – Mean Time Between Failuers): Representa el tiempo promedio acumulado en que un sistema o componente crítico es capaz de operar de manera continua y correcta sin registrar detenciones imprevistas. Se define matemáticamente como

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo Total de Operacion Efectiva}}{\textit{Numero de Fallas Total Registradas}}$$

Un incremento sostenido del MTBF es el reflejo directo de la efectividad de las estrategias predictivas aplicadas sobre los modos de falla críticos.

Tiempo Medio de Reparacion (MTTR – Mean Time to Repair): Mide la efectividad, mantenibilidad e infraestructura de respuesta técnica del equipo de mantenimiento ante un evento de detención. Expresa el tiempo promedio requerido para aislar, diagnosticar, reparar y poner en marcha nuevamente el activo tras la aparición de una falla. Su ecuación es:

$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo total de Detencion por Reparacion}}{\textit{Numero de Intervenciones Ejecutadas}}$$

Disponibilidad Tecnica Operacional (A): Es el indicador macro de productividad de la gestión de activos, determinando la probabilidad de que la correa transportadora este en condiciones de operar en forma segura y nominal en cualquier instante de tiempo programado. Se calcula directamente vinculando los dos KPIS anteriores:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

2.6 Correas transportadoras en minería

Las correas Transportadoras longitudinales constituyen el sistema de transporte continuo de material a granel mas eficiente, sustentable y de menor costo operativo por tonelada en operaciones mineras a cielo abierto a gran escala. mecánicamente, consisten en una banda sinfín elastómerica tensionada que se desplaza soportada por una matriz de polines (rodillos) alineados, impulsada por un tambor o polea motriz acoplada a un sistema de accionamiento electromecánico de alta potencia.

Para el transporte de mineral grueso proveniente del chancado primario , el diseño exige bandas del tipo ST (Steel Cord), compuestas por un núcleo interno de cables de acero longitudinales vulcanizados de alta resistencia a la tracción y bajo alargamiento elástico (0.22% a 0.28%) , encapsulados en cubiertas de caucho sintético formuladas bajo estándares internacionales como la norma DIN 53516 para resistir cortes por impacto, abrasión severa y desgaste de bordes por desalineación de la trayectoria estructural.

2.7 Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)

El análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) es una metodología técnica estructurada y de carácter preventivo utilizada para identificar, jerarquizar y mitigar las fallas potenciales en sistemas mecánicos complejos antes de que estas ocurran. Su propósito central es evaluar la criticidad de los componentes basándose en la relación causa-efecto de sus modos de falla operacionales.

La priorización de las acciones de mantenimiento se determina cuantitativamente mediante el **Numero de Prioridad de Falla** (NPR), el cual se calcula multiplicando tres variables criticas evaluadas desde el 1 al numero 10.

$$NPR = S \times O \times D$$

Severidad (S): Cuantifica la gravedad del impacto o consecuencia que genera la falla sobre la seguridad, el medio ambiente y la continuidad de la producción de la planta.

Ocurrencia (O): Estima la probabilidad o frecuencia con la que se suelen presentar el modo de falla especifico mediante un periodo de operación determinado.

Deteccion (D): evalúa la probabilidad de que los sistemas de control actuales (inspecciones, visuales o sensores) identifiquen la falla antes que causen un impacto catastrófico.

En la gestio de activos, la implementación de tecnologías IoT y monitoreo predictivo (como acelerómetros y sensores térmicos) reduce bastante el factor de detección (D), lo que disminuye el NPR global y optimiza la confiabilidad del sistema.

DESARROLLO

2.1.Revisión de la Literatura y Diagnóstico de Fallas en la Correa Transportadora CM1-A

En la industria minera, el transporte eficiente de materiales es esencial para garantizar la continuidad operativa. En este contexto, las correas transportadoras han evolucionado como una de las soluciones más efectivas para movilizar minerales desde la extracción hasta el procesamiento (HIDALGO, ANÁLISIS DE FALLAS EN MAQUINARIA MINERA, 2013). Su uso se remonta al siglo XVIII, cuando se empleaban para transportar carbón, y con el tiempo se han convertido en un componente clave en la optimización de los procesos mineros (Agusto Valderrama et al., 2021). Estas correas permiten un flujo constante de material, reduciendo la dependencia de camiones y ferrocarriles, además de adaptarse a diversos entornos operativos. En operaciones de gran escala, como minas a cielo abierto o subterráneas, pueden integrarse con otros sistemas de manejo de materiales, como tolvas de acopio y equipos de clasificación granulométrica, mejorando la eficiencia en la distribución del mineral (Ccori et al., 2006).

En el procesamiento minero, las correas transportadoras desempeñan un papel fundamental en las etapas de chancado y molienda (Marquina Araujo et al., 2023). El chancado consiste en la reducción del tamaño del mineral mediante equipos de trituración mecánica y se desarrolla en dos grandes etapas: chancado primario o grueso y chancado fino, cada una con trituradoras específicas para alcanzar la granulometría deseada (Codelco Chile, 2018). Posteriormente, el mineral chancado es transportado a la molienda, donde se somete a la acción de molinos que lo pulverizan hasta obtener partículas suficientemente finas para la recuperación de los minerales valiosos. La eficiencia en la transferencia del material entre estas etapas es crucial para optimizar los tiempos de procesamiento y reducir costos operativos (Diez Román, 2015).

Las correas transportadoras presentan ventajas significativas frente a otros sistemas de transporte en minería. Su alta capacidad de carga permite movilizar grandes volúmenes de material con menor consumo energético y menores costos operacionales en comparación con los camiones mineros, además de contar con una vida útil prolongada. Son más eficientes energéticamente, alcanzando hasta un 75% de eficiencia frente al 45% de los camiones, y contribuyen a la reducción de emisiones de polvo y ruido, minimizando el impacto ambiental (Blanco, 2016). Sin embargo, su implementación implica una inversión inicial elevada y un diseño cuidadoso para evitar interrupciones operativas. A pesar de su menor flexibilidad frente a los camiones, su uso representa una solución estratégica para mejorar la productividad y sostenibilidad en la minería (Riveros Arcos G. A., 2021).

Normativas nacionales e internacionales aplicables al mantenimiento de correas transportadoras.

En Chile, el mantenimiento de correas transportadoras en la industria minera está regulado por diversas normativas que buscan garantizar la seguridad y eficiencia en su operación. La mina Los Bronces, operada por Anglo American en Chile, cuenta con procedimientos y normativas internas específicas para el mantenimiento y operación de las correas transportadoras. Estos procedimientos están alineados con las regulaciones nacionales y las mejores prácticas de la industria para garantizar la seguridad y eficiencia en las operaciones mineras. A continuación, en la **Tabla 2** se presenta una tabla que resume las principales normativas aplicables:

Tabla 2. Normativas y Estándares para el Mantenimiento de Correas Transportadoras en Minería	
NORMATIVA / ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN
Reglamento de Seguridad Minera (DS N° 132)	Regula la instalación, operación y mantenimiento de correas transportadoras, incorporando medidas de seguridad y protección contra incendios.
Estándares de Competencia de la Industria Minera (CCM)	Define las competencias para el mantenimiento de correas transportadoras y alimentadores, garantizando el cumplimiento de normativas y procedimientos técnicos.
Procedimientos de Trabajo Seguro (PTS)	Establece directrices para la elaboración, capacitación y control de protocolos seguros en labores de mantenimiento y operación.
Estándar N°014 de Codelco	Especifica criterios de ingeniería para la protección contra incendios en correas transportadoras, considerando riesgos y condiciones ambientales.
Estándares de Competencia (U-0400-7233-015-V03)	Regula las competencias para la inspección, mantenimiento y recambio de componentes en correas transportadoras.
API 686 – Machinery Installation and Installation Design	Establece lineamientos para la correcta instalación, alineación y montaje de maquinaria rotativa, aplicable a motorreductores, poleas y rodamientos asociados a correas transportadoras.

<i>API 670 – Machinery Protection Systems</i>	Define criterios para sistemas de protección y monitoreo de condición, incluyendo vibraciones y temperatura en rodamientos y equipos rotativos, fundamentales para mantenimiento predictivo en correas transportadoras.
---	---

Fuente: Elaboración propia

La mina Los Bronces, ubicada en la zona cordillerana de Lo Barnechea, en la Región Metropolitana de Santiago, Chile, es una de las principales explotaciones a cielo abierto dedicadas a la extracción de cobre y molibdeno. Su operación se desarrolla a altitudes que oscilan entre 3.300 y 4.200 metros sobre el nivel del mar, lo que implica enfrentar condiciones extremas como bajas temperaturas, presencia de nieve y una geografía montañosa con pendientes pronunciadas (Anglo American Chile, 2016). Estas condiciones hacen que el transporte de material sea un desafío que requiere equipos de alta resistencia y confiabilidad.

Para garantizar un rendimiento óptimo, las correas transportadoras utilizadas están fabricadas con materiales de alta resistencia, como refuerzos de cables de acero que proporcionan una gran capacidad de carga y resistencia a la tracción. La cubierta de caucho de alta durabilidad protege la estructura interna de la correa frente a impactos y desgaste, asegurando una mayor vida útil. Además, muchas de estas correas están diseñadas para operar a altas velocidades y en largos recorridos, optimizando la eficiencia del transporte de material en minas a cielo abierto y subterráneas. A continuación, en la **Tabla 3** se presentan los principales componentes que conforman una correa transportadora usada en minería:

Tabla 3. Componentes de una correa transportadora

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
<i>Correa o banda</i>	Elemento principal que soporta y transporta el material a lo largo del sistema.
<i>Polea Motriz</i>	Polea principal que impulsa la correa mediante la transmisión de potencia del motor.
<i>Polea Deflectora</i>	Mantiene la tensión adecuada en la correa para evitar deslizamientos y asegurar un funcionamiento eficiente.
<i>Polines de impacto</i>	Elementos ubicados en la zona de carga de la correa transportadora, diseñados para absorber los impactos del material, proteger la banda y reducir el desgaste prematuro.
<i>Polines de carga</i>	Soportan la correa en la zona de carga, garantizando estabilidad y alineación.
<i>Polines de retorno</i>	Sostienen la correa en su tramo de retorno, evitando desviaciones y desgastes innecesarios.
<i>Gualderas</i>	Protegen la correa y otros componentes del polvo y materiales externos que puedan causar desgaste.
<i>Chutes</i>	Estructura donde se deposita el material para ser transportado por la correa.
<i>Polea deflectora de cola</i>	Ayuda en la redirección de la correa en el extremo de retorno.
<i>Polea de Cola</i>	Facilita el cambio de dirección de la correa en el extremo opuesto al tambor de accionamiento.
<i>Polines de impacto</i>	Absorben el impacto del material al caer sobre la correa, protegiendo su integridad.
<i>Raspador de la correa</i>	Limpia la superficie de la correa para evitar acumulaciones de material que puedan afectar su funcionamiento.
<i>Contrapeso tensor</i>	Sistema que asegura la tensión constante de la correa, compensando elongaciones y variaciones durante la operación.

Fuente: (FUENZALIDA, 2018)

Las especificaciones técnicas de estas correas varían según la aplicación y el tipo de material transportado. En general, cuentan con características como refuerzo de cables de acero, alta resistencia a la abrasión, operación a velocidades de hasta 6 m/s y capacidad de carga de hasta 10.000 toneladas por hora. También están diseñadas para resistir temperaturas extremas y garantizar una alineación precisa a lo largo de su recorrido. A continuación, en la **Tabla 4** se detallan sus principales características:

Tabla 4. Características técnicas correa transportadora utilizada en minería

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
<i>Tipo de refuerzo</i>	Cables de acero de alta resistencia (Steel Cord – ST)
<i>Resistencia a la tracción</i>	Hasta 2,000 N/mm (configuración 7x7); hasta 10,000 N/mm (configuración 7x19)
<i>Alargamiento</i>	0.22% a 0.28%
<i>Ancho de la correa</i>	Hasta 2000 mm
<i>Velocidad de operación</i>	Hasta 6 m/s
<i>Longitud</i>	Puede superar los 10 km
<i>Pendiente máxima</i>	Hasta 11%
<i>Capacidad de carga</i>	Hasta 10,000 toneladas por hora
<i>Material de la cubierta</i>	Caucho resistente a la abrasión y al impacto
<i>Temperatura de operación</i>	Hasta 190°C en operación continua; picos de hasta 200°C
<i>Resistencia a la abrasión</i>	Clase DIN X, Y, W, RMA I y II (según el tipo de material transportado)
<i>Diámetro de los cables de acero</i>	Varía según diseño; comúnmente entre 4 y 12 mm
<i>Espesor total de la correa</i>	Entre 20 y 30 mm, dependiendo de las capas y recubrimientos
<i>Distribución de cables en la carcasa</i>	Configuración estándar de cables longitudinales con posibles refuerzos transversales
<i>Número de capas de recubrimiento</i>	Generalmente 2: superior e inferior
<i>Carga de rotura por ancho de correa</i>	Aproximadamente 8,000 kN/m
<i>Tensión máxima de operación</i>	Hasta 2,500 kN/m
<i>Coefficiente de fricción</i>	Entre 0.3 y 0.5, dependiendo del material transportado
<i>Índice de desgaste de la cubierta</i>	≤ 120 mm³ (según norma DIN 53516)
<i>Requisitos de alineación</i>	Desalineación máxima permitida de ±2% del ancho de la correa
<i>Vida útil estimada</i>	Entre 5 y 15 años, dependiendo de las condiciones operativas y el mantenimiento
<i>Métodos de reparación</i>	Empalmes vulcanizados en caliente; parches locales para daños menores
<i>Aplicaciones</i>	Minería a cielo abierto y subterránea, transporte de cobre, molibdeno, hierro, carbón y otros materiales a granel

Fuente: (DUNLOP, 2019; ConVeyBelts, 2023; Metso, 2025)

Especificaciones técnicas de la correa CM1-A

La correa transportadora CM1-A, que forma parte del proceso de chancado y molienda en la mina Los Bronces, opera en condiciones exigentes que requieren alta resistencia y eficiencia. Sus especificaciones técnicas permiten un transporte continuo y seguro del mineral, asegurando la estabilidad del proceso. A continuación, en la **Tabla 5**, se presentan sus principales características:

Tabla 5. Especificaciones técnicas de la correa transportadora CM1-A

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Capacidad de transporte (tph)	9,870
Velocidad de operación (m/s)	6.5
Número de polines de carga	3,268
Número de polines de retorno	742
Número de poleas motrices	1
Número de poleas de cola	1
Número de poleas deflectora	1
Tipo de banda	ST-7800 (cables de acero de alta resistencia)
Número de empalmes	11
Ancho de la correa (m)	1.8
Espesor de la correa (mm)	33.7
Largo entre ejes (m)	5,435
Número de motores	1
Potencia por motor (MW)	2.5
Número de reductores	1
Tipo de engranaje en reductor	Cónica-recta-recta
Número de frenos de disco	1
Sistema de tensado	Gravitacional

Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Polea motriz de la correa transportadora CM1-A correspondiente al sistema principal de accionamiento.

Figura 2. Motor eléctrico de accionamiento de la correa transportadora CM1-A durante una intervención de mantenimiento programada.



Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 1 y 2 muestran los principales componentes del sistema de accionamiento de la correa transportadora CM1-A. La Figura 1 corresponde a la polea motriz, elemento encargado de transmitir el movimiento y el torque hacia la banda transportadora mediante la fricción entre su recubrimiento y la correa. Por su parte, la Figura 2 presenta el motor eléctrico de accionamiento durante una intervención de mantenimiento programada, equipo responsable de suministrar la potencia necesaria para el funcionamiento continuo del sistema. Ambos componentes son considerados activos críticos, ya que cualquier falla en ellos puede provocar la detención total de la correa transportadora y afectar la continuidad operacional del proceso de chancado. Por esta razón, el plan de mantenimiento propuesto contempla inspecciones periódicas, monitoreo de temperatura y vibraciones, verificación de la alineación, revisión del estado de los rodamientos y controles preventivos orientados a maximizar la confiabilidad y disponibilidad operacional del sistema.

Análisis de Fallas Recurrentes en la Correa Transportadora CM1-A

En la minería, las correas transportadoras operan en condiciones extremas que pueden generar diversas fallas, afectando la continuidad y eficiencia del proceso. Entre los problemas más frecuentes se encuentran la desalineación, el desgaste de rodillos, la acumulación de material, una tensión inadecuada y la falta de mantenimiento preventivo (HIDALGO, 2013). La desalineación causa derrames y bloqueos, acelerando el desgaste de los componentes. El deterioro de los rodillos, provocado por impactos o acumulación de residuos, compromete la estabilidad del sistema (Pérez et al., 2009). La acumulación de material reduce la capacidad de transporte y genera atascos, mientras que una tensión incorrecta favorece deslizamientos y roturas. Finalmente, la falta de mantenimiento estructurado incrementa el riesgo de fallos imprevistos, afectando la continuidad operativa y aumentando los costos (Riveros Arcos G. A., 2021).

