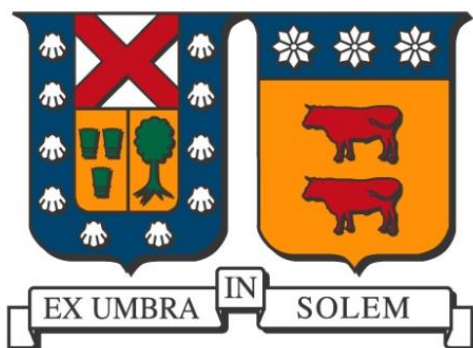


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**«ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO EN LOS
PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO, AL ESTABLECER
NORMAS Y MÉTODOS PARA MEJORAMIENTO DE
LUBRICACIONES EN COMPONENTES ASOCIADOS A CORREAS
TRANSPORTADORAS»**

NICOLÁS ESTEBAN NIETO QUINTANILLA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

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

NOVIEMBRE, 2019

DEDICATORIA

Dedico estas primeras líneas en agradecimiento por Todo a quién es mi Padre, al que me dio las manos para poder escribir este trabajo y desde siempre me ha acompañado. Le agradezco poder ser parte de su obra, ser bendecido en tanto amor y haberme elegido para ser su siervo. Padre, en tus manos encomiendo mi espíritu.

«Pero tú eres el que me sacó del vientre, el que me hizo estar confiado desde que estaba en el regazo de mi madre. A ti fui encomendado desde antes de nacer; desde el vientre de mi madre, tú eres mi Dios»

(Salmos 22: 9-10)

La realización de este trabajo de título está cimentada por los momentos compartidos con todos los que han caminado este largo sendero conmigo, muchos de los cuales generaron recuerdo en mi memoria. Han forjado lo que escribiendo esto soy, un par de ellos desde que nací. Dedicado a la dicha de tener padres que con esfuerzo y sacrificio me han dado la oportunidad de estudiar, por nunca decaer y ser los pilares de mi vida. Gracias por tanto.

Dedico estas palabras también a mis hermanos, con los que he crecido y reído desde la cuna, y han sido, por sobre todo, mis amigos. A mis camaradas, que día a día me acompañaron en la risa y en el desvelo del estudio, muchos de ellos, me acompañaron más que unos buenos brindis.

Para quién me dio la fuerza en el final de este camino y fue mi inspiración para realizar este trabajo: para Karina, que llegó a traerle luz a mi vida y ha iluminado los momentos más sobrecogedores que he tenido. Para el bebé que en su vientre lleva, al que sueño con tenerlo en mis brazos cada día... Son la razón de mis días.

RESUMEN

El estudio realizado en el proceso de concentración convencional de Codelco división El Teniente, busca mejorar el mantenimiento y la operación de las cuarenta y ocho correas transportadoras presentes en la planta de Molienda Convencional, utilizando un modelo de mantenimiento cuya base es la mejora continua del ciclo de trabajo del mantenimiento, mediante la generación de propuestas y análisis que sirvan de apoyo a la toma de decisiones de la Gerencia de Plantas, favoreciendo el resultado económico y la confiabilidad del sistema.

Por medio del análisis de causa raíz de los modos de falla asociados a lubricación, según la información extraída del período Enero, 2017 – Diciembre, 2018, se determina que las fallas por lubricación generaron pérdidas por 2,97 [MUSD] por el mineral no procesado, evidenciando que el 37% de las detenciones no programadas del sistema en el período se debieron a fallas en la lubricación de dos componentes: reductores de velocidad y rodamientos, utilizados en los soportes de pie de las distintas poleas.

En reductores de velocidad, se detecta que las fallas del período se originaron por la degradación de los lubricantes, siendo las causas raíces, la polimerización de los componentes orgánicos del lubricante (oxidación), generado por una baja frecuencia de cambio del lubricante que difiere del requerimiento establecido por el fabricante basado en los rangos de viscosidad de la Norma AGMA 250.04; y por la falta de control del profuso mineral fino suspendido en el ambiente, contaminando constantemente la acción del lubricante en la operación.

En los rodamientos de bloques de almohada, las causas raíces de las fallas se generaron por contaminación de la grasa lubricante debido a la alta presencia de partículas abrasivas adheridas, producto de la deficiente manipulación del rodamiento y de la grasa lubricante por parte de mantenedores, tanto en la instalación como en el mantenimiento.

Ante lo anterior, se evalúa la incorporación de tres aspectos de solución para evitar la aparición de los modos de falla detectados en reductores de velocidad: reducción de la frecuencia de cambio del lubricante, aplicación de un análisis vibracional trimestral, y la instalación de filtros de aire; mientras que para la corrección de los modos de falla en rodamientos, se propone cambiar los rodamientos actuales por rodamientos sellados, siendo mantenidos por un análisis trimestral de ultrasonido, generando la reducción de los tiempos de mantenimiento programado en aproximadamente 271 [hr/año].

Los indicadores económicos señalan una alta rentabilidad en las propuestas presentadas, y un flujo de caja de aproximadamente 1,81 [MUSD/año] según la evaluación económica realizada, determinando un TIR de 88,9% y un Payback menor a 1 [año].

ABSTRACT

The present study carried out at Codelco división El Teniente, seeks to improve the maintenance and operation of the forty-eight conveyor belts using a maintenance model whose basis is the continuous improvement of the maintenance work cycle, through the generation of proposals and analysis that support the decision making of the Plant Management, favoring the economic result and the reliability of the system. For this purpose, root cause analysis tools are used, which determine that there are two critical components whose failure modes are due to deficiencies in the lubrication: speed reducers and bearings, used in the pillow blocks of the different pulleys of the system.

By analyzing the root cause of the failure modes associated with lubrication, according to the information extracted from the failures that occurred in the period January, 2017 - December, 2018, it is determined that lubrication failures generated losses of 2.97 [MUSD] by the unprocessed ore, evidencing that more than 1/3 of the unscheduled arrests of the system in the period were due to failures in the lubrication of two components: speed reducers and bearings, used in the foot supports of the different pulleys.

In speed reducers, it is detected that the failures of the period were caused by the degradation of the lubricants, the root causes being the polymerization of the organic components of the lubricant (oxidation), generated by a low frequency of change of the lubricant, which differs from the requirement established by the manufacturer based on the viscosity ranges of AGMA Standard 250.04; and by the lack of control of the fine mineral suspended in the environment, constantly contaminating the action of the lubricant in the operation.

In the bearings of the pillow blocks, the root causes of the failures were generated by contamination of the lubricating grease due to the high presence of adhered abrasive particles, due to the poor handling of the bearing and the lubricating grease by the maintainers, both in installation and maintenance.

In view of the above, the incorporation of three aspects of the solution is evaluated to avoid the appearance of the failure modes detected in speed reducers: reduction of the frequency of change of the lubricant, application of a quarterly vibrational analysis, and the installation of filters air; while for the correction of the failure modes in bearings, it is proposed to change the current bearings to sealed bearings, being maintained by a quarterly ultrasound analysis, generating the reduction of the scheduled maintenance times in approximately 271 [hr/year].

The economic indicators indicate a high profitability in the proposals presented, and a cash flow of approximately 1.81 [MUSD/year] according to the economic evaluation, determining an IRR of 88.9% and a Payback less than 1 [year].

GLOSARIO

AMFE	Análisis de Modos de Falla y Efectos
CLP	Peso Chileno
cSt	Centistoke
CTR	Correa Transportadora
DET	División El Teniente
hr	Hora
HH	Hora-Hombre
MTTR	Tiempo Medio Para Reparar
MTBF	Tiempo Medio Entre Fallas
PMC	Planta Molienda Convencional
tmf	Toneladas Métricas Finas
tph	Toneladas por Hora
USD	Dólar Estadounidense

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1. MARCO TEÓRICO	15
1.1. MANTENIMIENTO.....	15
1.2. MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.....	18
1.2.1. Definición del Negocio	19
1.2.2. Análisis de la Situación Actual del Mantenimiento	20
1.2.3. Jerarquización de Equipos Críticos	20
1.2.4. Análisis de Riesgos Potenciales en Equipos Críticos.....	22
1.2.5. Diseño de Planes de Mantenimiento	23
1.2.6. Planificación y Control del Mantenimiento	31
1.2.7. Evaluación y Control de la Ejecución del Mantenimiento	32
1.2.8. Análisis del Ciclo de Vida del Activo	34
1.3. CORREAS TRANSPORTADORAS.....	34
1.3.1. Componentes de una Correa Transportadora	35
1.4. LUBRICACIÓN.....	43
1.4.1. Viscosidad	43
1.4.2. Factores que Afectan la Selección del Lubricante	44
1.4.3. Factores que Afectan la Acción del Lubricante	44
1.4.4. Tipos de Lubricantes	46
1.4.5. Clasificación de los Lubricantes.....	50
1.4.6. Relación de Viscosidad Entre las Distintas Clasificaciones.....	53
2. CONTEXTO OPERACIONAL	54
2.1. CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE	54
2.2. DIVISIÓN EL TENIENTE.....	55
2.2.1. Proceso Productivo.....	55

2.3.	DESCRIPCIÓN DE PROCESO A INTERVENIR: CONCENTRACIÓN PROCESO CONVENCIONAL	60
2.3.1.	Planta Chancado Secundario y Terciario	60
2.3.2.	Planta Molienda Convencional	60
2.3.3.	Planta Flotación Convencional.....	61
2.4.	DESCRIPCIÓN DE SISTEMA A INTERVENIR: CORREAS TRANSPORTADORAS.....	61
2.4.1.	Tipo de Configuración del Sistema	63
2.4.2.	Características de Operación de Correas Transportadoras	63
2.5.	PRESENCIA DE SÍLICE Y POLVO FUERA DE NORMATIVA	65
3.	DIAGNÓSTICO DE CONDICIÓN ACTUAL.....	66
3.1.	IMPACTO DEL PRECIO Y COSTO DE COBRE EN LA INDUSTRIA	66
3.2.	MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN CODELCO.....	67
3.2.1.	Sistema de Gestión de Recursos, SAP ERP	68
3.3.	INDICADORES DE DESEMPEÑO	71
3.4.	PENALIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS	72
3.5.	COSTOS DE MANTENIMIENTO	74
4.	ESTUDIO TÉCNICO	76
4.1.	ANÁLISIS DE OPERACIÓN	76
4.1.1.	Diagrama de Pareto de Detenciones No Programadas	77
4.1.2.	Análisis de Criticidad de Modos de Falla	79
4.1.3.	Análisis de Modos de Falla, Causas y Efectos.....	84
4.1.4.	Diagramas Causa-Efecto de Modos de Falla por Lubricación	88
4.1.5.	Análisis de Resultados	95
4.2.	ANÁLISIS DE MANTENIMIENTO	97
4.2.1.	Análisis de Indicadores de Mantenimiento	97
4.2.2.	Análisis de Planes de Mantenimiento	103
4.2.3.	Análisis de Resultados	110
5.	PROPUESTAS DE SOLUCIÓN	113
5.1.	SISTEMA DE CORREAS CORTAS	113
5.1.1.	Aumento de Frecuencia de Cambio de Lubricante en Reductores de Velocidad	114
5.1.2.	Análisis Vibracional Trimestral (3M) en Reductores de Velocidad	114
5.1.3.	Filtros de Aire para Respiraderos en Reductores de Velocidad	114

5.1.4.	Rodamientos de Rodillos a Rótula Sellados.....	115
5.1.5.	Ultrasonido Trimestral (3M) en Rodamientos Propuestos	118
5.2.	SISTEMA DE CORREAS ALIMENTADORAS.....	118
5.2.1.	Rodamientos de Rodillos a Rótula Sellados.....	118
5.2.2.	Ultrasonido Trimestral (3M) en Rodamientos Propuestos	119
6.	ESTUDIO ECONÓMICO.....	120
6.1.	Aumento de Producción	120
6.2.	Inversión y Depreciación de Activos	121
6.3.	Costos por Planes de Mantenimiento Propuestos.....	121
6.4.	Flujo de Caja	122
6.5.	Indicadores Económicos	123
6.5.1.	Valor Actual Neto (V.A.N.)	123
6.5.2.	Tasa Interna de Retorno (T.I.R.)	123
6.5.3.	Plazo de Recuperación (Payback)	123
	CONCLUSIONES	124
	BIBLIOGRAFÍA	126
	ANEXOS	127
	ANEXO I – MOTORES DE CORREAS CORTAS	127
	ANEXO II – REDUCTORES EN CORREAS CORTAS	128
	ANEXO III – MOTORES DE CORREAS ALIMENTADORAS.....	129
	ANEXO IV – REDUCTORES EN CORREAS ALIMENTADORAS	129
	ANEXO V – CÁLCULO MONETARIO DE PRODUCCIÓN POR MOLINO	130
	ANEXO VI – ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE COMPONENTES DE CORREAS TRANSPORTADORAS	131
	ANEXO VII – INFORME DE ANÁLISIS DE ACEITE	132
	ANEXO VII – PAUTA DE MANTENIMIENTO EN SISTEMAS MECÁNICOS (4M)	133
	ANEXO VIII – PAUTA DE MANTENIMIENTO MEDICIÓN DE VIBRACIONES (3M) ...	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de mantenimiento según acciones reactivas y proactivas.....	15
Figura 1.2 - Ciclo de trabajo de mantenimiento.	18
Figura 1.3 - Diagrama del modelo de gestión de mantenimiento con sus etapas.....	19
Figura 1.4 - Matriz de criticidad, Frecuencia vs Consecuencia.....	22
Figura 1.5 - Diagrama entrada, proceso, salida	26
Figura 1.6 – Diagrama de causa y efecto.....	31
Figura 1.7 - Componentes principales de una correa transportadora.	35
Figura 1.8 - Detalle de elementos en una cinta.....	36
Figura 1.9 - Tipos de polines para cintas transportadoras.	37
Figura 1.10 - Componentes principales de un tambor o polea.	38
Figura 1.11 - Motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla.	39
Figura 1.12 - Motor trifásico formado por un rotor bobinado.....	40
Figura 1.13 - Reductor de velocidad de engranajes.....	41
Figura 1.14 - Conjunto de soporte de pie, manguito y rodamiento, utilizados en ejes de poleas.....	42
Figura 1.15 - Película de lubricante entre dos superficie en contacto.	43
Figura 1.16 - Medición del grado de consistencia en grasas.	47
Figura 2.1 - Corporación Nacional del Cobre.	54
Figura 2.2 - Divisiones de Codelco.	55
Figura 2.3 - Proceso productivo del cobre en la división El Teniente.....	56
Figura 2.4 - Proceso de extracción, división El Teniente.	57
Figura 2.5 - Proceso de concentración por plantas, división El Teniente.	58
Figura 2.6 - Proceso de Fundición, división El Teniente.	59
Figura 2.7 - Planta de Molienda Convencional, división El Teniente.....	60
Figura 2.8 - Diagrama de proceso, Planta de Molienda Convencional.	62
Figura 2.9 - Correas Transportadoras del proceso productivo de la Planta Molienda Convencional.....	62
Figura 2.10 - Esquema de disposición de principales componentes en correas cortas.	64
Figura 2.11 - Diseño esquemático tipo de correas transportadoras alimentadoras de un molino de bolas.....	65
Figura 3.1 - Costos C1, C2 y C3 en industria del cobre.	67
Figura 3.2 - Gestión del mantenimiento en Codelco.	67
Figura 3.3 - Software de gestión de recursos utilizado por Codelco.....	68
Figura 3.4 - Diagrama de tratamiento de avisos en SAP ERP.	69
Figura 4.1 - Registro de detenciones de Molinos de bolas utilizado en Planta Molienda Convencional.....	76
Figura 4.2 - Diagrama de causa-efecto, rodamiento de bloque de almohada.....	88
Figura 4.3 - Rodamiento de soporte de pie desarmado posterior a falla.	88

Figura 4.4 - Grasa lubricante contaminada.....	89
Figura 4.5 - Lubricación manual contaminando rodamientos.....	90
Figura 4.6 - Medición de holgura en rodamiento.	90
Figura 4.7 - Diagrama causa-efecto, reductores de velocidad.....	91
Figura 4.8 - Reductores de velocidad sin filtros de aire para respiradores.....	92
Figura 4.9 - Fotografía de placa de lubricación en reductores de velocidad.	92
Figura 4.10 - Viscosidad recomendada en reductores de velocidad según temperatura ambiental.	93
Figura 4.11 - Cambio de propiedades del lubricante según condición.....	94
Figura 4.12 - Ruta de inspección mensual realizada por mantenedor.	106
Figura 4.13 - Medición de juego radial interno en rodamientos de bloques de almohada.	107
Figura 4.14 - Rodamiento contaminado posterior a medición de juego radial interno.	107
Figura 4.15 - Puntos de medición de vibraciones en sistemas motrices.	108
Figura 5.1 - Filtro de aire para respiradero de reductores de velocidad.	115
Figura 5.2 - Rodamiento de rodillo a rótula sellado.	116
Figura 5.3 - Sello obturador evitando ingreso de partículas contaminantes en rodamiento.	117
Figura 5.4 - Sello obturador evitando salida de lubricante del rodamiento.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Hoja de información para aplicación de análisis de modos de fallas y efectos (AMFE).	30
Tabla 1.2 - Grados de Viscosidad según Norma SAE J300 – Revisión Enero 2015.	51
Tabla 1.3 - Clasificación AGMA de aceites para engranajes cerrados en aplicaciones industriales.....	51
Tabla 1.4 - AGMA 250.04 Rangos de viscosidad para lubricantes.	52
Tabla 1.5 - Límites de Viscosidad ISO según Norma DIN 51519-2015.....	53
Tabla 1.6 - Equivalencias de viscosidades.	53
Tabla 2.1 - Características principales de operación en correas cortas.	63
Tabla 2.2 - Características principales de operación en correas alimentadoras.	64
Tabla 2.3 - Medición de contaminantes.	65
Tabla 3.1 - Resumen indicadores de desempeño Molienda Convencional	71
Tabla 3.2 - Porcentaje de detenciones en molinos de bolas debido a correas transportadoras..	71
Tabla 3.3 - Detenciones no programadas en molinos debido a correas transportadoras.....	72
Tabla 3.4 - Características de la producción del proceso convencional.	73
Tabla 3.5 - Pérdidas por mineral no procesado.	74
Tabla 3.6 - Costos de mantenimiento de correas transportadoras	75
Tabla 3.7 - Costos de mantenimiento utilizado en correas transportadoras	75
Tabla 4.1 - Causas de intervenciones no programadas en correas transportadoras.....	77
Tabla 4.2 - Cantidad de intervenciones no planificadas según correa transportadora	79
Tabla 4.3 - Indicador de frecuencia según la frecuencia de falla.	80
Tabla 4.4 - Indicador de consecuencia según puntaje.	82
Tabla 4.5 - Resultado de criticidad de modos de falla.....	83
Tabla 4.6 - Criticidad de modos de falla en Correas Alimentadoras.....	83
Tabla 4.7 - Criticidad de modos de falla en Correas Cortas.....	84
Tabla 4.8 - Matriz cualitativa de riesgo (HSEC), división El Teniente.....	85
Tabla 4.9 - Análisis de modos de fallas, causas y efectos en Correas Alimentadoras.	86
Tabla 4.10 - Análisis de modos de fallas, causas y efectos en Correas Cortas.	87
Tabla 4.11 - Modos de falla por lubricación en Correas Alimentadoras.....	95
Tabla 4.12 - Modos de falla por lubricación en Correas Cortas.....	95
Tabla 4.13 - Porcentaje del total de pérdidas por detenciones debido a lubricación.....	96
Tabla 4.14 - Características principales de plan de mantenimiento en detectores de atollo. ...	103
Tabla 4.15 - Características principales de plan de mantenimiento en sistemas de instrumentación.	104
Tabla 4.16 - Características principales de plan de mantenimiento mensual en motores de accionamiento.....	104
Tabla 4.17 - Características principales de plan de mantenimiento cuatrimestral en sistemas de fuerza y control eléctrico.	105

Tabla 4.18 - Características principales de ruta de inspección mensual de sistemas mecánicos.	106
Tabla 4.19 - Características principales de plan de mantenimiento cuatrimestral de sistemas mecánicos.	108
Tabla 4.20 - Características principales de medición semestral de vibraciones en sistemas motrices de Correas Alimentadoras.....	109
Tabla 4.21 - Características principales de muestra anual de lubricante en reductores de velocidad.....	110
Tabla 5.1 - Síntesis de propuestas de solución en correas cortas	113
Tabla 5.2 - Características principales de cambio de lubricante propuesto.....	114
Tabla 5.3 - Características principales de análisis vibracional trimestral propuesto.....	114
Tabla 5.4 - Características de filtro respirador cotizado para reductores de velocidad de correas cortas.	115
Tabla 5.5 - Principales características de rodamiento sellado cotizado para soportes de pie de correas cortas.	117
Tabla 5.6 - Mantenimiento trimestral por ultrasonido para rodamientos sellados de correas cortas.....	118
Tabla 5.7 - Síntesis de propuestas de solución en correas alimentadoras	118
Tabla 5.8 - Principales características de rodamiento sellado cotizado para bloques de almohada de correas alimentadoras.....	119
Tabla 5.9 - Mantenimiento trimestral por ultrasonido para rodamientos sellados de correas alimentadoras.....	119
Tabla 6.1 - Cálculo monetario de aumento de producción por propuesta de solución.....	120
Tabla 6.2 - Inversión inicial y depreciación de activos.	121
Tabla 6.3 - Costos por planes de mantenimiento propuestos.	121
Tabla 6.4 - Flujo de caja, año 0 – año 5.	122
Tabla 6.5 - Flujo de caja, año 6 – año 10.	122

INTRODUCCIÓN

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

El mantenimiento es una acción que tiene como objetivo preservar un activo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo la función requerida, y para ello, existen distintas metodologías que se crearon con el fin de llevar a cabo dichas acciones en los activos.

El modelo de gestión del mantenimiento a presentar se compone de siete principales etapas, las cuales deben desarrollarse progresivamente según el escenario actual de la organización, haciendo énfasis en la gestión y optimización sostenida en el tiempo de procesos asociados a la planificación, programación y ejecución del mantenimiento.

Adicionalmente, el modelo se complementa con herramientas de apoyo para el desarrollo e implementación de las etapas, utilizando características operacionales reales, las cuales afectan el desempeño de la unidad de mantenimiento.

Este trabajo de título desarrolla la mejora de los planes de mantenimiento en los sistemas de correas transportadoras de la planta de Molienda Convencional de la división El Teniente de Codelco, mediante el estudio de las causas raíces de las fallas asociadas a lubricación, buscando mejorar los índices de disponibilidad de la planta, disminuir los costos de mantenimiento, y evaluar los riesgos ambientales y en seguridad del proceso.

El modelo permitirá evaluar el riesgo de cada modo de falla de los componentes críticos de correas transportadoras, logrando identificar las acciones proactivas faltantes que ayudarán a aumentar la confiabilidad en los procesos y el EBITDA de la corporación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de factibilidad técnico y económico de propuestas para mejorar la lubricación de componentes de correas transportadoras, mediante la solución de los modos de falla asociados a lubricación, según las condiciones de operación y mantenimiento a las que están sometidas en la Planta Molienda Convencional de la División El Teniente de Codelco.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contextualizar la situación actual de operación y mantenimiento en las correas transportadoras a estudiar.
- Identificar los principales indicadores de mantenimiento, en base a las condiciones a las que están sometidas las correas transportadoras.
- Efectuar un análisis de modos de falla, causas y efectos de las principales fallas presentadas en correas transportadoras, identificando principales modos de falla por lubricación, sus causas, efectos y riesgos.
- Formular evaluación de los parámetros estudiados conforme a lo establecido en los planes de mantenimiento y al análisis efectuado.
- Realizar evaluación económica de las propuestas presentadas, considerando todas las alternativas o consideraciones emanadas de la evaluación técnica.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. MANTENIMIENTO [1]

Se define el mantenimiento como todas las acciones que tienen como objetivo preservar un sistema o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo la función requerida. Estas acciones incluyen la combinación de las acciones técnicas y administrativas correspondientes.

En efecto, para poder llevar a cabo el mantenimiento de manera adecuada es imprescindible actuar con especificaciones técnicas –normas, tolerancias, planos, tablas– y los estándares y procedimientos adecuados para seguir con la recepción, instalación y puesta en marcha.

Estas actividades cuando son realizadas con la participación del personal de mantenimiento deben servir para establecer y documentar el estado de referencia.

Existen diferentes nombres que suelen utilizarse para denominar los tipos de mantenimiento. En ciertas circunstancias resulta difícil establecer el límite entre cada uno de los tipos de mantenimiento, sin embargo, es posible agruparlos en dos grupos.

Por un lado, se encuentran las tareas que involucran acciones *Reactivas*; y por otro, se encuentran las que se caracterizan por acciones del tipo *Pro-activas*.

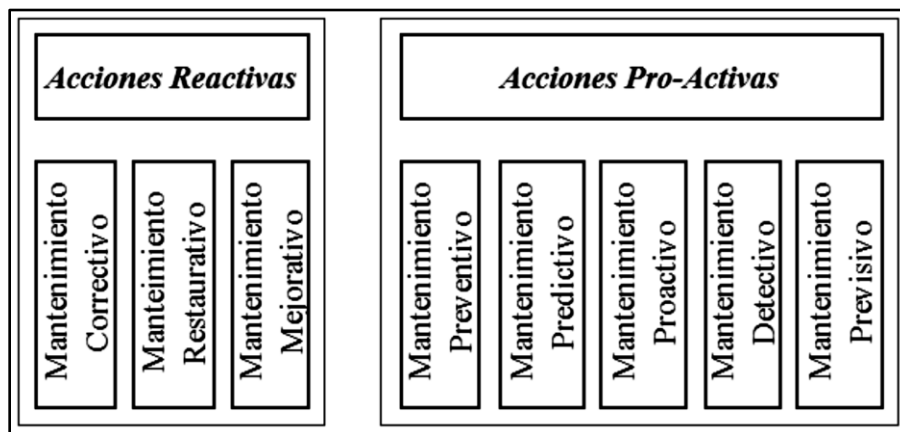


Figura 1.1 - Tipos de mantenimiento según acciones reactivas y proactivas.

(Referencia: PISTARELLI, Manual de Mantenimiento)

- ***Acciones Reactivas***

Una acción reactiva considera tomar alguna medida para restablecer las funciones originales que se perdieron como consecuencia de un evento inesperado (falla funcional). Cuando se trata de una emergencia, la programación casi no existe o, sencillamente, es improvisada. Dentro de los mantenimientos basados en acciones reactivas encontramos:

- a) *Mantenimiento Correctivo*

Consiste en la corrección o reparación de averías o fallos funcionales de manera *no programada*. El personal encargado de identificar los defectos generalmente es el operador de la máquina, y es quien avisa al personal especializado para que realice la reparación.

- b) *Mantenimiento Restaurativo*

La detección de ciertos parámetros que estén fuera del estado óptimo de funcionamiento, aún sin haberse producido todavía una falla funcional, puede generar un estado insatisfactorio que requiera la intervención de personal especializado para restaurar el sistema a los parámetros requeridos.

- c) *Mantenimiento Mejorativo*

Se conoce también como *rediseño* y busca optimizar el proceso productivo, eliminar fallos crónicos, o bien aumentar la confiabilidad o mantenibilidad de los activos modificándolos de alguna manera. Los rediseños pueden ser de índole física u operativa. Los primeros involucran modificaciones sobre el activo, mientras que los *rediseños operativos* pretenden mejorar los procedimientos de operación, los procedimientos de mantenimiento e inclusive el grado de capacitación de las personas.

- ***Acciones Pro- Activas***

Los planes de mantenimiento están constituidos por acciones del tipo Pro-activas. Tienen como objetivo impedir que se manifiesten modos de falla, que no ocurran con frecuencia o minimizar sus consecuencias. Gestionar un modo de falla antes de que suceda, significa llevar adelante un mantenimiento con acciones pro-activas, entre las que se encuentran:

- d) *Mantenimiento Preventivo*

Se busca disminuir la frecuencia de las paradas no programadas aprovechando el momento más oportuno, tanto para la producción como para mantenimiento. Permite, preparar herramientas, repuestos e insumos y seleccionar al personal más capacitado.

Como parte del mantenimiento preventivo se encuentran los servicios de inspección cíclicos, conservación y restauración de un ítem para prevenir, detectar o corregir defectos. Se realiza a espacios de tiempos, horas, ciclos, etc. regulares bien definidos y sin importar el estado del ítem a mantener. Normalmente con el equipo o instalación fuera de servicio y sustituyendo o reparando cíclicamente los componentes. En algunos equipos es necesario justificar cierta rentabilidad económica para su aplicación.

e) Mantenimiento Predictivo

Propone que es posible detectar *síntomas* prematuros de desperfectos o desajustes, algún tiempo antes de que se produzca una detención no deseada. Se presume que ciertos componentes “avisan” antes de llegar a la falla funcional.

A partir de la detección de la falla incipiente, es posible estimar el tiempo de la vida hasta la falla operacional, y, en consecuencia, contar con el tiempo suficiente para programar su reemplazo o reparación. Para equipos prioritarios, se realizan estimaciones por evaluación estadística, tratando de extrapolar el comportamiento de estas piezas y determinar la frecuencia exacta de inspección.

Normalmente se realiza con el equipo o instalación en servicio. Algunas herramientas utilizadas por el mantenimiento predictivo son análisis de vibraciones, termografía infrarroja, análisis de partículas de desgaste, inspección por ultrasonido, emisión acústica.

f) Mantenimiento Proactivo

Consiste en monitorear las propiedades de ciertos parámetros en los componentes antes de decidir una intervención. Sin embargo, en este caso y a diferencia del predictivo, se pretende determinar la *causa raíz* que puede provocar una falla sintomática con el fin de desviar una tendencia indeseable.

Identificar síntomas adversos, brinda la oportunidad de tomar acciones restaurativas para desviar tendencias y mejorar las condiciones de operación sin llegar a la falla sintomática irreversible.

Algunos ejemplos de mantenimiento proactivo son la tribología, conteo de partículas, alineación y balanceo, monitoreo de viscosidad, acidez de lubricantes, entre otros.

g) Mantenimiento Detectivo

Son las acciones tendientes a poner de manifiesto *fallos ocultos* que se dan básicamente en dispositivos redundantes o de protección. Identificar un fallo oculto y eliminarlo, aumenta la disponibilidad del dispositivo de seguridad. De no tomarse ninguna acción ante este tipo de fallos, y de suceder una falla funcional de la función cargada a proteger, se estaría ante una *falla simultánea*.

h) Mantenimiento Previsivo

En este tipo de acciones se trata de minimizar la ocurrencia de futuros fallos durante la etapa de diseño. A través de aplicaciones tecnológicas se utilizan técnicas de simulación para representar posibles fallos de la instalación. Estas herramientas posibilitan planear alternativas de solución y realizar las modificaciones o ajustes convenientes disminuyendo la probabilidad de falla del conjunto.

1.2. MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

El concepto base que da lugar a la ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión y el ciclo de trabajo del mantenimiento mediante la incorporación de conocimiento y análisis que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en el área del mantenimiento, orientadas a favorecer el resultado económico y operacional global.

En base a la Norma ISO 9001-2008, se puede reconocer un diagrama reconocido como *Ciclo de Trabajo de Mantenimiento*. De este modo, se distinguen varios aspectos que deben ser considerados al momento de elaborar e implementar un modelo de gestión del mantenimiento.

En la Figura 1.2 se presentan dos ciclos de trabajo representativos y necesarios en un buen modelo de gestión de mantenimiento. El primero, reconocido como *Ciclo Habitual de Mantenimiento* o *Ciclo de Trabajo Estándar*, explica la secuencia lógica del proceso táctico-operativo de las actividades de mantenimiento, las cuales son: planificación, programación, asignación de tareas y ejecución.

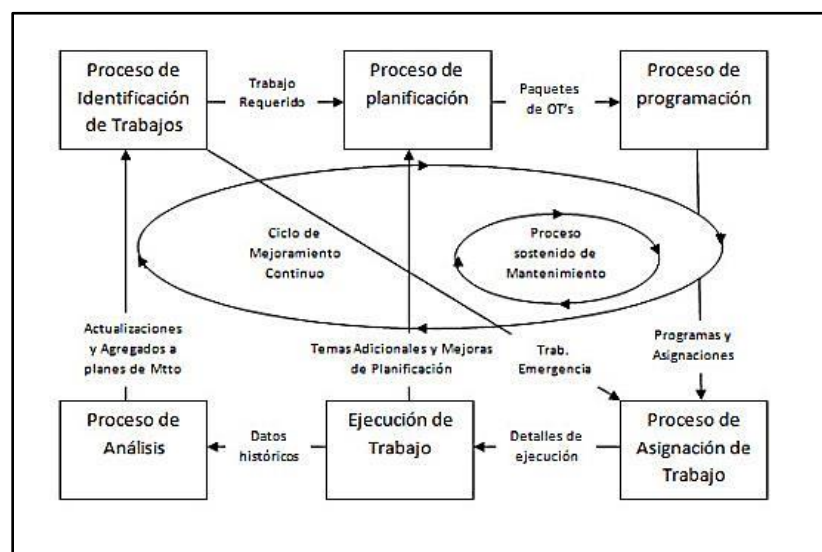


Figura 1.2 - Ciclo de trabajo de mantenimiento.

1.2.2. Análisis de la Situación Actual del Mantenimiento

Esta evaluación de la situación actual debe considerar todos aquellos aspectos relacionados con el mantenimiento de equipos de los cuales se disponga información, como la planificación, programación y ejecución de las tareas de mantenimiento, histórico de fallas, indicadores de *tiempo medio entre fallas (MTBF)* y *tiempo medio de reparación (MTTR)*, recursos financieros asignados al mantenimiento, impacto económico o en producción (consecuencia de falla del equipo) por paradas no programada de la planta, entre otros.

La gestión del mantenimiento debe conseguir alinear todas las actividades de mantenimiento con la estrategia definida a nivel estratégico o de dirección, táctico y operativo. Una vez que se han transformado las prioridades del negocio en prioridades de mantenimiento, se procederá a la elaboración de la estrategia, de acuerdo con los objetivos. De esta forma se obtiene un plan de mantenimiento genérico en la empresa que se desarrollará y enfocará a aquellos activos considerados críticos

1.2.3. Jerarquización de Equipos Críticos

El análisis de criticidad es un conjunto de metodologías que permiten definir las prioridades de un proceso, sistema o equipos, según los parámetros de *criticidad* y *riesgo*, generando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando los esfuerzos y recursos técnico-económicos en áreas que tienen mayor impacto en el negocio.