A partir de informes internos y registros de mantenimiento, se han identificado las fallas más recurrentes ocurridas en la correa transportadora CM1-A en Mina Los Bronces. A continuación, se presenta la **Tabla 6** con las principales fallas detectadas, su frecuencia estimada y el impacto que pueden generar en la operación:

Tabla 6. Fallas recurrentes en la correa transportadora CM1-A

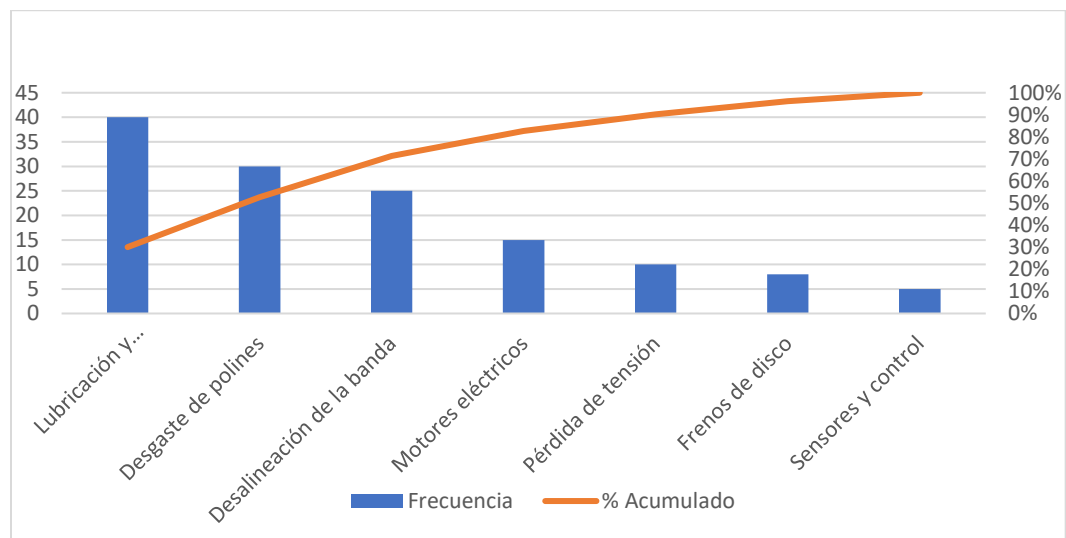
Falla Identificada	Frecuencia Estimada	Impacto en la Operación
Problemas de lubricación y sobrecalentamiento en polines y reductores	Alta (40%)	Aumento del desgaste, riesgo de sobrecalentamiento y fallas mecánicas.
Desgaste en polines y desalineación de la banda	Media (30%)	Riesgo de atascamiento de la banda, cortes en la banda y detenciones imprevistas.
Desalineación y daño en la banda transportadora	Media (25%)	Afecta el desgaste de los componentes y puede provocar paradas prolongadas por reparación o cambio de tramos de banda.
Fallas en motores eléctricos (desgaste de rodamientos)	Baja (15%)	Disminución de la eficiencia energética y riesgo de fallo total del sistema motriz.

Falla Identificada	Frecuencia Estimada	Impacto en la Operación
<i>Pérdida de tensión en la correa</i>	Baja (10%)	Posible deslizamiento de la banda, reducción de capacidad de transporte.
<i>Problemas en frenos de disco</i>	Baja (8%)	Riesgo de detención abrupta o falta de control en paradas de emergencia.
<i>Fallas eléctricas en sensores y sistemas de control</i>	Baja (5%)	Pérdida de monitoreo en tiempo real y potenciales fallos de seguridad.

Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de priorizar las fallas de mayor impacto en la operación de la correa transportadora CM1-A, la información presentada en la Tabla 6 se representa mediante un diagrama de Pareto. Esta herramienta permite identificar los modos de falla que concentran la mayor frecuencia de ocurrencia y, por consiguiente, orientar las actividades de mantenimiento hacia aquellos componentes cuya intervención genera un mayor beneficio para la disponibilidad y confiabilidad del sistema.

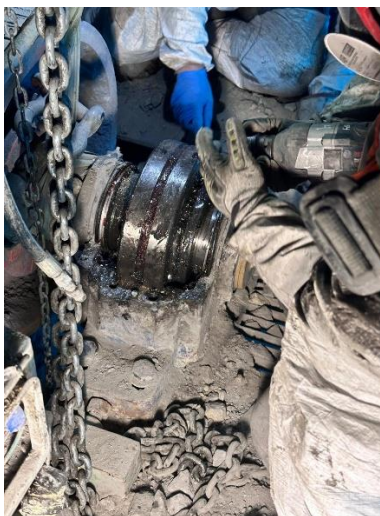
Gráfico 1. Diagrama de Pareto de las fallas recurrentes identificadas en la correa transportadora CM1-A



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 1 presenta el diagrama de Pareto de las fallas recurrentes identificadas en la correa transportadora CM1-A. Se observa que las fallas asociadas a la lubricación y sobrecalentamiento, el desgaste de polines y la desalineación de la banda concentran aproximadamente el 71% del total de las fallas analizadas. Al incorporar las fallas relacionadas con los motores eléctricos, el porcentaje acumulado supera el 80 %, evidenciando que un número reducido de modos de falla concentra la mayor parte del impacto operacional. Estos resultados justifican que el plan de mantenimiento propuesto priorice las actividades de inspección, lubricación, monitoreo por condición y reemplazo programado de los componentes críticos, contribuyendo a mejorar la disponibilidad y confiabilidad de la correa transportadora CM1-A.

Figura 3. Intervención de mantenimiento en el conjunto de rodamiento de la polea de la correa transportadora CM1-A durante el proceso de desmontaje para inspección y reemplazo de componentes



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra una intervención de mantenimiento realizada en el conjunto de rodamiento de una polea de la correa transportadora CM1-A. Este componente está sometido a elevadas cargas radiales y a condiciones severas de operación, caracterizadas por la presencia de polvo, humedad y vibraciones, factores que aceleran el desgaste y pueden comprometer su vida útil. Durante las actividades de mantenimiento se inspecciona el estado de los rodamientos, sellos, alojamiento y superficies de apoyo, verificando la existencia de desgaste, contaminación o pérdida de lubricación. Estas inspecciones permiten detectar oportunamente condiciones anormales y planificar el reemplazo de componentes antes de que se produzcan fallas que afecten la disponibilidad operacional del sistema.

Figura 4. *Polín de impacto con desgaste severo del recubrimiento de caucho producto del trabamiento del rodillo durante la operación de la correa transportadora CM1-A*



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4 muestra un polín de impacto retirado de servicio que presenta un desgaste severo en su recubrimiento de caucho, originado por el trabamiento del rodillo durante la operación. Esta condición impide la libre rotación del polín, provocando que la banda transportadora deslice sobre su superficie en lugar de rodar, lo que incrementa la fricción, acelera el desgaste del recubrimiento y favorece el deterioro prematuro de la banda transportadora. Entre las principales causas de este modo de falla se encuentran el ingreso de polvo y material particulado a los rodamientos, la pérdida de lubricación y el desgaste de los sistemas de sellado. Para mitigar este problema, el plan de mantenimiento propuesto considera inspecciones periódicas de la libre rotación de los polines, verificación del estado de los rodamientos y reemplazo oportuno de los elementos que presenten bloqueo o desgaste excesivo.

Matriz de modos de fallas críticos y efectos operacionales en correa CMI-A.

El levantamiento de los modos de falla críticos se estructuró mediante la triangulación de los registros históricos del sistema de gestión de activos de la faena y la validación empírica en terreno durante las campañas de mantenimiento preventivo. Para efectos de este diagnóstico, se priorizaron aquellos eventos mecánicos y operacionales que, de acuerdo con la experiencia en la línea de producción del chancado primario, presentan una mayor recurrencia y tienen la capacidad de degradar de forma inmediata los indicadores de disponibilidad de la correa CM1-A. A continuación, en la Tabla 7, se detallan las fricciones operacionales detectadas, sus efectos y la justificación técnica de su impacto en el sistema:

Tabla 7. Identificación de los modos de falla críticos de la correa transportadora CM1-A

Componente Crítico	Modo de Falla Identificado en Terreno	Impacto en la Operación	Justificación
<i>Matriz de Polines (3268 carga / 742 retorno)</i>	Entrada de polvo abrasivo por falla de sellos laberínticos (obturadores). Secundariamente, desalineación geométrica en el montaje del bastidor.	Pérdida de lubricación, incremento de temperatura por fricción y gripado (bloqueo) del rodamiento. Desgaste severo del manto por roce.	El bloqueo de polines genera un efecto de arrastre "fijo" continuo sobre la banda, aumentando el consumo de corriente del motor y arriesgando desgarros longitudinales en el caucho.
<i>Gualderas de Chutes (Zonas de carga)</i>	Desgaste abrasivo natural por ciclo operativo. Paralelamente, error en el ajuste de la holgura (<i>gap</i>) dejando la estructura en contacto dinámico con la cinta.	Pérdida de estanqueidad dinámica en el chute, provocando derrames masivos de material. Desgaste prematuro de los bordes por fricción parásita.	La pérdida de control del flujo permite el atrapamiento de rocas de alta granulometría entre la guía estructural y la banda, actuando como elementos punzantes que ranuran la cubierta superior de la banda ST-7800.
<i>Raspadores de Banda (Sistemas de limpieza)</i>	Desgaste por abrasión severa de las cuchillas de carburo de tungsteno y pérdida de presión de contacto por destensado del brazo mecánico/neumático.	Pérdida de eficiencia en la remoción de finos húmedos, provocando el retorno de mineral adherido a la correa	Los finos adheridos se compactan sobre los mantos de las poleas deflectoras, generando costras excéntricas que desalinean dinámicamente la trayectoria de la banda y alteran la
<i>Transmisión Principal (Acoplamiento Motor-Reductor)</i>	Desalineación geométrica entre ejes y fatiga cíclica flexo torsional en los pernos de unión (bulones / pines) y elementos amortiguadores.	Degradación elástica de los bujes, corte o cizalle de los bulones del manguito. Incremento de vibraciones en los descansos del motor.	A pesar de contar con rampas de aceleración suaves controladas por el Variador de Frecuencia (VF), la desalineación induce esfuerzos de corte asimétricos que destruyen los bulones, gatillando una

Componente Crítico	Modo de Falla Identificado en Terreno	Impacto en la Operación	Justificación
<i>Conjunto de Poleas (Motriz, Cola y Deflectoras)</i>	Anomalías de lubricación en rodamientos de chumaceras (deficiente o por sobrepresión debido a sobre lubricación). Secundariamente, fatiga del revestimiento del manto por excesivo tensionamiento del contrapeso.	Incremento térmico y emisión acústica anómala en chumaceras. Pérdida de la geometría del rodamiento que desalinea la polea, forzando un trabajo asimétrico y el desgaste severo localizado del manto.	parada de emergencia de la línea.
			La desalineación interna de una polea distribuye la tensión de la banda ST-7800 de forma desigual. Esto altera la transferencia de potencia del motor de 2,500 kW y acelera la degradación estructural de los descansos, con riesgo de descalce catastrófico del eje.

Fuente: Elaboración propia

2.2. Análisis de Fallas y Evaluación de Criticidad mediante AMEF

El Análisis de Modos de Fallas y Efectos (AMEF) fue desarrollado por la NASA en los años 40 con el propósito de evaluar la confiabilidad de sus equipos (Salazar López, 2019) Se trata de un método sistemático empleado para detectar y analizar posibles fallas en productos, procesos o sistemas (Hurtado et al., 2019). Su finalidad es reducir los riesgos derivados de fallos que puedan comprometer la operatividad y el mantenimiento de un sistema. Para ello, se examinan minuciosamente los componentes, identificando sus modos de falla, las razones que los provocan y las consecuencias que pueden generar (EAN, 2021; Ruiz Parroquiano, 2024). Este enfoque ayuda a prevenir problemas antes de que ocurran, facilitando la implementación de acciones correctivas y preventivas. Asimismo, el AMEF fomenta un trabajo interdisciplinario y promueve una cultura organizacional enfocada en la mejora continua y en la gestión eficiente del riesgo (Barrientos Medina, 2017; Mozo y Marleny, 2019).

El AMEF se fundamenta en principios esenciales que aseguran la efectividad del análisis. Uno de ellos es su naturaleza preventiva, ya que busca identificar y mitigar fallas antes de que impacten la operación (Salazar López, 2019). Además, su estructura sistemática permite examinar de manera ordenada todas las funciones de un producto o proceso, considerando cada posible forma en la que un fallo podría ocurrir. Otro aspecto clave es la priorización de riesgos, basada en la evaluación de la criticidad de cada posible fallo (Astudillo Astudillo y Criollo Gallardo, 2022).

El AMEF se basa en un análisis detallado del sistema en cuestión, dividiéndolo en componentes clave y evaluando su criticidad en función de tres factores principales: severidad,

ocurrencia y detección (Sharma y Srivastava, 2018). La severidad indica el impacto que puede generar una falla en el proceso; la ocurrencia mide la probabilidad de que esta se manifieste; y la detección refleja la capacidad del sistema para identificar el problema antes de que provoque consecuencias graves (Stamatis, 2003; Salazar López, 2019). La combinación de estos factores permite calcular un índice de criticidad, el cual se usa para priorizar las acciones correctivas. Este enfoque permite a los equipos de mantenimiento y gestión tomar decisiones fundamentadas para reducir la incidencia de fallas y mejorar la eficiencia operativa.

El formato seleccionado para llevar a cabo el AMFEC está detallado en la **Tabla 8**, donde se explica cada uno de los elementos que la componen.

Tabla 8. Formato AMEF

Proceso/ Componente crítico	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	SEVERIDAD	Causa(s) potencial de la falla	OCURRENCIA	Controles actuales del proceso	DETECCIÓN	NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad y día de culminación	Resultados de las acciones				
												Accio nes tomad as	SEV	OCU	DET	NPR
Pasos del proceso a analizar, aquellos que afectan directamente a los factores y salida críticos.	Parámetros o condiciones necesarias para garantizar el desempeño adecuado del proceso.	¿De qué maneras puede fallar potencialmente el proceso para cumplir con los requerimientos o el diseño?	¿Cuál es el efecto de cada modo de falla en las salidas y/o los requerimientos?	¿Qué tan severo es el efecto para el cliente? ¿Cómo puede ocurrir la falla? Describir en términos de algo que se pueda corregir o controlar. Sea Específico.	¿Qué tan frecuente ocurre el modo o causa de la falla?	¿Cuáles son los controles y procedimientos existentes (inspección y prueba) que previenen o detectan la ocurrencia?	¿Qué tan bien se puede detectar la causa o el EF?	SEV x OCU x DET	Medidas propuestas para reducir la ocurrencia del fallo o mejorar su detección. Se priorizan fallas con alto NPR.	¿Quién es responsable de las acciones recomendadas?	Listar las acciones completas que se incluyeron en el nuevo cálculo del NPR.	¿Cuál es la nueva severidad?	¿Cuál es la nueva capacidad del proceso?	¿Se mejoraron los límites de detección?	Recalcular NPR después de que se terminen las acciones	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 8 contiene diversas columnas, cada una con un propósito específico, descrito a continuación:

- **Proceso / Componente Crítico:** Indica las funciones o pasos específicos que se analizan dentro del proceso, resaltando aquellos que influyen directamente en los factores críticos y los resultados esperados.
- **Requerimiento:** Especifica las condiciones o parámetros que deben cumplirse para garantizar el desempeño adecuado del sistema y satisfacer las necesidades operativas o del cliente.
- **Modo Potencial de Falla:** Identifica las posibles formas en que el proceso o componente puede fallar, impidiendo el cumplimiento de los requerimientos establecidos.
- **Efecto Potencial de Falla:** Describe las consecuencias que cada falla podría generar en el sistema, afectando su calidad, seguridad, rendimiento o confiabilidad.

- SEVERIDAD (SEV):** Cuantifica el impacto de la falla en el sistema o en la satisfacción del cliente, asignando un valor numérico donde una puntuación más alta representa un efecto más crítico. Para la severidad se presenta la clasificación de la **Tabla 9**.