Los equipos críticos se caracterizan porque pueden afectar la continuidad del proceso, la calidad del producto, la seguridad de las personas y el cuidado del medioambiente. El método general para evaluación de riesgos se basa en el siguiente precepto:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

Dentro de los modelos para la determinación del riesgo, el *Modelo de Criticidad Cuantitativo* o *Criticidad Total por Riesgo (CTR)*, es ampliamente utilizado por su practicidad al ser un método semicuantitativo. Establece la relación entre la frecuencia de fallas en un rango de tiempo determinado versus las consecuencias que tendría la aparición de una falla:

$$\text{Criticidad Total por Riesgo (CTR)} = \text{Frecuencia de Fallas} \times \text{Consecuencia}$$

El valor de la *Consecuencia* de una falla se obtiene a partir de la relación de factores como impacto en la producción, flexibilidad operacional al momento de una falla, costos de mantenimiento, y el impacto a la salud, seguridad, medioambiente y comunidad (HSEC):

$$\text{Consecuencia} = (\text{Impacto Producción} \times \text{Flexibilidad Operacional}) + \text{Costos de Mantenimiento} + \text{HSEC}$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios para determinar la consecuencia de una falla se presentan a continuación:

- ***Factor de Frecuencia de Fallas (escala 1-4)***

4: Frecuentemente (mayor a 2 eventos al año)

3: Promedio (1 y 2 eventos al año)

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

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

- ***Impacto Operacional (escala 1-10)***

10: Pérdidas de producción superiores al 75%.

7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%.

5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%.

3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%.

1: Pérdidas de producción menor al 10%.

- ***Flexibilidad Operacional (escala 1-3)***

3: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.

1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

- ***Impacto HSEC (escala 1-9)***

9: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico) que exceden los límites permitidos.

6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración.

3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.

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

Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo o sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales y se ubican en la matriz de criticidad presentada en la Figura 1.4:

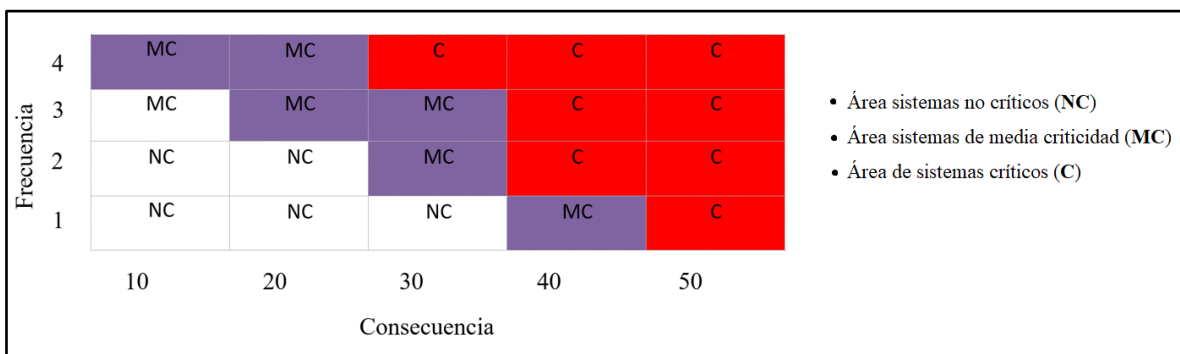


Figura 1.4 - Matriz de criticidad, Frecuencia vs Consecuencia.

El valor de la *Frecuencia de fallas* se ubica en el eje vertical y el valor de *Consecuencias* se ubica en el eje horizontal. Las propuestas de mejora, según la criticidad de los modos de falla, sistemas o subsistemas, darán la pauta para enfrentar el problema desde el punto de vista de la confiabilidad, producto de la alta frecuencia de intervención, o bien desde la mantenibilidad, dados los altos tiempos medios de reparación.

1.2.4. Análisis de Riesgos Potenciales en Equipos Críticos

La identificación previa de los equipos críticos y semicríticos permite conocer el estado actual de operación de los equipos, las deficiencias en su funcionamiento, el contexto de operación y la información para determinar las necesidades específicas de mantenimiento.

En los equipos críticos, previo desarrollo de las acciones constituyentes de los planes de mantenimiento, es recomendable analizar los posibles fallos repetitivos y crónicos (a partir del histórico de los equipos) cuya frecuencia de aparición pueda considerarse excesiva.

La eliminación o en su defecto el control de los modos de fallo contribuye a lograr un alto retorno inicial a la inversión en el programa de gestión de mantenimiento, asimismo, facilita las fases sucesivas de análisis y diseño de planes de mantenimiento, que requieren de una importante inversión de tiempo y recursos.

Existen diferentes métodos para realizar análisis de puntos débiles en activos críticos, uno de los más utilizados es el *Análisis Causa Raíz (ACR)*. Se trata de una metodología que permite de forma sistemática identificar las causas raíces primarias de las fallas, para aplicar posteriormente soluciones que las eliminen de forma definitiva.

1.2.5. Diseño de Planes de Mantenimiento

Una de las estrategias más utilizadas en la industria para el diseño de estrategias y planes de mantenimiento es el denominado *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* o *RCM (Reliability Centred Maintenance)*.

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

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

1.2.5.1. Funciones de un Activo (Primera Pregunta del RCM)

Por lo general existe más de una función en un activo físico, y se pueden clasificar en primarias y secundarias. Las funciones primarias representan la razón principal por la cual el activo ha sido adquirido por lo que se debe definir con la mayor precisión posible, esto quiere decir definir el desempeño esperado del equipo como velocidad, volumen, capacidad de almacenamiento, calidad, etc.

Las funciones secundarias muestran ciertos desempeños o acciones que se esperan del activo, que si bien no son fundamentales, llegan a satisfacer necesidades secundarias como alertas de seguridad, indicadores de combustible y aceite, etc. Las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, pero una pérdida de estas funciones puede llegar a ser hasta más seria que las primarias.

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

1.2.5.2. Contexto de Operación

Para poder definir la función del activo adecuadamente es necesario definir las condiciones de operación y el tipo de proceso al que será sometido, entre los que se cuentan conceptos como los que se mencionan a continuación:

a) Procesos por Lotes y Continuos

Procesos continuos donde la falla de un activo puede parar o reducir la producción o procesos por lotes donde los activos trabajan en forma discontinua. Esto implica que los planes de mantenimiento a plantas continuas pueden ser radicalmente distintos a procesos por lotes.

b) Redundancia

Es importante identificar los equipos redundantes o con stand by, ya que su plan de mantenimiento puede variar bastante considerando tales factores.

c) Estándares de Calidad

Este aspecto puede afectar la definición de una función y consecuentemente sus planes de mantención, como por ejemplo cuando existen tolerancias de fabricación, o granulometría de material como es el caso de la molienda.

d) Riesgos para la Salud, Seguridad y Medioambiente

Los procesos productivos, no solo deben cumplir con los estándares de las organizaciones propiamente tal, sino que también con la legislación que protege a los trabajadores (Ley 16.744). Así mismo, se debe cumplir las normas y estándares reguladoras para el medioambiente de operación.

e) Turnos de Trabajo

Las plantas se pueden diferenciar por las horas de producción, donde se pueden encontrar operaciones de 8 horas al día por 5 días a la semana y en el otro extremo encontramos producciones de 24 horas al día los 7 días de la semana.

f) Productos en Proceso

Hace referencia a la materia prima que se encuentre en etapas intermedias del proceso y aún no pase a través de todo su proceso productivo. Para evaluar este punto se debe tener presente la cantidad de producto en proceso entre esa etapa y la siguiente, y así por toda la línea productiva. Además, se debe considerar la proporción en que cualquiera de los procesos afectados se vuelve cuello de botella.

g) Tiempo de Reparación

La velocidad de respuesta, el nivel del personal, y la velocidad de reparación que a su vez depende de la disponibilidad de repuestos, de herramientas y recursos humanos. Todos estos factores condicionan el tiempo de reparación.

h) Repuestos

Adquirir repuestos toma tiempo, esto se conoce como el tiempo de reposición (lead time), y puede ser del orden de minutos a varios meses o años. El tiempo de reposición del repuesto determina cuánto tiempo tomará reparar la falla, y por lo tanto la severidad de la falla.

i) Demanda del Mercado

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

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

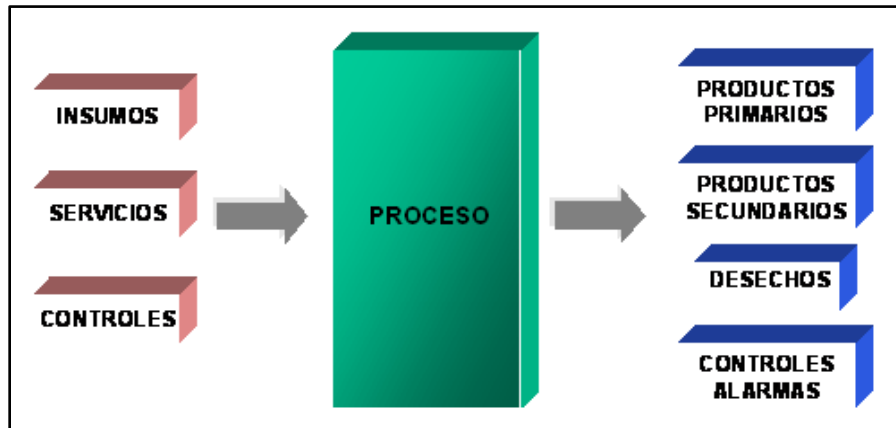


Figura 1.5 - Diagrama entrada, proceso, salida

(Referencia: *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*, Moubray, 1997).

1.2.5.3. Fallas Funcionales del Activo (Segunda Pregunta del RCM)

Una falla funcional indica la incapacidad de cualquier sistema de hacer aquello que el usuario quiere que haga. De esta forma, un sistema puede tener distintas funciones, lo que provoca que a la vez existan distintas formas de fallar, ya sea una falla de función primaria o secundaria.

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

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

a) Falla Total o Parcial

Una falla total del sistema ocurre al detenerse por completo, en cambio una falla parcial ocurre cuando comienza a funcionar fuera de los parámetros deseados.

b) Límites Superiores e Inferiores

Estándares que definen el funcionamiento del sistema, en base a esto el usuario define límites superiores e inferiores que tienen que ver con la calidad del producto, el sobrepasar estos límites provocan una falla funcional.

c) Instrumentos de Medición e Indicadores

Dentro de los límites de funcionamiento también existen instrumentos de medición que indican el estado del sistema, los cuales pueden ser trascendentales para evitar un modo de falla.

d) Contexto Operacional

La falla funcional de un sistema depende en gran parte del contexto operacional en el cual se desempeña, por lo que al igual que en la definición de funciones, no se deben generalizar las fallas funcionales entre sistemas similares.

1.2.5.4. Modos de Falla (Tercera Pregunta del RCM)

Un modo de falla corresponde a cualquier evento que genera una falla funcional. La definición del modo de falla debe ser lo suficientemente detallada para identificar de forma sencilla las acciones necesarias para prevenir la ocurrencia de este.

Se debe tener en consideración que existen distintos niveles de modos de falla y se puede perder bastante tiempo en definirlos todos e incluso llegar a su causa raíz. Para ahorrar recursos de tiempo, se deben establecer los riesgos y la probabilidad de ocurrencia, sin embargo, a mayor nivel de profundidad al definir un modo de falla, mayor es el beneficio.

Definir los modos de falla para cada falla funcional tiene como propósito especificar el correcto plan de mantenimiento ya sea correctivo, preventivo o predictivo con el fin que eviten o mitiguen el efecto de la ocurrencia de tal evento.

1.2.5.5. Efectos de Fallas (Cuarta Pregunta del RCM)

Los efectos que pueda generar una falla funcional se describen a través de lo que ocurre cuando se presenta un modo de falla.

Al describir el efecto de una falla se debe considerar la evidencia de que se ha producido una falla, las maneras en que la falla supone una amenaza al medio ambiente o la seguridad, qué debe hacerse para reparar la falla y qué efectos tiene sobre la operación.

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

Además, se debe señalar si el riesgo de fenómenos aumenta, como el caso de incendio, escape de productos químicos peligrosos, electrocución, explosiones o exposición a materiales calientes. Junto con esto se debe indicar cómo y durante cuánto tiempo se ve

afectada la producción, relacionada con el tiempo de parada de la máquina. Por último, se debe indicar las tareas de mantenimiento correctivo para reparar la falla.

1.2.5.6. Consecuencias de Fallas (Quinta Pregunta del RCM)

Establece de qué manera importa la falla funcional del sistema. En otras palabras, se define la manera en que los usuarios del activo entenderán la importancia de una falla.

Los efectos describen lo que sucede cuando ocurre una falla, por lo que al disminuir un efecto estaremos disminuyendo a la vez sus consecuencias. Cuando una consecuencia es muy grave, impactando el medio ambiente o la salud, entonces se deben hacer esfuerzos considerables para evitar, eliminar o disminuir las consecuencias. Esto también es válido para fallas que interfieren con la producción o las operaciones. Por otro lado, si la falla tiene consecuencias menores, probablemente no se tome ninguna acción proactiva, y la falla será reparada una vez que ocurra. Las consecuencias se clasifican en cuatro categorías que se describen a continuación:

a) Fallas No Evidentes

La falla no se hará evidente a los operadores bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola. En general en estos casos, si la consecuencia es importante se debe agregar un dispositivo de protección que alerte a los operadores de una falla en el activo.

b) Seguridad y Medio Ambiente

Una falla tiene consecuencia en la seguridad si puede lesionar a alguien, en cambio tiene consecuencias ambientales si infringe alguna norma ambiental de carácter corporativo, regional o nacional.

c) Operación y Producción

Existen consecuencias operacionales si se ve afectada la producción por la ocurrencia de la falla (capacidad, calidad, costo operacional y costo directo de reparación).

d) No Operacionales

Estas fallas sólo involucran consecuencias de costos directos de reparación.

1.2.5.7. Acciones para Predecir o Prevenir Modos de Falla (Sexta Pregunta del RCM)

Todo activo se ve sometido a esfuerzos que provocan su deterioro, por lo que a medida que el tiempo avanza su resistencia al esfuerzo disminuye. Para esto, debe existir

una tolerancia al deterioro, lo que implica que debe existir un rendimiento mayor al estándar mínimo de funcionamiento, denominado *Margen de Deterioro*.

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

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

1.2.5.8. Acciones Faltantes (Séptima Pregunta del RCM)

Cuando no es posible encontrar una tarea proactiva que disminuya las consecuencias del modo de falla a un nivel tolerable, existen acciones definidas por la metodología, las cuales varían según la consecuencia a la se está expuesto y también a si la falla es evidente u oculta.

Cuando la falla no es evidente se debe realizar una tarea de búsqueda de fallas y si no se encuentra la apropiada es posible requerir un rediseño del activo. Por otro lado, cuando existe riesgo de afectar el medio ambiente o la seguridad, es obligatorio el rediseño.

Finalmente, si no es posible encontrar una tarea proactiva y no existe efecto operacional, no realizar ningún mantenimiento programado es la mejor opción.

1.2.5.9. Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE)

El *Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE)* es la herramienta más importante que contempla el *RCM*, ya que permite dar respuesta a las 7 preguntas del método (p.23). Esto asegura que se han considerado a lo largo del proceso de aplicación todas las fallas potencialmente posibles.

El *FMEA* (por sus siglas en inglés, *Failure Mode Effect Analysis*), es una metodología que nació en Estados Unidos a finales de la década del 40 desarrollada por la NASA, y se creó con el propósito de evaluar la confiabilidad de los equipos, en la medida en que evalúa y analiza los efectos de las fallas de los mismos.

- **Hoja de Información del Sistema**

Esta herramienta integra los primeros cuatro conceptos para la aplicación del método, comenzando por la definición de funciones, siguiendo por la identificación de las fallas funcionales, el modo de falla probable, el efecto de la falla y finalmente la evaluación de las consecuencias del modo de falla.

En la tabla 1.1 se presenta un ejemplo de una hoja de información con la aplicación de los primeros cuatro pasos:

Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto de la falla
Elevar tensión de 13.8 kV a 115 kV +/- 5% con una potencia de 20MW cada uno TX-13 o TX-14 y con ventilación forzada hasta 30MVA, 29MVA y 32MVA	No eleva tensión de 13.8 kV a 115 kV	Espiras en cortocircuito	Actuar ele 87T y/o 51T el cual envía la orden para que actúe el rele de bloqueo 86 sacando de servicio al TX (falla mayor). MTTR= 3 meses
		Falsos contactos entre la bobina del TX y el bushing	Formandose un punto caliente provocando que actúen las protecciones por alta temperatura. MTTR= 3 días
		Falla de fase a tierra (bushing)	Actuación del rele 51T enviando la orden para que actúe el rele de bloqueo 86 y de las protecciones asociadas al generador, el TX sale de servicio, se pierden 20MW ya que también sale de servicio el generador. MTTR=3 meses
	No llega a suministrar los 20MVA	Falla de aceite	Provoca calentamientos de los devanados y actuación de los ventiladores (automática o manual) por lo que se debe limitar la carga del TX, de no ser así se activarían las alarmas por alta temperatura actuando las protecciones. MTTR=2 días
		Aceite contaminado	Originaria calentamiento súbito y posible cortocircuito, por lo que se debe limitar la carga a TX, de no ser así se activarían las alarmas por alta temperatura actuando las protecciones. MTTR=2 días (filtrar). MTTR=5 días
		Radiadores taponados o válvulas de radiadores cerradas	Provoca calentamiento de los devanados y actuación de los ventiladores (automática o manual) por lo que se debe limitar la carga a TX, de no ser así se activarían las alarmas por alta temperatura actuando las protecciones. MTTR=2 días (filtrar). MTTR=5 días

Tabla 1.1 - Hoja de información para aplicación de análisis de modos de fallas y efectos (AMFE).

- **Análisis de Causa Raíz (ACR)**

Dentro de las herramientas complementarias al AMFE para la determinación de las causas probables de un efecto, se encuentra el diagrama de espina de pescado, diagrama de Ishikawa o diagrama de causa y efecto. Se trata de una herramienta de análisis de causa raíz que representa la relación entre un efecto (problema) y todas las posibles causas que lo ocasionan.

Busca determinar todos los posibles causantes del efecto mediante un diagrama que integra las distintas aristas a las que está ligada el sistema a analizar. Así mismo, en cada ítem de análisis existen subdivisiones que permiten ahondar en el análisis de las causas.

Esta herramienta permite determinar todas las posibles causas que pueden generar un efecto indeseado, y de esa forma, evitar o reducir la posible aparición de modos de falla en el sistema de análisis.

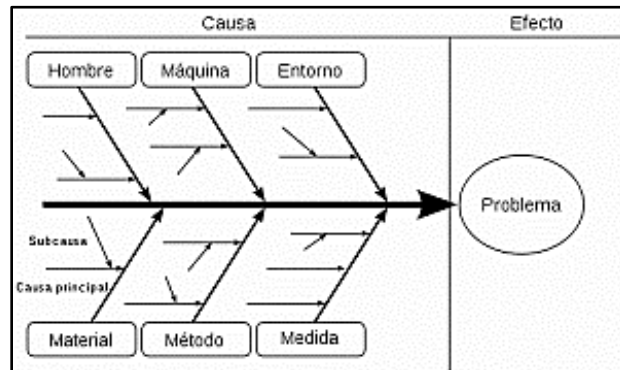


Figura 1.6 – Diagrama de causa y efecto.

1.2.6. Planificación y Control del Mantenimiento

Las tareas de mantenimiento en un ciclo corto del trabajo de mantenimiento consideran tres actividades claves:

a) Programación del Mantenimiento

Se deben incorporar todas las actividades de mantenimiento, considerando para ello las necesidades de producción en la escala temporal y el coste de oportunidad para el negocio durante la ejecución de las tareas. La programación de las actividades de mantenimiento pretende optimizar la asignación de recursos tanto humanos como materiales, así como minimizar el impacto en la producción. La programación del mantenimiento debe efectuarse a corto, mediano y largo plazo.

b) Ejecución del Mantenimiento

Se refiere las actividades propias, características de los procesos e intervenciones físicas y operativas de las tareas de mantenimiento sobre los activos, con el fin de impedir que deje de cumplir su función. Cumpliendo con los procedimientos y estándares de ejecución.

c) Evaluar y Controlar la Ejecución del Mantenimiento

La ejecución de las actividades de mantenimiento, una vez diseñadas, planificadas y programadas tal y como se ha descrito en apartados anteriores, debe ser evaluada y las desviaciones controladas para perseguir continuamente los objetivos de negocio y los

valores estipulados para los indicadores de mantenimiento seleccionados por la organización.

El diseño del sistema de información está encaminado a recoger y procesar los datos precisos para satisfacer las necesidades de información que lleven a alcanzar los objetivos básicos de la gestión de mantenimiento, que son el aumento de la eficacia y la disminución de costos.

1.2.7. Evaluación y Control de la Ejecución del Mantenimiento

El insumo en esta etapa es la información proveniente de la evaluación y control de la ejecución de las tareas de mantenimiento, para luego continuar con el ciclo de mejora continua. Siguiendo la secuencia presentada en la Figura 1.3 (p.19), las ejecuciones de los trabajos planificados previamente arroja una data histórica utilizada para el proceso de análisis, lo cual permite un mejoramiento constante de los planes de mantenimiento.

La data histórica puede ser utilizada como parámetro de control de las acciones establecidas en el mantenimiento de activos y ser replicable en otras áreas de la empresa. Permite que la información extraída en el seguimiento de las acciones sea medible y con ello, facilitar la toma de decisiones a nivel gerencial.

Así mismo, permite reiniciar el reinicio del ciclo de mejora continua mediante el análisis de la información medida en el proceso, según el rango de tiempo de estudio.

1.2.7.1. Indicadores de Medición del Mantenimiento

Para medir el estado actual de los procesos en base al mantenimiento, existen tres indicadores principalmente utilizados: disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad, con los cuales se determinarán las futuras acciones a realizar en el ciclo de mejora continua y así ajustar el modelo de mantenimiento. La forma de cálculo de estos indicadores se explica a continuación:

- ***Confiabilidad***

Es la probabilidad de un activo o componente para realizar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado. La confiabilidad de un componente en un instante de tiempo $R(t)$, corresponde a que dicho ítem realice una función requerida bajo condiciones dadas en un intervalo de tiempo $[0, t]$.

A los equipos se le pueden asignar dos estados en todo instante de su vida: buen funcionamiento y funcionamiento defectuoso. Por lo que a dicho equipo se le puede considerar la probabilidad de encontrarse en un estado u otro.

- *Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)*

El tiempo medio entre fallas indica el intervalo de tiempo promedio entre un arranque y la aparición de una falla; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la aparición de una falla.

Es un indicador representativo de la *Confiabilidad* del componente o equipo. Uno de los parámetros más importantes utilizados en el estudio de la confiabilidad constituye el MTBF, es por esta razón que debe ser tomado como un indicador más que represente de alguna manera el comportamiento de un equipo específico.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo entre fallas}_i}{n^{\circ} \text{ fallas}}$$

- ***Mantenibilidad***

Es definida por la *ISO/DIS 14224*, como la capacidad (o probabilidad en términos estadísticos), bajo condiciones dadas, que tiene un activo o componente de ser mantenido o restaurado en un periodo de tiempo dado a un estado donde sea capaz de realizar su función original nuevamente, cuando el mantenimiento ha sido realizado bajo condiciones prescritas, con procedimientos y medios adecuados.

Es una función del diseño del equipo; factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnóstico, influyen en el cumplimiento del mantenimiento. Para un diseño dado, si las reparaciones se realizan con personal calificado y con herramientas, documentación y procedimientos prescritos, el tiempo de reparación depende de la naturaleza del fallo y de las mencionadas características de diseño.

- *Tiempo Medio Para Reparar (MTTR)*

Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema, siendo un indicador representativo de la *Mantenibilidad*.

Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por una falla, dentro de un período de tiempo determinado. El tiempo promedio para reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo de reparación}_i}{n^{\circ} \text{ fallas}}$$

- **Disponibilidad**

La Disponibilidad es una función que permite estimar el porcentaje de tiempo total en que un equipo estuvo o estará disponible para cumplir la función para la cual fue destinado, en las condiciones de operación requeridas.

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

1.2.8. Análisis del Ciclo de Vida del Activo

En esta etapa se debe valorar la importancia que tiene el ciclo de vida de los activos, la importancia de este concepto está en un enfoque global del mantenimiento destacando el impacto económico del mismo.

En todas las etapas hay decisiones a tomar, información a seguir, costos a evaluar registrar y considerar, repuestos a definir, capacitación de operadores y mantenedores a desarrollar, análisis que hacer referentes a distintos aspectos de la operación y el mantenimiento del activo. La adecuada consideración de todos esos factores es clave en el logro del objetivo de maximizar el *Retorno Sobre los Activos (ROA)* y minimizar el *Costo de Ciclo de Vida (LCC)*, así como lograr la adecuada *Tasa de Retorno Sobre Inversión (TIR)* que viabilicen nuestros proyectos.

1.3. CORREAS TRANSPORTADORAS [3]

Las correas o cintas transportadoras son un sistema de transporte de material formado por una cinta de caucho reforzado que se arrastra mediante fricción entre una polea o tambor motriz y una polea de cola, siendo el movimiento de rotación generado por un motor eléctrico. La correa es soportada por una serie de rodillos o polines instalados entre las poleas, y cumplen la función de soportar y guiar la carga durante el movimiento.

En la actualidad, los transportadores de cinta han alcanzado una posición dominante en el transporte de materiales, debido a las ventajas inherentes como su continuidad de operación, seguridad, confiabilidad, versatilidad, y autonomía. Recientemente, su conformidad a los requerimientos ambientales ha constituido un mayor incentivo para su selección por encima de otros medios de transporte.

1.3.1. Componentes de una Correa Transportadora

Las correas transportadoras cuentan con diversos componentes necesarios para su correcto funcionamiento, los cuales deben cumplir con los parámetros de diseño establecidos, dependiendo de las condiciones de operación en las que se encuentre la cinta.

En la Figura 1.7, se representan los principales componentes de una cinta transportadora, sin embargo, en función de las condiciones de operación, se puede prescindir o añadir algún componente.

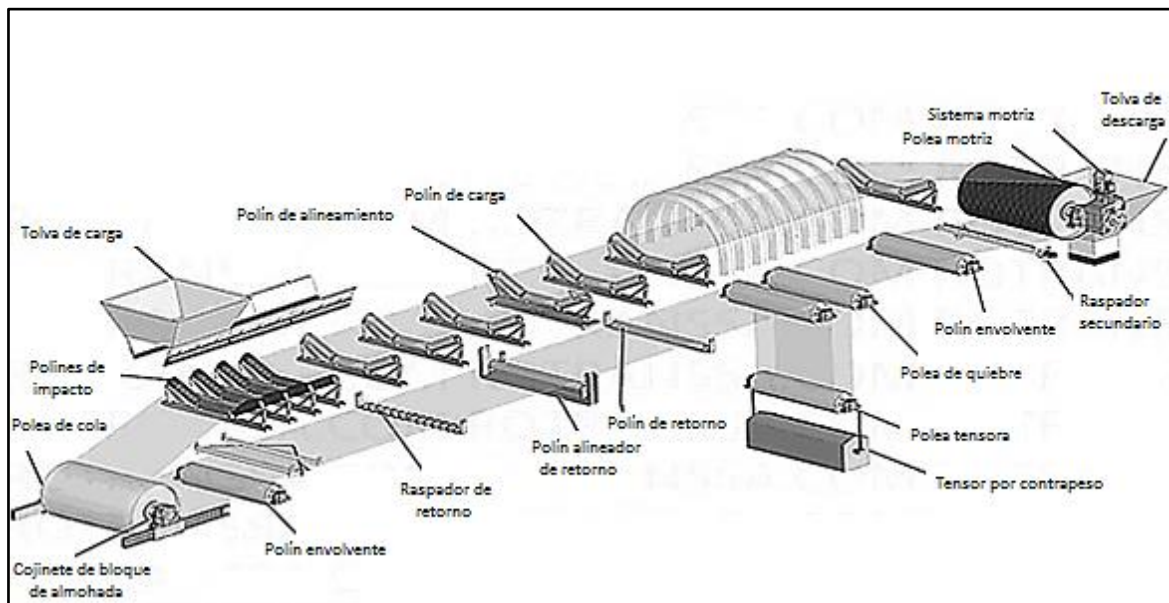


Figura 1.7 - Componentes principales de una correa transportadora.

1.3.1.1. Banda, Cinta o Correa

Es el elemento principal del sistema de transporte de carga, y de su eficiencia depende gran parte del funcionamiento del sistema, ya que debe cumplir, entre otras, con las siguientes funciones:

- Absorber las tensiones desarrolladas en el arranque.
- Absorber la energía de impacto en el punto de carga.
- Resistir efectos térmicos y agentes químicos del material a transportar.
- Cumplir requisitos de seguridad, tales como la resistencia al fuego.

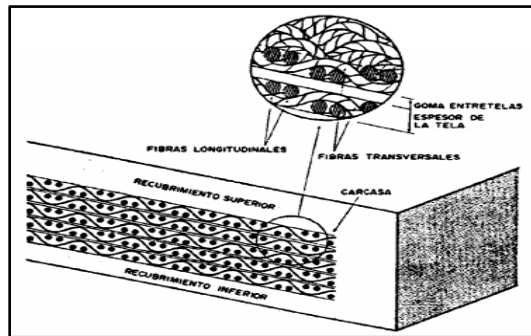


Figura 1.8 - Detalle de elementos en una cinta.

1.3.1.2. Polines

Es el elemento que permite el soporte y guía de la banda, y de su calidad depende en gran medida el buen funcionamiento de la correa transportadora. Si el giro de algún rodillo no es correcto, además de aumentar la fricción y por tanto el consumo de energía, también se producen desgastes en el recubrimiento de la banda, con la consiguiente reducción de la vida útil de esta.

- ***Elementos de un Polín***

- ***Rodamientos***

Los rodamientos más utilizados en la fabricación son los de bolas o esféricos, según la carga de trabajo y las velocidades de rotación. Los rodamientos de bolas tienen una alta capacidad de carga y velocidades en tiempos de duración exigidos, siendo poco sensibles a la falta de alineación.

- ***Sistema de Sellado***

Se encuentra constituido por el conjunto de juntas, ya sean de fricción o de laberintos. De su eficiencia depende la mayor o menor contaminación de la grasa lubricante, afectando la vida útil de los rodamientos, y por tanto del rodillo.

- ***Eje de Giro***

Es un componente sencillo, siendo la precisión y coaxialidad de las zonas de asiento de los rodamientos, las dos condiciones exigidas al mismo. Suelen ser fabricados de aceros al carbono.

○ *Cuerpo del Rodillo*

Se encuentra formado por el tubo cilíndrico y por los extremos o cubos del mismo. Es la parte en contacto directo con la cinta y la que está expuesta a mayor fricción con esta, siendo la principal parte afectada a la abrasión de contaminantes.

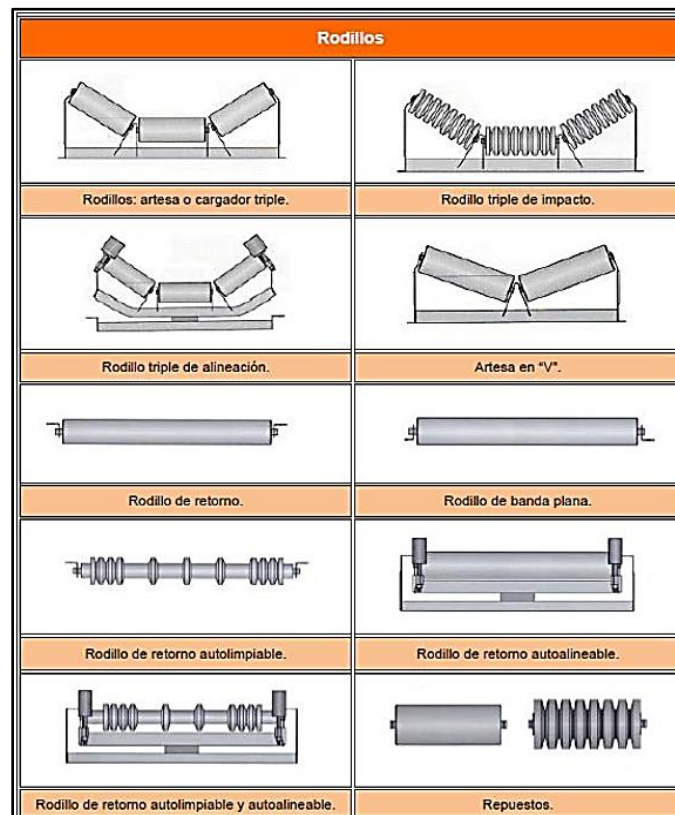


Figura 1.9 - Tipos de polines para cintas transportadoras.

1.3.1.3. Polea o Tambor

Las Poleas son elementos de transmisión de potencia que se encargan de realizar el desplazamiento de la cinta transportadora mediante la tracción por fricción. Es posible agruparlas en: poleas motrices (o de cabeza), poleas conducidas (o de cola), poleas de quiebre (o deflectoras) y poleas Tensoras

Las poleas suelen estar cubiertas de goma, cerámica u otro material, con el objeto de incrementar el coeficiente de fricción entre la banda y la polea, así como también reducir el desgaste de la cara o carcasa de la polea.

- **Elementos de las Poleas**

En la Figura 1.10, se puede visualizar los componentes principales y la disposición de un tambor motriz:

- Envolvente cilíndrica y discos laterales
- Eje
- Tubo mecanizado (carcasa o cuerpo)
- Recubrimientos
- Soporte (bloque de almohada)

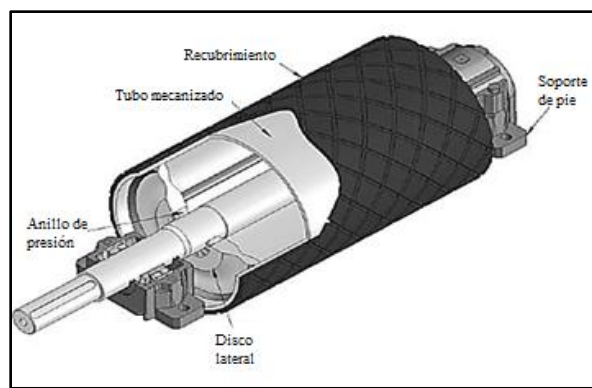


Figura 1.10 - Componentes principales de un tambor o polea.

1.3.1.4. Tensor de Cinta

Los tensores de cinta son un elemento fundamental en los sistemas de cintas transportadoras, pues permiten lograr el adecuado contacto entre cinta y polea motriz para que se efectúe la transmisión de fuerza, impidiendo el patinaje.

Existen muchos tipos de tensores encargados de cumplir la misma función de formas distintas. Se pueden clasificar según su forma constructiva: de lazo sencillo o múltiple; forma de aplicación de fuerza tensora: automática o fija; equipo mecánico que aplica la fuerza: contrapeso gravitacional, husillo, huinche manual fijo, huinche eléctrico fijo o huinche eléctrico automático; o se puede clasificar por la ubicación del equipo de tensado: en la cabeza o en la cola.

1.3.1.5. Raspador de Limpieza

La limpieza de las cintas transportadoras es un problema de gran importancia económica. El principal problema que se presenta es la *fugitividad*, tendencia del material a

escaparse de la vía principal. Esta se presenta principalmente en los lugares donde se cambia la dirección del flujo del material, tales como tolvas o guías de carga y descarga.

1.3.1.6. Motor Eléctrico

Junto con los acoplamientos, reductor de velocidad, mecanismos anti-retorno, constituyen el grupo motriz, encargado de dar el movimiento a la correa transportadora.