Tabla 9. Severidad AMEF

EFFECTO	SEVERIDAD	RANGO (SEV)
Falla en el cumplimiento con requisitos de seguridad y normativas	La falla potencial pone en riesgo la seguridad del operador o de la máquina sin advertencia previa. También implica incumplimientos regulatorios.	10
Falla con advertencia en seguridad y normativas	La falla potencial representa un riesgo para la seguridad del operador o la máquina, pero con advertencia previa. Puede implicar incumplimientos regulatorios.	9
Interrupción total del proceso	La falla genera la pérdida total del producto fabricado o la detención completa de la línea de producción.	8
Interrupción significativa	Se pierde una parte considerable de la producción, se reduce la velocidad de la máquina o se incrementa el uso de mano de obra para mitigar el problema.	7
Interrupción importante	La totalidad de la producción requiere retrabajo fuera de la línea antes de su aprobación.	6
Interrupción parcial	Solo una parte de la producción necesita retrabajo fuera de la línea antes de su aprobación.	5
Interrupción moderada	Toda la producción requiere retrabajo dentro de la estación antes de continuar el proceso.	4
Interrupción menor	Solo una fracción de la producción requiere retrabajo en la estación antes de continuar el proceso.	3
Molestia menor / impacto leve	La falla genera una leve inconveniencia en el proceso, operación o para el operador.	2
Sin efecto	No hay impacto perceptible en la producción, operación o seguridad.	1

Fuente: Elaboración propia

- Causa(s) potencial de la falla:** Aquí se identifican las posibles causas de cada modo de falla. Se busca comprender las razones subyacentes que podrían llevar a la ocurrencia de los modos de falla.
- OCURRENCIA (OCU):** Se evalúa la probabilidad o frecuencia con la que puede ocurrir cada modo de falla. Se asigna un valor numérico que indica la frecuencia estimada de ocurrencia, donde valores más altos indican una mayor probabilidad, así como se presenta en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Ocurrencia AMEF

Probabilidad de ocurrencia	Incidentes por producto	Pts.
Muy Alta	1 en 20	10
Alta	1 en 20	9
	1 en 50	8
	1 en 100	7
Moderada	1 en 500	6
	1 en 2000	5
	1 en 10,000	4
Baja	1 en 100,000	3
	1 en 1,000,000	2
Muy Baja (La falla es eliminada a través de controles preventivos)		1

Fuente: Elaboración propia

- Controles vigentes del proceso:** Esta columna detalla los procedimientos y mecanismos implementados para prevenir o identificar la ocurrencia de posibles fallas en el proceso.

Estos controles pueden incluir inspecciones, pruebas, monitoreos u otras estrategias de supervisión.

- **DETECCIÓN (DET):** Se analiza la capacidad del sistema para identificar la causa o el modo de falla antes de que afecte los requisitos del cliente. Se asigna un valor numérico que representa la efectividad de la detección, donde cifras más altas reflejan una mayor capacidad para identificar fallas a tiempo.

Tabla 71. Detección AMEF

Nivel de Detección	Descripción	DPPM	Probabilidad de detección	Pts.
Muy baja	No hay monitoreo ni inspección. Fallas no detectadas hasta que ocurren paradas no programadas.		Casi imposible	10
Baja	Inspecciones visuales esporádicas sin registros sistemáticos. Fallas detectadas solo cuando afectan la operación.	50.000	Muy remota	9
	Inspección manual posterior a una falla evidente, sin herramientas avanzadas de diagnóstico.	20.000	Remota	8
Moderada	Inspecciones visuales y táctiles regulares con bitácoras de mantenimiento.	10.000	Muy baja	7
	Detección posterior a fallas menores mediante chequeos manuales programados (sin sensores ni automatización).	5.000	Baja	6
	Uso de sensores básicos (vibración/temperatura) con alertas para monitoreo de condiciones anormales.	2.000	Moderada	5
Alta	Sensores avanzados de monitoreo en línea detectan anomalías y generan alertas antes de fallas críticas.	1.000	Altamente moderada	4
	Sistemas automatizados de monitoreo detienen preventivamente la correa ante detección de condiciones críticas.	500	1 en 2,000	3
Muy alta	Sistemas predictivos basados en análisis de datos detectan tendencias de degradación y previenen fallas antes de que ocurran.	200	1 en 5,000	2
	Diseño optimizado de la correa y componentes críticos reduce la probabilidad de fallas. Sistema a prueba de errores.	100	1 en 10,000	1

Fuente: Elaboración propia

- **NPR (Nivel de Prioridad de Riesgo):** Representa la prioridad de cada modo de falla y se obtiene multiplicando los valores de severidad, ocurrencia y detección. Se emplea para enfocar los esfuerzos en la mitigación de los riesgos más críticos.
- **Acciones recomendadas:** Contiene las medidas propuestas para disminuir la probabilidad de ocurrencia de las fallas, optimizar su detección o identificar su origen. Se priorizan aquellas con un NPR elevado.
- **Responsabilidad y fecha de finalización:** Asigna a personas o equipos la ejecución de las acciones correctivas y establece un plazo para su cumplimiento.
- **Resultados de las acciones:** Registra los efectos de las medidas implementadas, incluyendo cambios en la severidad, ocurrencia y detección, además de la actualización del NPR tras la aplicación de dichas acciones.

Identificación de las fallas en la correa CM1-A mediante AMEF

Se aplicó la metodología de Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) con el objetivo de identificar y evaluar los modos de falla más críticos. La **Tabla 8** muestra los principales componentes

analizados, los efectos, sus causas potenciales y los controles existentes, calculando el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) para determinar la criticidad de cada problema.

Tabla 82. AMEF correa transportadora CM1-A

ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF)											
Nombre del proceso:						Preparado por:					
Equipo central:						Fecha clave:			Fecha (AMEF):		
Proceso/ Componente crítico	Requerimiento	Modo potencial de falla	Efecto potencial de falla	SEV	Causa(s) potencial de falla	OCU	Controles actuales del proceso	DET	NPR	Acciones recomendadas	Responsabilidad y día de culminación
Pasos del proceso a analizar, aquellos que afectan directamente a los factores y salida críticos.	Parámetros o condiciones necesarias para garantizar el desempeño adecuado del proceso.	¿De qué maneras puede fallar potencialmente el proceso para cumplir con los requerimientos o el diseño?	¿Cuál es el efecto de cada modo de falla en las salidas y/o los requerimientos?	¿Qué tan severo es el efecto para el cliente?	¿Cómo puede ocurrir la falla? Describir en términos de algo que se pueda corregir o controlar. Sea Específico.	¿Qué tan frecuente ocurre el modo o causa de la falla?	¿Cuáles son los controles y procedimientos existentes (inspección y prueba) que previenen o detectan la ocurrencia?	¿Qué tan bien se puede detectar la causa o el EF?	SEV x OCU x DET	Medidas propuestas para reducir la ocurrencia del fallo o mejorar su detección. Se priorizan fallas con alto NPR.	¿Quién es responsable de las acciones recomendadas?
Polines y reductores	Lubricación adecuada	Problemas de lubricación y sobrecalentamiento	Aumento del desgaste, fallas mecánicas	8	Falta de mantenimiento, contaminación del lubricante	6	Inspección manual, lubricación periódica	6	288	Implementar sensores de temperatura y vibración	Mantenimiento - Día 10
Polines y banda transportadora	Funcionamiento sin atascos y alineación estable	Desgaste en polines y desalineación de la banda	Riesgo de atascamiento, cortes y detenciones imprevistas	8	Desgaste natural, polines desajustados, sobrecarga de material	6	Revisiones periódicas, ajuste manual	5	240	Sensores de alineación con alarmas automáticas	Operaciones - Día 8
Banda transportadora	Integridad estructural	Daño y cortes en la banda	Paradas prolongadas por reparación o cambio de tramos	9	Objetos extraños, tensión incorrecta	4	Inspección visual, mantenimiento correctivo	6	216	Detectores de objetos extraños y limpieza automatizada	Mantenimiento - Día 7
Motores eléctricos	Operación eficiente	Fallas en rodamientos	Disminución de eficiencia, riesgo de fallo total	7	Falta de lubricación, desgaste normal	3	Monitoreo de temperatura	5	105	Mantenimiento predictivo basado en vibraciones	Mantenimiento - Día 7
Sistema de tensado	Tensión adecuada	Pérdida de tensión en la correa	Deslizamiento de la banda, reducción de capacidad de transporte	6	Ajuste incorrecto, desgaste en el sistema de tensado	2	Inspección visual, ajustes manuales	7	84	Sistema de ajuste automático de tensión	Operaciones - Día 5
Frenos de disco	Funcionamiento eficiente en paradas	Problemas en frenos de disco	Detención abrupta o fallas en paradas de emergencia	8	Desgaste excesivo, contaminación con polvo	2	Revisión en cada parada programada	6	96	Frenos de mayor durabilidad y protección contra polvo	Mantenimiento - Día 7
Sensores y sistemas de control	Monitoreo continuo	Fallas eléctricas en sensores y sistemas de control	Pérdida de monitoreo, posibles fallos de seguridad	9	Falla eléctrica, condiciones ambientales adversas	2	Monitoreo redundante en puntos críticos	4	72	Implementación de redundancia eléctrica y respaldo	Automatización - Día 10

Fuente: Elaboración propia

El AMEF de la correa transportadora CM1-A destaca fallas con alto Nivel de Prioridad de Riesgo (NPR), como los problemas de lubricación en polines y reductores (NPR 288), el desgaste y desalineación de la banda (NPR 240) y los daños en la banda transportadora (NPR 216). Estas fallas representan un alto impacto en la operación debido a su frecuencia y severidad, lo que puede ocasionar paradas imprevistas y afectaciones en la producción. Para mitigar estos riesgos, se han implementado acciones.

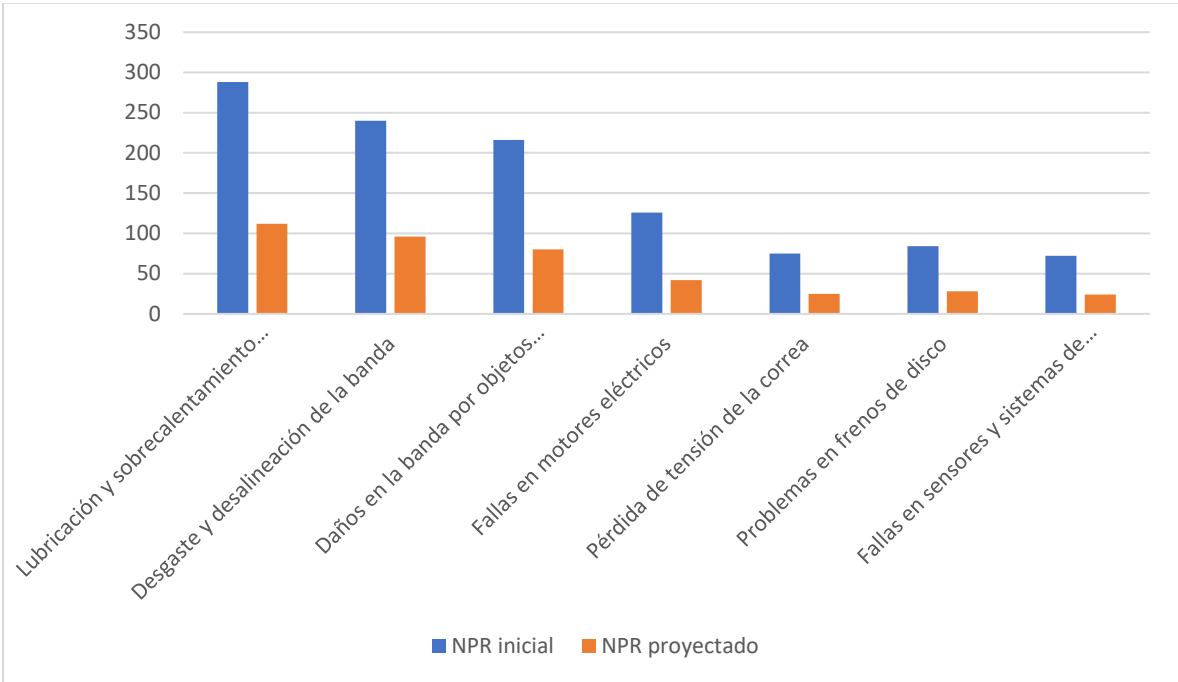
En la Tabla 9, se detallan las acciones implementadas y su impacto en la reducción del NPR. Estas mejoras incluyen la incorporación de sensores, estrategias de mantenimiento predictivo y ajustes en los sistemas de monitoreo y control.

Tabla 9. Acciones propuestas para la reducción del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) de los principales modos de falla de la correa transportadora CM1-A

RESULTADOS DE LAS ACCIONES				
Acciones tomadas	SEV	OCU	DET	NPR
Listar las acciones completas que se incluyeron en el nuevo cálculo del NPR.	¿Cuál es la nueva severidad?	¿Cuál es la nueva capacidad del proceso?	¿Se mejoraron los límites de detección?	Recalcular NPR después de que se terminen las acciones
Sensores de temperatura y vibración en polines y reductores.	7	4	4	112
Sensores de alineación con alarmas automáticas.	8	4	3	96
Detectores de objetos extraños y mejora en limpieza.	8	2	5	80
Mantenimiento predictivo basado en vibraciones en motores eléctricos	7	2	3	42
Sistema de ajuste automático de tensión en la correa.	5	1	5	25
Frenos de mayor durabilidad y protección contra polvo.	7	1	4	28
Redundancia eléctrica en sensores y sistemas de control.	8	1	3	24

Fuente: Elaboración propia

Grafico 2. Comparación del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) inicial y proyectado de los principales modos de falla de la correa transportadora CM1-A



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 2 evidencia una disminución significativa del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) en todos los modos de falla evaluados tras la aplicación de las acciones de mejora propuestas. La mayor reducción se observa en las fallas asociadas a la lubricación y sobrecalentamiento de polines y reductores, cuyo NPR disminuye de 288 a 112. De igual forma, la implementación de sensores de alineación con alarmas automáticas permitió reducir el NPR asociado al desgaste y desalineación de la banda de 240 a 96, mientras que la incorporación de detectores de objetos extraños y el fortalecimiento de las actividades de limpieza disminuyeron el NPR de los daños en la banda transportadora de 216 a 80. Asimismo, la incorporación de estrategias de mantenimiento predictivo basadas en análisis de vibraciones, la implementación de un sistema de ajuste automático de tensión y las mejoras en los sistemas de frenado, monitoreo y control permitieron reducir el NPR de los restantes modos de falla a niveles considerablemente menores. En conjunto, estos resultados demuestran que las acciones propuestas permiten disminuir la probabilidad de ocurrencia de las fallas, mejorar su capacidad de detección y aumentar la confiabilidad operacional de la correa transportadora CM1-A, contribuyendo a reducir el riesgo de detenciones no programadas y a incrementar la continuidad del proceso productivo.

2.3.Diseño de Estrategias y Planificación del Mantenimiento Preventivo

El diseño del plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A se desarrolló a partir de los resultados obtenidos del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), priorizando aquellos componentes que presentan mayor criticidad y un mayor impacto sobre la continuidad operacional del sistema. De acuerdo con Stamis (2003), el AMEF constituye una herramienta preventiva que permite identificar los modos de falla más relevantes y establecer acciones de mantenimiento orientadas a disminuir el riesgo operacional antes que las fallas se materialicen.

La planificación del mantenimiento considero las condiciones de operación de la correa transportadora, el historial de fallas, la criticidad de sus componentes y las recomendaciones técnicas de los fabricantes para definir las actividades preventivas y sus respectivas frecuencias de intervención. Según Moubray (1997), la definición de estrategias de Mantenimiento debe basarse en función del equipo, sus modos de falla y las consecuencias que estos generan sobre el proceso productivo, permitiendo seleccionar las tareas más adecuadas para perseverar la confiabilidad de los activos.

Asimismo, el plan incorpora actividades de inspección, lubricación, ajustes mecánicos, verificación de alineamiento, monitoreo de condición mediante técnicas predictivas y reemplazo programado de componentes sometidos a desgaste. Estas actividades fueron estructuradas considerando principios de gestión de activos y mantenimiento preventivo establecidos por la norma ISO 55000, la cual promueve una administración sistemática de los activos físicos con el objetivo de maximizar su desempeño durante todo su ciclo de vida.

Finalmente, la planificación contempla la asignación de recursos humanos, materiales, repuestos y herramientas necesarias para la ejecución de cada intervención. Además, se incorpora la valorización económica del plan de mantenimiento preventivo, permitiendo estimar los costos asociados a su implementación y facilitando la planificación presupuestaria de las actividades. De acuerdo con Kelly (2006), una adecuada planificación de mantenimiento debe integrar tanto los aspectos técnicos como los recursos económicos necesarios para asegurar la disponibilidad, confiabilidad y sostenibilidad operacional de los equipos.

Plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A

Como resultado de la estrategia de mantenimiento desarrollada, se elaboró un plan de mantenimiento preventivo para la correa CM1-A, orientado a establecer las actividades necesarias para mantener la confiabilidad y disponibilidad operacional del sistema. El plan organiza las tareas de mantenimiento de acuerdo con su frecuencia de ejecución, los componentes involucrados y los recursos requeridos para cada intervención.

Las actividades consideradas incluyen inspecciones operacionales, lubricación, verificación de alineamiento, revisión de elementos de transmisión, monitoreo de condición mediante técnicas predictivas y reemplazo programado de componentes críticos. Estas tareas fueron definidas con el propósito de controlar los principales modos de falla identificados y reducir la probabilidad de detenciones no programadas.