El motor, el reductor y el freno, se encuentran unidos en una bancada. En motores de baja potencia, el motor y el reductor forman una sola unidad, eliminándose la bancada.

En correas transportadoras se utilizan principalmente motores de corriente alterna, de jaula de ardilla y de rotor bobinado.

- **Motor Asíncrono, Rotor Jaula de Ardilla**

Se denomina así debido al tipo de rotor presente, el que se asemeja a una jaula. Los devanados inductores en el estator de un motor de inducción, incitan al campo magnético a rotar alrededor del rotor. Las corrientes alternadas que fluyen longitudinalmente en los conductores reaccionan con el campo magnético del motor produciendo una fuerza que actúa tangente al rotor, dando por resultado un esfuerzo de torsión para dar vuelta al eje.

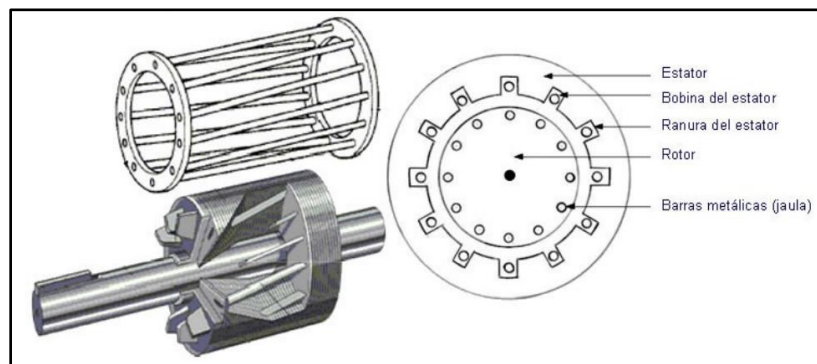


Figura 1.11 - Motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla.

- **Motor Asíncrono, Rotor Bobinado**

En la franja de trabajo, la variación del par es prácticamente lineal; es posible controlar el par en el arranque mediante resistencias rotóricas. Son adecuados también para su uso en cintas descendentes.

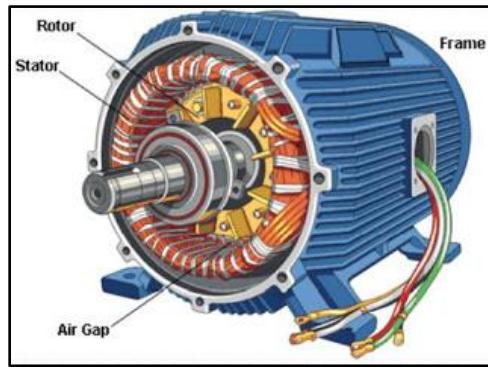


Figura 1.12 - Motor trifásico formado por un rotor bobinado.

1.3.1.7. Reductor de Velocidad

Los reductores de velocidad o cajas reductoras de velocidad, son equipos que disminuyen la velocidad de giro de salida del motor de accionamiento aumentando a su vez el par-torque, mediante una configuración especial de engranajes, según el tipo de reductor que se presente. Al aumentar el par-torque se permite el giro de la polea motriz, y por tanto, se efectúa el movimiento de la cinta transportadora.

Adicionalmente, los reductores disponen de un sistema de lubricación, con la finalidad de reducir el roce entre engranajes y refrigerarlos. El sistema de lubricación de los reductores puede ser *auto-sustentado*, el aceite se acumula en el fondo del reductor; o *asistido*, el aceite se acumula en el fondo del reductor, pero se inyecta en los engranajes por recirculación. Los reductores se pueden clasificar por la tipología de sus engranajes, las clasificaciones más usuales son: sin fin-corona; engranajes; planetarios y cicloidales:

- **Reductores de Velocidad Sinfín-Corona**

Se compone de una corona dentada comúnmente de bronce en cuyo centro se ha embutido un eje de acero, Esta corona está en contacto permanente con un husillo de acero en forma de tornillo sinfín. Una vuelta del tornillo sinfín provoca el avance de un diente de la corona y en consecuencia la reducción de velocidad. La reducción de velocidad de una corona sinfín se calcula con el producto del número de dientes de la corona por el número de entradas del tornillo sinfín.

- **Reductores de Velocidad de Engranajes**

Los reductores de engranajes son aquellos en que toda la transmisión mecánica se realiza por pares de engranajes de cualquier tipo excepto los basados en tornillo sin fin. Sus ventajas son el mayor rendimiento energético, menor mantenimiento y menor tamaño.

Cabe considerar además, que estos tipos de reductores son los utilizados en la Planta Molienda Convencional.

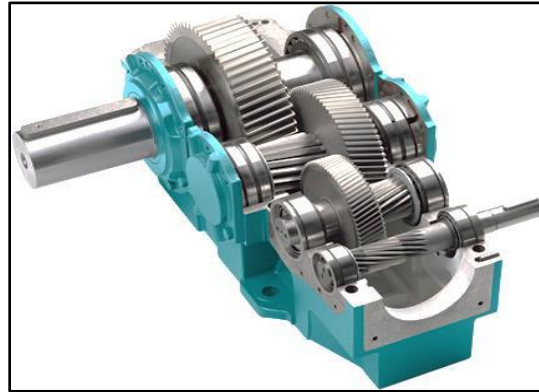


Figura 1.13 - Reductor de velocidad de engranajes.

- ***Reductores Cicloidales***

En los reductores cicloidales, el eje de alta velocidad soportado en la tapadera posterior mueve un rodamiento excéntrico que está en el corazón del reductor; este rodamiento excéntrico es la única pieza junto con el eje de alta velocidad que rota a la velocidad alta. El rodamiento empuja los discos cicloidales hacia la circunferencia interior de los casquillos y pines estacionarios. La acción que resulta es similar a una rueda rotando dentro de un anillo, la rueda (el disco cicloidal) al recorrer un sentido horario dentro del anillo (carcasa de pines), rota lentamente en su propio eje en el sentido contrario generando una rotación inversa que reduce la velocidad.

- ***Reductores de Velocidad Planetarios***

Constituidos por engranajes externos que rotan sobre un planeta o engranaje central, suelen ser montados sobre una especie de brazo móvil ideado precisamente para facilitar la rotación y de ser el caso incluir un engranaje anular o corona.

Los engranajes que componen este reductor reciben distintos nombres según la función y la disposición que poseen.

- *Sol*: Engranaje central a partir del cual los restantes engranajes *orbitan*.
- *Porta-planetas*: Es la pieza que sujeta los engranajes, los cuales deben ser de igual tamaño.
- *Corona o anillo*: Corresponde a un elemento externo con dientes que logra engranar con el o los planetas.

Una vez que el motor transmite su fuerza a este mecanismo, es cuando se facilitan los cambios de marcha, para ello es propio que el motor comparta algo de su fuerza con el engranaje central y así pueda desencadenarse el giro de la corona, el resultado no será otro que el poder disponer de un continuo cambio de marcha y el poder incluso ir hacia atrás manteniendo siempre el correspondiente control sobre la máquina.

1.3.1.8. Bloque de Almohada

Los soportes de pie o bloques de almohada son fabricados en fundición de hierro, acero o termoplástico. Su diseño constructivo permite alojar, para un mismo modelo, distintos tipos de rodamientos y obturaciones.

Su principal ventaja es que en ellos se pueden instalar ejes pre-montados, agilizando el montaje y desmontaje en múltiples aplicaciones industriales. Es decir, se monta el rodamiento en el eje, y luego éste se monta sobre el soporte, posicionando los accesorios pertinentes y finalmente apernando la tapa del soporte.

Cabe mencionar, que los soportes de pie se fabrican en dimensiones métricas e imperiales, los que son designados por los prefijos SNL y SAF, respectivamente.

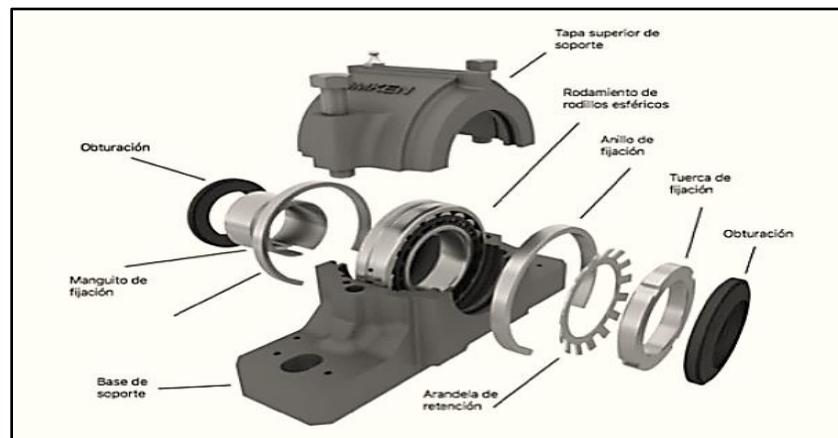


Figura 1.14 - Conjunto de soporte de pie, manguito y rodamiento, utilizados en ejes de poleas.

1.4. LUBRICACIÓN [4]

La lubricación es una de las ramas de estudio de la *Tribología*, ciencia que se encarga de estudiar la fricción, el desgaste y la lubricación que tiene lugar entre dos superficies en movimiento relativo. Es un proceso que busca el aumento de la vida útil de los componentes mediante la aplicación de un lubricante entre dos superficies en movimiento relativo y por ende el aumento de la Confiabilidad de un sistema. Los efectos de la lubricación se pueden describir, resumidamente, de la siguiente manera:

- Reducción de fricción y desgaste: Se impide o reduce el contacto metálico directo entre dos superficies en movimiento relativo por medio de una película lubricante.
- Aumento de vida útil: La vida útil de los elementos, depende ampliamente de la viscosidad y grosor de la película en las zonas de contacto. Una película de mucho grosor puede prolongar la vida frente a la fatiga pero puede provocar el efecto de *fricción fluida*; en tanto una viscosidad de aceite demasiado baja o un grosor de película insuficiente, puede no cumplir la función protectora de los elementos.
- Disipación del calor por fricción: Al existir una película lubricante entre las dos superficies en contacto, el calor se disipa hacia el lubricante, generando una barrera protectora de temperatura.

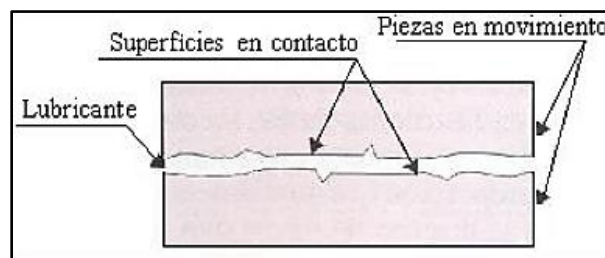


Figura 1.15 - Película de lubricante entre dos superficie en contacto.

1.4.1. Viscosidad

La viscosidad, es la medida de la resistencia que ofrece un aceite o líquido cualquiera a fluir. De esta manera, lubricantes de baja viscosidad o ligeros, fluyen rápidamente porque su fricción interna presenta poca resistencia; por el contrario, lubricantes de elevada viscosidad o pesados fluyen lentamente debido a que su fricción interna presenta gran resistencia.

Se le conoce comúnmente como “cuerpo del lubricante” y es una de las más importantes características de los aceites, pues influye directamente en la formación de la película lubricante y, por consiguiente, en la lubricación adecuada de cualquier elemento. Además, ejerce su influencia en la periodicidad de lubricación y en la forma o dispositivos que se empleen para tal objeto.

1.4.2. Factores que Afectan la Selección del Lubricante

1.4.2.1. Velocidad

Previamente se vio como la lubricación hidrodinámica tipo cuña de aceite es dependiente principalmente de la velocidad relativa entre dos superficies. Sin embargo, se presenta un efecto secundario llamado *fricción fluida* que es tanto mayor, cuanto mayor es la viscosidad o cuerpo del lubricante; consiguientemente, siempre que la velocidad relativa de las superficies en movimiento sea elevada, habrá una mayor facilidad para formarse la cuña de aceite, por lo tanto, un aceite ligero será suficiente. Por otra parte, cuando la velocidad relativa es muy baja, la deficiencia en la formación de la cuña de aceite deberá ser suplida mediante un aceite muy viscoso, dificultando ser comprimido y protegiendo mejor las superficies.

1.4.2.2. Carga

Cuando existe una carga elevada que tiende a juntar dos superficies en movimiento, una mayor viscosidad del lubricante soportará mejor la acción de compresión que esa carga ejerce. Por el contrario, si se trata de un cojinete pequeño que soporta una baja carga, será indispensable un aceite de muy baja viscosidad para permitir el libre movimiento de las partes y menos pérdida de potencia por fricción fluida.

1.4.2.3. Temperatura

La temperatura influye directamente modificando la viscosidad de los aceites. Todo lubricante al ser calentado sufre un adelgazamiento o disminución de viscosidad; el enfriamiento produce el efecto contrario. De acuerdo con esto, al seleccionar un lubricante deberá tenerse en cuenta la temperatura ambiente o de operación del lugar en que va a trabajar y así, si el ambiente es cálido, se deberá emplear un aceite muy viscoso, no obstante que la velocidad sea alta y la carga ligera, pues la temperatura se encargará de dar al aceite la fluidez necesaria.

1.4.3. Factores que Afectan la Acción del Lubricante

1.4.3.1. Contaminación

Si se pudiera conservar en excelentes condiciones de limpieza el lubricante, éste podría permanecer trabajando en los sistemas de lubricación por circulación por considerable tiempo; sin embargo, debido a la contaminación, es necesario desechar la

carga de aceite por ser el medio más sencillo y económico de eliminar los contaminantes para que no ocasionen daños.

Algunos de los contaminantes más comunes son el polvo, material particulado, agua, fluidos para el corte de metales y solventes. Estos contaminantes ocasionan serios daños en la maquinaria, tales como desgaste abrasivo, formación de depósitos que puedan intervenir con la distribución correcta o que puedan acortar la vida del lubricante.

1.4.3.2. Métodos de Aplicación

En la práctica existen varios métodos de aplicación de los lubricantes, los cuales dependen del diseño de la máquina o del componente por lubricar; de las cargas que transmiten, de su operación, de su eficiencia, entre otras. Entre las más utilizadas están:

- ***Sistemas de Circulación***

Es un sistema frecuentemente usado, el cual implica un abundante flujo de lubricante a las partes por lubricar. Generalmente está formado por una bomba que da presión y velocidad al lubricante y a través de conductos lo aplica en los puntos necesarios de la máquina; de aquí generalmente escurre un depósito en donde es tomado nuevamente por la bomba para iniciar un nuevo ciclo.

- ***Aplicación Manual***

Cuando se utiliza este tipo de aplicación, no es del todo eficiente, puesto que no se puede lograr una alimentación regular, continua, controlada, y normalmente se expone a los componentes y al lubricante a elevada contaminación. Habitualmente, recién aplicado el lubricante, se encuentra en abundancia y la protección es considerable, pero al irse escapando el lubricante, la fricción aumenta.

Por lo tanto, si la cantidad o la frecuencia de aplicación son inadecuadas, puede ocurrir desgaste severo, un consumo excesivo de fuerza y elevación de temperatura de los cojinetes, los cuales pueden fallar por barrido o atascamiento.

- ***Aplicación Mediante Dispositivos***

Otro tipo de lubricación a película delgada, es el uso de dispositivos para la aplicación continua de éste, como es el caso de las botellas aceiteras, copas con mecha o copas graseras de resorte, o lubricadores electromecánicos. Estos dispositivos presentan ventajas al alimentar de manera constante y automática, pequeñas cantidades de lubricante, el cual después de actuar se escurre. Estos dispositivos deben recibir pulcritud en la instalación y mantenimiento –revisión, limpieza, reparación–, dado que debido a la automatización del sistema, se suele descuidar hasta su próximo cambio.

1.4.3.3. Lugar de aplicación

El lugar o punto de aplicación también tiene relación con el buen desempeño del lubricante, dado que las presiones máximas y las cargas no siempre se encuentran en el lugar de aplicación, por lo que es conveniente proveer de ranuras o canaletas axiales para mejorar la distribución del aceite, intentando tallarlas sin llegar a los extremos, de manera de evitar la fuga de lubricante.

1.4.4. Tipos de Lubricantes

Los distintos tipos de lubricantes se dividen inicialmente en lubricación por *grasa* o *aceite*. Cada tipo de lubricante posee sus respectivas ventajas o desventajas, que dependerán de la exigencia de la aplicación.

1.4.4.1. Lubricación con Grasa

La grasa presenta diversas ventajas con respecto al aceite; requiere un sistema más sencillo y económico, mejor adhesión, protección contra la humedad y los contaminantes del ambiente de trabajo.

Las grasas lubricantes poseen forma semilíquida y están constituidas, en relación a los siguientes componentes:

- Aceite base: 70 - 90%
- Espesante: 5 - 30%
- Aditivos: 1 - 5%

- ***Aceite Base***

Las propiedades lubricantes de la grasa dependen principalmente de las características de su aceite base. De esta manera, la viscosidad del aceite base es una de las características más importante al momento de seleccionar el lubricante adecuado.

Normalmente las grasas fabricadas con una baja viscosidad, son utilizadas en aplicaciones de alta velocidad y baja temperatura, mientras que una alta viscosidad es adecuada en aplicaciones donde la velocidad es baja y las cargas son grandes.

Los aceites minerales o sintéticos, tales como la *silicona* o el *aceite diéster*, son ejemplos de aceites bases para las grasas.

- ***Espesante***

La función del espesante, es proporcionar una red tridimensional que retiene el lubricante entre sus poros.

Más del 90% de los espesantes existentes corresponden a un jabón metálico. Este jabón metálico actúa como una esponja, es decir, el jabón forma una malla de fibras jabonosas que están llenas de aceite base. El espesante libera el aceite base a medida que la temperatura y la carga aumenta.

- **Aditivos**

Con la finalidad de mejorar el rendimiento del lubricante en los rodamientos, se agregan distintos tipos de aditivos, dependiendo de las exigencias que requiera la aplicación.

Existen –entre otros– aditivos para: extra presión (EP), antidesgaste (AW), antioxidantes e inhibidores de corrosión.

- **Viscosidad del Aceite Base**

La viscosidad del aceite es la propiedad básica más importante, de la cual resulta la capacidad de carga de la película de aceite al existir rozamiento líquido. Desde un punto de vista práctico, se puede definir como la resistencia a fluir, es por lo tanto una medida de la fricción interna de un lubricante. La viscosidad es una función inversamente proporcional a la temperatura, a mayor temperatura decrece la viscosidad de un lubricante y viceversa.

La unidad internacional para medir la viscosidad cinemática es en $[\text{mm}^2/\text{s}]$, o también llamado *CentiStoke* (cSt). La medición de la viscosidad referencial se realiza a 40°C .

- **Consistencia**

La consistencia es el grado de rigidez de una grasa. Se clasifica de acuerdo a la escala del *Instituto Nacional de Grasas Lubricantes de los Estados Unidos* (NLGI), por grados de consistencia. La medición de la consistencia se realiza mediante un cono impulsado por un peso específico, el cual penetra en la grasa durante 5 segundos. La profundidad de penetración se expresa en unidades de $1/10$ [mm].

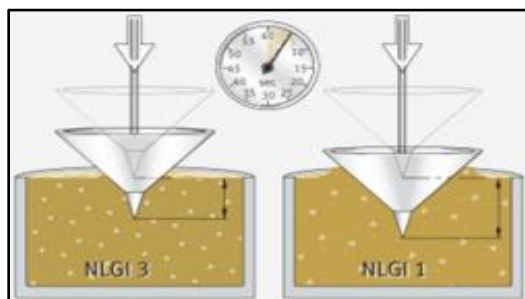


Figura 1.16 - Medición del grado de consistencia en grasas.

- ***Temperatura de Trabajo***

Es importante seleccionar una grasa que admita las temperaturas adecuadas según sea la aplicación. A altas temperaturas muchas grasas se “ablandan”, y contrariamente cuando las temperaturas son bajas, las grasas se vuelven rígidas que fallan en la misión de lubricar.

En el caso de las grasas con aceite base mineral, las temperaturas admisibles van desde -30° a 110°C. No obstante, el tipo de espesante juega un papel importante en el rango de temperaturas. Por otro lado, una grasa con aceite base sintético tiene un mejor rendimiento, con temperaturas admisibles entre -50° a 150° C.

- ***Punto de Goteo***

El punto de goteo de una grasa lubricante, corresponde a la descomposición de su estructura cuando la grasa comienza a disolverse al superar una temperatura específica. Es decir, la temperatura a la cual se produce la licuación se llama punto de goteo. Cuando la grasa se enfría, se endurece gradualmente, perdiendo sus cualidades lubricantes.

Por lo tanto, el punto de goteo es una referencia que indica la temperatura a la cual puede ser utilizada la grasa, aunque hay muchos otros factores que se deben tener en cuenta, como el tipo de espesante y aceite base. La grasa no debe ser trabajada a la temperatura de su punto de goteo, sino que por debajo de éste, entre 20 a 40°C.

1.4.4.2. Lubricación con Aceite

El aceite es el lubricante apropiado cuando la velocidad y/o las condiciones de funcionamiento no permiten usar grasa o cuando es necesario evacuar el calor; muchas veces se emplea aceite debido a los requisitos de otros componentes, es decir, obturaciones, engranajes, cojinetes lisos, entre otros.

La selección de un lubricante depende del rango de temperaturas de operación, la velocidad de rotación, y de las condiciones ambientales y de funcionamiento.

Cabe destacar que aproximadamente el 90% de los rodamientos se lubrican con grasa. La ventaja de la grasa respecto al aceite, es que es más fácil de retener en la disposición de rodamientos, y también ayuda a obturar contra los contaminantes, la humedad o el agua.

Por otra parte, el aceite ofrece una mejor lubricación para mayores velocidades de giro y mayor capacidad para evacuar el calor. No obstante, requiere un mantenimiento más cuidadoso y es más costoso de implementar.

- ***Tipos de Aceites***

Los aceites lubricantes pueden ser de dos tipos: *Minerales* o *Sintéticos*. Ambos presentan características particulares según el tipo de aplicación en las que sean requeridos, las cuales se presentan a continuación:

- a) *Aceites Minerales*

En la mayoría de los casos, para condiciones ambientales estables y regulares, los aceites minerales de alta calidad son los lubricantes más adecuados. Deben ser puros, libres de compuestos inestables como nitrógeno, oxígeno, compuestos de azufre y ácidos.

- b) *Aceites Sintéticos*

Los aceites sintéticos son mayormente necesarios para la lubricación de elementos en casos especiales. Principalmente utilizados cuando las temperaturas de operación son sobre 90°C, o a temperaturas muy bajas, con cargas de operación elevadas, o altas velocidades de rotación.

Además, poseen mayor estabilidad mecánica en el uso, menor fricción interna, mayor fluidez a temperaturas ambiente y bajas, y garantizan una película lubricante más resistente en condiciones críticas de cargas.

- ***Aditivos***

Los aceites lubricantes, tanto minerales como sintéticos, pueden incluir aditivos que mejoran sus propiedades, y entre los más importantes que aumentan el rendimiento de un aceite lubricante, se encuentran:

- a) *Antioxidantes*

Los aceites expuestos a altas temperaturas y en contacto con el aire se oxidan, formando compuestos químicos indeseados, que pueden incrementar la viscosidad del aceite y causar corrosión. Estos aditivos mejoran la estabilidad a la oxidación del aceite entre 10 a 150 veces.

- b) *Protectores Contra Corrosión*

Existen dos tipos de aditivos que ofrecen protección contra la corrosión: aditivos solubles en agua –por ejemplo: nítrico sódico–, y aditivos solubles en aceite.

- c) *Anti-Espumantes*

La formación de espuma es la forma más grave de la contaminación de aire en un sistema de lubricación. Esto suele ocurrir cuando la tensión superficial del fluido es demasiado alta para permitir que las burbujas de aire se rompan después de que se forman y

suben a la superficie del fluido. Si el aceite forma espuma, su capacidad de formación de película lubricantes decrecerá, disminuyendo la capacidad de carga.

d) Anti-Desgaste

Se utilizan para reducir el contacto metálico cuando la película lubricante se rompe. Se emplean distintos compuestos químicos, que forman una capa superficial con buenas propiedades que dan lugar a una mayor presión superficial de la película de aceite.

e) Extra Presión (EP)

Estos aditivos están compuestos por fósforo, cloro y azufre. Cuando las crestas de las superficies metálicas están en contacto, la temperatura que se alcanza es muy alta, de tal manera que los compuestos EP reaccionan formando un compuesto químico con las superficies metálicas.

1.4.5. Clasificación de los Lubricantes

Debido a la gran cantidad de lubricantes que se fabrican actualmente, se han desarrollado clasificaciones o normas que delimitan el uso y la aplicación de los mismos. Estas normas se van actualizando constantemente para adaptarlas a las continuas innovaciones tecnológicas. A continuación se presentan las clasificaciones de viscosidades más reconocidas:

1.4.5.1. Clasificación de Viscosidad SAE

La *Sociedad de Ingenieros Automotrices* de los Estados Unidos (SAE por sus siglas en inglés), estableció una clasificación de viscosidad para los lubricantes desarrollados para su uso en motores de combustión interna.

Cuando un lubricante es formulado para cumplir con sólo uno de los requisitos de la tabla, es decir, baja temperatura (W, invierno) o alta temperatura (verano), se dice que este aceite es un *monogrado* (por ejemplo: SAE 30). Por otro lado, cuando un aceite cumple con un grado de invierno y uno de verano, se dice que es *multigrado* (por ejemplo: SAE 10W-30); es decir, este aceite se comporta como un SAE 10W a bajas temperaturas y como un SAE 30 en altas temperaturas.

La determinación de viscosidad de aceites para motores se mide con la tabla 1.2 de viscosidades SAE de acuerdo a la *Norma SAE J300-2015*. Esta tabla clasifica las viscosidades de acuerdo a su viscosidad cinemática a 100°C y 40°C:

SAE J300 - Revisión Enero 2015					
Viscosidad SAE	Arranque en Frío (cP)	Bombeabilidad en Frío (cP)	Mínima Cinemática (cSt)	Máxima Cinemática (cSt)	Cizallamiento en alta temperatura (cP)
0W	6,200 a -35°C	60,000 a -40°C	3.8	-	-
5W	6,600 a -30°C	60,000 a -35°C	3.8	-	-
10W	7,000 a -25°C	60,000 a -30°C	4.1	-	-
15W	7,000 a -20°C	60,000 a -25°C	5.6	-	-
20W	9,500 a -15°C	60,000 a -20°C	5.6	-	-
25W	13,000 a -10°C	60,000 a -15°C	9.3	-	-
8	-	-	4	<6.1	1.7
12	-	-	5	<7.1	2.0
16	-	-	6.1	<8.2	2.3
20	-	-	6.9	<9.3	2.6
30	-	-	9.3	<12.5	2.9
40	-	-	12.5	<16.3	3.5 [0W-40, 5W-40, 10W-40]
40	-	-	12.5	<16.3	3.7 [15W-40, 20W-40, 25W-40, 40 monogrado]
50	-	-	16.3	<21.9	3.7
60	-	-	21.9	<26.1	3.7

Tabla 1.2 - Grados de Viscosidad según Norma SAE J300 – Revisión Enero 2015.

1.4.5.2. Clasificación de viscosidad AGMA

La clasificación de aceites industriales más utilizada es la establecida en conjunto por AGMA (*Asociación Americana de Manufactureros de Engranajes*) que clasifica los aceites industriales para engranajes, clasificándose de acuerdo a las siguientes tablas:

Tipos de aceites para engranajes semi-cerrados o abiertos	Formulación
R&O (herrumbre y corrosión)	El aceite mineral contiene inhibidores de oxidación y corrosión como aditivos
EP (extra presión)	El aceite mineral contiene agentes para extrema presión como aditivo.
Compuesto Diluido	Aceite mineral de alta viscosidad o aceite EP diluido con solventes volátiles no inflamables (dilución con solvente)

Tabla 1.3 - Clasificación AGMA de aceites para engranajes cerrados en aplicaciones industriales.

- Los aceites para engranajes R&O son formulados para contener, como aditivos, inhibidores de herrumbre y de oxidación. Es distribuido como aceite multiuso para diversas aplicaciones.
- Los aceites para engranajes EP contienen agentes de extrema presión tales como aditivos S-P, y son más utilizados que cualquier otro tipo de aceite para engranajes.
- Los aceites para engranajes compuestos y los aceites para engranajes sintéticos se utilizan en aplicaciones especiales.

Nº Lubricante AGMA	Rango de viscosidad cSt [mm ² /s] @ 40°C
1	41.4 – 50.6
2	61.2 – 74.8
3	90 – 110
4	135 – 165
5	198 – 242
6	288 – 352
7	414 – 506
8	612 – 748
8A	900 – 1100

Tabla 1.4 - AGMA 250.04 Rangos de viscosidad para lubricantes.

1.4.5.3. Clasificación de viscosidad ISO

La *Organización Internacional para la Estandarización (ISO)* estableció desde 1975 el sistema ISO para especificar la viscosidad de los aceites industriales, pero sólo hasta 1979 fue puesta en práctica por la mayoría de los fabricantes de lubricantes. El sistema ISO clasifica la viscosidad de los aceites industriales en [cSt] a 40°C, mediante un número estándar que se coloca al final del nombre del aceite industrial.

Este sistema pretende reducir las posibilidades de que el usuario se equivoque en la selección del aceite a utilizar o que mezcle lubricantes de diferentes viscosidades; facilita además hallar de manera inmediata el equivalente en viscosidad de un aceite con otro puesto que el nombre del aceite debe traer al final el grado ISO correspondiente.

La tabla de viscosidad DIN 51519 determina la viscosidad ISO. Clasifica los aceites industriales de acuerdo a su viscosidad a 40°C, permitiendo 10% para límites de viscosidad:

Grado de viscosidad ISO VG	Viscosidad cinemática media cSt @ 40°C	Límite inferior cSt @ 40°C	Límite superior cSt @ 40°C
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.00	11.00
15	15	13.50	16.50
22	22	19.80	24.20
32	32	28.80	35.20
46	46	41.40	50.60
68	68	61.20	74.80
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	2420
3200	3200	2880	3520

1.4.6. Relación de Viscosidad Entre las Distintas Clasificaciones.

Si bien las clasificaciones de lubricantes están hechas en base al uso que estos tengan, se pueden relacionar en base a la viscosidad. En la tabla 1.6 se muestra la relación de equivalencia entre las diferentes clasificaciones de lubricantes.

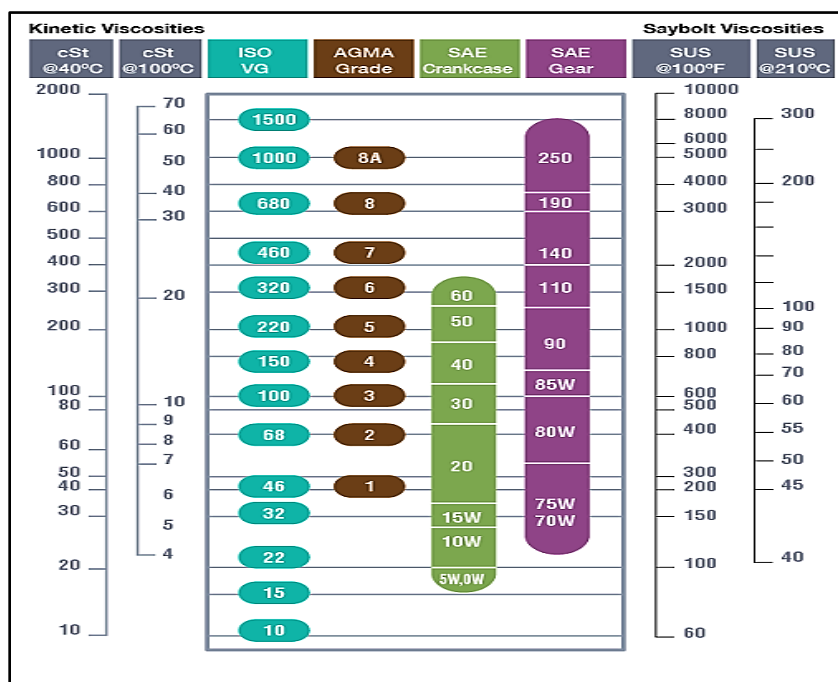


Tabla 1.6 - Equivalencias de viscosidades.

2. CONTEXTO OPERACIONAL

2.1. CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE

La Corporación Nacional del Cobre es una empresa estatal chilena, cuyo negocio se centra principalmente en la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y sus subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización.

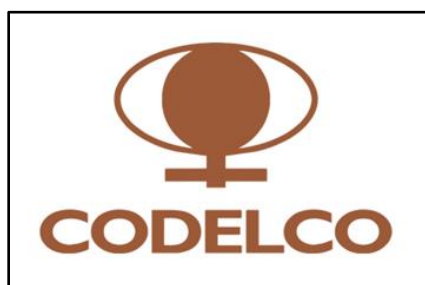


Figura 2.1 - Corporación Nacional del Cobre.

Codelco es el mayor productor de cobre de mina del mundo, logrando en el año 2018 una producción de 1.677.554 [tmf] (toneladas métricas de cobre fino) equivalente al 10% de la producción global de cobre de mina y a un 33% de la producción nacional aproximadamente.

Concentra el 9% de las reservas globales de cobre, y es también el segundo mayor productor mundial de molibdeno de mina, alcanzando una producción total de 28.674 [tmf] en el año 2018, equivalente al 46% de la producción nacional de molibdeno.

La corporación tiene activos por un total de 36.356 [MUSD] y un patrimonio que a fines de 2018 ascendió a 10.925 [MUSD], siendo su principal productor comercial los cátodos de cobre grado A (Memoria Anual, 2017).

La compañía ejecuta sus operaciones a través de siete divisiones mineras: Radomiro Tomic, Chuquicamata, Ministro Hales, Gabriela Mistral, Salvador, Andina, Fundición y Refinería Ventanas, y la división El Teniente, en la cual se desarrolla el presente trabajo. Su estrategia corporativa es coordinada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile.

2.2. DIVISIÓN EL TENIENTE

La División El Teniente está ubicada en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes, entre los 2.200 y los 3.200 metros sobre el nivel del mar. Está distante a 54 kilómetros de Rancagua, capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

Es la mina subterránea de cobre más grande del mundo y entre sus unidades productivas destacan los yacimientos Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y Teniente 4 Sur.

También tiene una operación en superficie, el Rajo Sur, ubicado entre 2.730 y 3.240 metros sobre el nivel del mar, que entró en funcionamiento a fines del año 2012.

Durante el año 2018, El Teniente alcanzó una producción de 464.000 [tmf], que es comercializado a través de ánodos que se generan en la Fundición de Caletones.



Figura 2.2 - Divisiones de Codelco.

2.2.1. Proceso Productivo

En la división El Teniente, el proceso productivo para obtener el producto final como ánodos de cobre y lingotes refinados a fuego (RAF) desde la extracción en mina subterránea, hasta su posterior exportación en el puerto de San Antonio, está representado en la Figura 2.3 y consta de tres principales etapas: *Extracción*, *Concentración* y *Fundición*.

Como subproductos del proceso productivo de extracción de cobre, se obtiene molibdeno, ácido sulfúrico, plata y oro.

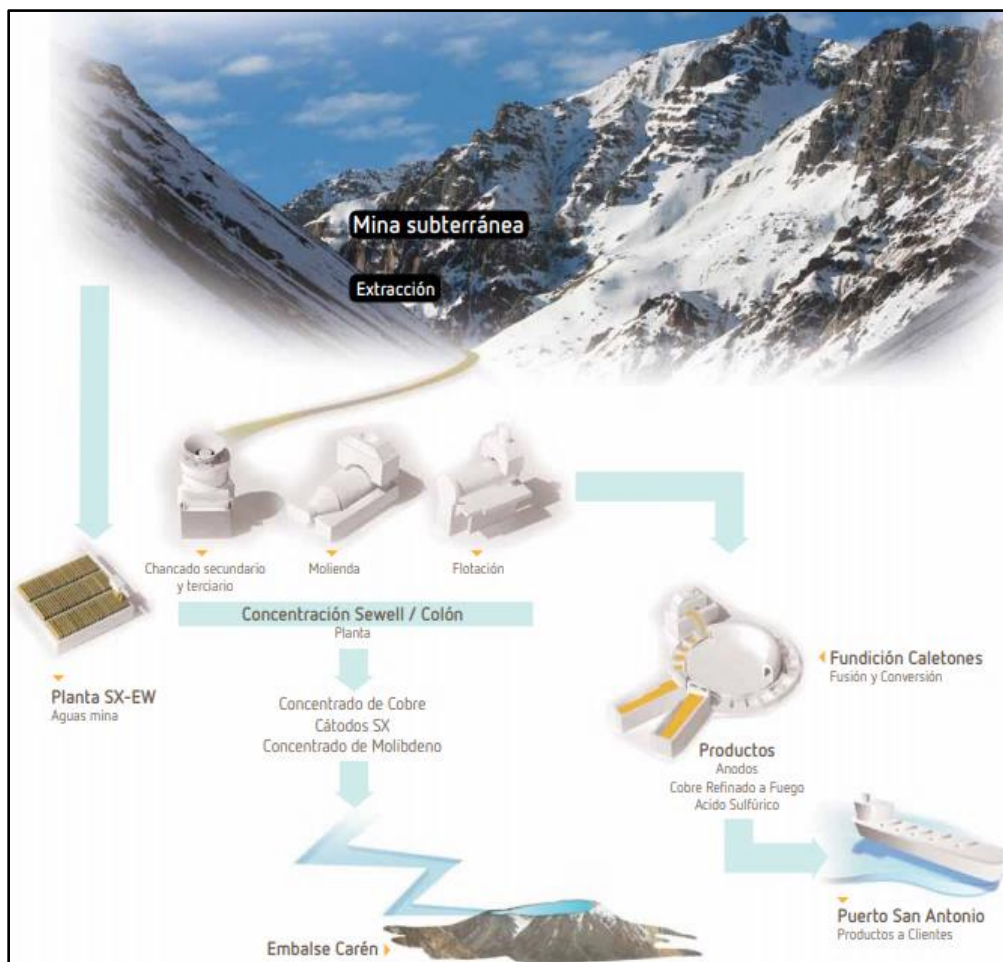


Figura 2.3 - Proceso productivo del cobre en la división El Teniente.

2.2.1.1. Extracción

Se emplea el método de explotación por hundimiento, que consiste en socavar mediante explosiones la base de columna del cerro –del tamaño aproximado de un edificio de cincuenta pisos– para que se fracturen por efecto de la fuerza de gravedad y los esfuerzos internos presentes en la montaña.

Luego el mineral es recogido por equipos cargadores LHD (Load Haul Dump) que lo trasladan a los puntos de vaciado, donde los martillos reducen el tamaño de las rocas. Estas son transportadas posteriormente al ferrocarril que las lleva hasta Punta de Rieles, y aquellos niveles productivos bajo la cota del sector Teniente 4 descargan el mineral en los chancadores ubicados en Colón Alto.

El proceso de extracción, tiene asociado un flujo de minerales y materiales, en función de los distintos niveles dentro de la mina, visualizado de mejor forma en la Figura 2.4 indicando además, la maquinaria especializada para cada sector de ésta.

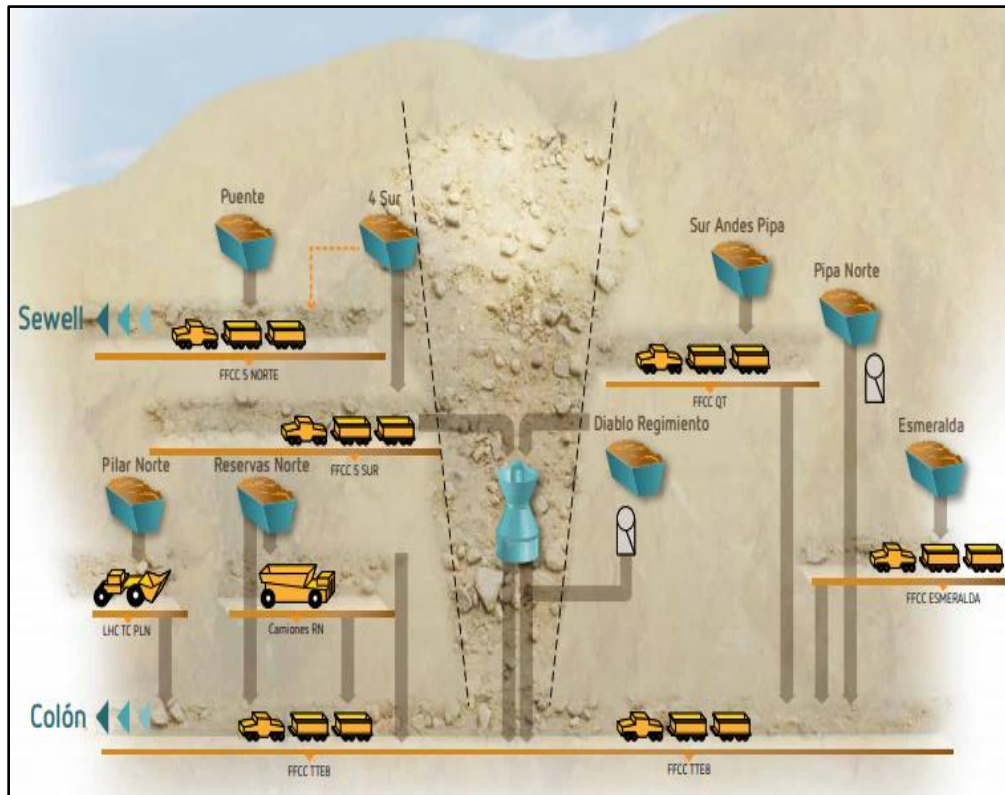


Figura 2.4 - Proceso de extracción, división El Teniente.

2.2.1.2. Concentración

Dentro de la división El Teniente, existen tres procesos enfocados a la concentración de cobre: *Concentración Convencional*; *Concentración SAG*; y *Concentración Molibdeno*, siendo el primero de ellos el proceso de concentración a estudiar.

Los 3 procesos de concentración de cobre de la división, se representan gráficamente en la Figura 2.5:

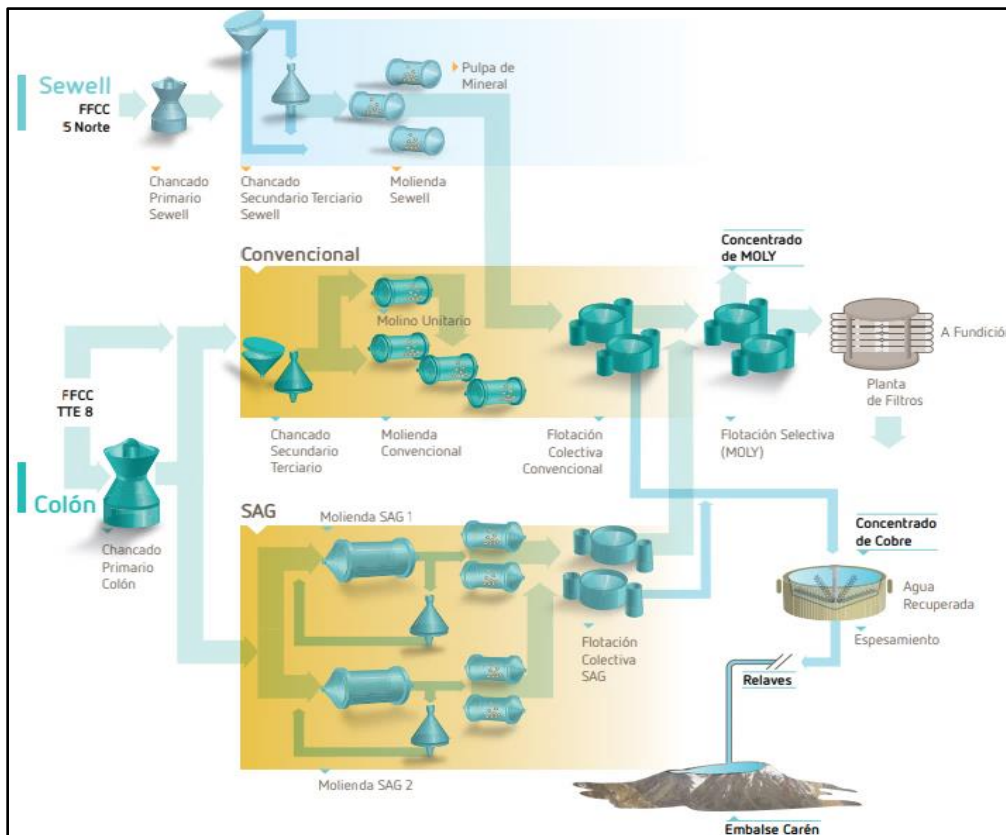


Figura 2.5 - Proceso de concentración por plantas, división El Teniente.

- **Concentración Proceso SAG**

Se compone por las plantas SAG 1, SAG 2 y flotación colectiva. Este proceso posee una capacidad aproximada de 90.000 [t/día], con una ley de cobre de 0,8% y una ley de molibdeno de 0,005%.

- **Concentración Proceso Convencional**

El proceso de concentración convencional (proceso a intervenir en el presente trabajo) se compone por las plantas de chancado secundario, chancado terciario, molienda convencional, molienda unitaria y flotación convencional (colectiva). Este proceso posee una capacidad aproximada de 60.000 [t/día] con una ley de cobre de 0,8% y una ley de molibdeno de 0,005%.

- **Concentración Proceso Molibdeno**

Se compone de sucesivas etapas de Flotación Selectiva y Espesamiento, en este proceso se separa el molibdeno del cobre y se obtiene el producto final de concentrado de molibdeno. Esta planta posee una capacidad de 4.500 [t/día] con una ley de cobre de 29% y una ley de molibdeno de 0,5%.

2.2.1.3. Fundición

En la fundición, el material proveniente de la etapa de concentración, ingresa a una planta que le extrae la humedad, y a través de un sistema de transporte neumático, llega a los Convertidores Teniente para el proceso de fusión. El producto principal de estos convertidores es un metal blanco, que contiene 75% de cobre.

Luego este metal blanco es vaciado en los convertidores *Pierre Smith*, donde se inicia el proceso de conversión que da origen al cobre blíster y del que se obtiene finalmente cobre refinado a fuego y cobre anódico.

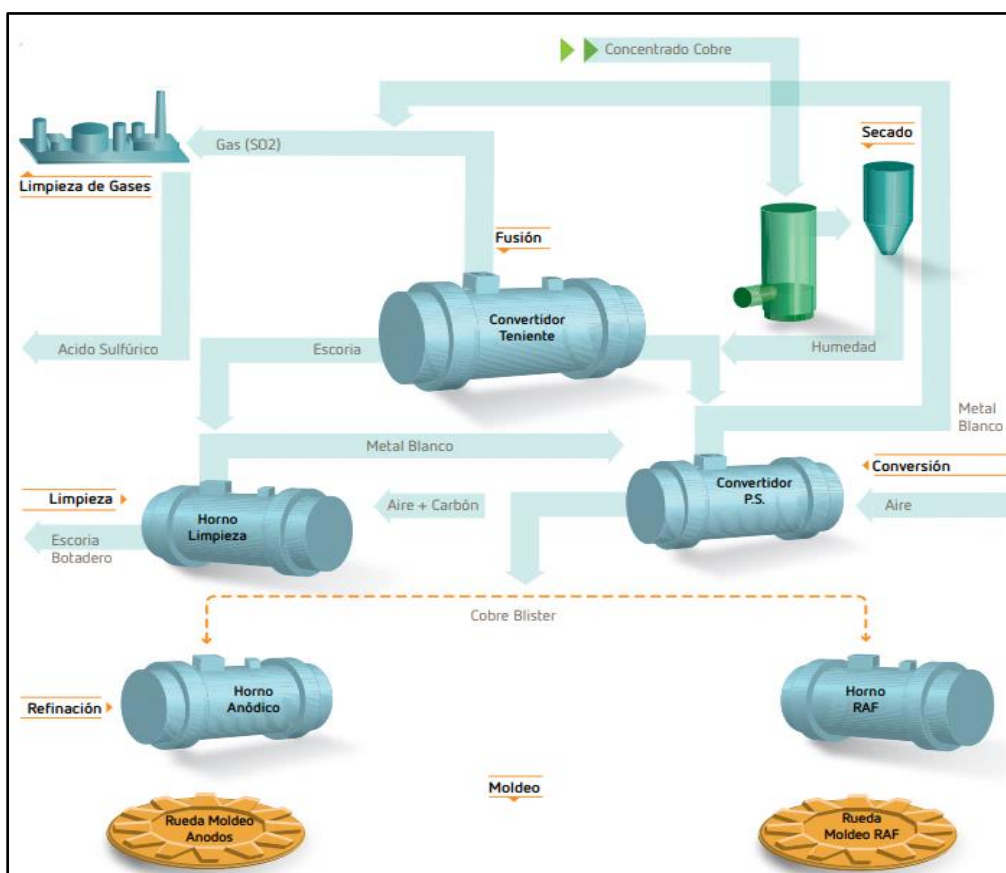


Figura 2.6 - Proceso de Fundición, división El Teniente.

2.3. DESCRIPCIÓN DE PROCESO A INTERVENIR: CONCENTRACIÓN PROCESO CONVENCIONAL

2.3.1. Planta Chancado Secundario y Terciario

El objetivo del chancado es reducir el tamaño de los fragmentos mayores hasta obtener una distribución granulométrica adecuada a la etapa siguiente. Para lograr la distribución de tamaño deseado se utiliza la combinación de dos etapas en línea, denominada Chancado Secundario y Chancado Terciario; que permiten reducir el tamaño del mineral recepcionado a una granulometría conveniente para la etapa de Molienda Convencional.

En el Chancado Secundario el mineral es reducido hasta obtener una granulometría menor a 2,5". En el Chancado Terciario el mineral es reducido hasta alcanzar una granulometría menor a 9 [mm].

2.3.2. Planta Molienda Convencional

La Planta de Molienda Convencional, lugar de realización del presente estudio, se encarga de aproximadamente el 25% de la molienda de mineral chancado de la división, y tiene como propósito efectuar las operaciones de molienda del mineral procedente de Chancado Secundario y Chancado Terciario, para obtener el concentrado de cobre que es enviado a la Planta de Flotación Colectiva.



Figura 2.7 - Planta de Molienda Convencional, división El Teniente.

En la Planta de Molienda Convencional existen 12 Molinos de bolas: 8 Molinos *Hardinge* y 4 Molinos *Füller-Taylor*.

Al mineral chancado que ingresa a los molinos se le adiciona agua, reactivos y cal, esta última se dosifica según el pH de la mezcla.

La reducción del tamaño se genera por fricción e impacto de las bolas con el mineral, la pulpa resultante se almacena en el cajón de descarga desde donde es bombeada a la batería de ciclones.

En los ciclones se produce la clasificación por tamaño de la partícula; si la pulpa cumple con el tamaño de la partícula, será directamente enviada al proceso de Flotación (en este punto se agrega reactivo espumante), mientras que la pulpa que no cumple con los requerimientos es reprocesada en los molinos.

2.3.3. Planta Flotación Convencional

La pulpa proveniente de la Molienda Convencional es procesada en las celdas de Flotación Colectiva. El concentrado producido en esta etapa se envía a una segunda limpieza y el material de descarte se envía como relave a la Planta PTR (planta de retratamiento). La obtención de concentrado colectivo (cobre y molibdeno) es enviado al Espesador P-4, siendo el posterior proceso el de Flotación Selectiva.

Para el aseguramiento de la calidad en la granulometría del concentrado existen dos molinos de bolas adicionales y dos hidrociclones para bombear la pulpa; después de la primera limpieza la pulpa es enviada a los hidrociclones desde donde el mineral que cumple con el estándar es enviado a una segunda limpieza y el resto es enviado a la remolienda.

Posterior a ello, el concentrado que no cumple con el estándar después de las etapas de barrido se va a la planta de PTR. La flotación de barrido son columnas de alta ley por lo tanto antes de ser descartadas es necesario que sean tratadas con circuitos agotadores y a estos se les denomina barrido.

2.4. DESCRIPCIÓN DE SISTEMA A INTERVENIR: CORREAS TRANSPORTADORAS

El conjunto de 48 Correas Transportadoras de la Planta Molienda Convencional tiene por fin alimentar a los 12 Molinos de Bolas presentes. 36 de ellas son denominadas *Correas Cortas*; mientras que las 12 restantes son denominadas *Correas Alimentadoras*.

El mineral utilizado para alimentar a los molinos, proviene desde Chancado Secundario y Chancado Terciario, y es depositado en pilas de acopio ubicadas en un nivel más arriba de

las Correas Cortas, las que entregan el mineral mediante los Chutes de Carga. A su vez, las Correas Cortas, transportan el mineral hacia las Correas Alimentadoras ubicadas un nivel más abajo mediante Chutes de Descarga.

Estas últimas correas, transportan el mineral hasta los Chutes de Alimentación que abastecen de mineral a los Molinos de Bolas de la planta.

El diagrama de proceso de la Planta está representado a continuación, indicando el sistema a intervenir:



Figura 2.8 - Diagrama de proceso, Planta de Molienda Convencional.

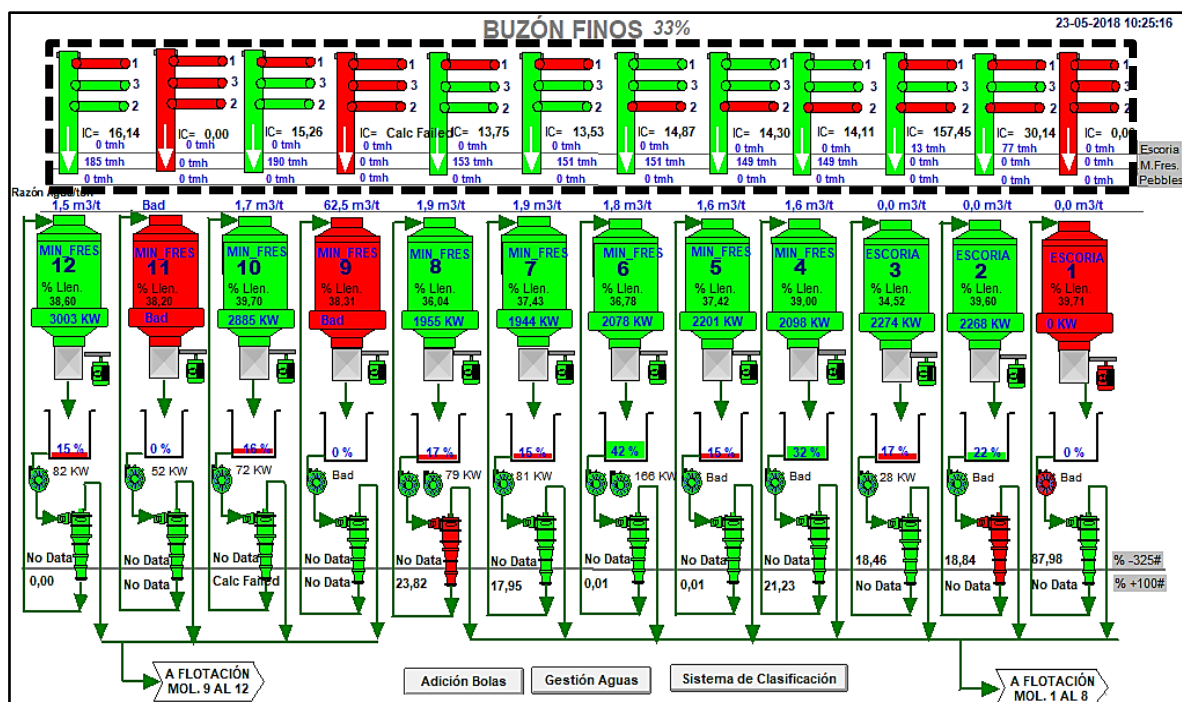


Figura 2.9 - Correas Transportadoras del proceso productivo de la Planta Molienda Convencional.

2.4.1. Tipo de Configuración del Sistema

Cada Molino de Bolas de la planta está configurado por 4 Correas Transportadoras. De estas, 3 corresponden a Correas Cortas de aproximadamente 12 [m] de largo, que reciben el mineral mediante los chutes de carga desde las pilas de acopio; y la restante es una Correa Alimentadora de 51 [m] y ángulo de elevación de 15°, en donde confluye el mineral transportado por las Correas Cortas mediante los chutes de traspaso.

2.4.1.1. Configuración de Correas Cortas

El sistema presenta una configuración en redundancia, es decir, que si existen 3 correas transportadoras, se requiere sólo de 2 correas transportadoras disponibles para un correcto funcionamiento del sistema.

Esto se debe a que la correa corta central debe estar disponible al ser la correa que presenta variador de frecuencias para regular el tonelaje requerido; mientras que 1 de las 2 correas cortas laterales restantes, debe estar disponible para aumentar el tonelaje de carga de la correa alimentadora.

2.4.1.2. Configuración de Correas Alimentadoras

En tanto, en las correas alimentadoras, al ser la única correa en donde confluyen los flujos de minerales de las otras tres correas transportadoras, presenta una configuración en serie con el resto de la línea de producción. La confiabilidad de un sistema en serie corresponde a la probabilidad que todos los elementos no fallen en un tiempo determinado.

2.4.2. Características de Operación de Correas Transportadoras

2.4.2.1. Correas Cortas

Características principales en correas cortas	
Velocidad de la cinta:	2,1 [m/s]
Mineral de transporte:	Mineral Chancado
Granulometría del mineral	0,371"
Largo entre polea motriz-cola:	15 [mt]
Ancho de la cinta:	48"
Tonelaje transportado:	Molino 1-8: 140-160 [t/h]; Molino 9-12: 180-220 [t/h]
Ángulo de elevación:	0°

Tabla 2.1 - Características principales de operación en correas cortas.

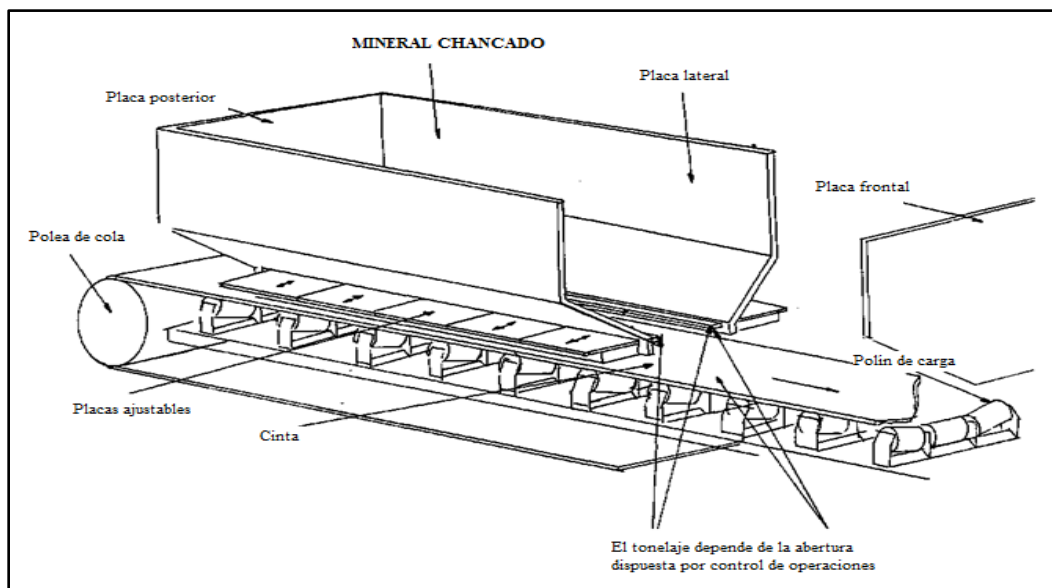


Figura 2.10 - Esquema de disposición de principales componentes en correas cortas.

2.4.2.2. Correas Alimentadoras

Características principales en correas alimentadoras	
Velocidad de la cinta	1,1 [m/s]
Granulometría del mineral	0,371"
Largo entre polea motriz-cola	51 [mt]
Ancho de la cinta	30"
Tonelaje transportado	Molino 1-8: 140-160 t/h Molino 9-12: 180-220 t/h
Ángulo de elevación	15,5°
Tipo de Tensor	Contrapeso gravitacional
Ángulo de reposo del material	35°
Ángulo de abrace cinta/polea motriz	180°

Tabla 2.2 - Características principales de operación en correas alimentadoras.

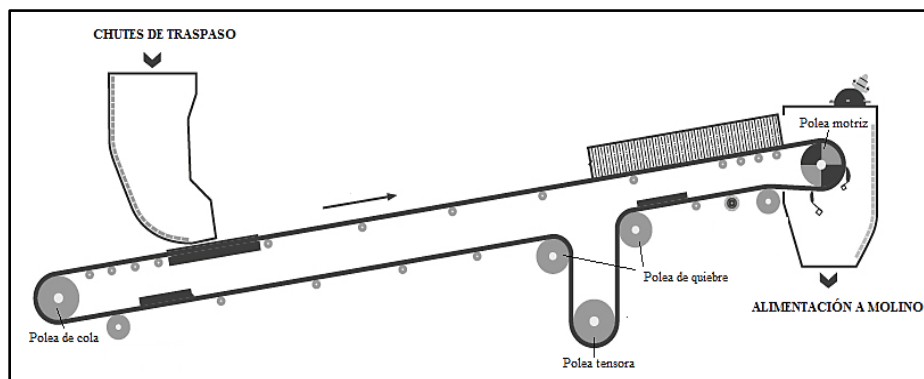


Figura 2.11 - Diseño esquemático tipo de correas transportadoras alimentadoras de un molino de bolas.

2.5. PRESENCIA DE SÍLICE Y POLVO FUERA DE NORMATIVA

Desde el punto de vista de la normativa vigente, Decreto Supremo N°594: Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, los límites establecidos para el polvo total en lugares de trabajo son de 8,0 [mg/m³], y 2,4 [mg/m³] para la fracción respirable.

Los límites permisibles para Sílice Cristalizada y Polvos No Clasificados en ambientes de trabajo, para una jornada normal de trabajo de 8 horas, se establecen en el Artículo 66 del Decreto Supremo N°594:

- 0,02 [mg/m³] para sílice libre cristalizada
- 2,00 [mg/m³] para polvos no clasificados

Las mediciones efectuadas en distintos puntos de trabajo, indicaron que los niveles de contaminación superan los límites permisibles establecidos por la normativa vigente:

Contaminante	Límite permisible	Medición realizada	% Sobre la norma
Sílice cristalizada	0,02 [mg/m ³]	0,187 [mg/m ³]	936%
Polvos no clasificados	2,00 [mg/m ³]	4,159 [mg/m ³]	208%

Tabla 2.3 - Medición de contaminantes.

(Referencia: TERMOVENT “Ingeniería de mejoramiento instrumentación y control sistema westcrubber de Planta Molienda Convencional”, 2015). [5]

3. DIAGNÓSTICO DE CONDICIÓN ACTUAL

3.1. IMPACTO DEL PRECIO Y COSTO DE COBRE EN LA INDUSTRIA

El contexto internacional que gobierna los precios del cobre ha sido bastante complejo, durante el año 2011 el precio se elevaba a los 4,625 [USD/lb] y junto con esto los costos de producción también se elevaron, esto conllevó a una crisis interna cuando el precio bajó llegando a los 2,2 [USD/lb], cercano a igualar el costo de producción. Actualmente el precio se ha recuperado llegando a los 2,85 [USD/lb] pero con gran variabilidad y con tendencia a la baja.

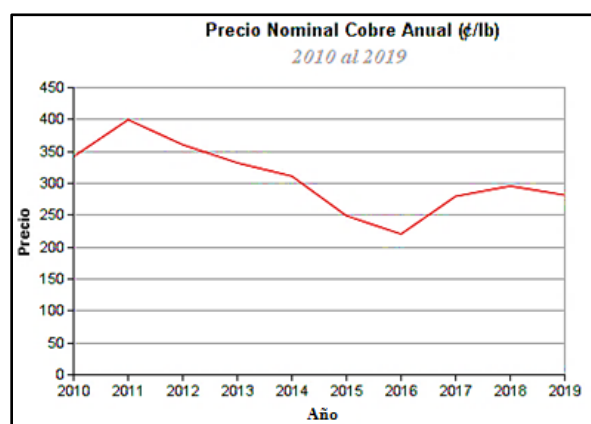


Gráfico 3.1 – Variación del precio del cobre.

(Referencia: Comisión Chilena del Cobre)

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

Entre estos costos, el costo C1, o *net direct cash cost*, agrupa los costos incurridos a través de todo el proceso minero hasta la venta del producto comercializable (cátodo en el caso del cobre), descontando los ingresos provenientes de los subproductos en caso de que existan. La situación anterior permite que en algunos casos el indicador C1 sea negativo.

El caso del costo C2, referido al *production cost*, corresponde al mismo costo C1, pero agregando los montos dados por depreciación, amortización o agotamiento del recurso en los casos que corresponda. En este caso, la incorporación de las variables previamente mencionadas permite tener una noción del costo operacional, que a diferencia del C1 tiene una visión de sustentabilidad del negocio en un mediano plazo.

Finalmente, el denominado costo C3 (*fully allocated cost*) incluye, además, costos indirectos, gastos, cargos financieros netos.

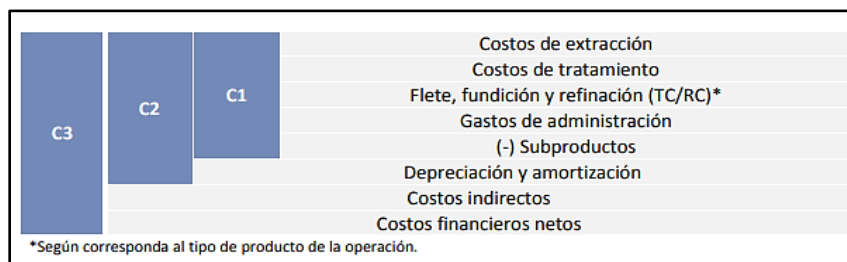


Figura 3.1 - Costos C1, C2 y C3 en industria del cobre.

(Referencia: Wood Mackenzie)

3.2. MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN CODELCO

En Codelco se utiliza un Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA), que corresponde a un conjunto de estándares y procesos que apuntan a optimizar la gestión de los activos. Su objetivo es generar valor a Codelco a través de los activos, asegurando el cumplimiento de estrategias de mantenimiento que optimicen su rendimiento. El modelo de gestión del mantenimiento se resume en la siguiente figura:

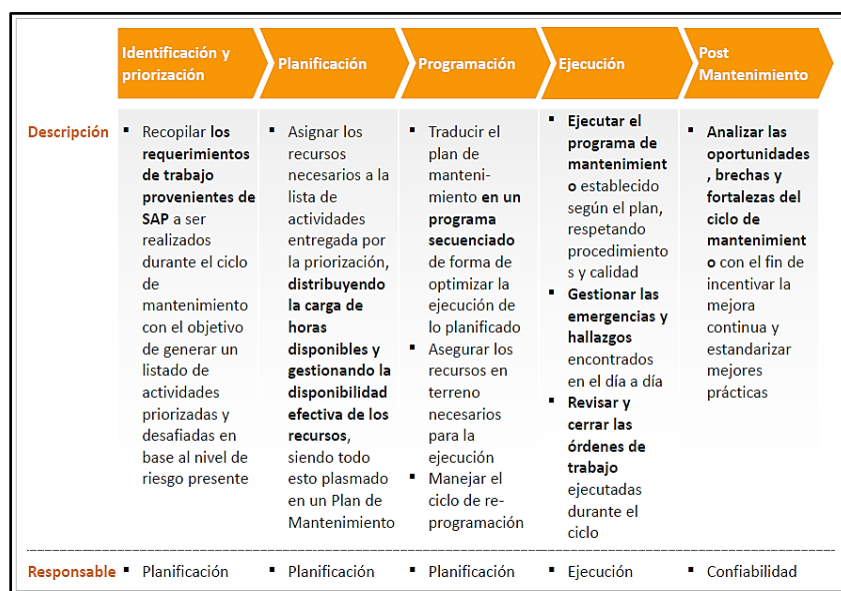


Figura 3.2 - Gestión del mantenimiento en Codelco.

(Referencia: Codelco)

La gestión del mantenimiento se agrupa en tres principales áreas: *Confiabilidad*, *Planificación*, y *Ejecución*:

- ***Confiabilidad***

Se encarga de optimizar el ciclo de vida del activo, asegurando la capacidad adecuada para cumplir con las funciones para las que fue diseñado, según el contexto operacional en el que está inmerso.

- ***Planificación***

Área encargada de generar y habilitar planes de mantenimiento basados en estrategias seleccionadas, maximizando la continuidad operacional y utilizando de forma eficiente el tiempo de trabajo, los recursos y materiales.

- ***Ejecución***

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

3.2.1. Sistema de Gestión de Recursos, SAP ERP

Toda la información relacionada al mantenimiento, como el plan matriz, las pautas de mantenimiento, recursos necesarios, órdenes de trabajo y materiales se encuentran en el Sistema de Gestión de Recursos *SAP*.



Figura 3.3 - Software de gestión de recursos utilizado por Codelco.

En esta plataforma, existe un módulo (PM) que permite crear ordenes de trabajo sobre alguna condición de los componentes de correas transportadoras, dónde son cargados los distintos recursos requeridos (HH, materiales, repuestos, estándares operacionales, otros) y posteriormente se planifica la actividad.

Existen tres clases de avisos en el módulo PM de SAP:

a) *Solicitud de Mantenimiento (PM1)*

Avisos que se utilizan para registrar requerimientos como montajes, mantenciones o servicios de ingeniería.

b) *Aviso de Avería (PM2)*

Interrupción imprevista del proceso o en el funcionamiento de un equipo.

c) *Aviso de Actividad (PM3)*

Avisos que documentan mantención preventiva realizada o actividades de mantenimiento predictivo.