Asimismo, el plan incorpora la identificación de las especialidades responsables, los tiempos estimados de ejecución, los recursos materiales y los registros necesarios para asegurar una adecuada planificación y control de las actividades de mantenimiento. De acuerdo con la norma UNE-EN 13306 (2018), un plan de mantenimiento preventivo debe establecer de forma sistemática las intervenciones requeridas para conservar el funcionamiento de los activos durante su vida útil.

En los apartados siguientes se presentan las frecuencias de mantenimiento establecidas para cada actividad, la valorización económica del plan y los formatos de registro y seguimiento propuestos para su implementación.

Figura 5. *Conjunto eje-rodamiento de un polín polea durante una intervención de mantenimiento en la correa transportadora CM1-A*



Fuente: Elaboración Propia

2.3.1.1.Frecuencia y actividades de mantenimiento preventivo

Con el propósito de facilitar la planificación y ejecución del mantenimiento preventivo de la correa transportadora CM1-A, las actividades fueron organizadas según su frecuencia de intervención. Esta programación permite distribuir las tareas de mantenimiento durante el período operativo, definiendo para cada actividad la frecuencia de ejecución, la especialidad responsable, los recursos requeridos y las observaciones técnicas correspondientes. La Tabla XX presenta el programa de mantenimiento preventivo propuesto para la correa transportadora CM1-A.

Tabla 14. Programa y valorización de las actividades de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A

Frecuencia	Componte	Actividad	Especialidad	Duración (h)	Personal	Eventos/ Año	HH/Año	Costo HH (USD)	Costo Total Anual (USD)
Diaria	Banda y Gualderas	Inspección visual de desgaste de cubierta y ajuste menor de gualderas laterales.	Técnico Mecánico	3	1	365	1.095	\$35	\$38.325
Diaria	Matriz de Polines	Ruta térmica y acústica predictiva para detección de polines trabados.	Técnico Mecánico	2,5	1	355	912,5	\$35	\$31.937
Diaria	Sistema Motriz / Freno	Inspección de la estación de accionamiento principal, control de temperatura de rodamientos de motores y niveles de fluido.	Técnico Mecánico	2	1	355	730	\$35	\$27.740
Semanal	Raspadores de Banda	Detención programada de ventana corta, limpieza profunda de costras de mineral, ajuste de presión y reemplazo de hojas de raspado desgastadas.	Técnico Mecánico	3	2	52	312	\$35	\$10.920
Semanal	Matriz de Polines	Reemplazo de los polines críticos defectuosos detectados en la semana, alineación menor de estaciones de carga y retorno.	Técnico Mecánico	4	2	52	416	\$35	\$14.560
Semanal	Chutes y Transferencias	Limpieza técnica de buzones, inspección de la caída de carga, remoción de	Técnico Mecánico	3	2	52	312	\$35	\$10.920

		material adherido y chequeo de placas de impacto.							
Semanal	Sistema de Tensado	Limpieza de la torre o carro de tensado por gravedad, verificación de carrera, lubricación de guías y estado del cable/polea tensora.	Técnico Mecánico	2,5	2	52	260	\$35	\$9.100
Mensual	Línea de Banda	Campana mensual de medición ultrasónica de espesores a lo largo de tramos críticos de la correa y mapeo de desgaste de vulcanizaciones.	Inspector de Confiabilidad Predictiva	6	2	12	144	\$45	\$6.480
Mensual	Revestimiento de Chutes	Medición de desgaste por espesores de placas de sacrificio internas en chutes y apriete/torqueado de pernos de sujeción.	Técnico Mecánico	5	2	12	120	\$35	\$4.200
Mensual	Poleas (Motriz / Cola / Deflectora)	Monitoreo predictivo por análisis de vibraciones en descansos, toma de muestras de aceite e inspección del estado del lagging (revestimiento).	Inspector de Confiabilidad Predictiva	4	2	12	96	\$45	\$4.320
Mensual	Motor y Reductor	Inspección termográfica de acoplamientos, medición de vibraciones en rodamientos mayores y chequeo de sistemas de lubricación forzada.	Inspector de Confiabilidad Predictiva	4	1	12	48	\$45	\$2.160
Mensual	Sistema de Frenos	Verificación de holguras entre pastillas y disco, pruebas dinámicas de frenado, medición de espesores y control de la unidad hidráulica.	Técnico Mecánico	4	2	12	96	\$35	\$3.360

Trimestral	Reductor	Inspección interna mediante boroscopia de la calidad de dientes de engranajes, filtrado de aceite o reposición total de carga lubricante.	Técnico Mecánico	8	2	4	64	\$35	\$2.240
Trimestral	Motores Eléctricos	Pruebas de resistencia de aislamiento (Megger), revisión de cajas de conexiones, limpieza de ventilación y balanceo dinámico de rotor.	Técnico Eléctrico	6	2	4	48	\$35	\$1.680
Trimestral	Sistema de Frenos	Purga completa del sistema de tuberías hidráulicas, cambio de sellos menores y pruebas de la lógica de parada de emergencia enclavada.	Técnico Mecánico	6	2	4	48	\$35	\$1.680
Anual	Reductor y Motor	Alineación láser de precisión del tren de potencia, cambio de acoplamientos de alta velocidad y cambio total de aceite.	Técnico Mecánico	16	3	1	48	\$35	\$1.680
Anual	Revestimiento interno	Reemplazo estructural masivo de las placas de sacrificio de carburo de cromo o acero al manganeso en chutes.	Técnico Mecánico	24	4	1	96	\$35	\$3.360
Anual	Componentes Mecánicos	Cambio programado de polea deflectora o de cola, inspección estructural de soportes y polines de impacto mayores.	Técnico Mecánico	24	4	1	96	\$35	\$3.360
Anual	Sistema de Monitoreo e IA	—	Técnico Eléctrico	12	2	1	24	\$35	\$840
	TOTAL						4.053		\$178.862

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 14 presenta el programa de mantenimiento preventivo propuesto para la correa transportadora CM1-A, en el cual se establecen las actividades de mantenimiento, la frecuencia de ejecución, el componente intervenido, la especialidad responsable, el tiempo estimado de intervención y la valorización de la mano de obra asociada a cada tarea. Esta planificación permite organizar de manera sistemática las intervenciones requeridas para mantener la disponibilidad y confiabilidad del sistema de transporte.

Se observa que las actividades con frecuencia **diaria** están orientadas principalmente a inspecciones operacionales y monitoreo de los componentes críticos, permitiendo detectar oportunamente condiciones anormales que puedan evolucionar hacia fallas de mayor impacto. Por otra parte, las actividades **semanales, mensuales, trimestrales y anuales** consideran intervenciones de mayor complejidad, tales como lubricación, ajustes mecánicos, inspecciones detalladas y reemplazo programado de componentes sometidos a desgaste, cuya ejecución requiere una mayor dedicación de recursos y tiempo.

Figura 6. Lubricador automático instalado en la correa transportadora CM1-A para el suministro continuo y controlado de lubricante durante la operación



Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, la incorporación de parámetros como la duración de las actividades, la cantidad de personal requerido, el número de eventos anuales y la valorización de las horas-hombre proporciona una base técnica para la planificación de los recursos de mantenimiento. Esta información facilita la programación de las intervenciones, la estimación de los costos operacionales y la asignación eficiente del personal responsable de cada actividad.

En conjunto, el programa de mantenimiento preventivo constituye una herramienta de planificación que permite estandarizar las actividades de mantenimiento de la correa transportadora CM1-A, favoreciendo la reducción de detenciones no programadas, el aumento de la disponibilidad operacional y una gestión más eficiente de los recursos destinados al mantenimiento.

Inversión inicial en repuestos y componentes críticos

Con el propósito de asegurar la disponibilidad de los componentes necesarios para la ejecución del plan de mantenimiento preventivo, se definió un stock inicial de repuestos y elementos críticos para la correa transportadora CM1-A. Esta inversión considera aquellos componentes cuya falla puede generar detenciones prolongadas o afectar directamente la continuidad operacional del sistema. La Tabla 15 presenta la cantidad requerida, el valor unitario y el costo total estimado de los repuestos considerados.

Tabla 15. Stock inicial de repuestos, equipos e insumos críticos para la implementación del plan de mantenimiento preventivo de la correa transportadora CM1-A

Categoría	Componente / Insumo	Descripción Técnica del Repuesto	Stock Crítico Mínimo	Unidad	Costo Unitario (USD)	Inversión Total en Stock (USD)
Repuestos Mecánicos	Rodamientos de Polea Motriz	Rodamientos de rodillos esféricos de alta carga para ejes de poleas motriz y cola.	2	Unidad	\$1.850	\$3.700
Repuestos Mecánicos	Chumaceras para Poleas	Soportes partidos de hierro fundido con sellos.	2	Unidad	\$1.200	\$2.400
Repuestos Mecánicos	Acoplamientos de Transmisión	Elementos flexibles, rejillas de repuesto (Grilla) y sellos para acoplamientos (Motor-Reductor-Polea).	2	Juego	\$1.150	\$2.300
Repuestos Mecánicos	Pastillas de Freno	Kit de alta fricción para las pinzas del sistema de frenado de emergencia.	8	Juego	\$650	\$5.200
Equipos de Levante	Alza Correas Mecánico	Dispositivo estructural tipo pinza para levantar de forma segura la lona pesada ST-7800.	Existentes ya en planta.			0
Equipos de Levante	Tecles de Palanca 3 Ton	Tecles manuales para el posicionamiento y tracción de componentes pesados en estructuras.	Existentes ya en planta.			0
Equipos de Levante	Eslingas y Grilletes	Kit de eslingas planas de poliéster certificadas y grilletes forjados de alta resistencia.	Existentes ya en planta.			0
Elementos Desgaste	Block Shocks	Bloques para parchar placa madre en chutes.	10	Unidad	\$350	\$3.500

Elementos Desgaste	Lifters (Barras Levantadoras)	Barras de desgaste con perfil deflector para modular el flujo de mineral y proteger paredes de chutes.	24	Unidad	\$180	\$4.320
Elementos Desgaste	Gualderas	Placas de confinamiento lateral masivas de acero con goma maciza integrada de alta dureza.	6	Unidad	\$520	\$3.120
Elementos Desgaste	Placas de Sacrificio Chutes	Placas de Carburo de Cromo (500x500x25mm) para blindaje interior de zonas de impacto ordinarias.	20	Unidad	\$450	\$9.000
Elementos Desgaste	Polín de carga 5"	Polín de servicio pesado sellado para estaciones de carga a lo largo de la estructura.	80	Unidad	\$130	\$10.400
Elementos Desgaste	Polín de retorno 5"	Polín en V para mantener el alineamiento dinámico de la lona de retorno.	15	Unidad	\$120	\$1.800
Elementos Desgaste	Hojas Raspador Primario	Placas de poliuretano/tungsteno para remoción de finos adheridos a la lona.	8	Unidad	\$320	\$2.560
Elementos Desgaste	Hojas Raspador Secundario	Hojas de limpieza secundaria para asegurar el correcto retorno de la lona sin finos.	16	Unidad	\$280	\$4.480
Instrumentación	Tarjeta Optoelectrónica DAS	Tarjeta de repuesto para el sistema de Fibra Óptica Acústica de detección en polines.	1	Unidad	\$2.500	\$2.500
Instrumentación	Cabezal de Inducción Magnética	Sensor de repuesto para el escaneo interno continuo de cables de acero (Rip Scan).	1	Unidad	\$4.200	\$4.200

Instrumentación	Celdas de Carga (Tensado)	Transductores de fuerza para monitorear y regular la tensión de la correa.	2	Unidad	\$1.200	\$2.400
Instrumentación	Sensor Constante Dieléctrica	Sensor en línea para monitoreo continuo de degradación y partículas en el reductor.	1	Unidad	\$1.100	\$1.100
Instrumentación	Sensores de Posición e IA	Sensores ultrasónicos e interruptores de desalineación lateral de la lona.	4	Unidad	\$450	\$1.800
Instrumentación	Sensores Ultrasónicos Fijos	Kit de sensores fijos en retorno para telemetría automatizada del espesor de lona.	2	Unidad	\$850	\$1.700
Equipos Diagnóstico	Medidor Ultrasonido Portátil	Equipo portátil de medición de espesores por ultrasonido para campañas mensuales manuales.	1	Unidad	\$1.200	\$1.200
Equipos Diagnóstico	Cámara Termográfica Flir	Equipo portátil para auditorías mensuales de temperatura en motores y descansos.	Existente ya en planta.			0
Equipos Diagnóstico	Lámpara Estroboscópica	Instrumento para inspección visual predictiva de acoplamientos en movimiento.	1	Unidad	\$580	\$580
Equipos Diagnóstico	Pirómetros Láser Digitales	Termómetros de no-contacto para rutas rutinarias de inspección diaria.	3	Unidad	\$150	\$450
					Costo Total	\$68.710

Fuente: Elaboración propia

La inversión inicial presentada en la **Tabla 15** permite disponer de un stock estratégico de repuestos y componentes críticos para la correa transportadora CM1-A, asegurando la disponibilidad de los elementos necesarios para ejecutar las actividades de mantenimiento preventivo y atender oportunamente eventuales fallas. La existencia de este inventario reduce los tiempos asociados a la adquisición de repuestos, disminuye el riesgo de prolongar detenciones por falta de materiales y contribuye a mantener la continuidad operacional del sistema. En este sentido, la inversión propuesta representa una medida orientada a fortalecer la confiabilidad del proceso de mantenimiento y optimizar la gestión de los recursos destinados a la operación del equipo.

2.3.1.2.Registro y seguimiento

El Formato de Registro y Seguimiento del Mantenimiento Preventivo tiene como objetivo documentar de manera detallada y estructurada todas las actividades de mantenimiento realizadas en la correa transportadora CM1-A. A través de este registro, se lleva un control preciso de las inspecciones, lubricaciones, ajustes y reemplazos de componentes, asegurando el cumplimiento del plan de mantenimiento preventivo. Este documento permite:

- Registrar sistemáticamente cada actividad de mantenimiento, junto con cualquier incidencia detectada.
- Identificar patrones o tendencias en fallas recurrentes para la implementación de mejoras.
- Evaluar la efectividad del plan de mantenimiento mediante auditorías periódicas y ajustes en la estrategia.

La

Tabla 1 de registro incluye información clave como la frecuencia del mantenimiento, el estado inicial de los componentes, las acciones correctivas realizadas y el estado final tras la intervención. De este modo, se garantiza un seguimiento continuo y la optimización de la operatividad, seguridad y eficiencia de la correa transportadora CM1-A.

Tabla 16. Registro de seguimiento al mantenimiento preventivo correa transportadora CM1-A

FORMATO DE REGISTRO Y SEGUIMIENTO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO					
Correa Transportadora CM1-A					
Fecha					
Hora de Inicio			Responsable		
Hora de Finalización			Supervisor		
Actividad realizada	Estado Inicial	Acción Tomada	Estado Final Mejorado	Observaciones	Firma del Técnico

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.3. Procedimiento de seguridad

El Procedimiento de seguridad en el mantenimiento de la correa transportadora CM1-A tiene como objetivo garantizar la integridad del personal y la operatividad segura del equipo durante todas las actividades de mantenimiento preventivo. Para ello, se establecen protocolos claros de seguridad, que incluyen:

- *Bloqueo y etiquetado de energía (LOTO):* Se debe desactivar y asegurar cualquier fuente de energía antes de realizar intervenciones en la correa transportadora.
- *Uso de equipos de protección personal (EPP):* Todo el personal deberá portar casco, guantes, gafas de seguridad, botas con puntera de acero y protectores auditivos según la tarea a realizar.
- *Manejo adecuado de productos químicos:* Los lubricantes, grasas y solventes deben ser manipulados con las precauciones indicadas por el fabricante y almacenados en zonas seguras.
- *Capacitación del personal:* Se realizarán entrenamientos periódicos en normas de seguridad, procedimientos de emergencia y uso de herramientas especializadas.
- *Revisión y actualización de los procedimientos:* Se evaluará regularmente la efectividad de los protocolos de seguridad, incorporando mejoras para garantizar el cumplimiento de normativas vigentes.