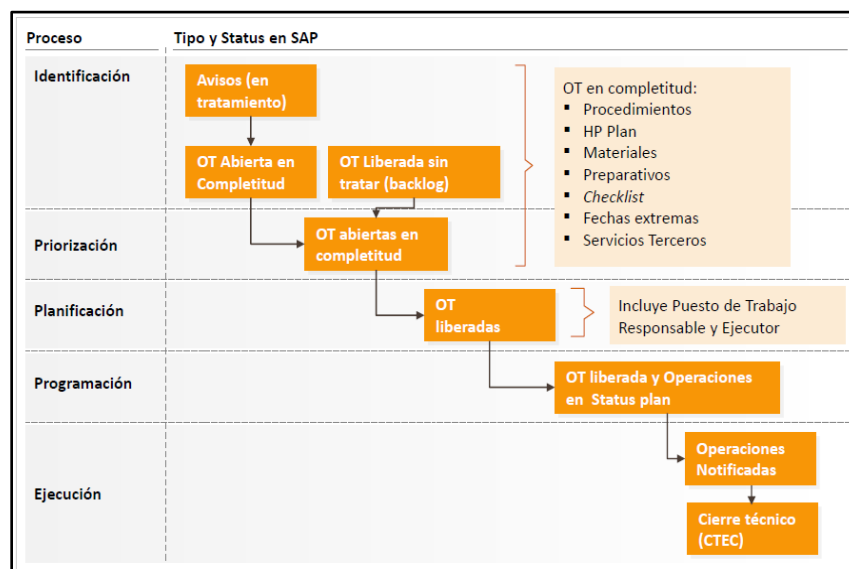


Figura 3.4 - Diagrama de tratamiento de avisos en SAP ERP.

3.2.1.1. Clases de Órdenes de Trabajo

- **Mantenimiento No Planificado (NP)**

Indica aquellas fallas producidas de manera imprevista y que afectan el normal funcionamiento de un equipo. Se subdivide en:

a) Emergencia

Fallas en equipos o instalaciones que afectan la producción, seguridad y/o medioambiente. Este tipo de órdenes se deben concretar lo más rápido posible.

b) Correctivo no planificado

Fallas que sin ser una emergencia propiamente tal, se corrigen sin pasar por un proceso planificado de programación. En esta categoría se incluyen reparaciones producto de algún hallazgo por parte del mantenimiento predictivo.

- ***Mantenimiento Planificado (MP)***

Se refiere a los trabajos que han sido planificados con anterioridad. Se subdivide en:

a) Preventivo Predictivo

Registro de recursos asociados a prevenir detenciones en base a condiciones medibles.

b) Correctivo Planificado

Incluye fallas derivadas de inspecciones previas.

c) Modificación

Órdenes referidas en tareas de modificación, previo estudio y análisis, asegurando su mejor funcionamiento.

d) Servicios de Ingeniería de Mantenimiento

Trabajo solicitado a ingeniería de mantenimiento, este puede ser en dos modalidades diferentes: diagnóstico, con el fin de diagnosticar el estado de algún equipo; o estudio, para realizar alguna mejora.

e) Servicios de Talleres

Órdenes de trabajo solicitadas a los distintos talleres de la división. Se agrupan en: *Fabricación, Reparación, Modificación y Montaje*.

f) Servicios a Terceros

Corresponde al requerimiento que es ejecutado por terceros a la compañía.

3.3. INDICADORES DE DESEMPEÑO

Proceso	Confiabilidad (MTTR)	Mantenibilidad (MTBF)	Disponibilidad Período	Disponibilidad Plan
Molienda Convencional	197 [hr]	9 [hr]	92%	95%

Tabla 3.1 - Resumen indicadores de desempeño Molienda Convencional, Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.

(Referencia: Control de Operaciones CP-2, Molienda Convencional)

En la tabla anterior se presentan los indicadores de desempeño del período de estudio analizado, notando que la disponibilidad de la planta estuvo por debajo de la disponibilidad planificada (95%). Esto generó una menor capacidad de producción debido a las distintas fallas de los sistemas que componen las doce líneas productivas de la planta, incidiendo en una merma de la utilización, y por tanto, la disminución del EBITDA de la empresa.

En tanto las correas transportadoras de la planta, estuvieron disponibles un 95,9% del tiempo operacional, siendo menor a la disponibilidad planificada de un 98%. Del total de detenciones de los molinos de bolas, un 7,4% fue producto de fallas en correas transportadoras:

Sistema	Disponibilidad Período	Disponibilidad Plan	Porcentaje de detenciones en molinos de bolas debido a correas transportadoras
Correas Transportadoras	95,9%	98%	7,4%

Tabla 3.2 - Porcentaje de detenciones en molinos de bolas debido a correas transportadoras.

(Referencia: Control de Operaciones CP-2, Molienda Convencional)

El factor de disponibilidad de las correas transportadoras es mayormente afectado debido a mantenciones correctivas que implican cambio de componentes con un elevado tiempo medio para reparar (MTTR) –presentado posteriormente– como cintas, poleas y reductores.

3.4. PENALIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS

Molino	Tiempos totales de detenciones no programadas en correas transportadoras [hr]	Tiempos totales de detenciones no programadas en molinos de bolas [hr]	Porcentaje de incidencia en el total de detenciones
1	71,86	684,71	10,39%
2	29,63	689,15	4,30%
3	24,85	636,27	3,91%
4	34,44	737,59	4,67%
5	76,05	762,68	9,97%
6	29,07	611,18	4,76%
7	50,74	767,43	6,61%
8	47,13	606,43	7,76%
9	37,57	703,01	5,34%
10	73,87	670,85	10,10%
11	65,53	711,02	9,21%
12	75,21	662,84	11,35%
Total	615,92 [hr]	8.243,16 [hr]	$\bar{x}$ = 7,4%

**Tabla 3.3 - Detenciones no programadas en molinos de bolas debido a correas transportadoras
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.**

(Referencia: Registro de Detenciones; Plataforma SAP)

En la tabla anterior se evidencia que el total de intervenciones no programadas en Correas transportadoras fue de 615,92 [hr], tiempo durante el cual se detuvo la alimentación del mineral chancado que alimenta los molinos de bolas, generando pérdidas por mineral no producido.

El total de detenciones no programadas de los 12 molinos de bolas fue de 8.243 [hr], las que se pueden generar por diversas fallas a lo largo de la línea productiva en la planta Molienda Convencional.

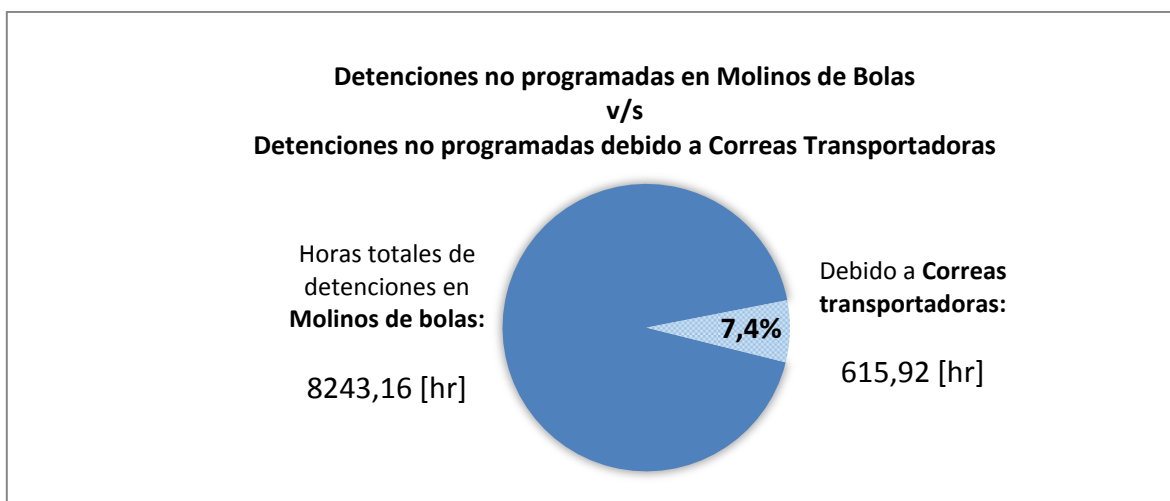


Gráfico 3.1 - Detenciones no programadas en molinos de bolas v/s Detenciones no programadas debido a correas transportadoras.
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.

Al ser un proceso productivo en serie, existen múltiples causas que pueden generar detenciones en un molino, entre las que es posible mencionar, según el Registro de Detenciones del Control de Operaciones (CP-2), las generadas por fallas en los bancos de flotación, fallas en bombas de ciclones, sobrecalentamiento de motores de accionamiento, bajas y altas presiones en bombas de lubricación, falta de agua en proceso, falta de mineral de alimentación, roturas de coronas en molinos, cañerías con atollos, reparaciones en líneas de agua, fallas en densímetros nucleares, entre tantas otras.

Los molinos 1-8 en tanto, son alimentados con 160-180 [t/h] de mineral chancado; mientras que los molinos 9-12 son alimentados con 200-220 [t/h] según el requerimiento diario.

El impacto en la producción en el proceso convencional está dado en la tabla 3.4, en base al porcentaje de cobre y molibdeno en la cabeza y en el concentrado, toneladas de alimentación y toneladas de concentrado generado:

Mineral	Ley del mineral	Toneladas por día	Precio [USD/lb]
Cobre	0,8%	60.000	\$ 2,78
Molibdeno	29%	4.500	\$ 11,99

Tabla 3.4 - Características de la producción del proceso convencional.

(Referencia: Comisión Chilena del Cobre, Cochilco)

Pérdidas por detención de un molino de bolas	
Molino 1-8	8.948,37 [USD/hr]
Molino 9-12	11.744,73 [USD/hr]

Tabla 3.5 - Pérdidas por mineral no procesado.

(Anexo V)

Según las consideraciones anteriores, es posible mencionar que en el período de estudio las detenciones no programadas en correas transportadoras generaron pérdidas por aproximadamente 8,1 [MUSD] por mineral que se dejó de procesar; cerca de 337.500 [USD/mes]. Las pérdidas totales de la Planta molienda convencional por detenciones no programadas en los 12 Molinos de bolas fueron de aproximadamente 109,5 [MUSD] para el período en análisis, equivalente a 4,6 [MUSD/mes].

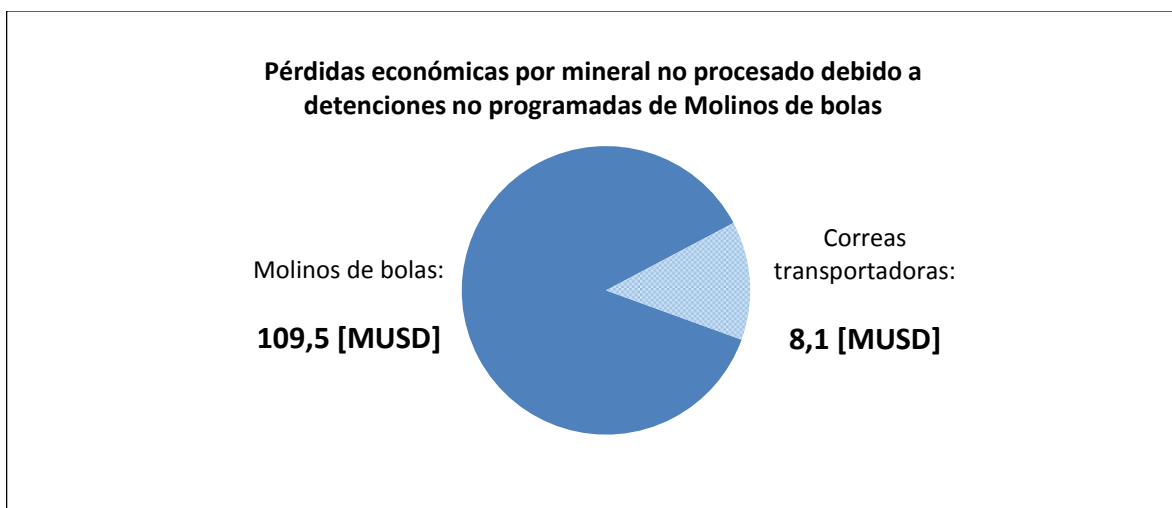


**Gráfico 3.2 - Pérdidas por detenciones no programadas en Planta Molienda Convencional.
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.**

3.5. COSTOS DE MANTENIMIENTO

Dentro de los parámetros para describir la situación inicial, los costos de mantenimiento desembolsados en el período para el sistema de correas transportadoras indican algunos aspectos que es necesario analizar.

Según la información extraída del módulo PM de SAP y la información entregada por la Gerencia de Plantas de la división respecto del presupuesto anual para el mantenimiento de

la planta Molienda convencional, los costos para los distintos mantenimientos (preventivos, proactivos, correctivos) realizados en los sistemas de correas transportadoras se resumen en la siguiente tabla:

Sistema	Costos de Mantenimiento			Presupuesto Molienda Convencional
	Preventivo	Correctivo	Proactivo	
Correas Transportadoras	111.615 [USD]	4,2 [MUSD]	15.307 [USD]	30,0 [MUSD]

**Tabla 3.6 - Costos de mantenimiento de correas transportadoras.
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.**

El presupuesto de la planta Molienda Convencional considera el mantenimiento desde las distintos costos asociados, directo, indirectos y de personal de mantenimiento. Entre estos, es posible mencionar supervisión, mantenedores, repuestos, insumos, tercerizaciones de trabajos, consumo de energía, horas extras, herramientas, administración, elementos de protección personal, entre otros.

Respecto a lo anterior, el presupuesto del período desembolsado para el mantenimiento de correas transportadoras fue de un 14,4%, el cual es un valor elevado considerando que más del 60% de los recursos son destinados a la mantención de los doce molinos de bolas.

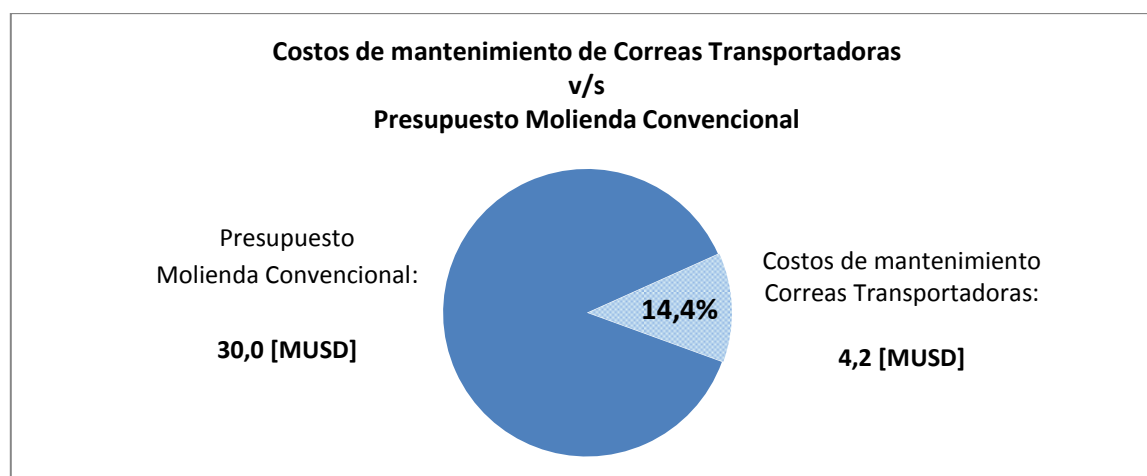


**Tabla 3.7 - Costos de mantenimiento utilizado en correas transportadoras.
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.**

(Referencia: Gerencia de Plantas)

4. ESTUDIO TÉCNICO

4.1. ANÁLISIS DE OPERACIÓN

En este capítulo se efectúa la recopilación de la información proporcionada por el Centro de Operaciones (CP-2) de la Planta Molienda Convencional para identificar las distintas fallas funcionales presentadas en el sistema de Correas Transportadoras en el período (Enero 01, 2017 a Diciembre 31, 2018) generando la detención de la alimentación del mineral chancado en los Molinos de bolas.

Equipo	Mode de Falla	Fecha Inicio	Fecha Final	duracion	comentario
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	05-06-2017 9:03	05-06-2017 10:19	1,27	Alineamiento ctr 04
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	06-06-2017 10:44	06-06-2017 11:12	0,47	Cambio gualdera ctr 04
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	10-06-2017 19:37	10-06-2017 20:21	0,73	
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	10-06-2017 21:26	11-06-2017 13:11	15,74	Falla en sistema piñón-corona. Pendiente.
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	11-06-2017 14:28	11-06-2017 15:26	0,97	
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	11-06-2017 15:41	13-06-2017 16:52	49,18	Falla bomba hidrociclón rotura i
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	13-06-2017 18:09	13-06-2017 18:48	0,65	
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	13-06-2017 18:57	13-06-2017 23:14	4,29	t* descanso
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	13-06-2017 23:33	14-06-2017 1:42	2,15	baja presion
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	14-06-2017 2:14	14-06-2017 4:21	2,11	t* descanso
MC Sec 01 Molino 01	Mant. imp. Molinos	14-06-2017 22:36	15-06-2017 11:44	13,14	Mol F/S por falla en Subestacion electrica Colon
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	15-06-2017 11:44	15-06-2017 12:06	0,36	
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	15-06-2017 12:06	15-06-2017 22:51	10,76	
MC Sec 01 Molino 01	Desconocido	22-06-2017 4:38	22-06-2017 5:22	0,74	

Figura 4.1 - Registro de detenciones de Molinos de bolas utilizado en Planta Molienda Convencional.

(Referencia: Control de Operaciones CP-2, división El Teniente)

Posteriormente se realizará un Análisis de Modos de Falla de los componentes críticos del sistema de Correas Transportadoras, determinando los riesgos cuantitativos (económicos) y cualitativos (salud, seguridad, medio ambiente y comunidad) que generan las principales fallas detectadas en correas transportadoras.

Las herramientas a utilizar para realizar el análisis de la operación –análisis de modos de falla y análisis de causa raíz– se aplican a los componentes que generaron la mayor cantidad de horas de detenciones no programadas en el sistema según el principio de Pareto aplicado, determinando cuáles fueron los modos de falla a causa de deficiencias en la lubricación del sistema, y las distintas consecuencias que generaron en la operación.

4.1.1. Diagrama de Pareto de Detenciones No Programadas

Componente intervenido/ Tarea realizada	Tiempo de reparación acumulado en periodo[hr]	Número de intervenciones no programadas	Porcentaje del total de detenciones	Porcentaje acumulado	Tipo de Mantenimiento
Cinta	113,13	3	18,36%	18,36%	Correctivo
Reductor	93,71	4	15,21%	33,57%	Correctivo
Poleas	85,66	4	13,90%	47,47%	Correctivo
Limpieza de acumulación de carga	58,61	36	9,52%	56,99%	Restaurativo
Polín	48,04	32	8,30%	65,29%	Correctivo
Rodamiento de rodillos a rótula	45,84	12	7,94%	73,23%	Correctivo
Alineamiento de cintas	39,25	18	6,87%	80,10%	Restaurativo
Desatollo de chute	31,93	21	4,68%	84,78%	Restaurativo
Chute	26,60	5	3,32%	88,10%	Correctivo
Gualdera	12,22	12	1,98%	90,08%	Correctivo
Raspador	11,51	6	1,87%	91,95%	Correctivo
Pesómetros	9,24	5	1,50%	93,45%	Correctivo
Acoplamiento	8,33	4	1,35%	94,80%	Correctivo
Interruptor diferencial	7,58	2	1,23%	96,03%	Correctivo
Panel integrador de control	6,50	1	1,05%	97,08%	Correctivo
Variador de frecuencia	5,70	1	0,93%	98,01%	Correctivo
Sensor de atollo	5,46	1	0,89%	98,90%	Correctivo
Cortocircuito motor eléctrico	2,25	1	0,40%	99,30%	Correctivo
Activación pull-cord	2,15	1	0,35%	99,65%	Desconocido
Alta vibración de sistema motriz	1,32	1	0,21%	99,86%	Correctivo
Sensor de velocidad cero	0,89	1	0,14%	100,00%	Correctivo
Total	615,92				

**Tabla 4.1 - Causas de intervenciones no programadas en correas transportadoras,
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.**

(Referencia: Registro de Detenciones PMC; Plataforma SAP)

En la tabla anterior, se presenta el registro de las causales de intervenciones registradas en la alimentación de mineral de los molinos para el período de estudio.

En esta, a partir del principio de Pareto aplicado, se tomarán las actividades que generaron mayores tiempos de reparación y se estudiarán en los siguientes tópicos, analizando si las fallas son derivadas de modos de falla generados por deficiencias en la lubricación de sus componentes.

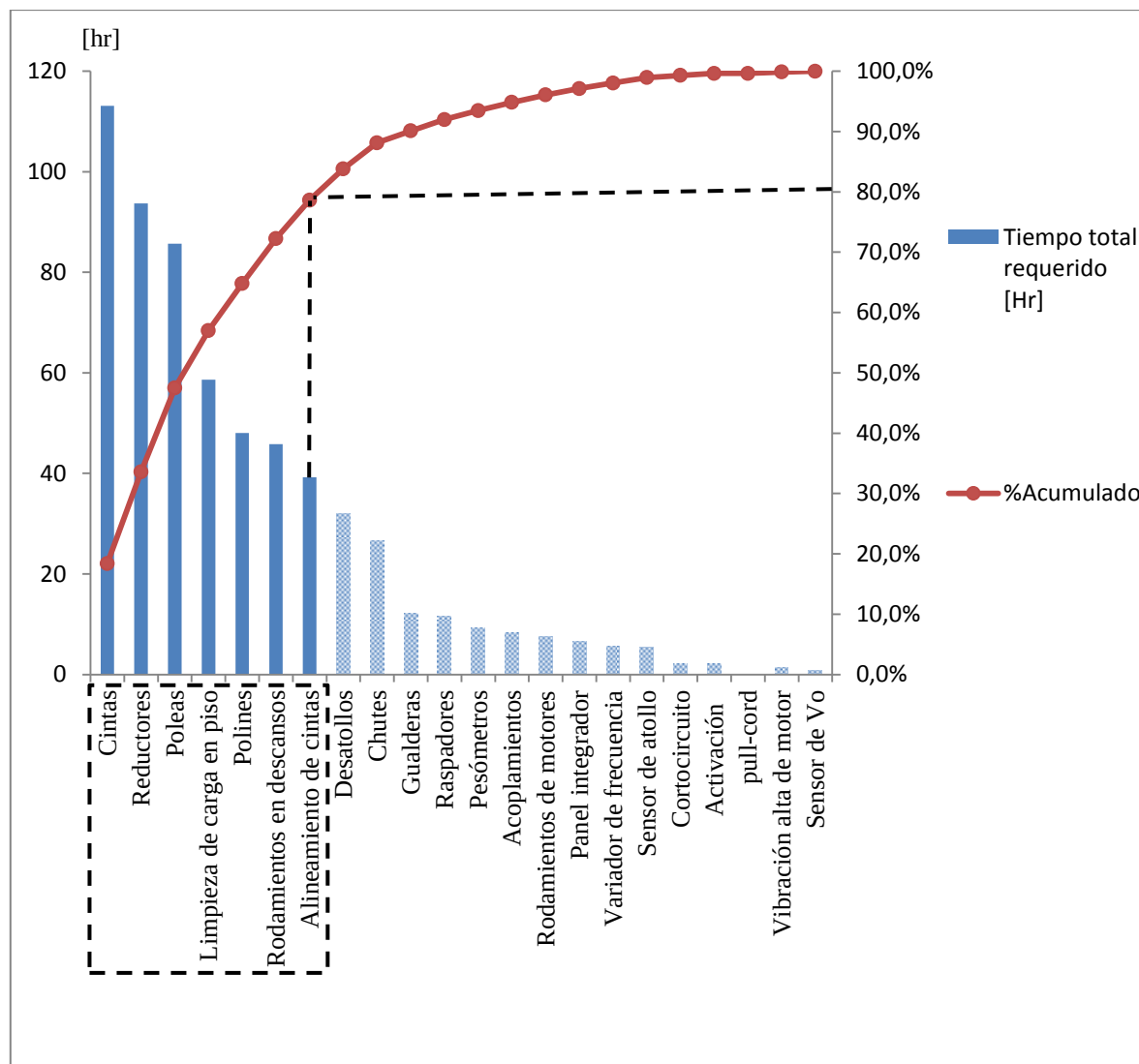


Gráfico 4.1 - Diagrama de Pareto de las detenciones no programadas en Correas Transportadoras, Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.

En la tabla 4.2 se puede verificar el número de intervenciones según la correa transportadora correspondiente –correa alimentadora o correa corta central–, en base a las intervenciones determinadas por el principio de Pareto aplicado anteriormente.

En base a esta tabla, se calculan los indicadores de tiempo medio para reparar (MTTR) y tiempo medio entre fallas (MTBF), presentados posteriormente, además del Análisis de Modos de Falla a realizar.

Componente intervenido/ Tarea realizada	Tiempo total requerido [hr]	Tiempo requerido en Correas Alimentadoras [hr]	Intervenciones Correas Alimentadoras	Tiempo requerido en Correas Cortas [hr]	Intervenciones Correas Cortas
Cintas	113,13	84,85	2	28,28	2
Reductores	93,71	0	0	93,71	4
Poleas	85,66	70,08	3	15,58	1
Limpieza de carga en piso	58,61	45,58	28	13,03	8
Polines	48,04	31,53	21	16,51	11
Rodamientos en soportes de pie	45,84	30,56	8	14,08	4
Alineamiento de cintas	39,25	33,64	15	5,61	3

Tabla 4.2 - Cantidad de intervenciones no planificadas según correa transportadora, Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.

4.1.2. Análisis de Criticidad de Modos de Falla

Para determinar los modos de falla asociados a lubricación con su respectiva criticidad, se utilizará un análisis semi-cuantitativo de *Criticidad Total por Riesgo* (presentado en el tópico 1.2.3. Análisis de Criticidad de Equipos), soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de una falla por la severidad del mismo.

$$\text{Criticidad Total por Riesgo} = \text{Frecuencia de Fallas} \times \text{Consecuencia}$$

La división El Teniente, mediante su sistema operativo del mantenimiento (SOMA), definió un modelo del análisis de criticidad semi-cuantitativo basado en el anterior, donde

definen los puntajes según el contexto operacional de la empresa, sus variables se describen a continuación:

4.1.2.1. Frecuencia de Fallas

El cálculo para el valor del indicador de la frecuencia de falla se presenta en la tabla 4.3:

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

Tabla 4.3 - Indicador de frecuencia según la frecuencia de falla.

(Referencia: Modelo de Gestión del Mantenimiento, Codelco)

4.1.2.2. Consecuencia

- **Seguridad (P1)**

Consecuencias potenciales que podría tener una falla para la seguridad de las personas y comunidades.

40 puntos - Riesgo de accidente con fatalidades múltiples.

38 puntos – Riesgo de accidente con una fatalidad.

30 puntos – Riesgo de accidente con discapacidad permanente.

12 puntos – Riesgo de accidente con tiempo perdido.

0 puntos – Sin riesgo para las personas.

- **Medio Ambiente (P2)**

Consecuencias sobre el medio ambiente – en las instalaciones de Codelco o áreas próximas- para el aire, el agua y/o la tierra.

40 puntos – Riesgo de daño medioambiental severo y de largo plazo.

32 puntos – Riesgo de daño de largo plazo.

28 puntos – Riesgo de daño de corto plazo.

10 puntos – Riesgo de daño medioambiental menor.

0 puntos – Sin daño al medio ambiente.

- **Producción (P3)**

Pérdidas o paradas de producción que pueden ocurrir como consecuencias potenciales de una falla.

12 puntos – Pérdida de producción mayor a 1 día.

8 puntos – Pérdida de producción entre 12 horas y 1 día.

4 puntos – Pérdida de producción entre 2 y 12 horas.

2 puntos – Pérdida de producción de hasta 2 horas.

0 puntos – Sin pérdida de producción.

- **Costos de Mantenimiento (P4)**

Costos de mantenimiento en los cuales se incurre para restituir la función afectada por la ocurrencia de la falla.

10 puntos – Costos muy altos, sobre los 500.000 USD.

8 puntos – Costos altos, entre 100.000 y 500.000 USD.

5 puntos – Costos medios, entre 50.000 y 100.000 USD.

2 puntos – Costos bajos, entre 10.000 y 50.000 USD.

1 punto – Costos muy bajos, menores a 10.000 USD.

- **Flexibilidad Operacional (P5)**

1 punto – No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

0,5 puntos – Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.

0,1 puntos – Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

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

$$\text{Consecuencia} = P1 + P2 + (P3 \times P5) + P4$$

Este puntaje se relaciona con un *Indicador de Consecuencia*, el cual indica que a mayor valor, mayor es la consecuencia generada ante la aparición de un modo de falla analizado. La tabla de indicadores de consecuencia se presenta a continuación:

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

Tabla 4.4 - Indicador de consecuencia según puntaje.

(Referencia: Modelo de Gestión del Mantenimiento, Codelco)

4.1.2.3. Resultado del Análisis de Criticidad

Finalmente, para obtener el indicador de criticidad se multiplica el indicador de frecuencia por el de consecuencia, obteniendo un resultado que indica la criticidad –alta, medio, baja– según los siguientes criterios definidos por el área corporativa:

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

La evaluación se realizó a los 12 modos de falla de los componentes seleccionados mediante el principio de Pareto aplicado, de los cuales se determina que existe sólo 1 modo de falla con criticidad media, siendo éste, asociado a lubricación:

Criticidad	Nº Modos de Falla	Porcentaje de Modos de Falla
Alta	0	0%
Media	1	8,3%
Baja	11	91,7%

Tabla 4.5 - Resultado de criticidad de modos de falla.

Los siguientes fueron los modos de falla analizados y sus valores de consecuencia y frecuencia de la falla se resumen en la siguiente tabla:

Nº	Modo de Falla	Indicador de Consecuencia	Indicador de Frecuencia de Falla	Puntaje Criticidad	Criticidad
Correas Alimentadoras					
1	Eje de polea fisurado por desgaste de rodamiento en bloque de almohada	4	3	12	Media
2	Revestimiento de polea desgastado	5	2	10	Baja
3	Desalineamiento de cinta	3	3	9	Baja
4	Corte longitudinal de cinta	4	2	8	Baja
5	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	2	4	8	Baja
6	Desgaste mecánico de rodamiento de bloque de almohada por abrasión interna	2	3	6	Baja

Tabla 4.6 - Criticidad de modos de falla en Correas Alimentadoras.

N°	Modo de Falla	Indicador de Consecuencia	Indicador de Frecuencia de Falla	Puntaje Criticidad	Criticidad
Correas Cortas					
1	Desalineamiento de cinta	3	3	9	Baja
2	Revestimiento de polea desgastado	4	2	8	Baja
3	Corte longitudinal de cinta	3	2	6	Baja
4	Engranes, rodamientos y/o eje de reductor de velocidad con daño por desgaste mecánico	2	3	6	Baja
5	Desgaste mecánico de rodamiento de bloque de almohada por abrasión interna	2	3	6	Baja
6	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	1	4	4	Baja

Tabla 4.7 - Criticidad de modos de falla en Correas Cortas.

Para analizar el detalle del análisis de criticidad realizado, revisar el Anexo VI – Análisis de Criticidad de Componentes de Correas Transportadoras.

4.1.3. Análisis de Modos de Falla, Causas y Efectos

El *Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE)* permite analizar los modos de falla que pueden aparecer en los componentes críticos de correas transportadoras, permitiendo tomar medidas correctivas en aquellos que no presentan un control y mejorar aquellos que no presentan un control adecuado, sin afectar la salud, la seguridad, el medio ambiente, ni la comunidad.

El análisis de modos de falla a desarrollar, busca analizar los modos de falla del sistema de correas transportadoras en el período Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018 según el análisis de criticidad previamente realizado.

El control de operaciones (CP-2) del proceso convencional, señala que el sistema de correas transportadoras presenta una matriz cualitativa de riesgo HSEC (salud, seguridad, medio ambiente y comunidad) con *riesgo mínimo*; es decir, una falla generada en cualquier componente del sistema tiene consecuencias por flexibilidad operacional, pérdida de producción y costos de mantenimiento. La matriz cualitativa de riesgo se presenta en la siguiente tabla:

Matriz Cualitativa de Riesgo (HSEC)				
Medio Ambiente Comunidad	A	C-A	B-A	A-A
	B	C-B	B-B	A-B
	C	C-C	B-C	A-C
		C	B	A
		Salud Seguridad		

● Riesgo Máximo

● Riesgo Medio

● Riesgo Mínimo



Tabla 4.8 - Matriz cualitativa de riesgo (HSEC), división El Teniente.

(Referencia: Resolución de problemas. Excelencia Operacional C+. División El Teniente)

Se realiza un análisis de modos de falla para cada sistema de correas transportadoras (correas alimentadoras y correas cortas) aplicando la información obtenida según el *Registro de Detenciones* y la *Plataforma SAP*, mediante el cual será posible determinar los modos de falla que se derivan de deficiencias en la lubricación.

Los análisis de modos de falla efectuados se detallan a continuación:

Análisis de Modos de Falla en Correas Alimentadoras

Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018

Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto	Causas	Frecuencia [Fallas/Año] (1)	MTTR [hr]	Costos Directos [USD] (2)	Flex. Operac.	Imp. Amb.	Imp. Seg.	Riesgo Cuantitativo [USD/Año]	Riesgo Cualitativo (HSEC)
Cinta	1	Transportar mineral chancado desde Chutes de Traspaso hasta Chutes de Alimentación de Molinos de bolas, según el estándar operacional requerido:	1.1	No transportar mineral chancado	1.1.1	Corte de cinta	Detención de alimentación de Molino de bolas. Se incurre en altos tiempos de reparación, según disponibilidad de mantenedores para cambio de cinta.	Corte longitudinal de cinta por el excesivo desgaste de poleas, generando que el tubo mecanizado actúe como elemento punzante	0,5	42,43	6.227,14	1,0	C	C	215.263,57	C-C
		Estándar Operacional Molinos 1-8: 140-160 [t/h]; Molinos 9-12 180-220 [t/h]	1.2	Transportar mineral chancado fuera de estándares operacionales de tonelaje	1.2.1	Desalineamiento de la cinta	Transporte de mineral fuera de estándares de operación por derrame de carga	Acumulación de mineral fino en poleas y polines, generando desplazamiento lateral de cinta	7	2,24	76,76	0,5	C	C	157.337,32	C-C
Polea	2	Generar movimiento de la cinta mediante la fricción existente entre el revestimiento de la polea y la cinta	2.1	No generar fricción con cinta por falta de revestimiento	2.1.1	Revestimiento desgastado	Falta de tensión en cinta, generando desalineamientos	Desgaste por abrasión, producto de contacto directo con cinta transportadora	1	23,36	2115,02	1,0	C	C	235.715,02	C-C
					2.1.2	Eje fisurado por desgaste en rodamiento de bloque de almohada	Detención de la alimentación para realizar el cambio de polea y rodamiento	Contaminación del lubricante con partículas abrasivas; Montaje y/o mantenimiento inapropiado	3	27,18	2.450,25	1,0	C	C	822.750,45	C-C
Polín	3	Guiar el desplazamiento de la cinta y soportar la carga presente	3.1	No guiar el desplazamiento de la cinta por falta de giro	3.1.1	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	Alto ruido por fricción interna entre rodamiento y cuerpo del rodillo	Término de vida útil de rodamiento interno de polín	10	1,56	88,43	0,5	C	C	156.884,30	C-C
Rodamiento de Rodillos a Rótula (utilizados en soportes de pie de poleas)	4	Permitir la rotación relativa de elementos bajo carga, con precisión y con rozamiento mínimo	4.1	Aumento de rozamiento entre rodamiento-eje.	4.1.1	Desgaste mecánico producto de la abrasión interna	Ruidos anormales; aumento de la temperatura de soporte de pie	Contaminación del rodamiento con partículas abrasivas; Montaje y/o mantenimiento inapropiado	4	3,82	108,30	0,5	C	C	153.233,2	C-C

(1) El período de estudio es de 2 años (Enero 01, 2017 a Diciembre 31, 2018) por lo que, el valor de 0,5 indica que en el período de estudio, hubo 1 falla por este modo de falla.

(2) Costos directos por mantenedores, supervisores y repuestos.

Tabla 4.9 - Análisis de modos de fallas, causas y efectos en Correas Alimentadoras.

Análisis de Modos de Falla en Correas Cortas

Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018

Componente	#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de Falla	Efecto	Causas	Frecuencia [Fallos/Año] (1)	MTTR [hr]	Costos Directos [USD] (2)	Flex. Operac.	Imp. Amb.	Imp. Seg.	Riesgo Cuantitativo [USD/Año]	Riesgo Cualitativo (HSEC)
Cinta	1	Transportar mineral chancado desde Chutes de Carga hasta Chutes de Traspaso de Molinos de bolas, según el estándar operacional requerido:	1.1	No transportar mineral chancado	1.1.1	Corte de cinta	Detención de alimentación de Molino de bolas. Se incurre en altos tiempos de reparación, según disponibilidad de mantenedores para cambio de cinta	Caída de material punzante desde pilas de acopio, como planchas de acero, concreto de suelto en loza, material no detectado, otros.	0,5	14,14	6.010,25	1,0	C	C	73.705,13	C-C
		Estándar Operacional Molinos 1-8: 140-160 [t/h]; Molinos 9-12 180-220 [t/h]	1.2	Transportar mineral chancado fuera de estándares operacionales de tonelaje	1.2.1	Desalineamiento de la cinta	Transporte de mineral fuera de estándares de operación por derrame de carga	Acumulación de mineral fino en poleas y polines, generando desplazamiento lateral de cinta	2	1,87	76,76	1,0	C	C	37.553,52	C-C
Polea	2	Generar movimiento de la cinta mediante la fricción existente entre el revestimiento de la polea y la cinta	2.1	No generar fricción con cinta por falta de revestimiento	2.1.1	Revestimiento de polea desgastado	Deslizamiento de cinta; Falta de tensión en cinta, generando desalineamiento	Exceso de abrasión debido a acumulación de mineral fino en Cinta	1	15,58	2115,02	1,0	C	C	157.915,02	C-C
Polín	4	Guiar el desplazamiento de la cinta y soportar la carga presente	4.1	No guiar el desplazamiento de la cinta por falta de giro	4.1.1	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	Alto ruido por fricción interna entre rodamiento y cuerpo del rodillo	Término de vida útil de rodamiento interno de polín	5	1,44	88,43	1,0	C	C	72.442,15	C-C
Reductor de Velocidad	3	Reducir velocidad de giro del motor y aumentar torque en eje de salida	3.1	Pérdida de función	3.1.1	Engranes, rodamientos y/o eje con daños por desgaste mecánico	Detención de alimentación debido a altas vibraciones en sistema motriz	Lubricante oxidado por exceso de utilización; Lubricante con alta presencia de material particulado	2	23,43	1.850,25	1,0	C	C	472.300,5	C-C
Rodamiento de Rodillos a Rótula (utilizados en soportes de pie de poleas)	5	Permitir la rotación relativa de elementos bajo carga, con precisión y con rozamiento mínimo	5.1	Aumento de rozamiento entre rodamiento-eje.	5.1.1	Desgaste mecánico producto de la abrasión interna	Ruidos anormales; aumento de la temperatura de soporte de pie	Contaminación del rodamiento con partículas abrasivas; Montaje y/o mantenimiento inapropiado	2	3,52	108,30	1,0	C	C	70.616,6	C-C

(1) El período de estudio es de 2 años (Enero 01, 2017 a Diciembre 31, 2018) por lo que, el valor de 0,5 indica que en el período de estudio, hubo 1 falla por este modo de falla.

(2) Costos directos por mantenedores, supervisores y repuestos.

Tabla 4.10 - Análisis de modos de fallas, causas y efectos en Correas Cortas.

4.1.4. Diagramas Causa-Efecto de Modos de Falla por Lubricación

- **Rodamientos de Bloques de Almohada**

Dado que las deficiencias en la lubricación de los *rodamientos de bloques de almohada* generan 3 modos de falla (2 en correas alimentadoras: eje de polea fisurado por desgaste en rodamiento; desgaste mecánico de rodamiento producto de abrasión interna, y 1 en correas cortas: desgaste mecánico de rodamiento producto de abrasión interna) el diagrama de causa-efecto a presentar, es indicativo para los tres modos de falla pues se relacionan a las mismas causas:

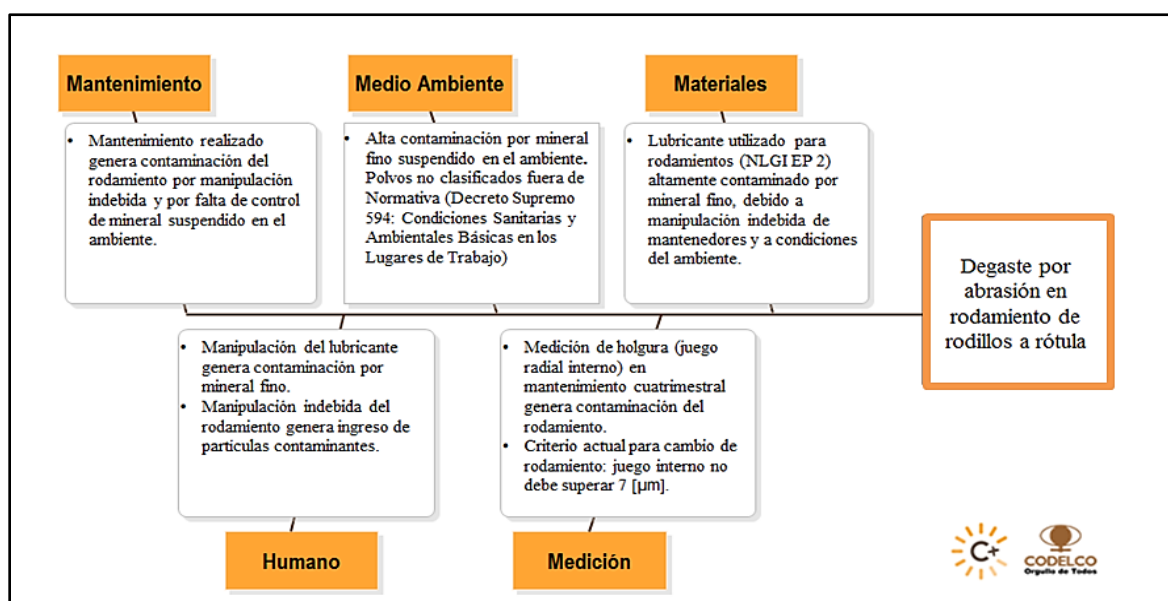


Figura 4.2 - Diagrama de causa-efecto, rodamiento de bloque de almohada.



Figura 4.3 - Rodamiento de soporte de pie desarmado posterior a falla.

- **Mantenimiento:** El mantenimiento realizado en poleas, es realizado por un mantenedor mediante una *Ruta de Inspección Mensual*, en el que verifica visualmente el estado del revestimiento. El estado del rodamiento del soporte de pie en tanto, es verificado cada cuatro meses en el *Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M)*, por lo que no existe detección prematura para este modo de falla.
- **Medio Ambiente:** Los rodamientos utilizados en los soportes de pie, son afectados por la alta presencia de mineral fino en el ambiente, derivados principalmente por la ineficiencia de los colectores de polvo, los cuales captan sólo una pequeña parte del mineral fino suspendido. Ante esto, existe una alta contaminación al momento de realizar la medición del juego radial interno del rodamiento y al relubricar el rodamiento, generando que el mineral suspendido se adhiera a la grasa lubricante y contamine la acción de éste, reduciendo la confiabilidad del rodamiento.
- **Materiales:** El aspecto preponderante para la aparición del presente modo de falla se deben a la contaminación del lubricante en el rodamiento.

La contaminación del principal material utilizado en rodamientos (lubricante) se genera por múltiples causas, según lo señalado por mantenedores en entrevistas:

- Manipulación indebida del rodamiento por parte de los mantenedores (instalación y mantenimiento).
- Condiciones ambientales desfavorables para operación debido a contaminación.
- Almacenaje indebido de grasa lubricante.
- Lubricación manual contaminante.



Figura 4.4 - Grasa lubricante contaminada.

- **Humano:** El factor humano es el principal incidente en la aparición de este modo de falla, principalmente por la manipulación del lubricante y el rodamiento, tanto en la instalación como en el mantenimiento, agravado por las otras causas.



Figura 4.5 - Lubricación manual contaminando rodamientos.

- **Medición:** La medición o control actual para detectar el presente modo de falla es realizado cada cuatro meses (Plan de Mantenimiento 4M), donde se realiza la medición del juego radial interno del rodamiento, siendo el criterio de cambio cuando éste supere los 7 [μm]. Para realizar la medición, se utilizan galgas o *feeler*, siendo además una actividad contaminante.



Figura 4.6 - Medición de holgura en rodamiento.

- **Reductores de Velocidad**

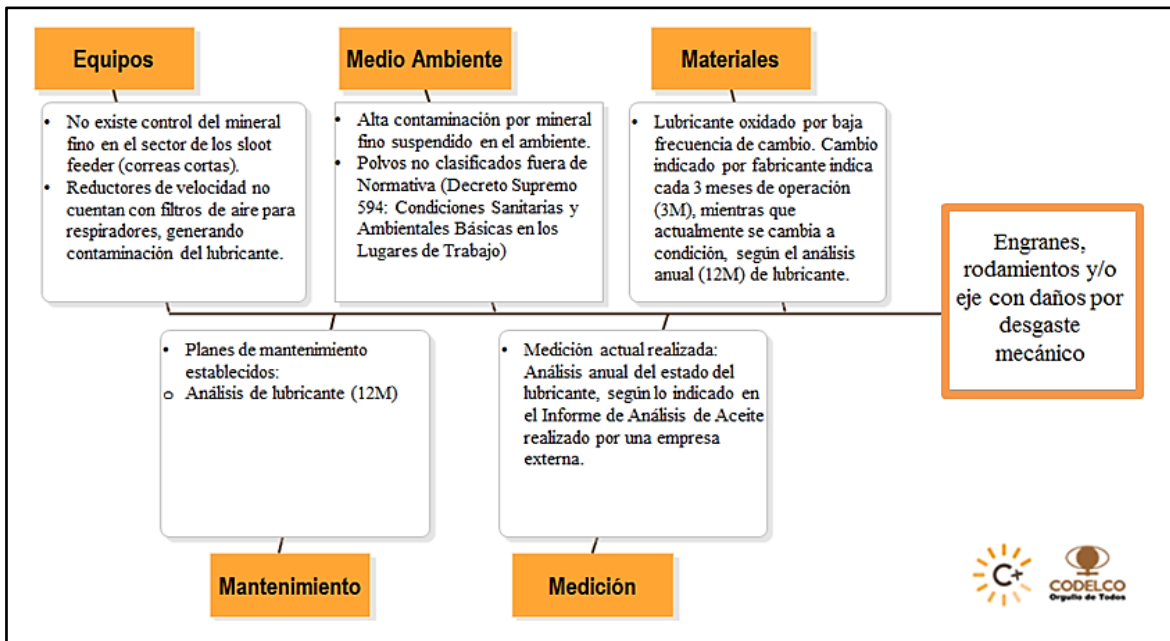


Figura 4.7 - Diagrama causa-efecto, reductores de velocidad.

- **Equipos:** El daño en la geometría de los engranes y el desgaste de rodamientos en los reductores, se deriva –entre otras causas– por el exceso de mineral fino y polvo en el ambiente, el cual se presenta en mayor abundancia en correas cortas debido a que en esta zona no existen campanas de captación de polvo.

Anteriormente, se detectó que las cuatro fallas en reductores de velocidad en el período de estudio fueron en correas cortas.

Los reductores no cuentan con filtros que reduzcan el ingreso de mineral fino, adhiriéndose al lubricante y generando abrasión constante en la operación.

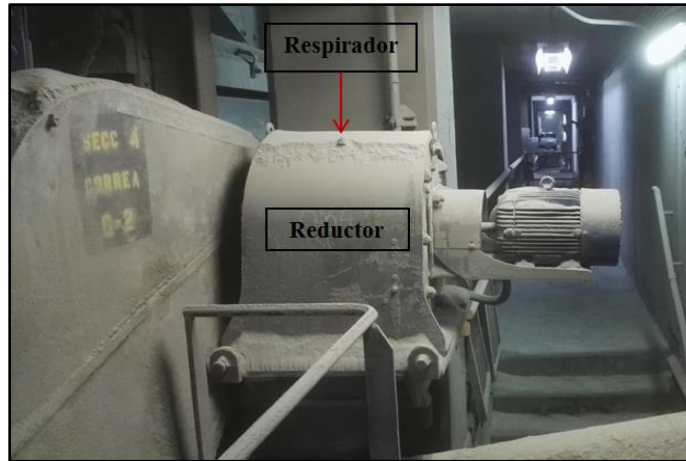


Figura 4.8 - Reductores de velocidad sin filtros de aire para respiradores.

- **Medio Ambiente:** El ambiente en el que operan los reductores de velocidad presenta alta contaminación por mineral fino y polvo, generando que exista una constante presencia de contaminantes. Si se adhiere además que no existe un control del polvo en esta zona, la operación de los reductores y de la totalidad de los componentes de las correas transportadoras es afectada.
- **Materiales:** La recomendación de la placa de lubricación del fabricante indica: “llenar hasta el nivel indicado con aceite base mineral de alto grado inhibidor de óxido y de espuma a la viscosidad recomendada. El punto de fluidez debe ser inferior a la temperatura ambiente mínima. Vaciar y enjuagar cada 2.500 [hr] o tres meses”.

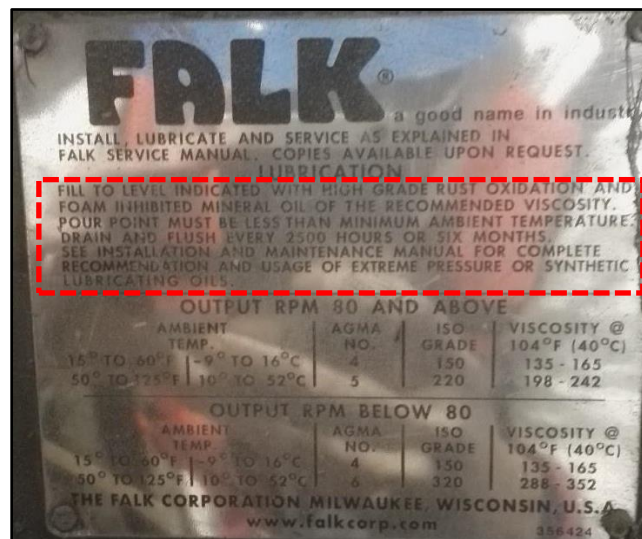


Figura 4.9 - Fotografía de placa de lubricación en reductores de velocidad.

Mientras que la recomendación para viscosidad según la temperatura ambiental, indica que el lubricante actualmente utilizado en reductores de velocidad (Castrol Optigear BM ISO VG 220) es el más óptimo para las temperaturas ambientales de la Planta, las que oscilan durante el año entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente:

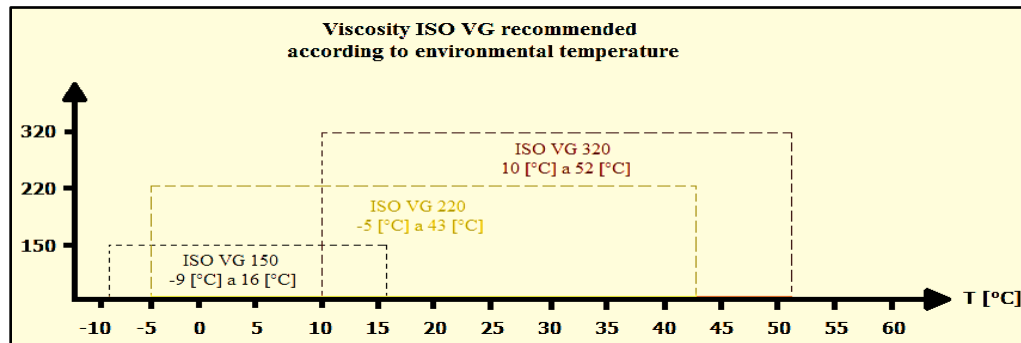


Figura 4.10 - Viscosidad recomendada en reductores de velocidad según temperatura ambiental.

(Referencia: Recommended Viscosity Gearbox Model: 52-7EZ3-06A7, Falk Corporation)

Sin embargo, la frecuencia de cambio recomendada por el fabricante (Figura 4.9) indica que debe realizarse cada 2.500 [hr], lo cual no se condice con el actual criterio establecido, realizando el cambio según la condición del lubricante (posterior al análisis anual de lubricante) generando la *oxidación* del lubricante, provocando la pérdida de su función protectora y la pérdida de sus características físico-químicas, y por tanto, se provoca el aumento en el desgaste de las partes, verificado por el índice PQ (el cual mide la relación de elementos ferromagnéticos en el lubricante), disminuyendo la confiabilidad del sistema.

La oxidación es un proceso en el que el aceite se va transformando mediante la polimerización de las moléculas orgánicas de las que está constituido. Como consecuencia, las propiedades del aceite van evolucionando respecto a las originales.

Esto indica que existen deficiencias en la frecuencia de cambio y por ende del mantenimiento aplicado en torno a la lubricación de reductores de velocidad, las cuáles deben ser corregidas.

- **Mantenimiento:** Actualmente, el mantenimiento que se aplica en los reductores de velocidad, consiste únicamente en un mantenimiento predictivo: Análisis Anual (12M) del Lubricante.

El fabricante de los reductores de velocidad (*Falk*) indica realizar un cambio de aceite cada 2.500 [hr] de funcionamiento (aproximadamente cada tres meses de operación) basado en la Norma AGMA 250.04: Lubricación de engranajes industriales cerrados.

Lo anterior permite evidenciar una falta de mantenimiento en los reductores de velocidad, dado que el único plan de mantenimiento actualmente activo, se realiza a una frecuencia menor a la requerida, generando la oxidación del lubricante y por tanto la disminución de la confiabilidad del sistema de correas transportadoras, afectando el EBITDA de la corporación.

Como se puede apreciar en el *Informe de Análisis de Aceite* (Anexo VI), la condición del lubricante al momento de la medición es severa, debido a su alta relación de elementos magnéticos –provenientes del desgaste del reductor– y al estado de oxidación en el que se encuentra, principalmente por el prolongado uso.

- **Medición:** La medición actual, como se indicó previamente, corresponde a una toma anual de muestra de lubricante. En esta, habitualmente se verifica que el lubricante se encuentra en un estado severo, debido a una alta oxidación, y a una alta presencia de elementos magnéticos –índice PQ– producto del desgaste de los engranes en la línea de paso. Los otros estados para la condición del lubricante son: anormal, precaución y normal.

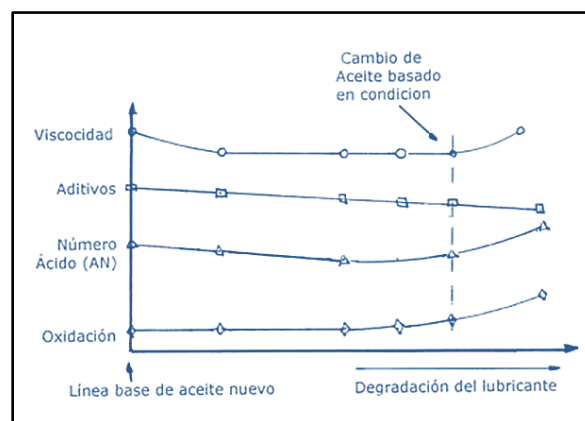


Figura 4.11 - Cambio de propiedades del lubricante según condición.

Como se verificó anteriormente, el cambio de lubricante recomendado por el fabricante según la Norma AGMA 250.04, debe realizarse cada 2.500 [hr] de operación –aproximadamente cada tres a cuatro meses de operación–, por lo que se evidencia que existe una falta de medición de los parámetros de operación de los lubricantes en los diferentes reductores.

4.1.5. Análisis de Resultados

Mediante el anterior análisis de modos de falla realizado se puede percibir que en *Correas Alimentadoras*, los modos de falla producto de deficiencias en lubricación generaron pérdidas económicas que ascienden a 975.983,65 [USD/Año], siendo éstos:

Componente	Modo de falla	Tiempo de reparación	Riesgo cuantitativo [USD/Año]	Riesgo cualitativo (HSEC)
Polea	Eje fisurado por desgaste de rodamiento de bloque de almohada	27,2 [hr]	822.750,5	C-C (Riesgo Mínimo)
Rodamiento de bloque de almohada	Desgaste mecánico producto de abrasión interna	3,8 [hr]	153.233,2	C-C (Riesgo Mínimo)

Tabla 4.11 - Modos de falla por lubricación en Correas Alimentadoras.

Es posible verificar que en correas alimentadoras, existen dos modos de falla generados por deficiencias en lubricación. Sin embargo, éstos son generados por un mismo modo de falla en común: el desgaste mecánico producto de la abrasión interna generada por contaminantes sólidos en rodamientos de rodillos a rótula.

Lo anterior es de relevancia debido a que un solo elemento (rodamiento) puede generar fallas que implican tiempos de detención de hasta 27,18 [hr] según los cálculos realizados para tiempo medio de reparación (MTTR), por conceptos de cambio de polea y rodamiento.

Mientras que en *Correas Cortas*, los modos de falla por lubricación generaron pérdidas económicas por 542.917,1 [USD/Año]:

Componente	Modo de falla	Tiempo de reparación	Riesgo cuantitativo [USD/Año]	Riesgo cualitativo (HSEC)
Reductor de velocidad	Engranajes, rodamientos y/o eje con daños por desgaste mecánico	23,43 [hr]	472.300,5	C-C (Riesgo Mínimo)
Rodamiento de bloque de almohada	Desgaste mecánico producto de abrasión interna	3,5 [hr]	70.616,6	C-C (Riesgo Mínimo)

Tabla 4.12 - Modos de falla por lubricación en Correas Cortas.

En *reductores de velocidad*, se puede percibir que el modo de falla principal está asociado a desgaste mecánico debido a una oxidación del lubricante derivado de una baja frecuencia de cambio del lubricante, la que según el fabricante, basado en la Norma AGMA 250.04: Lubricación de engranajes industriales cerrados, debe ser cada 2.500 [hr].

En tanto en los *rodamientos de rodillos a rótula*, similar a lo ocurrido en correas alimentadoras, el desgaste se debe a la alta contaminación presente en el lubricante, generando abrasión y prematuras fallas.

En la siguiente tabla se expresan las pérdidas asociadas a fallas por lubricación, versus las pérdidas totales por detenciones en correas transportadoras:

Pérdidas totales por detenciones en correas transportadoras	Pérdidas por detenciones asociadas a lubricación	Porcentaje de pérdidas por detenciones asociadas a lubricación en correas transportadoras
8,10 [MUSD]	2,97 [MUSD]	37%

Tabla 4.13 - Porcentaje del total de pérdidas por detenciones debido a lubricación.

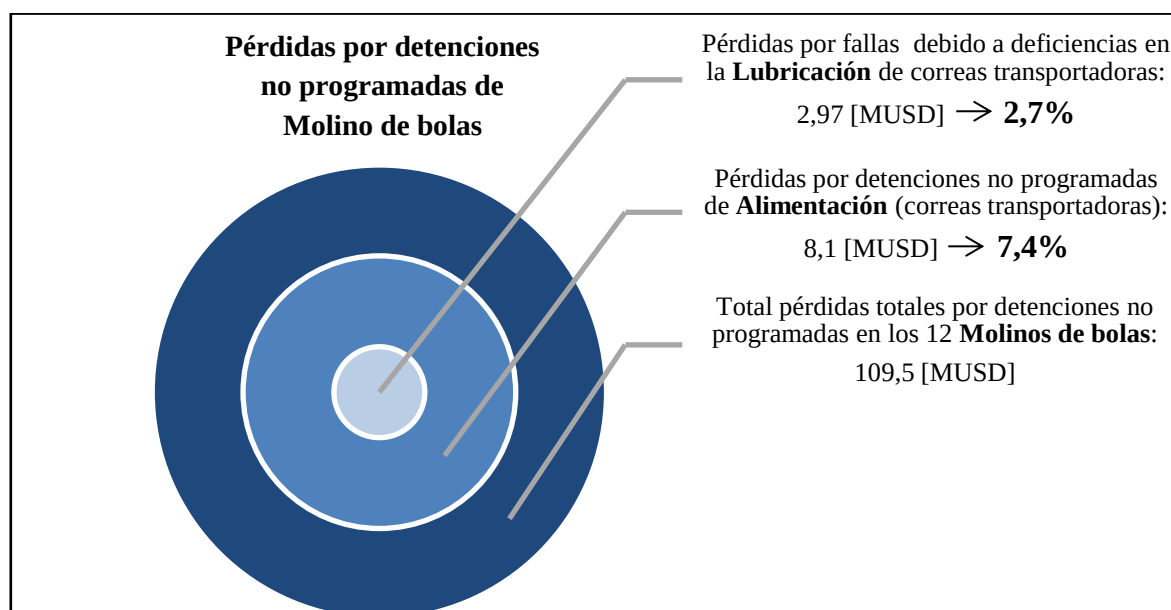


Gráfico 4.2 - Pérdidas por detenciones no programadas de Molinos de bolas.
Enero 01, 2017 – Diciembre 31, 2018.

4.2. ANÁLISIS DE MANTENIMIENTO

El análisis del mantenimiento busca encontrar puntos de mejora en base al análisis actual de las pautas de inspección y mantenimiento establecidos para los componentes en estudio.

Es por ello que se indagó en cada uno de los planes, revisando además las actividades asociadas a cada plan tanto para sistemas de instrumentación y control electrónico, sistemas de fuerza y control eléctrico, y sistemas mecánicos.

4.2.1. Análisis de Indicadores de Mantenimiento

4.2.1.1. Mantenibilidad (MTTR)

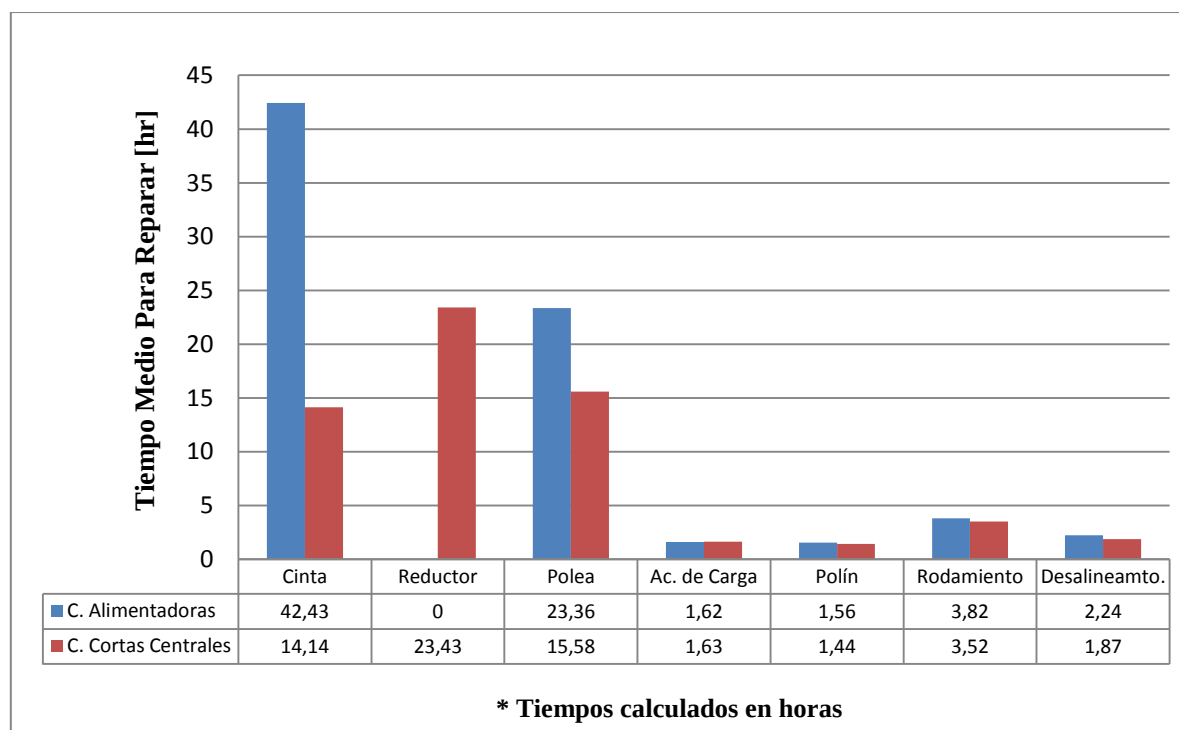


**Gráfico 4.3 - Tiempo medio para reparar funcionamiento en correas transportadoras.
Enero 01, 2017 a Diciembre 31, 2018.**

El tiempo medio para reparar (MTTR) refleja el tiempo promedio que se requiere invertir en un componente que presenta pérdida de funcionalidad, para volver a dejarlo en condiciones operativas según las condiciones en las que sea requerido, siendo además, un indicador de la Mantenibilidad.

- ***MTTR Cintas***

El MTTR calculado para el cambio de cinta no planificado en correas alimentadoras, arroja un valor de 42,43 [hr] según el registro de detenciones de la planta, en desmedro de un cambio de cinta planificado que implica una detención de 16 [hr] x 3 mantenedores.

En correas cortas en tanto, el MTTR calculado es de 14,14 [hr], mientras que un cambio planificado de cinta está establecido para 12 [hr] x 3 mantenedores.

Dichas diferencias se deben a que los cambios planificados de cintas, son proyectados mediante la Reunión Mensual de Planificación que se ejecuta en la PMC, en donde se establece la distribución de los distintos recursos y tiempos necesarios; mientras que un cambio no planificado de cinta, implica una intervención acorde a la cantidad de recursos disponibles al presentarse una falla, es decir, se debe ejecutar la tarea según la cantidad de mantenedores, operarios, supervisores, prioridad de la falla en el momento de la aparición y repuestos disponibles.

- ***MTTR Reductores de Velocidad***

En reductores de velocidad, se puede ver que las cuatro fallas presentadas en el período fueron en correas cortas, con un tiempo medio para reparar de 23,43 [hr]. En el caso de un cambio planificado de reductor, se dispone de 12 [hr] x 3 mantenedores, y de manera similar a los cambios de cinta, la diferencia se da principalmente por la cantidad de recursos disponibles al presentarse una falla.

Dentro de los motivos de esta diferencia además, se encuentran que las 12 [hr] señaladas, se establecen tanto para correas alimentadoras como para correas cortas; sin embargo, en el sector de las correas cortas no existe Puente Grúa como sí lo hay en la planta donde operan los reductores de correas alimentadoras, por lo que algunas maniobras se deben realizar con un Tecle Manual según lo señalado por los mantenedores, implicando mayores tiempos de ejecución para la realización del cambio.

- ***MTTR Poleas***

En tanto en las poleas de las correas alimentadoras, el MTTR calculado es de 23,36 [hr], mientras que en condiciones planificadas, se disponen 16 [hr] x 4 mantenedores para el cambio, tanto para correas alimentadoras como para correas cortas.

Su elevado tiempo en el registro de detenciones, es producto de que al presentarse una falla, se debe incurrir en gran cantidad de recursos para realizar la reposición, siendo además una tarea de alta complejidad debido a que se deben realizar múltiples maniobras, entre las que se cuenta el izaje.

Se debe tener en cuenta además, que existen diferentes condiciones para el cambio según la polea correspondiente; vale decir, para una polea motriz, de quiebre, tensora o de cola, son distintas las condiciones para realizar el cambio debido a la ubicación en la cinta.

El cálculo del tiempo medio para reparar una polea en las correas cortas en tanto, fue de 15,58 [hr] y se realizó con una única falla en el período, siendo esta, acorde a los tiempos dispuestos por una planificación normal.

- ***MTTR Acumulación de Carga***

La limpieza de la acumulación de carga es una tarea de mantenimiento no planificada de tipo restaurativo, con el fin de reestablecer las condiciones normales de funcionamiento de las cintas. Tanto en correas alimentadoras, como en correas cortas, el MTTR calculado es similar –1,62 [hr] y 1,63 [hr] respectivamente– y se ejecutan por 2-3 operarios, quienes despejan el trayecto alrededor de la cinta, quitan la acumulación de mineral en los ramales superior e inferior y devuelven el mineral perdido a la cinta. La acumulación de carga en tanto, es uno de los principales factores de desalineamientos en cintas.

- ***MTTR Polines***

Los cambios de polines son realizados cuando estos pierden su capacidad de giro y guía de la cinta. En dicha situación, se presentan altas fricciones debido al roce con la cinta, pudiendo por tanto, generar cortes longitudinales en esta cuando el desgaste en la superficie exterior del rodillo es excesivo.

Los polines se suelen cambiar en el Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M) –del cual se ahondará en el Análisis del Mantenimiento– de forma programada; sin embargo, cuando un polín presenta desgastes excesivos, se incurre en un cambio no programado.

El MTTR calculado para la ejecución de esta tarea en correas alimentadoras es de 1,56 [hr], y en correas cortas es de 1,44 [hr]. Los cambios de polines, no tienen tiempos programados en particular; sino que se incluye dentro de las tareas a realizar en el Plan de Mantenimiento 4M, el cual está dispuesto para 12 [hr] en correas alimentadoras, y 8 [hr] en correas cortas.

- ***MTTR Rodamientos de Soportes de Pie***

Los rodamientos presentes en los bloques de almohada que dan soporte y giro a los ejes de las distintas poleas, si bien son elementos que forman parte de la pauta de mantenimiento de las correas transportadoras en el Plan de Mantenimiento Cuatrimestral, son elementos que presentan fallas prematuras según lo señalado por mantenedores.

Estos rodamientos son lubricados manualmente con grasa Mobilux EP2 cada cuatro meses, siendo esta tarea altamente contaminante por razones que se especificarán en el Análisis de

Modos de Fallas presentado posteriormente. En correas alimentadoras, el tiempo medio para reparar este componente es de 3,82 [hr], mientras que en correas cortas es de 3,52 [hr].

Estos valores reflejan que los esfuerzos realizados en las mantenciones programadas, no cumplen con el objetivo de mantener la funcionalidad del componente, sino que perjudican la vida útil del mismo, por lo que en adelante, se hará hincapié en el presente componente dada su relación directa con la lubricación.