La siguiente Sábana de Mantenimiento detalla las actividades de mantenimiento preventivo junto con sus respectivas frecuencias y responsabilidades:

Tabla 17. Sabana de mantenimiento correa transportadora CM1-A

Actividad de Mantenimiento	Frecuencia	Responsable	Observaciones
Inspección y Mantenimiento Diario	Diario	Operador / Mantenimiento	
- Verificar estado general de la correa transportadora			
- Inspección visual de la banda, polines y reductores			
- Registro de anomalías o condiciones inusuales			
Mantenimiento Semanal	Semanal	Mantenimiento	
- Lubricación de polines y reductores según especificaciones			
- Ajuste de tensión de la banda transportadora			
- Revisión de sensores de temperatura, vibración y alineación			
Mantenimiento Mensual	Mensual	Mantenimiento	
- Inspección y ajuste de polines y rodillos			
- Verificación estructural de la banda transportadora			
- Comprobación del sistema de tensado y ajustes necesarios			
Mantenimiento Trimestral	Trimestral	Mantenimiento	
- Cambio de lubricantes en reductores y rodamientos			
- Inspección de desgaste de la banda y necesidad de reemplazo parcial			
- Evaluación del sistema de frenos y sustitución de componentes desgastados			
Mantenimiento Anual	Anual	Mantenimiento	
- Reemplazo de polines con signos de desgaste severo			
- Sustitución programada de secciones de la banda transportadora			

- Inspección estructural detallada y refuerzo de componentes			
--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

2.4. Diseño de un plan de mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es un enfoque basado en la supervisión constante del estado de los equipos para anticiparse a posibles fallas, reduciendo imprevistos y prolongando la vida útil de los componentes (Montaña, 2019). A diferencia del mantenimiento preventivo, que sigue un cronograma fijo, o el correctivo, que actúa después de una avería, este método utiliza herramientas avanzadas para detectar anomalías antes de que se conviertan en problemas mayores (Molęda et al., 2023). Su implementación requiere una planificación detallada que incluya la identificación de activos críticos, la definición de parámetros de monitoreo y la capacitación del personal en tecnologías especializadas, garantizando intervenciones oportunas y eficientes (Garcia, 2018).

El mantenimiento predictivo emplea diversas técnicas avanzadas para detectar fallos en equipos industriales antes de que ocurran fallas críticas. El análisis de vibraciones permite evaluar el estado de máquinas rotativas mediante la medición de sus oscilaciones, identificando problemas como desalineación o desgaste de rodamientos. La termografía infrarroja detecta anomalías térmicas en componentes eléctricos y mecánicos, facilitando la identificación de sobrecalentamientos (Huda y Taib, 2013). El análisis por ultrasonido permite localizar fugas, fricción anormal o descargas eléctricas mediante la detección de ondas de alta frecuencia no audibles para el oído humano (Hedkvist, 2019). El análisis de aceite evalúa la lubricación y el desgaste de los componentes internos a través del estudio de sus propiedades físicas y químicas (Garcia, 2018). Además, existen ensayos eléctricos y mecánicos que incluyen pruebas en transformadores, interruptores y sistemas blindados, así como la medición de descargas parciales en equipos de alta tensión. La combinación de estas técnicas permite una supervisión integral de los activos industriales, optimizando su rendimiento y prolongando su vida útil (GÓMEZ, 2017).

Aplicar correctamente el mantenimiento predictivo no solo mejora la fiabilidad de los sistemas, sino que también contribuye a una mayor eficiencia operativa al reducir paros no planificados. Al emplear tecnologías avanzadas, se pueden realizar inspecciones sin interrumpir el funcionamiento de los equipos, lo que optimiza la disponibilidad de la maquinaria (Zonta et al., 2020). Además, el análisis de datos históricos y la integración de sistemas computarizados optimizan la planificación de las intervenciones, incrementando la productividad en los procesos industriales. Sin embargo, este enfoque presenta desafíos, como los altos costos de los equipos especializados y la necesidad de personal altamente capacitado para su correcta implementación y operación (Bousdekis et al., 2019; Montaña, 2019).

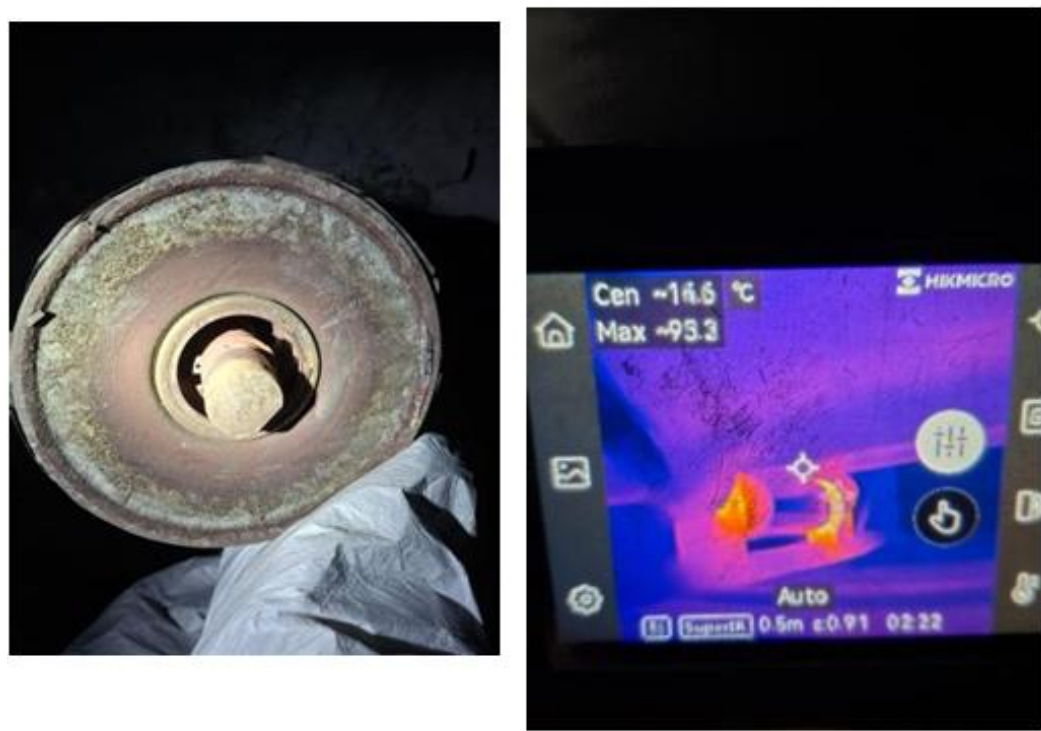
Plan de mantenimiento predictivo para la correa transportadora CM1-A

El mantenimiento predictivo se define como un enfoque de gestión de activos basado en la supervisión constante y el diagnostico en tiempo real de la condición operativa de los equipos. Su objetivo fundamental es anticiparse a la aparición de modos de fallas catastróficos, optimizando los intervalos de intervención y prolongando la vida útil remanente de los componentes críticos

(Montaña, 2019). A diferencia de las estrategias preventivas tradicionales sujetas a cronogramas fijos por tiempo o tonelaje, o de las tácticas correctivas que actúan tras la avería, este método utiliza variables físicas cuantificables para detectar las anomalías en etapas incipientes (Moleda et al, 2023). Para la correa CM1-A, su implementación exige una ingeniería de detalle que identifique los componentes de alta criticidad, configure umbrales normativos de alarma y capacite al personal electromecánico en la interpretación de tendencias.

Para el diagnóstico de la línea de chancado primario, se prioriza la integración de dos técnicas predictivas fundamentales por sobre metodologías secundarias. En primer lugar, el análisis de vibraciones mecánicas global y espectral, el cual permite evaluar la firma cinemática de las maquinas rotativas principales (Motor eléctrico 2500 kW y reductor de engranajes), identificando frecuencias asociadas a desalineaciones de ejes, holguras mecánicas o fallas estructurales en rodamientos antes que alteren la estabilidad del torque en general. En segundo lugar, se incorpora monitoreo térmico continuo y por termografía infrarroja, orientado a registrar la disipación de calor en chumaceras de poleas y descansos de motores (Huda y Taib, 2013.). La combinación de estas variables físicas centralizadas vía en sensores en terreno viabiliza una supervisión integral del sistema de transporte, reduciendo drásticamente la tasa de fallas imprevistas.

Figura 7. Inspección de un rodamiento mediante evaluación visual y análisis termográfico para la detección de condiciones anormales en la correa transportadora CM1-A



Fuente: Elaboración propia

La Figura 7 presenta la inspección de un rodamiento de la correa transportadora CM1-A mediante evaluación visual y monitoreo termográfico. La imagen de la izquierda corresponde al estado físico del componente durante la inspección, mientras que la imagen de la derecha muestra el registro obtenido con una cámara termográfica, utilizada para identificar incrementos anormales de

temperatura asociados a deficiencias de lubricación, desgaste de los rodamientos, desalineación o incremento de la fricción. La aplicación de esta técnica de mantenimiento predictivo permite detectar oportunamente condiciones que podrían evolucionar hacia una falla, facilitando la programación de intervenciones antes de que se produzcan detenciones no programadas y contribuyendo a mejorar la confiabilidad y disponibilidad operacional de la correa transportadora.

2.4.1.1. Parámetros críticos para monitorear

Para garantizar la eficiencia y confiabilidad estructural de la correa CM1-A, es fundamental identificar y monitorear las variables operativas clave que influyen directamente en la tasa de degradación de sus componentes. La detección temprana de desviaciones en estos parámetros permite al sistema de control automatizado implementar acciones de mitigación antes de la aparición de fallas catastróficas, optimizando la disponibilidad y resguardo de activos de alta potencia. A continuación en la **Tabla 16** se detallan los principales parámetros a supervisar, junto con sus modos de falla asociados e impactos potenciales en la línea de chancado primario.

Tabla 18. Parámetros críticos para monitorear

PARÁMETRO	FALLA ASOCIADA	IMPACTO POTENCIAL
<i>Vibración en motores y reductores</i>	Desalineaciones dinámicas entre ejes, desbalanceo de masas o fatiga elástica en bulones de acoplamiento.	Falla prematura de rodamientos por carga asimétrica, deformación flexo torsional de ejes y detención imprevista de la transmisión de 2,500 kW.
<i>Temperatura en reductores y rodamientos</i>	Sobrecarga, falta de lubricación, desgaste	Sobrecalentamiento, fatiga del material, riesgo de incendio
<i>Desgaste de la banda transportadora</i>	Abrasión severa por ciclo operativo, desalineación geométrica prolongada o fricción parásita con gualderas desajustadas.	Exposición directa y corte de los cables de acero internos, pérdida de resistencia a la tracción y riesgo de rotura longitudinal de la cinta.
<i>Estado de polines y rodillos</i>	Ingreso de polvo abrasivo por falla de sellos laberínticos (obturadores) o atascamiento físico por acumulación de finos.	Incremento drástico de la resistencia al avance, elevación del consumo de corriente del motor principal, y desgaste severo localizado del manto por roce continuo.
<i>Tensión de la banda transportadora</i>	Pérdida de carrera en el carro tensor, elongación elástica excesiva de la cinta o falla en celdas de carga.	Patinaje de la banda sobre la polea motriz con destrucción del revestimiento , pando de la cinta entre estaciones y derrames masivos de mineral grueso.

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.2. Tecnologías y herramientas de monitoreo

El mantenimiento predictivo para correa transportadora CM1-A se sustenta en la integración de hardware de nivel industrial y plataformas de análisis de datos en tiempo real. La selección de cada tecnología se fundamenta en criterios rigurosos de ingeniería mecánica y condiciones operacionales extremas (presencia de polvo, alta vibración y fluctuaciones térmicas estacionales en Mina Los Bronces).

- *Precisión y sensibilidad del sensor:* Componentes con rangos de frecuencia adecuados para baja velocidad en poleas y alta frecuencia en rodamientos de motores.
- *Compatibilidad con el entorno de operación:* Grados de protección IP66 o superior para resistir la polución del chancado primario.
- *Capacidad de integración industrial:* *Compatibilidad nativa con arquitecturas de automatización basadas en los protocolos de comunicación estándar MODBUS TCP/IP y OPC UA, facilitando la transmisión de datos hacia el sistema SCADA centralizado.*

Para el despliegue de la propuesta tecnológica, se seleccionan los siguientes dispositivos y sistemas:

- **Sensores de vibración:** Instalados de forma permanente en dirección radial y axial en los descansos del motor eléctrico de 2,500 kW y la caja del reductor de velocidad. Permiten capturar señales cinemáticas brutas para el análisis espectral (FFT), diagnosticando de forma predictiva holguras, desalineaciones y fallas en las pistas de rodadura.
- **Sensores de temperatura (Sondas térmicas RTD Pt100 Dúplex):** Insertadas directamente en los alojamientos de los rodamientos de las chumaceras críticas (polea motriz, de cola y deflectora).
- **Celdas de carga de cizalladura (Shear Web Load Cells) de alta capacidad:** Instrumentadas físicamente en los apoyos de los ejes de las poleas del carro tensor (o cables del sistema de contrapeso por gravedad). Estas celdas transforman la deformación mecánica inducida por la tracción de la banda de cables de acero ST-7800 en una señal eléctrica de 4-20 mA, permitiendo al PLC calcular de forma continua la tensión dinámica en kN durante las etapas de arranque, régimen permanente y frenado de la correa.
- **Cámaras termográficas fijas e instrumentos de pirometría infrarroja:** Dispuestas en las zonas de carga y transferencia (chutes) para el monitoreo perimetral y la detección de anomalías térmicas superficiales en polines bloqueados.

Conectividad y gestión de datos vía SCADA

Las señales analógicas y digitales recolectadas en terreno se concentran en un PLC de cabecera distribuido en la sala eléctrica de la línea de chancado. Mediante una red de fibra óptica industrial bajo el protocolo OPC UA, los datos se despliegan en la interfaz HMI del sistema SCADA, permitiendo el almacenamiento de registros históricos para el análisis de tendencias a través de modelos estadísticos predictivos. El sistema automatiza la generación de pre-alarmas y la activación de secuencias de enclavamiento para resguardar la integridad del motor de 2.5 MW y los componentes críticos ante superaciones de los límites operativos estipulados.

2.4.1.3.Umbrales de alerta y protocolos de intervención

Para garantizar la continuidad operacional y la seguridad estructural de la correa transportadora CM1-A, se definen los umbrales de control automatizados divididos en tres niveles operativos: NORMAL (operación sin restricciones), ALERTA MEDIA (aviso al personal de mantenimiento para inspección programada en terreno) y ALERTA CRITICA (activación de la lógica de enclavamiento o Trip en el PLC para la detención controlada del sistema a través del variador de frecuencia).

Los límites de vibración se configuran bajo los criterios estrictos de la norma internacional ISO 10816-3 (Grupo 1: Grandes maquinas con potencia superior a 300 kW sobre fundaciones rígidas), mientras que las variables térmicas y mecánicas se alinean con los estándares de diseño para minería de alta exigencia. A continuación la **Tabla 17** consolida los umbrales de operativos y sus respectivas acciones de control:

Tabla 109. Umbrales de Alerta y Protocolos de Intervención

PARÁMETRO	NORMAL	ALERTA MEDIA	ALERTA CRÍTICA	ACCIÓN CORRECTIVA
Vibración en motores y reductores (mm/s)	< 2,8 mm/s	2,8mm/s – 4,5 mm/s	> 4,5 mm/s > 7.1 mm/s (detención inmediata)	Inspección / Lubricación / Reemplazo de rodamientos
Temperatura en Rodamientos de motor (°C)	< 70°C	70 - 90°C	> 105°C	Inspección / Cambio de lubricante / Desmontaje
Temperatura en Reductores (°c)	< 65°C	65°C – 75°C	> 80°C	Inspeccionar el nivel y estado de degradación química del aceite; verificar el funcionamiento del sistema de refrigeración externa.
Temperatura en Chumaceras (Poleas)	< 60°C	60°C – 75°C	> 85°C	Evaluar presencia de contaminantes abrasivos, aliviar sobrepresión por exceso de grasa o programar sustitución por desgaste de rodadura.
Polines Bloqueados o Agripados	< 2%	2%-5%	>5%	Coordinar detención corta para el reemplazo inmediato de polines trabados.
Tensión Dinámica de la Banda (Sistema de Contrapeso)	450 kN-550 kN	551 kN – 600 kN	>600 kN	Regular la carrera física del carro tensor, calibrar las celdas de carga y corregir variaciones por estiramiento elástico de la banda ST-7800

Fuente: Elaboración propia

Para asegurar una respuesta operativa eficaz ante cualquier anomalía detectada por la instrumentación de campo, se establecen protocolos de intervención estandarizados según el nivel de criticidad variable. Estos protocolos definen acciones mecánicas, eléctricas y de automatización, optimizando los tiempos de respuesta para minimizar el impacto en el indicador de disponibilidad física de planta de chancado.

Tabla 20. Protocolos de intervención técnica por niveles de criticidad.

NIVEL DE ALERTA	ACCIÓN CORRECTIVA Y LOGICA DE CONTROL	TIEMPO DE RESPUESTA
Normal (Óptimo)	Operación continua del sistema motriz a régimen nominal. Almacenamiento automatizado de variables en la base de datos histórica del SCADA para análisis de tendencias basales.	Monitoreo continuo automatizado.
Alerta Media (Aviso)	Notificación automática en el HMI de la sala de control. Programación de inspección técnica dirigida en terreno dentro del turno operativo para verificar lubricación, alineación láser o ajuste menor de componentes sin detener la marcha.	< 24 Horas (planificable dentro del programa diario)
Alerta Crítica (Trip/Enclavamiento)	Ejecución inmediata de la lógica de enclavamiento (<i>Interlock</i>) en el PLC de cabecera. Detención automática de la correa CM1-A mediante rampa de desaceleración controlada en el Variador de Frecuencia para proteger la integridad del motor de 2,500 kW, reductor o banda ST-7800. Bloqueo manual (LOTO) e intervención de especialistas de inmediato.	Inmediato (Automatizado por PLC).