- **MTTR Desalineamiento de Cintas**

Los desalineamientos de cintas, son generados por la acumulación de mineral fino en los componentes que guían la cinta, como poleas y polines. Al existir acumulación de mineral en estos componentes, el trayecto normal de la cinta se ve alterado, generando desplazamientos laterales que provocan derrames de carga y por tanto detenciones no programadas. El alineamiento de cintas en correas alimentadoras presentó un MTTR calculado de 2,24 [hr] en el período de estudio; en tanto el MTTR calculado para correas cortas, es de 1,87 [hr].

4.2.1.2. Confiabilidad (MTBF)

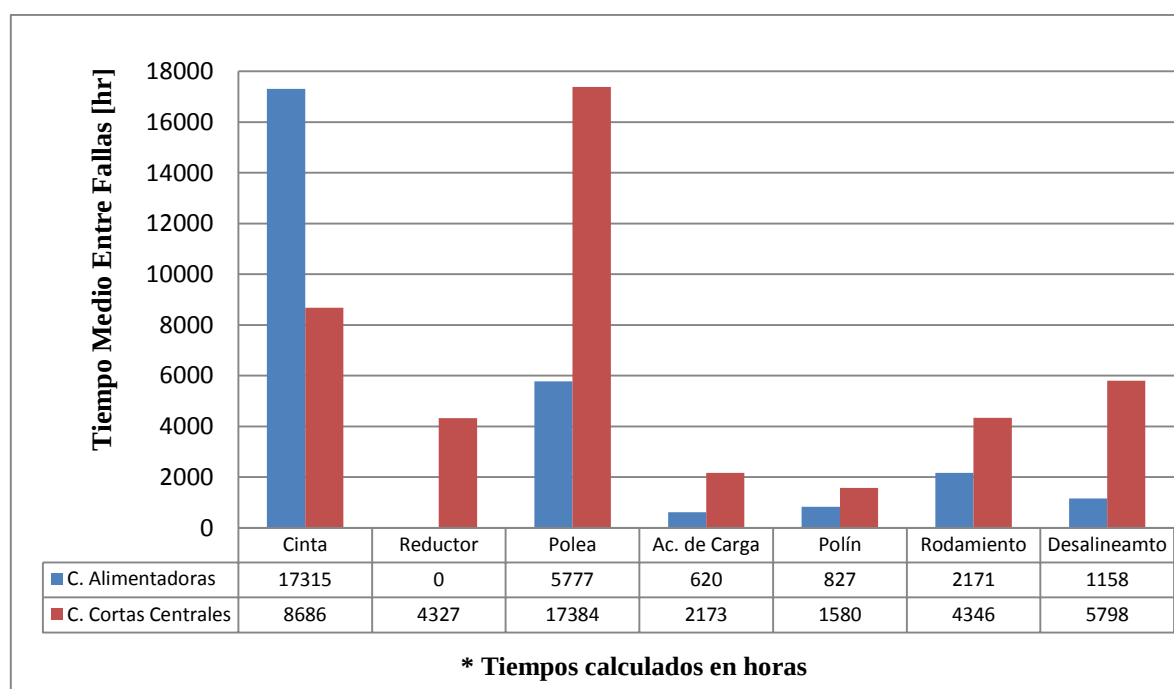


**Gráfico 4.4 - Tiempo medio entre fallas en correas transportadoras.
Enero 01, 2017 a Diciembre 31, 2018.**

El tiempo medio entre fallas (MTBF) establece el período promedio entre dos fallas consecutivas de un componente en estudio, según el contexto de funcionamiento, siendo un indicador de la Confiabilidad del sistema.

- ***MTBF Cintas***

El MTBF calculado para las fallas registradas en cintas de correas alimentadoras, indica un valor de 17.315 [hr], equivalente a alrededor de 721 días, en base al registro de detenciones de la planta. En correas cortas en tanto, el MTBF calculado es de 8.686 [hr], cada aproximadamente 362 días.

Se debe tener en cuenta además, que el proveedor de las cintas indica que la vida útil estimada para ambas cintas es de 48 meses; sin embargo, dada la falta de información respecto de los anteriores cambios, se desconoce si las cintas tuvieron cambios por fin de vida útil o por alguna falla presentada.

- ***MTBF Reductores de Velocidad***

En reductores de velocidad, dado que en el período de estudio no se presentaron fallas en correas alimentadoras, el tiempo medio entre fallas es nulo. Mientras que en correas cortas, el tiempo medio entre fallas calculado es de 4.327 [hr]; aproximadamente cada 180 días.

Las prematuras fallas presentadas en reductores de velocidad de correas cortas, tal como se verá en el tópico 3.1.2 Análisis de Modos de Fallas, se deben fundamentalmente al ambiente y a las condiciones en las que se encuentran operando.

- ***MTBF Poleas***

Las poleas en tanto, presentaron un tiempo medio entre fallas de 5.777 [hr] en correas alimentadoras, o análogamente, cada aproximadamente 241 días.

En tanto en las correas cortas, el MTBF calculado es de 17.384 [hr]; cerca de 724 días. Dichos valores, señalan que a pesar de existir una Ruta de Inspección Mensual en donde se revisa el estado de poleas –entre otros–, se presentaron fallas que provocaron detenciones no programadas, las que se deben fundamentalmente al desgaste de los rodamientos de rodillos a rótula utilizados en los soportes de pie, las que generan la fisura del eje de la polea.

- ***MTBF Acumulación de Carga***

El cálculo del tiempo medio entre fallas para la acumulación de carga en correas alimentadoras, indica que cada 620 [hr] –26 días– se debió efectuar una limpieza

restaurativa para correas alimentadoras; mientras que en correas cortas, las limpiezas se realizaron cada 2.173 [hr], aproximadamente cada 90 días.

Lo anterior se debe principalmente a que en correas alimentadoras existe mayor probabilidad de desalineamiento de cinta debido a la longitud de esta –51 [mt] entre la polea motriz y polea de cola– y por tanto de derrame de carga.

La acumulación de carga genera afecciones principalmente en los componentes del ramal inferior, como polines de retorno o polín de velocidad cero, además de desalineamientos de cintas.

- ***MTBF Polines***

Los polines en tanto, presentaron un MTBF calculado de 827 [hr] en correas alimentadoras y 1.580 [hr] en correas cortas, aproximadamente cada 34 y 65 días respectivamente. Los cambios de polines, tal como se señaló anteriormente, son realizados cuando estos pierden la capacidad de giro y guía de la cinta, generando altas fricciones y desgastes, los que pueden provocar potenciales cortes en cintas.

Los cambios realizados por tanto, se realizaron en polines que presentaron esta situación según lo señalado por la Ruta de Inspección Mensual, en la que también se revisa el estado de este componente.

- ***MTBF Rodamientos de Soportes de Pie***

Los rodamientos presentes en los bloques de almohada de las distintas poleas, tuvieron un tiempo medio entre fallas de 2.171 [hr] en correas alimentadoras, aproximadamente cada 90 días; y 4.346 [hr] en correas cortas, cerca de 181 días.

Estos rodamientos presentan fallas prematuras principalmente por el ingreso de material contaminante sólido en las pistas de rodadura, generado por múltiples acciones deficientes de la cuales se ahondará en el capítulo posterior.

- ***MTBF Desalineamiento de Cintas***

Los desalineamientos de cinta a su vez, presentaron un tiempo medio entre fallas de 1.158 [hr] –48 días– en correas alimentadoras, y 5.798 [hr] –241 días– en correas cortas.

Esta actividad de mantenimiento restaurativo, se efectúa para evitar o reducir el derrame de carga, y se genera por la acumulación de mineral fino en los componentes que guían la cinta, como poleas y polines.

4.2.2. Análisis de Planes de Mantenimiento

4.2.2.1. Planes de Mantenimiento en Sistemas de Instrumentación y Control Electrónico

- **Mantenimiento Mensual (M) en Detectores de Atollo**

Consiste en la revisión, calibración o cambio de los sensores de atollo ubicados en los chutes de alimentación de las correas, el cual emite una alerta en caso de detectar atollo mediante un sensor capacitivo. Se realiza para los 12 detectores de atollo presentes.

Plan de mantenimiento en detectores de atollo	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	1,8 [hr] (1 Mantenedor)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 56,75 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 681,12 [USD]
Detención de Alimentación:	No Requerida
Cantidad de Sensores Revisados por Pauta:	12 Sensores

Tabla 4.14 - Características principales de plan de mantenimiento en detectores de atollo.

- **Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M)**

El plan de mantenimiento cuatrimestral, está establecido en concordancia con la detención del molino a intervenir según la mantención preventiva de estos, que es realizada cada cuatro meses.

La mantención preventiva es realizada por operarios internos y terceros e incluye una serie de actividades de mantenimiento que se encargan de mantener en óptimas condiciones el sistema de monitoreo de las correas.

Las actividades principales están referidas a revisar safety switches, paradas de emergencia, cajas de conexiones, revisión de sellos y canalizaciones, calibración de sensores, entre otras actividades que sean requeridas.

Los componentes revisados en la actual pauta de mantenimiento presentan bajo índice de criticidad e índice de fallas, por lo que no se modificará.

Plan de mantenimiento en sistemas de instrumentación	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	3 [hr] (2 Mantenedores)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 195,40 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 7034,4 [USD]
Detención de Alimentación:	Requerida
Cantidad de Molinos Detenidos por Pauta	1 Molino

Tabla 4.15 - Características principales de plan de mantenimiento en sistemas de instrumentación.

4.2.2.2. Planes de Mantenimiento en Sistemas de Fuerza y Control Eléctrico

- ***Inspección Mensual (M) en Motores de Accionamiento***

El mantenimiento mensual en motores de accionamiento es realizado por el área eléctrica, consta de la inspección del estado de estatores, anclajes, cajas de conexiones, medición de temperatura y parámetros de operación, y de esta forma detectar posibles fallas. Es aplicado en la totalidad de las correas transportadoras (48 correas transportadoras).

Plan de mantenimiento mensual en motores de accionamiento	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	6 [hr] (1 Mantenedor)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 189,10 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 2269,2 [USD]
Detención de Alimentación:	No Requerida
Cantidad de Motores Revisados por Pauta:	12 Motores

Tabla 4.16 - Características principales de plan de mantenimiento mensual en motores de accionamiento.

- **Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M)**

Las actividades de mantenimiento cuatrimestral en el sistema de fuerza y control eléctrico de las correas alimentadoras y correas cortas, presentan actividades de mantenimiento enfocadas a mantener el motor accionador de las correas en óptimas condiciones de operación; entre otras operaciones de mantenimiento, se verifica y mide la presencia activa en los bornes de la protección de cortocircuito, se realiza limpieza de componentes y mantención de contactores, revisión de líneas de fuerza, revisión de sistemas de ventilación y revisión de variador de frecuencia.

Los sistemas de fuerza y control eléctrico presentan bajo índice de criticidad e índice de fallas por lo que no se modificará la actual pauta de mantenimiento

Plan de mantenimiento cuatrimestral en sistemas de fuerza y control eléctrico	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	4 [hr] (2 Mantenedores)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 252,35 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 9.084,6 [USD]
Detención de Alimentación:	Requerida
Cantidad de Molinos Detenidos por Pauta	1 Molino

Tabla 4.17 - Características principales de plan de mantenimiento cuatrimestral en sistemas de fuerza y control eléctrico.

4.2.2.3. Planes de Mantenimiento en Sistemas Mecánicos

- **Ruta de Inspección Mensual (M)**

Consiste en una inspección visual, cuyo fin es revisar el estado de raspadores, poleas, polines y cinta. En caso de detectar alguna falla, el inspector toma nota de ello, realizando posteriormente un informe en el cual señala aquellos componentes que deberán ser intervenidos, de manera tal de realizar la programación pertinente para el próximo mantenimiento cuatrimestral. En esta ruta, se excluyen componentes como reductores de velocidad y rodamientos, causantes de múltiples fallas en el período según lo revisado.



Figura 4.12 - Ruta de inspección mensual realizada por mantenedor.

Ruta de inspección mensual de sistemas mecánicos	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	4 [hr] (1 Mantenedor)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 130,80 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 1569,6 [USD]
Detención de Alimentación:	No Requerida
Cantidad de Correas Transportadoras Revisadas:	48 Correas Transportadoras

Tabla 4.18 - Características principales de ruta de inspección mensual de sistemas mecánicos.

- ***Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M)***

Al igual que los ya mencionados planes de mantenimiento cuatrimestrales, este plan en sistemas mecánicos está establecido en concordancia con la mantención planificada del molino correspondiente, y de esa manera aprovechar la detención de la línea productiva para la intervención completa de los diferentes subsistemas.

Contiene una serie de actividades adjuntas en el *Anexo VII*, y es realizado por dos a tres mantenedores durante 12 horas en Correas Alimentadoras; mientras que en Correas Cortas, la pauta de mantenimiento se realiza durante 8 horas por los mismos dos a tres mantenedores.

En este plan de mantenimiento, existe una actividad de lubricación realizada en los 10 rodamientos de soportes de pie de una Correa Alimentadora (2 por cada polea presente), con un tiempo de ejecución de 5,15 [hr] en el total de los rodamientos; mientras que en Correas Cortas, el tiempo de ejecución es de 2,33 [hr] (4 rodamientos de rodillos a rótula).

En total, en el plan de mantenimiento cuatrimestral, se dedican 7,5 [hr] de mantenimiento programado a labores de lubricación de un total de 20 [hr] de mantenimiento según la pauta de Correas Alimentadoras y Correas Cortas.



Figura 4.13 - Medición de juego radial interno en rodamientos de bloques de almohada.

Para realizar esta actividad, se debe desarmar el bloque de almohada, quitar el lubricante que recubre el rodamiento, realizar la medición de holgura, y posteriormente relubricar manualmente. Esta actividad es una fuente de contaminación del rodamiento, afectando la vida útil de este y por ende la confiabilidad del sistema.



Figura 4.14 - Rodamiento contaminado posterior a medición de juego radial interno.

Plan de mantenimiento cuatrimestral de sistemas mecánicos	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	Correas Alimentadoras: 12 (2 Mantenedores)
	Correas Cortas: 8 (2 Mantenedores)
Costo Aproximado de Pauta:	Correas Alimentadoras: \$ 490,20 [USD]
	Correas Cortas: \$ 375,10 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	Correas Alimentadoras: \$ 17.647,2 [USD]
	Correas Cortas: \$ 13.503,6 [USD]
Detención de Alimentación:	Requerida
Cantidad de Molinos Detenidos por Pauta	1 Molino
Pauta de Mantenimiento	Anexo VI

Tabla 4.19 - Características principales de plan de mantenimiento cuatrimestral de sistemas mecánicos.

- ***Medición Trimestral (3M) de Vibraciones en Sistemas Motrices***

La medición trimestral de vibraciones es una actividad de mantenimiento predictivo en la que se mide y analiza las vibraciones de los sistemas motrices de Correas Alimentadoras en los puntos señalados (Figura 4.15).

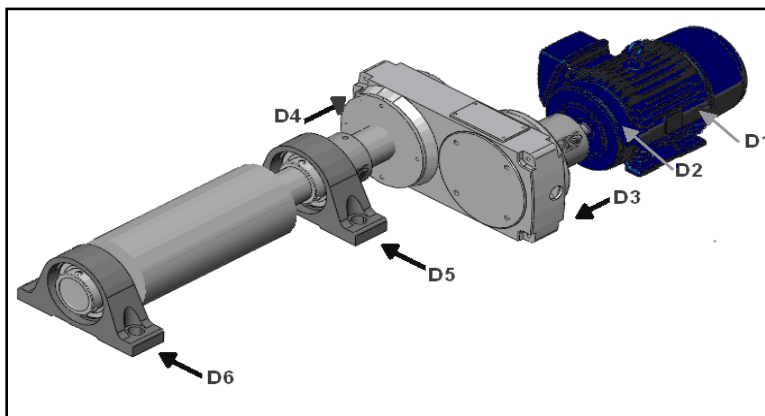


Figura 4.15 - Puntos de medición de vibraciones en sistemas motrices.

En las Correas Cortas en tanto, no se aplica el presente plan de mantenimiento, aplicándose sólo un análisis tribológico anual.

Medición trimestral de vibraciones en sistemas motrices de Correas Alimentadoras	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	6 [hr] (1 Mantenedor)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 110,25 [USD]
Costo Anual de Pauta:	\$ 2.646 [USD]
Detención de Alimentación:	No Requerida
Cantidad de Sistemas Motrices Revisados por Pauta:	12 Sistemas Motrices (Correas Alimentadoras)
Pauta de Mantenimiento	Anexo VII

Tabla 4.20 - Características principales de medición semestral de vibraciones en sistemas motrices de Correas Alimentadoras.

- ***Muestra Anual (12M) de Lubricante en Reductores de Velocidad***

El análisis de lubricantes, es una herramienta de mantenimiento proactivo, cuya finalidad es determinar la condición físico-química del lubricante y conocer el estado tribológico del reductor analizado; es decir, las causas de su desgaste, el nivel y origen de las impurezas, entre otras.

Esto se debe a que los reductores están compuestos de elementos, cuyo material base se va desprendiendo al trabajar durante ciclos prolongados, así como el lubricante presenta una composición establecida.

La toma de muestra de lubricante, es un indicador de los elementos y componentes que están presentes en el lubricante al momento de realizar la medición, señalando cuáles parámetros se escapan del normal establecido, y por ende, cuál sería la potencial falla a presentarse.

Anteriormente, se pudo apreciar que el fabricante de los reductores utilizados en la Planta recomienda cambiar el lubricante y realizar limpieza del reductor (*flushing*) cada 2.500 [hr] de funcionamiento, en circunstancias que actualmente el presente plan de mantenimiento se realiza anualmente, lo que evidencia una falta de mantenimiento.

Muestra anual de lubricante en reductores de velocidad	
Horas-Hombre requeridas aproximadas:	1 [hr] (2 Mantenedores)
Costo Aproximado de Pauta:	\$ 81 [USD]
Costo Anual de Plan de Mantenimiento:	\$ 972 [USD]
Detención de Alimentación:	No Requerida
Cantidad de Reductores de Velocidad por Pauta:	1 Reductor de Velocidad (Correa Alimentadora) + 3 Reductores de Velocidad (Correas Cortas)

Tabla 4.21 - Características principales de muestra anual de lubricante en reductores de velocidad.

4.2.3. Análisis de Resultados

Los componentes de correas transportadoras son agrupados en tres principales áreas: Sistemas de instrumentación y control electrónico, Sistemas de fuerza y control eléctrica, y Sistemas mecánicos. Cada área es mantenida por diferentes mantenedores según la especialidad de éstos.

Los costos anuales de los planes de mantenimiento establecidos actualmente para correas transportadoras según el área encargada se representan en el siguiente gráfico:

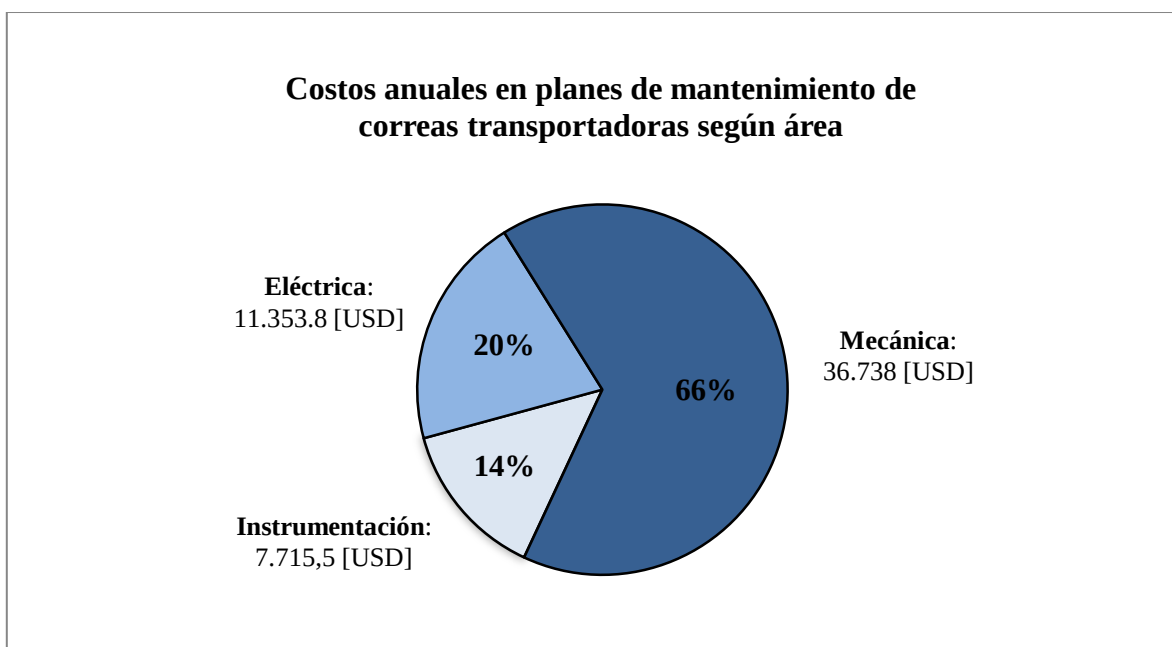


Gráfico 4.5 - Costo anual en planes de mantenimiento de correas transportadoras según área.

Se percibe que el área de Mecánica abarca el 66% de los costos anuales en mantenimiento de correas transportadoras, siendo además los sistemas revisados por esta área los que presentan mayor número de fallas anuales, y en particular aquellos componentes que presentaron fallas por deficiencias en lubricación, reductores de velocidad y rodamientos de bloques de almohada.

En el Gráfico 4.6 en tanto, se puede percibir que 294 horas-hombre son destinadas anualmente a tareas de lubricación en los planes de mantenimiento establecidos, representando el 19% del total de horas-hombre cuantificadas.

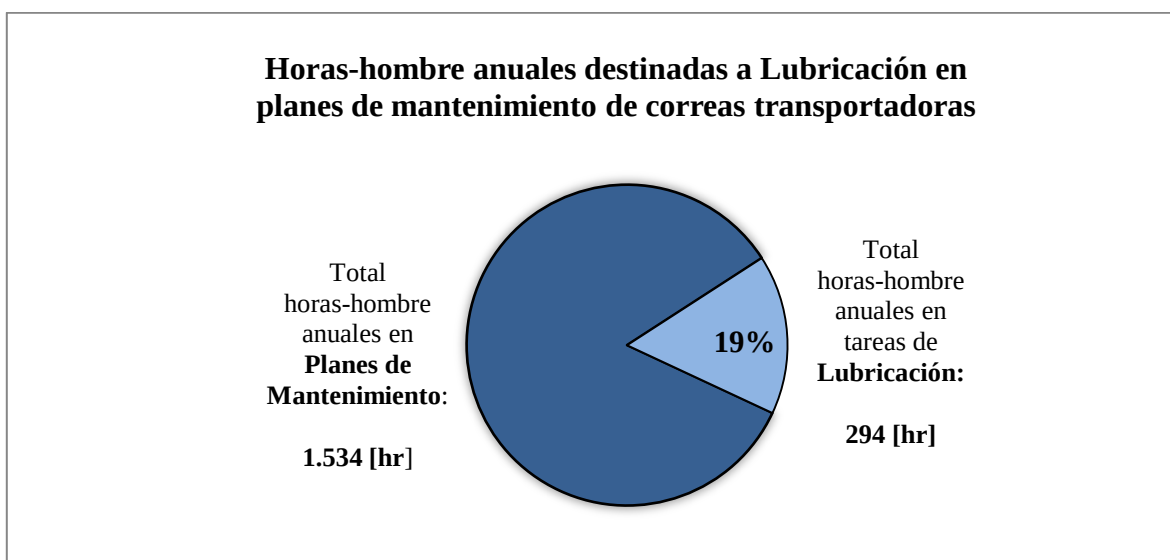


Gráfico 4.6 - Horas-hombre dedicadas a lubricación en planes de mantenimiento.

Estas 294 [hr] destinadas anualmente a tareas de mantenimiento asociadas a lubricación, son repartidas en los dos componentes antes vistos: Rodamientos de soportes de pie y Reductores de velocidad.

Tal como se puede percibir en el Gráfico 4.7, el 92% de las tareas anuales de lubricación son destinadas a los rodamientos mencionados; mientras que el 8% restante, es destinado a tareas de análisis de lubricante en reductores de velocidad.

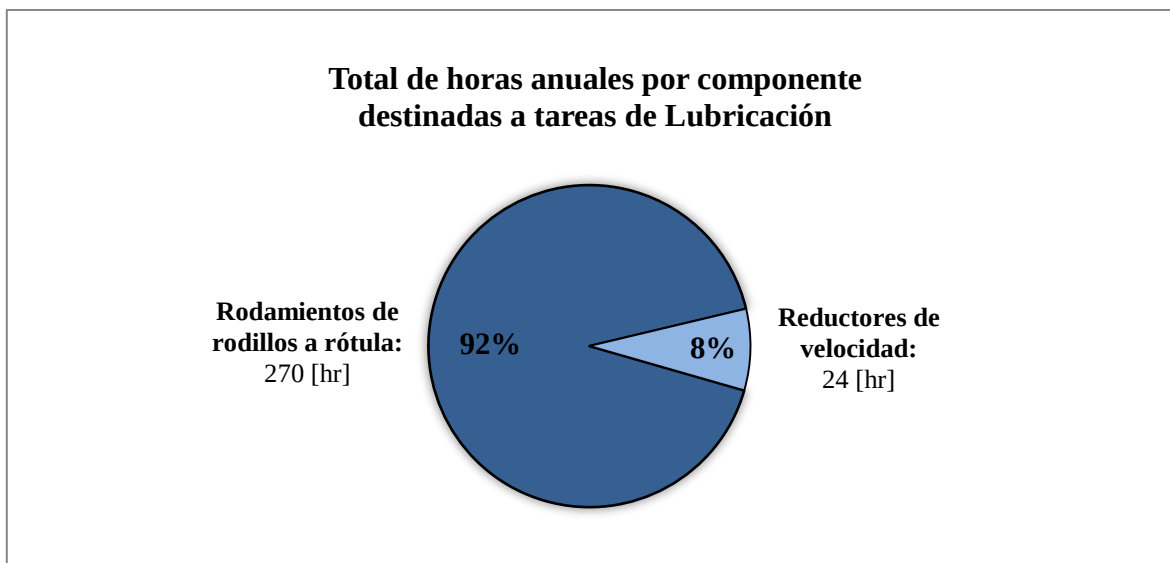


Gráfico 4.7 - Horas-hombre anuales por componente destinadas a tareas de Lubricación.

Según lo analizado en el presente capítulo, es posible percibir que existe una falta de mantenimiento en reductores de velocidad de correas cortas, dado que actualmente cuentan sólo con 1 plan de mantenimiento realizado cada 12 meses, dedicado al análisis tribológico del lubricante.

Esto se contrapone con la recomendación del fabricante, basado en la Norma AGMA 250.04: Lubricación de engranajes industriales cerrados, el cual señala que el lubricante debe ser cambiado cada 2.500 [hr] de operación (equivalente a aproximadamente 104 días) generando la polimerización de las moléculas orgánicas (oxidación), incidiendo en la pérdida de la acción protectora y deteriorando la composición físico-química del lubricante. Se verifica además que los análisis de vibraciones son realizados solamente en los sistemas motrices de correas alimentadoras, mientras que según lo verificado, las 4 fallas del período de estudio fueron en reductores de velocidad de correas cortas.

Se verifica en rodamientos de soportes de pie que las actuales tareas de mantenimiento son fuentes de contaminación y generan el desgaste prematuro del rodamiento. Esto debido a que existe manipulación indebida del rodamiento tanto en el montaje como en el mantenimiento, el cual se basa en la medición del juego radial interno cada 4 meses (plan de mantenimiento cuatrimestral), generando la adhesión de mineral fino al lubricante, provocando abrasión constante en la operación y en consecuencia, desgaste prematuro del rodamiento y disminución de la Confiabilidad del sistema.

5. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

A continuación se presentan las propuestas de solución de los modos de falla detectados en el sistema de correas transportadoras.

Las propuestas están separadas según el tipo de correa transportadora (correa corta o correa alimentadora), buscando aumentar la Confiabilidad del sistema mediante el aumento del tiempo medio entre fallas (MTBF), consiguiendo así una mayor Disponibilidad y por tanto una mayor Producción, que se traduce en un aumento del EBITDA (Beneficios antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización) para la corporación.

5.1. SISTEMA DE CORREAS CORTAS

Componente	Modo de Falla	Riesgo Anual [USD]	Propuestas de Solución	Costos Anuales [USD]
Reductor de Velocidad	Engranajes, rodamientos y/o eje con daños en geometría por desgaste mecánico	\$ 472.300,5	4.1.1. Cambio de lubricante en plan de mantenimiento cuatrimestral (4M). Se sigue recomendación de fabricante, basado en la Norma AGMA 250.04.	\$ 1.661,4
			4.1.2. Mantenimiento predictivo: Análisis vibracional trimestral (3M) de sistemas motrices. Permite detectar síntomas de posibles fallas en el sistema y planificar anticipadamente un mantenimiento programado.	\$ 661,5
			4.1.3. Filtros de aire para respiraderos. Permite filtrar las partículas contaminantes que afectan la acción de lubricante.	\$ 1.836
Rodamiento de bloque de almohada	Desgaste por abrasión debido a alta presencia de contaminantes sólidos	\$ 70.616,6	4.1.4. Rodamiento de rodillos a rótula sellado. Permite prescindir de relubricación, disminuyendo tiempos de mantenimiento en 2,3 [hr] por pauta en Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M). Genera una disminución anual de 84 [hr] de mantenimiento en Correas Cortas.	\$ 7.834
			4.1.5. Mantenimiento predictivo: Ultrasonido trimestral (3M). Permite detectar fisuras en los elementos del rodamiento anteriormente propuesto.	\$ 1.584

Tabla 5.1 - Síntesis de propuestas de solución en correas cortas.

(Referencia: Superintendencia de Mantenimiento, Gerencia Plantas división El Teniente)

5.1.1. Aumento de Frecuencia de Cambio de Lubricante en Reductores de Velocidad

Según la placa de lubricación recomendada por el fabricante basado en la Norma AGMA 250.04: Lubricación de engranajes industriales cerrados, se debe realizar el cambio del lubricante cada 2.500 [hr] de operación, junto con un *flushing* o limpieza del reductor.

Actualmente, el criterio establecido indica un cambio de lubricante según el resultado del análisis del lubricante, el cual es realizado anualmente. Esta condición genera que el lubricante presente alta oxidación y contaminación, presentando además un índice de elementos ferromagnéticos alto (índice PQ) producto del desgaste de los engranes del reductor. (Anexo VII)

La recomendación es incluir dentro de la nueva pauta de mantenimiento del Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M) de Sistemas Mecánicos el cambio de lubricante en reductores, siguiendo las recomendaciones entregadas por el fabricante cada 2.500 [hr] (cada 104 días aproximadamente).

Características principales de cambio de lubricante en Plan cuatrimestral	
Costo anual requerido:	\$ 1.661,4 [USD]
Horas-hombre anuales requeridas:	20 [hr]
Pauta de mantenimiento:	Anexo VI

Tabla 5.2 - Características principales de cambio de lubricante propuesto.

5.1.2. Análisis Vibracional Trimestral (3M) en Reductores de Velocidad

Dado que actualmente sólo se cuenta con un análisis tribológico realizado anualmente como único plan de mantenimiento en los reductores de velocidad de Correas Cortas, se propone la inclusión de este plan de mantenimiento sintomático con el fin de detectar posibles apariciones de fallas en el sistema motriz de correas cortas.

Características principales de análisis vibracional trimestral propuesto	
Costo anual de plan de mantenimiento:	\$ 661,5 [USD]
Horas-hombre anuales requeridas:	24 [hr]
Pauta de mantenimiento:	Anexo VII

Tabla 5.3 - Características principales de análisis vibracional trimestral propuesto.

5.1.3. Filtros de Aire para Respiraderos en Reductores de Velocidad

Para evitar el ingreso de mineral fino suspendido en el ambiente, el que, por lo visto en el Capítulo 2.5 está fuera de la normativa, se propone la instalación de filtros de aire que

reemplazan el tapón de ventilación estándar. Como el aire es arrastrado hacia el reductor a través del respiradero, los elementos filtrantes captan las partículas contaminantes, permitiendo que se reduzca considerablemente la contaminación del lubricante.

En la Figura 5.1 es posible apreciar un filtro de aire para un respirador de reductor. Para el montaje, se reemplaza la tapa de ventilación estándar con uno o varios adaptadores.

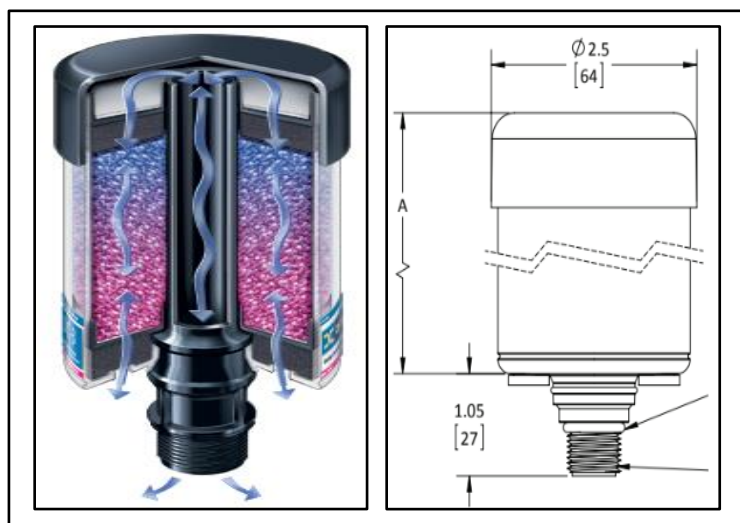


Figura 5.1 - Filtro de aire para respiradero de reductores de velocidad.

Entre las principales características del modelo cotizado, se encuentran las siguientes:

Principales características de filtro de aire requerido para reductores	
Marca:	Lubrication Engineers
Modelo requerido:	LEXS375-13
Volumen de reductor recomendado:	15 [gal] / 57 [L]
Dimensiones:	Conexión: 3/8"
	Altura: 3,9 [in] / 9,9 [cm]
	Ancho: 2,5 [in] / 6,4 [cm]
Rango de temperatura recomendado:	-29°C a 93°C
Costo anual requerido:	\$ 1.836 [USD]

Tabla 5.4 - Características de filtro respirador cotizado para reductores de velocidad de correas cortas.

5.1.4. Rodamientos de Rodillos a Rótula Sellados

Los rodamientos de rodillos a rótulas de algunas series, pueden ser solicitados con sellos obturadores laterales, permitiendo incrementar significativamente la vida útil en entornos contaminados. Estos rodamientos se lubrican previamente con una grasa

especialmente formulada y se sellan con sellos de contacto altamente eficaces. De esta manera, no es necesario lubricar nuevamente los rodamientos durante toda su vida útil.

Lo anterior implica una reducción en los tiempos de mantenimiento debido a lubricación manual en 84 [h/año] en correas cortas, generando una brecha para aumentar la producción y por tanto el EBITDA de la empresa.

La Figura 5.2 muestra un rodamiento que está sellado en ambos costados, lo que le brinda una barrera protectora frente a los contaminantes del ambiente. A su vez, los sellos cumplen la función de retener el lubricante, incorporado de fábrica en el interior del rodamiento.