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.4.Periodicidad del monitoreo y registro de variables

Para garantizar un control eficiente y un diagnóstico temprano del estado electromecánico de la correa transportadora CM1-A, se establecen metodologías de adquisición de datos, frecuencias de muestreo y los perfiles técnicos responsables de la integridad de cada variable clave.

Tabla 21. Matriz de periodicidad, métodos y responsabilidades de monitoreo

VARIABLE	MÉTODO DE MEDICIÓN	FRECUENCIA	RESPONSABLE
Vibración mecánica	Acelerómetros piezoeléctricos permanentes (4-20 mA) en línea conectados al SCADA.	Continuo y reporte semanal	Ingeniero de Confiabilidad / Especialista en Vibraciones
Temperatura	Sondas RTD Pt100 integradas en descansos y devanados con transmisión vía MODBUS TCP/IP.	Continuo (<i>Alarmas instantáneas en HMI</i>)	Instrumentista de Planta / Operador de SCADA
Tensión de banda	Sensor de carga	Continuo (<i>Validación dinámica en arranques</i>)	Instrumentista de Planta / Supervisor de Mantenimiento
Desgaste de banda	Escáner electromagnético de alta resolución en línea e inspección visual en paradas programadas.	Continuo (Escáner) / Semanal (Visual)	Inspector Mecanico
Consumo energético	Medidores de energía multifuncionales y lecturas de corriente del Variador de Frecuencia.	Continuo (<i>Monitoreo de eficiencia térmica</i>)	Instrumentista

Fuente: Elaboración propia

Se implementará un sistema de documentación accesible para los equipos de mantenimiento y producción, permitiendo la trazabilidad de datos históricos y facilitando la toma de decisiones basadas en tendencias y análisis predictivo.

A continuación, en la Tabla 21 se presentan los elementos clave del registro y seguimiento del mantenimiento predictivo:

Tabla 22. Registro de seguimiento al mantenimiento predictivo correa transportadora CM1-A

FORMATO DE REGISTRO Y SEGUIMIENTO DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO						
Correa Transportadora CM1-A						
Fecha						
Hora de Inicio			Responsable			
Hora de Finalización			Supervisor			
Variable Monitoreada	Valor Medido	Rango de Referencia	Nivel de Alerta (Bajo/Medio/Crítico)	Acción Tomada (si aplica)	Observaciones	Firma del Técnico

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.5. Plan de capacitación del personal técnico

El éxito operativo del modelo predictivo propuesto para la correa CM1-A depende directamente de la capacidad técnica del personal para interpretar las variables físicas y ejecutar los protocolos de intervención antes del desarrollo de fallas catastróficas. El programa de formación se estructura en tres ejes técnico-practico:

A. Formación en instrumentos de campo y plataforma SCADA

El éxito operativo del modelo predictivo propuesto para la correa CM1-A depende directamente de la capacidad técnica del personal para interpretar las variables físicas y ejecutar los protocolos de intervención antes del desarrollo de fallas catastróficas. El programa de formación se estructura en tres ejes técnico-prácticos.

- **Operación de hardware industrial:** Instrucción teórica y práctica sobre los principios de funcionamiento, calibración e inspección visual de los acelerómetros piezoeléctricos, sondas térmicas RTD Pt100 Dúplex y celdas de carga de cizalladura instaladas en el sistema tensor.
- **Diagnostico termográfico:** Capacitación certificada en el uso de cámaras térmicas portátiles y configuración de pirómetros infrarrojos fijados en los chutes de traspaso para la detección analítica de polines agripados.
- **Interfaz HMI-SCADA:** Entrenamiento del personal de operaciones e instrumentación en la navegación de la plataforma SCADA, interpretación de ventanas de alarma (Aviso y Trip) y validación de la conectividad de datos bajo protocolos MODBUS TCP/IP y OPC UA

B. Talleres de análisis de tendencias y confiabilidad

- **Análisis espectral básico (FFT):** Capacitación al equipo de confiabilidad en la lectura de espectros de vibración mecánica para diferenciar componentes de frecuencia asociados a desalineaciones, holguras de rodamiento o desbalanceo dinámico del motor
- **Gestión de históricos:** Métodos de extracción y correlación de datos históricos en el SCADA para proyectar curvas de desgaste en las cubiertas de caucho de la banda ST-7800 y predecir tasas de fallas por fatiga térmica.

C. Simulación de escenarios críticos y seguridad

Simulacro de eventos de falla: Ejercicios prácticos controlados desde la sala de control donde se simulen condiciones de operación en alerta media y alerta crítica.

Evaluación de tiempos de respuesta: Auditoría de desempeño del personal técnico en el cumplimiento de los tiempos de intervención estipulados y en la correcta aplicación del bloqueo de energía (LOTO) al ejecutar detenciones por trip automatizado.

Formación en el uso de herramientas de monitoreo

- Capacitación en manejo e interpretación de sensores de vibración y temperatura.
- Entrenamiento en el uso de cámaras termográficas y análisis espectral de vibraciones.
- Instrucción en el uso del software SCADA y plataformas de monitoreo.

Talleres de análisis de datos predictivos

- Uso de historiales de fallas para la identificación de patrones de desgaste.
- Aplicación de modelos de predicción y correlación de variables.
- Interpretación de gráficos de tendencias y establecimiento de acciones preventivas.

Simulación de casos de fallas

- Desarrollo de ejercicios prácticos con escenarios de fallas simuladas.
- Evaluación de la capacidad de respuesta del personal ante diferentes niveles de alerta.

2.5. Análisis de impacto de decisiones de mantenimiento basadas en datos reales. Evaluación económica y análisis de rentabilidad

El mantenimiento en la industria minera representa una parte significativa de los costos operativos, alcanzando entre el 30% y el 50% del total, lo que resalta su impacto financiero y la necesidad de una gestión eficiente (Mohutsiwa y Musingwini, 2015). En este contexto, según Herbert (2009) los diferentes tipos de mantenimiento (preventivo, predictivo y correctivo) tienen efectos distintos en la rentabilidad y disponibilidad de los equipos. Un mantenimiento correctivo, aunque puede parecer menos costoso a corto plazo, suele generar pérdidas mayores debido a tiempos de inactividad imprevistos. En contraste, el mantenimiento preventivo y predictivo, aunque requieren una inversión inicial mayor en tecnología y formación de personal, permiten

reducir fallas inesperadas, mejorar la disponibilidad y extender la vida útil de los equipos, generando beneficios económicos sostenibles a largo plazo.

El análisis de costos y beneficios en mantenimiento es una herramienta clave para la toma de decisiones estratégicas en industrias con alta demanda operativa, como la minería, ya que permite evaluar la viabilidad económica de un plan de mantenimiento al comparar los costos incurridos con los beneficios obtenidos a lo largo del tiempo (Lara y Franco, 2017). Entre los modelos más utilizados se encuentra el Análisis de Costos del Ciclo de Vida (LCC), que estima el costo total de propiedad al considerar la adquisición, operación, mantenimiento, reemplazo y disposición final de un activo, permitiendo identificar oportunidades de optimización (Okano, 2001). Otro enfoque relevante es el Análisis Costo-Beneficio (ACB), que cuantifica en términos monetarios los beneficios generados por una estrategia de mantenimiento en relación con su costo total, facilitando la selección de la opción más rentable (RODRÍGUEZ, 2021).

Finalmente, la métrica clave en cualquier modelo de análisis de costos y beneficios es el **Retorno de Inversión (ROI)**, que mide la rentabilidad de la inversión en mantenimiento, este indicador compara el beneficio neto obtenido con el costo de la inversión, proporcionando una visión clara de su eficacia económica (Montaña, 2019). Se calcula mediante la fórmula:

$$ROI = \left(\frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Costo de Inversión}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde el beneficio neto proviene de la reducción de costos operativos, disminución de tiempos de inactividad y mejora en la eficiencia del equipo, mientras que el costo de inversión incluye la adquisición de tecnologías de monitoreo, capacitación del personal y costos de implementación del plan de mantenimiento.

En el ámbito industrial, un ROI elevado indica una gestión de activos eficiente, reflejada en menor tiempo de inactividad, reducción de costos por fallas inesperadas y aumento de la productividad. Además, el ROI sirve como criterio para comparar diferentes estrategias de mantenimiento, ayudando a seleccionar la más eficiente desde el punto de vista financiero (Ramos y Pachón, 2021).

Evaluación económica y análisis de rentabilidad de la estrategia de mantenimiento propuesta para la correa transportadora CM1-A

La implementación de un plan de mantenimiento preventivo no solo debe garantizar la confiabilidad y disponibilidad operacional de los equipos, si no también demostrar que su aplicación resulta económicamente viable para la organización. En este contexto, la evaluación económica constituye una herramienta fundamental para cuantificar los costos asociados a la implementación del plan y compararlos con los beneficios esperados producto a la disminución de fallas, la reducción de paradas no programadas y el aumento de la continuidad operacional de la correa transportadora CM1-A.

De acuerdo con Blank y Tarquin (2018), la evaluación económica de proyectos permite determinar la conveniencia financiera de una inversión mediante la comparación entre los recursos requeridos para su implementación y los beneficios económicos obtenidos durante su vida útil. En el ámbito del mantenimiento industrial, este análisis facilita la toma de decisiones orientadas a optimizar la asignación de recursos y justificar económicamente la implementación de estrategias destinadas a mejorar la confiabilidad de los activos.

En la presente investigación, la evaluación económica considera los costos asociados a la implementación de la estrategia de mantenimiento propuesta, incluyendo las actividades de mantenimiento preventivo, las acciones de mantenimiento predictivo y la inversión inicial requerida para la adquisición del stock de repuestos y componentes críticos. Estos costos serán comparados con los beneficios económicos esperados respecto a la disminución de las detenciones no programadas y del incremento de la disponibilidad operacional de la correa transportadora CM1-A.

Para estimar dichos beneficios, se determinará el impacto económico asociado a una hora de detención de la correa transportadora dentro del proceso productivo en Mina Los Bronces. Posteriormente, este valor será relacionado con la reducción estimada de horas de indisponibilidad alcanzada mediante la implementación de la estrategia de mantenimiento propuesta, permitiendo cuantificar los ahorros potenciales y evaluar su rentabilidad mediante indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de inversión (Payback).

2.5.1.1. Determinación de los costos de implementación de la estrategia de mantenimiento (CAPEX y OPEX)

Para determinar los costos asociados a la implementación de la estrategia de mantenimiento propuesta para la correa transportadora CM1-A, se realizó la identificación y valorización de los recursos necesarios para ejecutar las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo, además de la inversión inicial requerida para disponer de un stock estratégico de repuestos y componentes críticos. Esta evaluación constituye la base para el análisis económico del proyecto, permitiendo cuantificar la inversión necesaria para su implementación y operación.

Según Blank y Tarquin (2018), los costos de un proyecto de inversión pueden clasificarse en Costos de Capital (Capital Expenditure, CAPEX) y costos operacionales (Operation Expenditure, OPEX). El CAPEX corresponde a los desembolsos efectuados al inicio del proyecto para la adquisición de recursos necesarios para su implementación, mientras que el OPEX comprende los costos recurrentes asociados a la operación y ejecución de las actividades durante el horizonte de evaluación.

En la presente investigación, el CAPEX está representado por la inversión inicial destinada a la adquisición del stock de repuestos y componentes críticos necesarios para asegurar la continuidad de actividades de mantenimientos. Por otra parte el OPEX corresponde a los costos anuales asociados a la ejecución de la estrategia de mantenimiento propuesta, incluyendo las

actividades preventivas y predictivas, las HH especializadas y los recursos técnicos requeridos para el desarrollo de inspecciones, monitoreos e intervenciones programadas.

Los costos considerados en la presente evaluación fueron obtenidos a partir de la valorización desarrollada en la Tabla 14, correspondiente al programa anual de mantenimiento preventivo y predictivo, y en la Tabla 15, donde se presenta la inversión inicial en repuestos y componentes críticos. Sobre la base de esta información se elaboro un resumen de los costos considerados para la implementación de la estrategia de mantenimiento.

Tabla 23. Resumen de los costos de implementación de la estrategia de mantenimiento para la correa transportadora CM1-A

Concepto	Clasificación	Costo (USD)	Descripción
Inversión inicial para la implementación de la estrategia de mantenimiento	CAPEX	\$68.710	Inversión inicial destinada a la adquisición del stock estratégico de repuestos, elementos de desgaste e instrumentación crítica necesarios para la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo.
Operación anual de la estrategia de mantenimiento (HH especializadas, reposición de repuestos, consumibles y recursos técnicos).	OPEX	\$178.862	Costos operacionales anuales asociados a la ejecución del plan de mantenimiento preventivo y predictivo, considerando horas-hombre especializadas, reposición de repuestos, consumibles y recursos técnicos requeridos para las inspecciones e intervenciones programadas.

Fuente: Elaboración propia

2.5.1.2. Valorización técnica del impacto de una hora de detención de la correa transportadora CM1-A

La correa transportadora CM1-A constituye un activo crítico para la continuidad del proceso de chancado y moliendo de Mina Los Bronces, debido a que permite el transporte continuo de material hacia las etapas posteriores del proceso productivo. Por esta razón, una detención no programada genera una disminución temporal en la alimentación de mineral, además de costos asociados a reparaciones de emergencia, utilización extraordinaria de personal y reprogramación de actividades de mantenimiento.

Para dimensionar el impacto operacional de una detención, se considero la capacidad nominal de transporte de la correa CM1-A, correspondiente a 9.870 toneladas de mineral por hora, y la ley media del mineral procesado en Mina Los Bronces. Para efectos de esta evaluación se adoptó una ley de referencia de 0,47% de cobre, valor representativo de la operación durante 2024. Anglo American informo que la producción de Los Bronces disminuyo durante dicho año debido, entre otros factores, a menores leyes de mineral y cambios en la operación de sus plantas.

La cantidad de cobre obtenido en el mineral transportado durante una hora de operación se determina mediante la siguiente

$$Cu_c = Q \times L$$

Donde:

- Cu_c : cobre contenido en el mineral transportado, en toneladas de cobre.
- Q : capacidad de transporte de la correa CM1-A, en toneladas de mineral por hora.
- L : ley de cobre expresada en forma decimal.

Al reemplazar los valores:

$$Cu_c = 9.870 \text{ t/h} \times 0,0047$$

$$Cu_c = 46,39 \text{ t de Cu contenido/h}$$

Por lo tanto, una hora de operación de la correa CM1-A permite transportar mineral que contiene aproximadamente 46,39 toneladas de cobre.

Considerando adicionalmente una recuperación metalúrgica de referencia de 88%, el cobre potencialmente recuperable se determina mediante:

$$Cu_r = Cu_c \cdot R$$

Donde:

- Cu_r : cobre potencialmente recuperable.
- R : recuperación metalúrgica del proceso.

$$Cu_r = 46,39 \times 0,88$$

$$Cu_r = 40,82 \text{ t de Cu recuperable/h}$$

En consecuencia, una detención de una hora de la correa transportadora CM1-A representa una interrupción temporal del transporte de aproximadamente 9.870 toneladas de mineral, equivalentes a 46,39 toneladas de cobre contenido y alrededor de 40,82 toneladas de cobre potencialmente recuperable.

No obstante, estas toneladas de cobre no deben interpretarse directamente como una pérdida económica definitiva, debido que al mineral detenido podría ser procesado posteriormente una vez restablecida la operación. Por esta razón, el cálculo anterior se utiliza para principalmente

demostrar la criticidad productiva de la correa CM1-A y dimensionar el costo de oportunidad asociado a su indisponibilidad.

La valorización financiera de la estrategia de mantenimiento no se desarrollará considerando únicamente el valor del mineral transportado, debido que una detención temporal no implica necesariamente una pérdida definitiva de producción. En consecuencia, la evaluación económica se fundamentará en los costos evitados por la reducción de intervenciones correctivas, la disminución de indisponibilidad operacional de la correa transportadora CM1-A y la mejora de los principales indicadores de desempeño (KPIs) de mantenimiento, tales como la disponibilidad física, el tiempo perdido entre fallas (MTBF) y el tiempo perdido de reparación (MTTR). Bajo este enfoque, los beneficios económicos estarán asociados al incremento de la confiabilidad del sistema y a la optimización de los recursos destinados al mantenimiento.

2.5.1.3. Determinación del costo económico de una detención no programada de la correa transportadora CM1-A

Una vez determinado el impacto técnico asociado a la indisponibilidad de la correa transportadora CM1-A, resulta necesario cuantificar económicamente los costos que genera una intervención correctiva no programada. Para ello, se consideraron los principales recursos utilizados durante una reparación de emergencia, incluyendo mano de obra especializada, equipos de apoyo, repuestos, consumibles y el costo asociado a la indisponibilidad operacional del sistema.