Figura 5.2 - Rodamiento de rodillo a rótula sellado.

(Referencia: SKF Rodamientos)

En un entorno contaminado, un rodamiento sellado tiene una vida nominal hasta cuatro veces mayor que la de un rodamiento común lubricado manualmente.

Una mayor vida útil significa una mayor confiabilidad, y así mismo, un funcionamiento más productivo y rentable.

Algunos de los beneficios son:

- Incremento significativo del tiempo productivo
- Reducción significativa de la necesidad de mantenimiento
- El sellado conserva la grasa y ofrece una mayor durabilidad y eficacia
- Menor impacto medioambiental
- Mayor seguridad para los trabajadores
- Disminuyen temperatura de funcionamiento hasta 20°C, lo que permite duplicar la velocidad nominal límite.

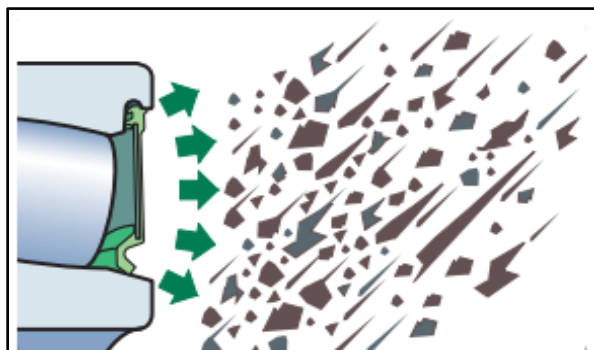


Figura 5.3 - Sello obturador evitando ingreso de partículas contaminantes en rodamiento.

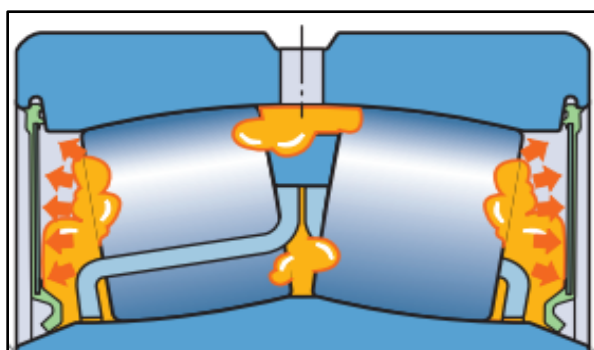


Figura 5.4 - Sello obturador evitando salida de lubricante del rodamiento.

Los rodamientos de rodillos a rótula sellados son adecuados para una amplia gama de aplicaciones: elevadores, maquinaria agrícola, ventiladores y maquinaria hidráulica, equipos en el sector alimenticio, cintas transportadoras, entre otros.

Las desventajas que presentan este tipo de rodamientos, son la insuficiente o nula capacidad de protección contra contaminantes líquidos –como fluidos ácidos– y su baja capacidad de aplicación en operaciones con altas velocidades angulares.

Las principales características del rodamiento de rodillos a rótula sellado cotizado, son:

Principales características de rodamiento de rodillos a rótula sellado	
Marca:	SKF
Modelo requerido:	SKF 22215-2RS
Valor total del rodamiento:	\$ 163,2 [USD]
Costo anual requerido:	\$ 7.834

Tabla 5.5 - Principales características de rodamiento sellado cotizado para soportes de pie de correas cortas.

5.1.5. Ultrasonido Trimestral (3M) en Rodamientos Propuestos

Para detectar la aparición de posibles fallas en el rodamiento sellado, se propone utilizar la técnica de ultrasonidos. Con este plan se puede detectar el desgaste prematuro de las pistas o elementos rodantes del rodamiento y permitir la toma de decisiones anticipadas a una falla.

Características principales de ultrasonido trimestral para rodamientos sellados	
Costo anual de plan de mantenimiento:	\$ 1584 [USD]
Horas-hombre anuales requeridas:	30 [hr]
Pauta de mantenimiento	Anexo VIII

Tabla 5.6 - Mantenimiento trimestral por ultrasonido para rodamientos sellados de correas cortas.

5.2. SISTEMA DE CORREAS ALIMENTADORAS

Componente	Modo de Falla	Riesgo Anual [USD]	Propuestas de Solución	Costos Anuales [USD]
Polea	Eje de Polea fisurado por desgaste de rodamiento de bloque de almohada	\$ 822.750,5	4.2.1. Rodamiento de rodillos a rótula sellado. Permite prescindir de relubricación, disminuyendo tiempos de mantenimiento en 5,2 [hr] por pauta en Plan de Mantenimiento Cuatrimestral (4M). Genera una disminución anual de 187,2 [hr] de mantenimiento en Correas Alimentadoras.	\$ 20.055
Rodamiento de bloque de almohada	Desgaste por abrasión debido a alta presencia de contaminantes sólidos	\$ 153.233,2	4.2.2. Mantenimiento predictivo: Ultrasonido trimestral (3M). Permite detectar fisuras en los elementos del rodamiento anteriormente propuesto.	\$ 3.960

Tabla 5.7 - Síntesis de propuestas de solución en correas alimentadoras.
(Referencia: Superintendencia de Mantenimiento, Gerencia Plantas división El Teniente)

5.2.1. Rodamientos de Rodillos a Rótula Sellados

Tal como para correas cortas (5.1.4) se proponen rodamientos de rodillos a rótula sellados para los bloques de almohada de las distintas poleas.

Esto permitirá la reducción del tiempo de mantenimiento en 5,2 [hr] según la actual pauta de mantenimiento cuatrimestral establecida, significando una reducción de 187,2 [hr] anuales de mantenimiento programado utilizado para lubricación.

Las características del modelo cotizado se indican en la siguiente tabla:

Principales características de rodamiento de rodillos a rótula sellado	
Marca:	SKF
Modelo requerido:	SKF 22217-2RS
Valor total del rodamiento:	\$ 205,7 [USD]
Costo anual requerido:	\$ 20.055 [USD]

Tabla 5.8 - Principales características de rodamiento sellado cotizado para bloques de almohada de correas alimentadoras.

5.2.2. Ultrasonido Trimestral (3M) en Rodamientos Propuestos

Al igual que en correas cortas (5.1.5), se propone el mantenimiento trimestral de rodamientos sellados mediante ultrasonido, y así detectar la aparición de posible fallas. Las características del mantenimiento propuesto son:

Características principales de ultrasonido trimestral para rodamientos sellados	
Costo anual de plan de mantenimiento:	\$ 3960 [USD]
Horas-hombre anuales requeridas:	75 [hr]
Pauta de mantenimiento	Anexo VIII

Tabla 5.9 - Mantenimiento trimestral por ultrasonido para rodamientos sellados de correas alimentadoras.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se detallan los elementos que constituyen el flujo de caja de las propuestas anteriormente presentadas. Posteriormente, se calculan los principales indicadores financieros a utilizar, con lo cual se puede determinar la factibilidad económica de las propuestas de inversión.

6.1. Aumento de Producción

Constituye el principal parámetro que da origen a un aumento de ingresos debido a las propuestas de solución presentadas.

Debido a que el cambio propuesto de rodamientos de rodillos a rótulas lubricados manualmente a rodamientos sellados genera una disminución de **271,2 [hr]** anuales, al prescindir de dichas horas de lubricación, el mantenimiento que se esté llevando a cabo adelanta su hora de término y por ende el sistema se puede poner en marcha antes, ganando de este modo un aumento de la producción mediante el aumento de horas producidas. La cantidad de mineral producido mediante esta propuesta se transforma a un valor monetario, siendo dicha cifra la que se utilizará para el presente flujo de caja.

Dado que las correas transportadoras de la planta transportan tonelajes distintos (Correas transportadoras de Molinos 1-8: 160 [t/hr]; Correas transportadoras de Molinos 9-12: 210 [t/hr]) se dividirán las 271,2 [hr] en 12, dado que corresponde al total de Molinos presentes, siendo el tiempo equitativo para cada sistema de correas transportadoras.

Lo anterior indica que en el sistema de correas transportadoras de cada molino de bolas, se prescinde de 22,6 [h/año] de lubricación, siendo repartidas entre Correas Cortas y Correas Alimentadoras.

Utilizando lo indicado en el *Anexo I – Cálculo Monetario de Producción por Molino*, las horas de producción a aumentar, y la conversión de dólares a pesos chilenos según el valor del dólar registrado el día 01 de Diciembre, 2018: \$681,99 [CLP] (Referencia: www.valor-dolar.cl) se puede indicar que el aumento monetario en la producción es:

Molino	Monto por aumento de producción [USD]	Monto por aumento de producción [CLP]
Molino 1-8	\$ 1.617.865,3	1.103.367.956
Molino 9-12	\$ 1.061.723,6	724.084.878
Total:	\$ 2.679.588,9 [USD/año]	\$ 1.827.452.834 [CLP/año]

Tabla 6.1 - Cálculo monetario de aumento de producción por propuesta de solución.

6.2. Inversión y Depreciación de Activos

La inversión inicial en activos corresponde al desembolso necesario para las propuestas presentadas anteriormente, respecto de los rodamientos sellados y los filtros de aire para reductores de velocidad. La información se encuentra tabulada a continuación:

Activo	Inversión [CLP]	Vida útil (1)	Depreciación [CLP/Año]
Correas Cortas			
Rodamientos sellados	\$ 5.342.710	5 años	\$ 1.068.542
Filtros de aire	\$ 1.252.134	5 años	\$ 250.427
Correas Alimentadoras			
Rodamientos sellados	\$ 13.677.310	5 años	\$ 2.735.462

Tabla 6.2 - Inversión inicial y depreciación de activos.

(Referencia: Servicio de Impuestos Internos)

6.3. Costos por Planes de Mantenimiento Propuestos

Dentro del flujo de caja, se debe considerar los costos adheridos que se deben desembolsar para los planes de mantenimiento propuestos para rodamientos y reductores de velocidad. Las propuestas de los planes de mantenimiento para los componentes señalados se encuentran tabulados según la siguiente información:

Plan de mantenimiento	Costo requerido [CLP/año]
Correas Cortas	
Cambio de lubricante cuatrimestral (4M) en reductores de velocidad	\$ 1.133.058
Análisis vibracional trimestral (3M) en reductores de velocidad	\$ 451.136
Ultrasonido trimestral (3M) en rodamientos de bloques de almohada	\$ 1.080.272
Correas Alimentadoras	
Ultrasonido trimestral (3M) en rodamientos de bloques de almohada	\$ 2.700.680

Tabla 6.3 - Costos por planes de mantenimiento propuestos.

(Referencia: Superintendencia de Mantenimiento, Gerencia Plantas división El Teniente)

6.4. Flujo de Caja

Reuniendo los elementos y las consideraciones emanadas de la evaluación técnica, se elabora el flujo de caja de las propuestas, tal como se indica a continuación:

Ítem	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Aumento de producción		\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834
Costos (Tasa Dcto. 10%)		(\$ 5.365.146)	(\$ 5.901.661)	(\$ 6.491.827)	(\$ 7.141.009)
EBITDA		\$ 1.822.087.688	\$ 1.821.551.173	\$ 1.820.961.007	\$ 1.820.311.825
Depreciación (Lineal)		(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)
Inversión en activos	(\$ 20.272.154)				
Flujo de caja	(\$ 20.272.154)	\$ 1.818.033.257	\$ 1.817.496.742	\$ 1.816.906.576	\$ 1.816.257.394

Tabla 6.4 - Flujo de caja, año 0 – año 5.

El quinto año se considera una reinversión correspondiente a los mismos componentes considerados en la inversión inicial, debido a que cumplen con su vida útil. Se considera un reajuste de sus precios con la tasa de descuento de 10%.

Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834	\$ 1.827.452.834
(\$ 7.855.110)	(\$ 8.640.621)	(\$ 9.504.684)	(\$ 10.455.151)	(\$11.500.667)	(\$12.650.733)
\$ 1.819.597.724	\$ 1.818.812.213	\$ 1.817.948.150	\$ 1.816.997.683	\$ 1.815.952.167	\$ 1.814.802.101
(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)	(\$ 4.054.431)
(\$ 22.299.369)					
\$ 1.793.243.924	\$ 1.814.757.782	\$ 1.813.893.719	\$ 1.812.943.252	\$ 1.811.897.736	\$ 1.810.747.670

Tabla 6.5 - Flujo de caja, año 6 – año 10.

6.5. Indicadores Económicos

6.5.1. Valor Actual Neto (V.A.N.)

El valor actual neto de la inversión, considerando una tasa de descuento del 10% es:

- **$VAN = \$ 1.632.485.352$ [CLP]**

El valor obtenido es bastante elevado, lo que indica que es un proyecto rentable y su ejecución es recomendable desde el punto de vista económico.

6.5.2. Tasa Interna de Retorno (T.I.R.)

Con el anterior valor actual neto, se determina que la tasa interna de retorno es:

- **$TIR = 88,7\%$**

La tasa interna de retorno es mucho mayor que la tasa de descuento aplicada en el flujo de caja del proyecto, por lo que el rendimiento económico de las propuestas presentadas es elevado y se recomienda su implementación.

6.5.3. Plazo de Recuperación (Payback)

Según el horizonte de evaluación, el payback de la inversión realizada es:

- **$PAYBACK = 1$ [año]**

El plazo necesario para recuperar la inversión inicial es menor a un año a partir de la puesta en marcha de las propuestas. Lo mismo ocurre con el periodo de reinversión. Este periodo es bastante corto, ubicándose en el contexto de las empresas mineras.

CONCLUSIONES

El estudio de las condiciones actuales de operación y mantenimiento de las correas transportadoras de la planta Molienda Convencional permitió detectar múltiples falencias en la lubricación de sus componentes, indicando que de la totalidad de componentes utilizados actualmente, existen sólo dos componentes críticos que presentaron fallas a raíz de las condiciones del lubricante en el período de estudio: reductores de velocidad, utilizados en los sistemas motrices de Correas Cortas; y rodamientos, utilizados en los soportes de pie de las distintas poleas, tanto de los sistemas de Correas Alimentadoras como en los sistemas de Correas Cortas.

Según las consideraciones realizadas en el presente trabajo, es posible mencionar que en el período de estudio (Enero 2017 – Diciembre 2018) las detenciones no programadas en correas transportadoras generaron pérdidas por aproximadamente 8,1 [MUSD] por el mineral no procesado, siendo el 37% de las detenciones no programadas del período debido a fallas por modos de falla asociados al lubricante, arrastrando pérdidas aproximadas de 2,97 [MUSD] por el mineral no procesado, siendo este valor equivalente al Riesgo Cuantitativo de los modos de falla.

Por otra parte, tras analizar los indicadores de desempeño del proceso de Molienda Convencional, la disponibilidad de los doce molinos de bolas estuvo por debajo de la disponibilidad planificada para el período; 92% versus 95% respectivamente. Esto se debió a la alta cantidad de horas no planificadas de mantenimiento correctivo realizado a los distintos sistemas que afectan la utilización de los molinos de bolas, siendo un 7,4% del total de fallas de la planta producto de correas transportadoras.

Los costos de mantenimiento a su vez, indican que el 14,4% del presupuesto asignado para el mantenimiento de la planta Molienda Convencional fue utilizado para el mantenimiento (correctivo, planificado y proactivo) de correas transportadoras, siendo el 97% del costo para mantenimiento correctivo de las distintas fallas en componentes.

El Análisis de Modos de Falla (AMFE) realizado en el sistema de correas transportadoras, evidenció que existen 4 modos de falla generados a raíz de una deficiente lubricación, presentados en los dos componentes anteriormente señalados: reductores de velocidad (Correas Cortas) y rodamientos utilizados en soportes de pie, tanto de Correas Cortas como en Correas Alimentadoras. El impacto de los modos de falla en salud, seguridad, medio ambiente y comunidad (HSEC) presentan un Riesgo Mínimo, equivalente a un impacto contenible en el lugar sin potenciales riesgos en la salud y seguridad de mantenedores.

Se percibe que en reductores de velocidad, las fallas del período se generaron por una baja frecuencia de cambio del lubricante, la cual según el fabricante, basado en la Norma AGMA 250.04: Lubricación de engranajes industriales, debe realizarse cada 2.500 [hr] de operación –equivalente a cerca de tres meses– mientras que actualmente el cambio de

lubricante es realizado a condición según el análisis tribológico realizado cada 12 meses. Dicha situación genera que exista una polimerización de los componentes orgánicos del lubricante provocando la oxidación del lubricante, y por tanto, el desgaste de las partes del reductor, incidiendo así en la aparición de fallas. Esta situación se agrava con el hecho de que existe una alta contaminación por mineral suspendido en el ambiente en la zona de Correas Cortas, el que ingresa constantemente al reductor debido a la falta de control en los respiraderos, adhiriéndose al lubricante y actuando como herramientas de corte.

En los rodamientos de los bloques de almohada en tanto, las causas raíces de las fallas se generaron por contaminación de la grasa lubricante debido a la alta presencia de partículas abrasivas adheridas, producto de la deficiente manipulación del rodamiento y de la grasa lubricante por parte de los mantenedores tanto en la instalación como en el mantenimiento.

Mediante el cálculo del tiempo medio entre fallas (MTBF) se determina que los reductores de velocidad de Correas Cortas presentaron fallas cada aproximadamente 180 días, mientras que en Correas Alimentadoras no hubo fallas en estos componentes en el período de estudio. En los rodamientos de soportes de pie de Correas Alimentadoras, se presentaron fallas cada aproximadamente 90 días, mientras que en Correas Cortas, cada 181 días. Dichos valores evidencian que la lubricación actualmente utilizada, puede generar fallas en períodos cortos, siendo preponderante las consideraciones emanadas del Análisis de Modos de Falla realizado.

Tras el análisis del mantenimiento efectuado en el sistema de correas transportadoras, se evidencia que el mantenimiento se divide en tres principales áreas: Instrumentación, Eléctrica y Mecánica, siendo ésta última la que requirió de mayores costos de mantenimiento, utilizando cerca del 66% de los recursos de mantenimiento. Dicha área se encarga del mantenimiento y de las tareas de lubricación del sistema, percibiendo que 294 horas-hombre son destinadas anualmente a tareas de lubricación en los planes de mantenimiento establecidos, representando el 19% del total de horas-hombre cuantificadas. Estas 294 [hr] son repartidas en los dos componentes antes señalados: rodamientos de soportes de pie y reductores de velocidad, siendo el 92% de las tareas anuales de lubricación destinadas a los rodamientos; mientras que el 8% restante, son destinadas a tareas de análisis de lubricante en reductores de velocidad.

Por las anteriores consideraciones se generan las propuestas de solución presentadas, las que según la evaluación económica realizada en un horizonte de evaluación de 10 años presentan una alta rentabilidad, con un Valor Actual Neto (V.A.N.) de aproximadamente 1,6 [MUSD] en cada año, una Tasa Interna de Retorno (T.I.R.) de 88,7% y un Plazo de recuperación (Payback) menor a 1 año.

Finalmente es importante destacar que para la correcta aplicación del mantenimiento y para la realización de posteriores estudios se requiere información fidedigna, cuyos registros históricos sean confiables y de calidad, además de contar con personal técnico ampliamente capacitado. Aplicar el Análisis de Modos de Falla en compañías que no tienen un correcto manejo de la información requiere varios ciclos de mejora continua para definir planes de mantenimiento con baja incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PISTARELLI, Alejandro. Manual de Mantenimiento – Ingeniería, Gestión y Organización.
- [2] MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, segunda edición. 1997
- [3] BLANCO, Emilio. Bloque III, Capítulo 12. Cintas Transportadoras Universidad de Cantabria, España.
- [4] CEMA, “Manual de transportadores de cinta”.
- [5] HERRERA, Ramón. Lubricación Aplicada, 2010.
- [6] TERMOVENT, “Ingeniería de mejoramiento instrumentación y control sistema westcrubber de Planta Molienda Convencional”, 2015. CODELCO, División El Teniente.
- [7] NORIA – Fundamentos de Lubricación, 2014.
- [8] NORIA – Lubricación Avanzada, 2014.
- [9] SKF. “Productos de mantenimiento y lubricación”, 2015.
- [10] LE Lubricants. “Reliability solutions”, 2015.

ANEXOS

ANEXO I – MOTORES DE CORREAS CORTAS

Correa Corta	Marca	Potencia [HP]	Voltaje [V]	RPM	Factor de Potencia [-]	Factor de Seguridad [-]
101	Allis Chalmer	5	550	1440	*	1,15
201	Siemens	5	575	1450	*	1
301	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
102	Allis Chalmer	5	550	1440	*	1,15
202	Westing House	5	575	1445	*	1,15
302	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
103	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
203	Allis Chalmer	5	550	1440	*	1,15
303	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
104	Allis Chalmer	5	550	1440	0,93	1,15
204	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
304	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
105	WEG	5	575	1440	*	1,15
205	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
305	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
106	Allis Chalmer	5	550	1440	*	1,15
206	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
306	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
107	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
207	Allis Chalmer	5	550	1470	*	1,15
307	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
108	Allis Chalmer	10	550	1460	*	1,15
208	Allis Chalmer	10	550	1450	*	1,15
308	Siemens	11 (KW)	575	1460	0,84	1
109	Stromberg	5,5 (KW)	575	1440	0,84	1
209	Stromberg	11 (KW)	575	1455	0,84	1
309	Stromberg	11 (KW)	575	1544	0,84	1
110	Stromberg	5,5 (KW)	575	1440	0,84	1
210	Stromberg	11 (KW)	575	1440	0,84	1
310	Stromberg	11 (KW)	575	1455	0,84	1
111	Stromberg	5,5 (KW)	575	1440	0,83	1
211	Stromberg	11 (KW)	575	1440	0,84	1
311	Stromberg	11 (KW)	575	1450	0,84	1
112	A.B.B	5,5 (KW)	575	1440	0,84	1
212	Stromberg	11 (KW)	575	1440	0,84	1
312	Stromberg	11 (KW)	575	1455	0,84	1

ANEXO II – REDUCTORES EN CORREAS CORTAS

Correa Corta	Marca	Modelo	Potencia [HP]	Ratio	RPM Out	RPM In	Capacidad para lubricante [U.S. Gals]
101	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
301	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
201	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
102	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
302	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
202	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
103	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
303	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
203	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
104	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
304	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
204	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
105	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
305	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
205	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
106	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
306	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
206	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
107	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
307	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
207	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
108	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
308	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
208	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
109	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
309	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
209	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
110	Link-Belt	29475133-AB	20	159	9	1450	15
310	Link-Belt	29475133-AB	30	159	9	1450	15
210	Falk	52-7EZ3-06A7	20	108.81	13.5	1450	15,5
111	Falk	52-7EZ3-06A7	20	159	9	1450	15,5
311	Falk	52-7EZ3-06A7	20	159	9	1450	15,5
211	Falk	52-7EZ3-06A7	20	159	9	1450	15,5
112	Link-Belt	29475133-AB	30	159	9	1450	15
312	Link-Belt	29475133-AB	30	159	9	1450	15
212	Link-Belt	29475133-AB	30	159	9	1450	15

ANEXO III – MOTORES DE CORREAS ALIMENTADORAS

Correa Alimentadora	Marca	N° Serie	Potencia [HP]	Voltaje [V]	RPM	Factor de Potencia [-]	Factor de Seguridad [-]
401	Sterling	25065	20	550	1430	*	1,15
402	Sterling	25196	20	550	1480	*	1,15
403	Baldor	10/381W736	25	575	1480	*	1
404	Sterling	220035	20	550	1480	*	1,15
405	Sterling	25095	20	550	1480	*	1,15
406	Sterling	25097	20	550	1480	*	1,15
407	Sterling	J025001	20	550	1470	*	1,15
408	Sterling	H02509	20	550	1480	*	1,15
409	Stromberg	8780MS	22 (KW)	575	1460	0,86	1
410	Baldor	C0508290068	22 (KW)	575	1460	0,86	1
411	Baldor	C0508290078	22 (KW)	575	1460	0,86	1
412	Baldor	C0508290088	22 (KW)	575	1460	0,86	1

ANEXO IV – REDUCTORES EN CORREAS ALIMENTADORAS

Correa Alimentadora	Marca	Modelo	Potencia	Ratio	RPM Out	RPM In	Capacidad para lubricante
401	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
402	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
403	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
404	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
405	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
406	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
407	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
408	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
409	Link-Belt	S/I	20	47.1	33.1	1500	15 (U.S. Gals)
410	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)
411	Rexnord	DBKL00433Z ZX11A-54727	20	43.78	33.1	1500	15 (U.S. Gals)
412	Falk	202-8EZ3-06A5	20	46.94	30	1450	15,5 (U.S. Gals)

ANEXO V – CÁLCULO MONETARIO DE PRODUCCIÓN POR MOLINO

(Referencia: Excelencia Operacional C+, división El Teniente, Codelco)

$$\% \text{Recuperación} = \frac{C \cdot c}{F \cdot f}$$

Dónde:

- $C \cdot c$ [lb]
- C = Toneladas calculadas de concentrado
- c = % cobre/molibdeno en concentrado
- f = % cobre/molibdeno en la cabeza
- F = Toneladas de alimentación [lb]

Según los datos de Julio, 2018:

(Referencia: Dirección Gestión de Calidad, Balance Mensual Oficial 31 Julio 2018)

- $\%Cu = 1,018$
- $\%Mo = 29\%$
- $\% \text{Recuperación} = 89,2\%$
- Molino de bolas 1-8 procesan ~ 160 [t/h] = 352.740 [lb/hr]
- Molino de bolas 9-12 procesan ~ 210 [t/h] = 462.971 [lb/hr]

$$C \cdot c = \% \text{Recuperación} * F * f$$

$$C \cdot c = 3203.0767344 \text{ [lb]} \text{ (Molino 1-8)}$$

$$C \cdot c = \% \text{Recuperación} * F * f$$

$$C \cdot c = 4204,03594 \text{ [lb]} \text{ (Molino 9-12)}$$

- Cotización Cobre Julio 31, 2018 = 2,793 [US\$/lb]
(Referencia: www.portalminero.com)
- US\$ por mineral procesado (Molino 1-8) = 8.948,37 [US\$/hr]
- US\$ por mineral Procesado (Molino 9-12) = 11.744,73 [US\$/hr]

ANEXO VI – ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE COMPONENTES DE CORREAS TRANSPORTADORAS

N°	Modo de Falla	Consecuencia Seguridad (P1)	Consecuencia Medio Ambiente (P2)	Consecuencia Producción (P3)	Consecuencia Costos de Mantenimiento (P4)	Consecuencia Flexibilidad Operacional (P5)	Puntaje Consecuencia $P1+P2+(P3 \times P5)+P4$	Indicador de consecuencia	Indicador frecuencia de falla	Puntaje Criticidad	Tipo de Criticidad
Correas Alimentadoras											
1	Eje fisurado por desgaste de rodamiento de bloque de almohada	12	0	12	1	1	25	4	3	12	Media
2	Revestimiento de polea desgastado	12	0	8	1	1	31	5	2	10	Baja
3	Desalineamiento de cinta	0	10	2	1	0,5	12	3	3	9	Baja
4	Corte longitudinal de cinta	0	10	12	1	1	23	4	2	8	Baja
5	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	0	0	2	1	0,5	2	2	4	8	Baja
6	Desgaste de rodamiento de bloque de almohada por abrasión interna	0	0	4	1	0,5	3	2	3	6	Baja
Correas Cortas											
1	Corte de cinta	0	10	8	1	1	19	3	2	6	Baja
2	Desalineamiento de cinta	0	10	2	1	0,5	12	3	3	9	Baja
3	Revestimiento de polea desgastado	12	0	8	1	1	21	4	2	8	Baja
4	Polín trabado por desgaste de rodamiento interno	0	0	8	1	0,5	5	2	3	6	Baja
5	Engranajes, rodamientos y/o ejes de reductor de velocidad con daños por desgaste mecánico	0	0	2	1	1	3	2	4	4	Baja
6	Desgaste de rodamiento de bloque de almohada por abrasión interna	0	0	4	1	0,5	3	2	3	6	Baja

ANEXO VII – INFORME DE ANÁLISIS DE ACEITE

UNITEC
Castrol

INFORME ANALISIS DE ACEITE

25138455

CLIENTE:	CODELCO TENIENTE	FECHA DE MUESTRA:	18-04-2018
EQUIPO:	Molino N° 6 / Reductor Correa 3	HORAS DE SERVICIO:	-
PRODUCTO/LINEA:	Optigear BM 220	OBSERVACIONES:	

ANÁLISIS ESPECTROGRÁFICO (ppm)

Fe	Cr	Pb	Cu	Sn	Al	Ni	Si	B	Na	Mg	Ca	P	Zn	Mo	Horas	Nº Muestra
42	<1	<1	4	1	12	<1	46	<5	5	1734	59	1372	1567	1392		25138455

CUENTA DE PARTICULAS (part/ml)

>4	>6	>14	Condición	Código ISO	Horas	Nº Muestra
			No se puede medir vía Laser por color oscuro		0	25138455
					0	0
					0	0
					0	0

ANÁLISIS FÍSICO

Nº DE MUESTRA	25138455	0	0	0	V.Típicos
VISCOSIDAD cSt	220				198/242
OXIDACION Abs	25				20 max
ÍNDICE PQ	155				<150
TAN (mgKOH/gr)					1,5 max
AGUA %vol	<0,05				0,1 max
ESTADO	STOP				

FECHA DEL INFORME: 30-04-2018

Acciones/ Recomendaciones para esta muestra:

Viscosidad en valores de Norma para ISO 220.

No se detecta contaminación con agua

Índice PQ, relación de elementos magnéticos alto.

Acción: Realizar cambio de lubricante.

CÓDIGOS

DEFECTO

ANORMAL

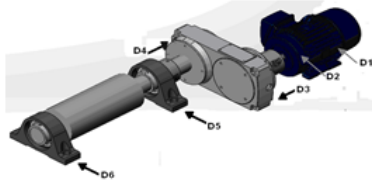
PRECAUCIÓN

NORMAL

ANEXO VII – PAUTA DE MANTENIMIENTO EN SISTEMAS MECÁNICOS (4M)

	Mantenimiento correa 01-02-03-04 molinos hardinge y fuller	Código:	Fecha: 28/09/2018	Versión:1
TABLA	DESCRIPCIÓN			
1.- Objetivos y Alcance	Realizar métodos de trabajos el cual permita minimizar, eliminar o controlar riesgos, peligros y accidentes en la ejecución de esta tarea.			
2.- Recursos para realizar el trabajo	2.1.- Personal.	2.2.- EPP críticos para la tarea.	2.3.- Equipos, herramientas y materiales	
	Ejecutantes: 1- Operador 2- mantenedores	Epp. básicos: Lentes de seguridad Guantes Overol de papel Zapatos de seguridad Casco Mapero Epp. especiales para la tarea Respirador Arnés Guantes de goma	Herramientas Martillo Barretilla corta Llave punta corona 15/16 -3/4 Chicharra Dados 15/16- 3/4 -9/16 Juego de llave Allen Grasa EP 2 Paños Repuestos (según amerite) Rodamientos 222 Rodamientos 517-515 Polines de retorno, carga raspadores	
3.- Seguridad y Salud Ocupacional	Riesgos Críticos de la tarea	Medidas de Control		
	Golpeador por Golpeado contra Caída mismo nivel Caída distinto nivel Ex posición a polvo Uso de elemento químico no tóxico (grasa EP 2)	Uso de epp Herramientas en buen estado Caminar con precaución Uso de arnés Uso de respirador Uso de guantes de goma, portar hds		
TABLA	DESCRIPCIÓN			
4.- Descripción de la actividad	4.1 -Preparación de materiales y herramientas		NOTA1: Eliminar rices con grasas en sector molino 1. 	

ANEXO VIII – PAUTA DE MANTENIMIENTO MEDICIÓN DE VIBRACIONES (3M)

		Supertendencia de Confiabilidad Gerencia Plantas Ingeniería de Mantenimiento		TIPO PENDIENTE ☐ PLANIFICADO ☒ FALLA ☐ NO PLANIFICADO ☐ MODIFICACIÓN ☐		GASTO NORMAL ☒ EXTRA ☐		ESTADO EQUIPO ON ☒ OFF ☐ RESERVA ☐ OTRO ☐		Formato Versión Fecha		GPTA-SCIM-8-003 1 15-09-2018	
Registro Actividades de Inspección													
1 NOMBRE ACTIVIDAD				Inspección Sintomático 3M Correa									
UBICACIÓN TÉCNICA ICCN-PMC-CTR-401		Nombre Ubicación Técnica Correa 401		INTERNA		EXTERNA		OTRO		NOTAS			
NOMBRE EJECUTOR SKF		PUESTO DE TRABAJO MA1TM875		#		HH		#		HH		#	
FECHA INICIO 20-09-2018		HORA INICIO 8:20		FECHA TERMINO 20-09-2018		HORA TERMINO 8:40		OT 102441256		INSP		1	
COMPONENTE Motor, reductor y polea motriz		SINTOMA Vibraciones		1		0,3		#		HH		#	
CAUSA Control programado de vibraciones		SUPERVISOR Karina Castro P.		#		HH		#		HH		#	
NOMBRE/FIRMA / FECHA EJECUTOR		SKF		SUPERVISOR		Karina Castro P.		#		HH		#	
2.- ACTIVIDADES PRELIMINARES				A llenar por el Supervisor (Procedimiento, Instructivos, Protocolos, Normativas, Charla 5 minutos, etc)									
Entrega documento de ingreso en sala de control.													
Comunicar a Jefe de turno y de Mantenimiento de las actividades a realizar.													
Evaluar los riesgos críticos existentes en el área de la actividad, si existe algún riesgo la actividad se evalúa nuevamente y se busca corregir la situación. De no ser posible, se reprograma actividad, previa comunicación a involucrados.													
El Jefe de turno analiza y firma el PTS de la actividad.													
3.- ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO													
													
Imagen de referencia correas													
Realizar medición de vibraciones con instrumento Microlog, según orden establecido para: Motor, Reductor y Descansos de polea (imagen de referencia).				EJECUTADA?		OBSERVACIONES							
				Si		No							
Medir envolvente de aceleración de los rodamientos en el sentido horizontal.				X									
Medición motor D1				X				Equipo sin alarma					
Medición motor D2				X									
Medición descanso reductor D3				X									
Medición descanso reductor D4				X									
Medición descanso D5				X									
Medición descanso D6				X									
Realizar medición de temperatura con pirómetro a los componentes establecidos.				EJECUTADA		OBSERVACIONES							
				Si		No							
Medir temperatura motor				X				Temperatura normal					
Medir temperatura reductor				X				Temperatura normal					
Medir temperatura rodamientos				X				Temperatura normal					
NOTAS: PARA CUALQUIER MEDICIÓN ANORMAL EN UN EQUIPO SE GENERARÁ UN INFORME DE EXCEPCIÓN QUE SERÁ ENVIADO A LOS RESPONSABLES E INVOLUCRADOS DEL ÁREA. LAS EMERGENCIAS O CASOS CRÍTICOS SERÁN INFORMADOS AL INSTANTE A LOS RESPONSABLES DEL ÁREA, ADEMÁS DEL RESPECTIVO INFORME QUE SE ENVIARÁ POSTERIORMENTE.													