El costo total de una detención no programada puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$C_{DNP} = C_{HH} + C_{EA} + C_{RC} + C_{IO}$$

Donde:

- C_{DNP} : costo total de la detención no programada.
- C_{HH} : costo de horas-hombre.
- C_{EA} : costo de equipos de apoyo.
- C_{RC} : costo de repuestos y consumibles.
- C_{IO} : costo asociado a la indisponibilidad operacional.

Cada uno de estos componentes fue estimado considerando una intervención correctiva representativa sobre la correa transportadora CM1-A. La valorización de estos recursos permitirá posteriormente determinar el ahorro económico asociado a la implementación de la estrategia de mantenimiento preventivo y predictivo propuesta.

Para efectos de la presente investigación, cada componente del costo fue estimado considerando una intervención correctiva representativa de una hora de duración sobre la correa

transportadora CM1-A. Los valores adoptados corresponden a la utilización de una cuadrilla de mantenimiento compuesta por tres mecánicos y un técnico eléctrico, el empleo de equipos de apoyo para la ejecución de la reparación, el consumo promedio de repuestos y consumibles, además de un costo de oportunidad asociado a la indisponibilidad operacional del sistema. Los valores considerados se presentan a continuación:

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, se obtiene:

$$C_{DNP} = 140 + 80 + 50 + 1.000$$
$$C_{DNP} = 1.270 \text{ USD/h}$$

Este valor representa el costo económico estimado de una hora de detención no programada de la correa transportadora CM1-A y constituye la base para la estimación de los beneficios económicos derivados de la reducción de fallas correctivas obtenida mediante la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo propuesto.

2.5.1.4. Estimación de los costos asociados a una intervención correctiva no programada

Con el propósito de cuantificar económicamente una intervención correctiva no programada sobre la correa transportadora CM1-A, se estimaron los principales costos directos e indirectos que normalmente intervienen durante este tipo de eventos. Para ello, se consideraron los recursos humanos especializados, equipos de apoyo para la ejecución de la reparación, repuestos y consumibles críticos, además del costo asociado a la indisponibilidad operacional del sistema mientras la correa permanece fuera de servicio.

La estimación presentada corresponde a una intervención correctiva representativa, construida a partir de los recursos habitualmente requeridos en labores de mantenimiento de la correa transportadora CM1-A. Esta valorización constituye la base para determinar posteriormente el beneficio económico asociado a la reducción de fallas correctivas mediante la implementación de la estrategia de mantenimiento preventivo y predictivo propuesta.

Tabla 24. Estimación del costo asociado a una hora de intervención correctiva no programada de la correa transportadora CM1-A

Concepto	Unidad	Criterio de valorización	Costo (USD)
HH de mantenimiento	Evento	Cuadrilla compuesta por tres mecánicos y un eléctrico, valorizados a USD 35 por hora-hombre.	\$140

Equipos de apoyo	Evento	Utilización de camión pluma para traslado de herramientas, repuestos y apoyo logístico. El izaje interior se realiza mediante monorrieles existentes en planta.	\$80
Repuestos y consumibles	Evento	Costo horario equivalente asociado al consumo promedio de lubricantes, elementos de fijación, materiales y componentes utilizados en intervenciones correctivas.	\$50
Costo por indisponibilidad operacional	Evento	Costo de oportunidad asociado a la disminución temporal de la disponibilidad física, el incumplimiento del programa operacional y la afectación de los KPIs del sistema.	\$1000
Costo total estimado de una intervención correctiva			\$1270

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la valorización presentada, el costo económico estimado de una hora de detención no programada de la correa transportadora CM1-A asciende a USD 1.270. Este valor integra los costos directos de la intervención correctiva y el costo de oportunidad derivado de la indisponibilidad operacional del sistema. El componente de indisponibilidad no representa el valor total del cobre contenido en el mineral transportado, sino una estimación conservadora del impacto generado sobre la disponibilidad física, el cumplimiento del programa productivo y los indicadores de gestión del mantenimiento.

Con el propósito de evitar una sobreestimación de los beneficios, se adopto un costo de indisponibilidad operacional de USD 1.000 por hora, equivalente aproximadamente al 0,27% del valor bruto teórico del cobre potencialmente recuperable transportado durante una hora de operación. Este criterio permite reconocer el impacto económico de la detención sin asumir que la totalidad del mineral dejado de transportar constituye una pérdida definitiva.

2.5.1.5. Beneficio económico esperado por la implementación del plan de mantenimiento

La implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo propuesto tiene como principal objeto disminuir la frecuencia de fallas correctivas y reducir el tiempo de indisponibilidad operacional de la correa transportadora CM1-A. Desde el punto de vista económico, el beneficio generado por esta estrategia se refleja en la disminución de los costos asociados a las intervenciones correctivas no programadas, permitiendo aumentar la disponibilidad física del activo y mejorar la continuidad operacional del proceso.

De acuerdo con el diagnóstico realizado durante el desarrollo de la presente investigación, la correa transportadora CM1-A registra aproximadamente 420 horas anuales de detenciones no programadas, producto de fallas asociadas principalmente a componentes mecánicos críticos, como polines, poleas, sistemas de transmisión raspadores y elementos de soporte.

La implementación del plan de mantenimiento propuesto incorpora inspecciones sistemáticas, rutas de lubricación, monitoreo mediante análisis de vibraciones y temperatura, remplazos programados de componentes y seguimiento de variables operacionales, permitiendo disminuir significativamente la ocurrencia de fallas inesperadas.

Bajo estas condiciones, se estima una reducción aproximada de 250 horas anuales de detención correctiva, manteniendo únicamente aquellas detenciones asociadas a fallas imprevisibles o eventos externos al sistema.

El ahorro económico anual se obtiene multiplicando las horas de detención evitadas por el costo estimado de una hora de intervención correctiva no programada, determinado en la sección anterior.

$$\text{AHORRO ANUAL} = 250(\text{h/año}) \times 1.270(\text{USD/h})$$

$$\text{AHORRO ANUAL} = 317.500 \text{ USD/AÑO}$$

El ahorro económico anual estimado asciende a USD 317.500 y corresponde al beneficio económico bruto obtenido por la reducción de 250 horas anuales de detenciones correctivas no programadas. Este beneficio se encuentra asociado directamente a la disminución de los costos de intervención correctiva y a la mejora de la disponibilidad operacional de la correa transportadora CM1-A.

Adicionalmente, la implementación del plan genera beneficios indirectos que no fueron incorporados en la evaluación financiera, entre ellos el incremento de la confiabilidad operacional, la extensión de la vida útil de los componentes críticos, la reducción del riesgo durante intervenciones de emergencia, una mejor planificación de los recursos de mantenimiento y una mayor disponibilidad del sistema para cumplir con los objetivos de producción.

2.5.1.6. Justificación técnica del OPEX en función de las horas-hombres (HH)

La ejecución del plan de mantenimiento preventivo y predictivo requiere la asignación anual de recursos humanos especializados para el desarrollo de las actividades de inspección, monitoreo e intervención programada. Con el propósito de dimensionar técnicamente este requerimiento, se valorizó la totalidad de las horas-hombre consideradas en el programa anual de mantenimiento, utilizando un costo referencial de USD 35 por hora-hombre para personal técnico especializado.

La valorización obtenida representa el costo técnico anual asociado a la ejecución del plan de mantenimiento y permite estimar el esfuerzo operativo requerido para mantener la continuidad operacional de la correa transportadora CM1-A. No obstante, dado que estas actividades pueden ser desarrolladas por personal propio del área de mantenimiento, esta valorización constituye principalmente una herramienta para la planificación de recursos y no necesariamente representa un costo incremental equivalente para la organización.

2.5.1.7. Evaluación financiera del proyecto

La evaluación financiera del plan de mantenimiento preventivo y predictivo tiene como propósito determinar la conveniencia económica de su implementación en la correa transportadora CM1-A. Para ello, se construyó un flujo de caja proyectado considerando la inversión inicial requerida, los costos operacionales anuales asociados a la ejecución del plan y los beneficios económicos derivados de la reducción de detenciones correctivas no programadas.

La evaluación se desarrolló para un horizonte de cinco años, considerando un CAPEX inicial de USD 68.710, un costo operacional anual de USD 178.862 y un beneficio económico bruto anual de USD 317.500. A partir de estos antecedentes, se obtiene un flujo neto anual de USD 138.638 durante el periodo de evaluación.

El CAPEX se incorpora únicamente en el año cero, debido a que corresponde a la inversión inicial necesaria para implementar el plan de mantenimiento. Por su parte, el OPEX y los beneficios económicos se consideran desde el primer año de operación, manteniéndose constantes durante el horizonte evaluado.

La expresión utilizada para determinar el flujo neto anual es la siguiente:

$$FNA = BA - OPEX$$

Donde:

- *FNA*: flujo neto anual, expresado en USD/año.
- *BA*: beneficio económico anual, expresado en USD/año.
- *OPEX*: costo operacional anual del plan, expresado en USD/año.

Reemplazando los valores obtenidos:

$$FNA = 317.500 - 178.862$$

$$FNA = 138.638 \text{ USD/año}$$

En el año cero, el flujo corresponde exclusivamente al desembolso asociado al CAPEX, por lo que se registra un valor negativo de USD 68.710. A partir del primer año, el proyecto genera flujos netos positivos de USD 138.638 anuales.

Tabla 25. Flujo de caja proyectado para la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo de la correa transportadora CM1-A

Año	CAPEX (USD)	Beneficio económico (USD)	OPEX (USD)	Flujo neto (USD)
0	-68.710	0	0	-68.710
1	0	317.500	178.862	138.638
2	0	317.500	178.862	138.638
3	0	317.500	178.862	138.638
4	0	317.500	178.862	138.638
5	0	317.500	178.862	138.638

Fuente: Elaboración propia

El flujo de caja proyectado muestra que la inversión inicial requerida para la implementación del plan de mantenimiento corresponde a un desembolso único de USD 68.710, registrado en el año cero. A partir del primer año de operación, el proyecto genera un beneficio económico bruto anual de USD 317.500, asociado a la disminución de las detenciones correctivas no programadas, mientras que el costo operacional anual para la ejecución del plan asciende a USD 178.862. Como resultado, se obtiene un flujo neto positivo de USD 138.638 por año durante el horizonte de evaluación considerado. Estos antecedentes constituyen la base para la determinación de los principales indicadores de rentabilidad del proyecto, tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (payback).

2.5.1.8. Valor actual neto (VAN)

El valor actual neto (VAN) constituye uno de los principales indicadores utilizados en la evaluación financiera de proyectos de inversión, ya que permite determinar si los beneficios económicos futuros compensan la inversión inicial requerida para su implementación. Este indicador consiste en actualizar los flujos de caja proyectados a valor presente mediante una tasa de descuento que representa el costo de oportunidad del capital. Cuando el VAN es mayor que cero, el proyecto genera valor económico y se considera financieramente conveniente; si es igual a cero, el proyecto recupera exactamente la inversión realizada; mientras que un VAN negativo indica que los beneficios esperados no son suficientes para justificar la inversión.

Para la presente investigación se consideró un horizonte de evaluación de cinco años y una tasa de descuento anual del **10 %**, valor frecuentemente utilizado como referencia en la evaluación económica de proyectos industriales. El cálculo del VAN se realizó mediante la siguiente expresión:

$$VAN = -CAPEX + \sum_{\{t=1\}}^{\{n\}} \frac{Ft}{(1 + i)^t}$$

Donde:

- **VAN:** Valor Actual Neto (USD).

- **CAPEX:** Inversión inicial del proyecto (USD).
- **Ft:** Flujo neto de caja del año t (USD).
- **i:** Tasa de descuento anual.
- **n:** Horizonte de evaluación (años).

Reemplazando los valores de la ecuación anterior obtenemos:

$$VAN = -68.710 + \frac{138.638}{(1 + 0,10)^1} + \frac{138.638}{(1 + 0,10)^2} + \frac{138.638}{(1 + 0,10)^3} + \frac{138.638}{(1 + 0,10)^4} + \frac{138.638}{(1 + 0,10)^5}$$

Resolviendo la expresión, se obtiene:

$$VAN = USD 456.837$$

El VAN obtenido para el proyecto corresponde a USD 456.837, valor superior a cero. Este resultado indica que la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo para la correa transportadora CM1-A es financieramente viable, ya que los beneficios económicos proyectados, actualizados a una tasa de descuento del 10 % anual, superan ampliamente la inversión inicial requerida y los costos operacionales considerados durante el horizonte de evaluación de cinco años. En consecuencia, la implementación del plan genera valor económico para la organización y contribuye a mejorar la rentabilidad de las actividades de mantenimiento.

2.5.1.9. Tasa interna de retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión. Corresponde a la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero, es decir, representa el rendimiento esperado del proyecto considerando los flujos de caja proyectados durante el horizonte de evaluación. En términos generales, un proyecto se considera financieramente viable cuando la TIR es superior a la tasa de descuento utilizada para la evaluación.

La TIR se determina mediante la siguiente expresión:

$$0 = -CAPEX + \sum_{t=1}^{\{n\}} \frac{Ft}{(1 + TIR)^t}$$

Donde:

- **CAPEX:** inversión inicial del proyecto (USD).
- **Ft:** flujo neto de caja del año t (USD).
- **TIR:** tasa interna de retorno.
- **n:** horizonte de evaluación (años).

Los flujos considerados fueron los siguientes:

Tabla 26. Flujo de Caja por año

Año	Flujo de caja (USD)
0	-68.710
1	138.638
2	138.638
3	138.638
4	138.638
5	138.638

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los valores del flujo de caja proyectado en la ecuación de la TIR, se obtiene:

$$VAN = -68.710 + \frac{138.638}{(1 + TIR)^1} + \frac{138.638}{(1 + TIR)^2} + \frac{138.638}{(1 + TIR)^3} + \frac{138.638}{(1 + TIR)^4} + \frac{138.638}{(1 + TIR)^5}$$

Debido a que la tasa se encuentra elevada a distintos períodos, la ecuación se resuelve mediante un procedimiento iterativo, buscando aquella tasa de descuento que permita que el Valor Actual Neto sea igual a cero.

Al resolver la expresión anterior, se obtiene:

$$TIR = 2,0096$$

Expresando el resultado en porcentaje:

$TIR = 200,96\%$

Para comprobar el resultado, se reemplaza la tasa obtenida en la ecuación:

$$\begin{aligned} 0 \approx & -68.710 + \frac{138.638}{(1 + 2,0096)^1} + \frac{138.638}{(1 + 2,0096)^2} + \frac{138.638}{(1 + 2,0096)^3} + \frac{138.638}{(1 + 2,0096)^4} \\ & + \frac{138.638}{(1 + 2,0096)^5} \end{aligned}$$

De esta manera, el valor presente de los flujos positivos se aproxima a la inversión inicial, haciendo que el VAN sea prácticamente igual a cero.

La Tasa Interna de Retorno obtenida corresponde a aproximadamente 200,96% anual, valor considerablemente superior a la tasa de descuento del 10 % utilizada en la evaluación. Este resultado indica que el proyecto presenta una elevada rentabilidad financiera, debido a que los beneficios económicos derivados de la reducción de detenciones no programadas superan

ampliamente la inversión inicial y los costos operacionales del plan. En consecuencia, la implementación de la estrategia de mantenimiento preventivo y predictivo resulta financieramente viable.

2.5.1.10. *Período de recuperación de la inversión (payback)*

El período de recuperación de la inversión (Payback) corresponde al tiempo requerido para recuperar el capital invertido mediante los flujos netos de caja generados por el proyecto. Este indicador permite estimar el tiempo necesario para que los beneficios económicos acumulados igualen la inversión inicial, constituyendo una herramienta simple para evaluar la rapidez con que una inversión comienza a generar retornos positivos.

El payback se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Flujo Neto Anual}}$$

Donde:

- **CAPEX:** inversión inicial del proyecto (USD).
- **Flujo Neto Anual:** beneficio económico neto obtenido cada año (USD/año).

Sustitución de valores:

$$\begin{aligned}\text{Payback} &= \frac{68.710}{138.638} \\ \text{Payback} &= 0,50 \text{ años}\end{aligned}$$

Expresando el resultado en meses:

$$\begin{aligned}0,50 \times 12 &= 5,95 \text{ meses} \\ \boxed{\text{Payback} \approx 6 \text{ meses}}\end{aligned}$$

El período de recuperación de la inversión obtenido corresponde aproximadamente a 0,50 años, equivalente a seis meses. Este resultado indica que la inversión inicial requerida para implementar el plan de mantenimiento preventivo y predictivo es recuperada durante el primer año de operación, gracias a los ahorros generados por la disminución de las detenciones correctivas no programadas. En consecuencia, el proyecto presenta un período de recuperación breve, lo que evidencia una rápida generación de beneficios económicos y una adecuada utilización de los recursos destinados a la implementación del plan.

2.5.1.11. Retorno sobre la inversión (ROI)

El Retorno sobre la inversión (ROI) es un indicador financiero que permite medir la rentabilidad obtenida en relación con la inversión realizada. Expresa, en términos porcentuales, cuánto beneficio genera el proyecto por cada unidad monetaria invertida, facilitando la comparación entre distintas alternativas de inversión.

El ROI se determina mediante la siguiente expresión:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio Neto Anual}}{\text{Inversión Inicial}} \times 100$$

Donde:

- **Beneficio neto anual:** Flujo neto de caja anual del proyecto (USD/año).
- **Inversión inicial:** CAPEX requerido para implementar el plan (USD).

Quedando:

$$ROI = 2,018 \times 100$$

$ROI = 201,8\%$

El Retorno sobre la Inversión obtenido corresponde a 201,8%, lo que significa que por cada dólar invertido en la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo se generan aproximadamente 2,02 dólares de beneficio neto anual. Este resultado evidencia una alta rentabilidad económica del proyecto y respalda la conveniencia de su implementación desde el punto de vista financiero.

2.5.1.12. Análisis de los resultados de la evaluación financiera

Los indicadores financieros obtenidos permiten concluir que la implementación del plan de mantenimiento preventivo y predictivo para la correa transportadora CM1-A representa una alternativa económicamente viable y financieramente conveniente para la operación.

El Valor Actual Neto (VAN) obtenido fue de USD 456.837, resultado positivo que demuestra que el proyecto genera valor económico durante el horizonte de evaluación de cinco años, recuperando la inversión inicial y produciendo beneficios adicionales para la organización.

Por su parte, la Tasa interna de retorno (TIR) fue superior a la tasa de descuento considerada para la evaluación, indicando que la rentabilidad del proyecto excede ampliamente el costo de oportunidad del capital. Este resultado confirma que la implementación del plan de mantenimiento constituye una inversión financieramente atractiva.

Respecto al período de recuperación de la inversión (payback), se determinó un tiempo aproximado de seis meses, evidenciando que la inversión inicial es recuperada dentro del primer año de operación mediante los beneficios económicos generados por la disminución de detenciones correctivas no programadas.

Finalmente, el retorno sobre la Inversión (ROI) alcanzó un valor cercano al 202 %, lo que indica que por cada dólar invertido se generan aproximadamente dos dólares de beneficio neto anual. Este indicador reafirma la capacidad del proyecto para generar retornos económicos significativos en relación con la inversión realizada.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la implementación del plan de mantenimiento propuesto no solo contribuye a mejorar la confiabilidad y disponibilidad operacional de la correa transportadora CM1-A, sino que también genera beneficios económicos que justifican plenamente su ejecución. La reducción de fallas, la disminución de intervenciones correctivas y el incremento de la continuidad operacional permiten recuperar rápidamente la inversión inicial y aportar valor económico a la operación minera, consolidando el plan de mantenimiento como una herramienta eficaz para optimizar la gestión de activos y apoyar el cumplimiento de los objetivos productivos de la compañía.

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A del proceso de chancado y molienda de Mina Los Bronces, con el propósito de mejorar su confiabilidad, disponibilidad y eficiencia operacional. Para ello, se realizó un análisis técnico de los principales componentes del sistema, se identificaron las fallas más recurrentes mediante herramientas de ingeniería de mantenimiento y se diseñó una propuesta de mantenimiento preventivo y predictivo complementada con una evaluación económica que permitió determinar la factibilidad de su implementación.

En relación con el objetivo general, se concluye que fue posible desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para la correa transportadora CM1-A, estructurado de acuerdo con la criticidad de sus componentes y las condiciones operacionales propias del proceso de chancado y molienda. La propuesta integra actividades preventivas programadas con técnicas de mantenimiento predictivo, permitiendo establecer una estrategia orientada a disminuir la ocurrencia de fallas, aumentar la disponibilidad del equipo y contribuir a la continuidad operacional de la planta.

Respecto del primer objetivo específico, orientado a investigar las fallas más comunes que provocan detenciones en la correa transportadora CM1-A, se identificó que los principales problemas corresponden al desgaste de polines, deficiencias en la lubricación de rodamientos y reductores, desalineación de la banda transportadora, deterioro de componentes mecánicos y fallas asociadas a los sistemas de monitoreo. Estas condiciones representan una parte importante de las detenciones no programadas y generan un impacto directo sobre la disponibilidad operacional, los costos de mantenimiento y la continuidad del proceso productivo.

En cuanto al segundo objetivo específico, la aplicación de la metodología de Análisis de modo y efecto de falla (AMEF) permitió identificar, evaluar y priorizar los modos de falla de acuerdo con su severidad, ocurrencia y capacidad de detección. Esta herramienta facilitó la determinación de los componentes con mayor criticidad y permitió establecer acciones de mantenimiento enfocadas en reducir el nivel de prioridad de riesgo (NPR), favoreciendo una gestión del mantenimiento basada en criterios técnicos y preventivos.

Respecto del tercer objetivo específico, se diseñó un plan de mantenimiento preventivo que contempla actividades de inspección, lubricación, limpieza, ajustes y reemplazos programados con frecuencias diarias, semanales, mensuales, trimestrales y anuales. Asimismo, se incorporaron técnicas de mantenimiento predictivo mediante el monitoreo de vibraciones, medición de temperatura, rutas de inspección y seguimiento de la condición de los componentes críticos, fortaleciendo la capacidad de detección temprana de fallas y permitiendo planificar las intervenciones antes de que se produzcan detenciones inesperadas.

En relación con el cuarto objetivo específico, correspondiente al análisis económico, los resultados obtenidos permitieron demostrar que la implementación del plan de mantenimiento preventivo constituye una alternativa económicamente viable. La evaluación financiera realizada mediante los

indicadores valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), período de recuperación de la inversión (Payback) y retorno sobre la inversión (ROI) evidenció que la disminución de las detenciones no programadas genera beneficios económicos suficientes para recuperar la inversión inicial y producir ahorros durante el horizonte de evaluación considerado. Estos resultados respaldan la conveniencia técnica y financiera de implementar el plan propuesto.

Finalmente, se concluye que el desarrollo de esta investigación permitió integrar herramientas de gestión del mantenimiento, análisis de confiabilidad y evaluación económica en una propuesta orientada a optimizar el desempeño de un activo crítico dentro del proceso minero. La metodología desarrollada puede ser utilizada como referencia para la elaboración de planes de mantenimiento en otras correas transportadoras de características similares, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión de activos, al incremento de la confiabilidad operacional y a la mejora continua de los procesos de mantenimiento en la industria minera.

En términos generales, la presente investigación demuestra que la aplicación de una estrategia de mantenimiento preventivo basada en criterios de confiabilidad, análisis de criticidad y monitoreo de condición constituye una herramienta eficaz para optimizar la gestión de activos en la industria minera. La metodología desarrollada no solo responde a las necesidades operacionales de la correa transportadora CM1-A, sino que también proporciona una base técnica que puede ser adaptada a otros sistemas de transporte de mineral con características similares. De esta manera, el trabajo realizado aporta una propuesta técnicamente fundamentada y económicamente viable, orientada a fortalecer la disponibilidad de los equipos, reducir los costos asociados a fallas imprevistas y promover una gestión del mantenimiento enfocada en la mejora continua.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se plantean las siguientes recomendaciones para fortalecer la gestión del mantenimiento de la correa transportadora CM1-A y contribuir a la mejora continua de la confiabilidad operacional del sistema.

En primer lugar, se recomienda que el plan de mantenimiento preventivo propuesto sea implementado de manera gradual, permitiendo evaluar su desempeño mediante indicadores de gestión como la disponibilidad operacional, el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y el cumplimiento del programa de mantenimiento. El seguimiento periódico de estos indicadores permitirá medir la efectividad del plan e identificar oportunidades de mejora.

Asimismo, se recomienda fortalecer las estrategias de mantenimiento predictivo mediante la incorporación de tecnologías de monitoreo de condición en línea. La instalación de sensores permanentes para el monitoreo de vibraciones, temperatura y condición de rodamientos permitiría detectar anomalías en etapas tempranas, disminuyendo la probabilidad de fallas catastróficas y optimizando la planificación de las intervenciones de mantenimiento.

También se sugiere mantener actualizado el análisis de modos y efectos de falla (AMEF), incorporando periódicamente la información proveniente de nuevas intervenciones, registros históricos de mantenimiento y análisis de fallas ocurridas durante la operación. La actualización continua de esta herramienta permitirá que la planificación del mantenimiento evolucione de acuerdo con las condiciones reales de operación de la correa transportadora.

Desde el punto de vista de la gestión de activos, resulta recomendable fortalecer el control del inventario de repuestos críticos, especialmente de componentes como polines, rodamientos, sellos, elementos de transmisión y sistemas de limpieza de banda. Una adecuada planificación del stock permitirá reducir los tiempos de espera por disponibilidad de repuestos y disminuir la duración de las detenciones programadas y no programadas.

De igual forma, se recomienda continuar fortaleciendo las competencias técnicas del personal de mantenimiento mediante programas permanentes de capacitación en análisis vibracional, termografía infrarroja, alineación de equipos rotativos, lubricación industrial y metodologías de análisis de fallas. La especialización del personal constituye un factor fundamental para aumentar la confiabilidad de los activos y mejorar la calidad de las intervenciones.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el alcance del presente estudio mediante la implementación práctica del plan de mantenimiento propuesto y la evaluación de sus resultados durante un período prolongado de operación. Asimismo, sería de interés desarrollar estudios similares en otras correas transportadoras y equipos críticos del proceso de chancado y molienda, permitiendo comparar resultados y generar estrategias integrales de mantenimiento para toda la planta concentradora.

En conclusión, la implementación de estas recomendaciones contribuirá a consolidar una gestión del mantenimiento basada en la prevención, el monitoreo de condición y la mejora continua, favoreciendo el incremento de la disponibilidad operacional, la reducción de los costos asociados a fallas imprevistas y el fortalecimiento de la confiabilidad de los sistemas de transporte de mineral en la industria minera.

BIBLIOGRAFÍA

- Agusto Valderrama, J. I., Naito Chiang, K., y Rivas Saldana, F. (2021). *Determinación de modelo teórico de generación energética para el monitoreo del estado de polines de las correas transportadoras* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ingeniería).
- Anglo American Chile. (2016). *Los Bronces*.
- Astudillo Astudillo, R. A., y Criollo Gallardo, S. G. (2022). *Análisis del Modo y Efectos de Fallo (AMEF) para la empresa TEDASA SA* (Bachelor's thesis).
- Barrientos Medina, G. (2017). *Mejora de la gestión de mantenimiento de maquinaria pesada con la metodología AMEF*.
- Blanchard, B. S. (2019). *System Engineering and Analysis*. Pearson.
- Blanco, E. A. (2016). *BLOQUE III–CAPÍTULO 12.'CINTAS'TRANSPORTADORAS*.
- Bousdekis, A., Apostolou, D., y Mentzas, G. (2019). *Predictive maintenance in the 4th industrial revolution: Benefits, business opportunities, and managerial implications*. *IEEE engineering management review*, 48(1), 57-62.
- Ccori, C. H., Bedoya, G. T., y Mejia, Z. S. (2006). *Transporte de mineral por medio de fajas transportadoras en una mina a tajo abierto*. *Ciencia & Desarrollo*, (10), 81-84.
- CENTINELA. (2021). *INSPECCIÓN Y OPERACIÓN DE CORREAS TRANSPORTADORAS*.
- CODELCO. (2015). *Estándar de Diseño de Sistemas Contra Incendio en Correas Transportadoras*.
- Codelco Chile. (2018). *CHANCADO "Reduciendo la roca"*.
- ConVeyBelts. (2023). *Bandas Transportadoras*.
- Diez Román, J. M. (2015). *Sistema de mejora en la gestión de los procesos mineros de planta (Chancado y Molienda)*.
- DUNLOP. (2019). *LAS BANDAS TRANSPORTADORAS MÁS RESISTENTES Y DURADERAS DEL MUNDO*.
- EAN. (2021). *AMEF-ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE LA FALLA*.
- Erbiyik, H. (2022). *Definition of maintenance and maintenance types with due care on preventive maintenance*. In *Maintenance Management-Current Challenges, New Developments, and Future Directions*. IntechOpen.
- Fernández, F. J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. FC editorial.

- FUENZALIDA, M. (2018). *CORREAS TRANSPORTADORAS-TRASPORTE DE MATERIALES EN MINERÍA*.
- Garcia, J. E. (2018). *Mantenimiento predictivo*.
- GÓMEZ, A. M. (2017). *TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. METODOLOGIA DE APLICACIÓN EN LAS ORGANIZACIONES*.
- Hedkvist, A. (2019). *Predictive maintenance with machine learning on weld joint analysed by ultrasound*.
- Herbert, J. H. (2009). *Introducción al Mantenimiento Minero*.
- HIDALGO, M. R. (2013). *ANÁLISIS DE FALLAS EN MAQUINARIA MINERA*.
- HIDALGO, M. R. (2013). *ANÁLISIS DE FALLAS EN MAQUINARIA MINERA*.
- Huda, A. N., y Taib, S. (2013). *Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. Applied Thermal Engineering, 61(2), 220-227*.
- Hurtado, M., Estacio, J., y Fandiño, P. A. (2019). *Análisis de riesgos según la metodología FMEA, basado en el sistema de gestión de calidad. Cali-Colombia: Universidad Santiago de Cali*.
- Lara, I. M., y Franco, O. C. (2017). *Análisis del costo: beneficio una herramienta de gestión. Contribuciones a la Economía, 15(2), 11*.
- Marquina Araujo, J. J., Briceño Contreras, S. K., Briceño Neyra, J., Salinas Murga, M. A., Vega-Gonzalez, J. A., Cotrina Teatino, M. A., y GOMEZ HURTADO, W. C. (2023). *Technological advancement of equipment for the comminution of minerals. LACCEI, 1(8)*.
- Melo, S. (2020). *La importancia de optimizar la gestión del mantenimiento*.
- Metso. (2025). *Correas transportadoras de cables de acero*.
- MINISTERIO DE MINERÍA. (2022). *LEYES, REGLAMENTOS, DECRETOS Y RESOLUCIONES DE ORDEN GENERAL*.
- Mobley, R. K. (2019). *Maintenance Engineering Handbook*. McGraw-Hill Education.
- Mohutsiwa, M., y Musingwini, C. (2015). *Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(8), 789-797*.
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., y Mrozek, D. (2023). *From corrective to predictive maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. Sensors, 23(13), 5970*.
- Montaña, C. A. (2019). *Mantenimiento Industrial y su Administración*.

- Mozo, F., y Marleny, J. (2019). *Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF)*.
- Okano, K. (2001). *Life cycle costing-An approach to life cycle cost management: A consideration from historical development*. *Asia Pacific Management Review*, 6(3), 317-341.
- Pascual, R., y Ortega, G. (2018). *Mantenimiento preventivo y su impacto en la confiabilidad operativa de equipos industriales*. Editorial académica española.
- Pérez, R. J., Lobaina, A. A., y Velazquez2, L. (2009). *Evaluación del desgaste de la banda transportadora en las minas de níquel de Moa y Nicaro*.
- Ramos, M. G., y Pachón, S. R. (2021). *Diseño e implementación del plan de mantenimiento preventivo de los equipos de la empresa Granitos y Mármoles Acabados SAS*. *Ciencia y poder aéreo*, 16(2), 98-111.
- Riveros Arcos, G. A. (2021). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo a cintas transportadoras para optimizar las fallas y su disponibilidad en el proceso minero en mina Chépica (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ingeniería)*.
- Riveros Arcos, G. A. (2021). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo a cintas transportadoras para optimizar las fallas y su disponibilidad en el proceso minero en mina Chépica (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ingeniería)*.
- RODRÍGUEZ, R. C. (2021). *Análisis costo-beneficio*. *Universidad de los Andes-Facultad de Economía*, 10.
- Ruiz Parroquiano, D. E. (2024). *Diseño de plan de mantenimiento preventivo para el taller de fabricación de moldes en la empresa Casald Ingeniería SAS*.
- Sacristán, F. R. (2014). *Elaboración y optimización de un plan de mantenimiento preventivo*.
- Salazar López, B. (2019). *Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF)*.
- Salvendy, G. (2012). *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. John Wiley & Sons.
- Sharma, K., y Srivastava, S. (2018). *Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review*. *Journal of Advance Research in Aeronautics and Space Science*, 5(1), 1-17.
- Smith, R., y Hinchcliffe, G. (2020). *RCM: Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Quality Press.
- Stenström, C., Norrbin, P., Parida, A., y Kumar, U. (2016). *Preventive and corrective maintenance–cost comparison and cost–benefit analysis*. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), 603-617.

Vaca, C. S., y Quito, R. F. (2022). *Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos.*

Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., Da Trindade, E. S., y Li, G. P. (2020). *Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering, 150, 106889.*

•