

Evaluación técnica económica de la implementación de un Sistema de Lubricación automático para un equipo crítico.

Trabajo de Titulación para optar al
Título Profesional de Ingeniería en
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Felipe Ignacio González Poblete

Profesor Guía:

Ing. Carlos Baldi González

2025

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo:

EVALUACIÓN TÉCNICA ECONOMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN AUTOMÁTICO PARA UN EQUIPO CRÍTICO

Nombre del candidato(a):

FELIX GONZÁLEZ POBLETE

Carrera / Grado:

INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

Campus: VISTA DEL MAR

Departamento:

MECANICA USM

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 25/06/26

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/06/26

Firma: 

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

RESUMEN

KEYWORDS: EVALUACION, TRABAJO EN TERRENO, LUBRICACIÓN

En el marco de la presente evaluación, se realizó una revisión exhaustiva de los procedimientos de mantenimiento aplicados en la planta Minera los pelambres, en conjunto a Berliam SpA. centrandó la atención en los sistemas pertenecientes al área de flotación, las celdas Scavenger, principalmente un proceso de análisis tuvo como propósito identificar oportunidades de mejora en la gestión de las actividades de mantenimiento, con el fin de fortalecer la confiabilidad operativa de los equipos y garantizar una mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles.

Durante la etapa inicial del estudio, se efectuó un levantamiento de información sobre las rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo, con especial énfasis en el procedimiento de lubricación de un equipo catalogado como crítico dentro del proceso productivo, tanto por su elevado costo de adquisición y operación como por su alta demanda operacional. La correcta lubricación de este tipo de equipos resulta determinante para su desempeño, ya que una deficiente aplicación del lubricante puede derivar en sobrecalentamiento, desgaste prematuro de componentes, fallas inesperadas o incluso paradas no programadas que afectan la continuidad del proceso.

En virtud de la criticidad de las celdas de flotación Scavenger y que cada intervención de mantenimiento por efecto de lubricación manual implica más de 13hrs de ejecución, junto a elevados costos operativos de la misma, se efectuó una propuesta de lubricadores automáticos, que además de optimizar los tiempos y costos asociados, mejora la disponibilidad de los rodamientos que componen la estructura de la celda.

Las pruebas desarrolladas permitieron evaluar la efectividad de los cambios propuestos, cuantificando las mejoras obtenidas en parámetros como la reducción del tiempo total de intervención, la disminución de riesgos asociados en zonas confinadas, la utilización más racional del lubricante y las horas-hombre involucradas.

Este reconocimiento representa un avance significativo hacia la implementación de prácticas de mantenimiento más eficientes, seguras, sostenibles, alineadas con los principios de mejora continua y confiabilidad operacional.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
SIGLAS Y SIMBOLOGIA	6
INTRIDUCCIÓN	7
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIOS ESPECIFICOS	9
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	10
1.1.Oportunidad	11
1.2.Fundamentos de las celdas	13
1.2.1. Historia de la empresa	16
1.2.2. 16	
1.2.3. 17	
1.2.4. Ubicación	18
1.3.Descripción física	19
1.3.1. 21	
1.4.23	
1.4.1. 23	
1.5.25	
1.5.1. 25	
1.5.2. 26	
1.5.3. 27	
1.5.4. 28	
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	29
2.1 Área de estudio	30
2.2. Descripción del sistema de giro y lubricación de la celda Scavenger	31
2.3 Muestra de estudio	34

2.4 Criterios de exclusión	35
2.5 Metodología de Solución	35
2.5.1	38
2.5.2	39
2.5.3	Sugerencias para la integración y cumplimiento de las normas 45
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y RESULTADOS	48
3.1.Diagnostico del sistema tradicional	49
3.2.Análisis del sistema con lubricador automático	51
3.3.Comparación técnica entre el sistema de lubricación tradicional y automático	54
3.3.1.	Comportamieto de linealidad y capacidad del proceso 54
3.3.2.	Seguridad y exposición al riesgo 55
3.3.3.	Confiabilidad operativa y calidad de la lubricación 56
3.3.4.	Impacto economico y costos de mano de obra 57
3.4.Recomendaciones	60
CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1 Ubicación Berliam SpA	19
Figura 1- 2 Organigrama flotación colectiva	20
Figura 1- 3 Organigrama de flotación colectiva 2	20
Figura 1- 4 Organigrama de la empresa	22
Figura 2- 1 Celdas scavenger área de flotación	30
Figura 2- 2 Eje vertical y parte externa de la celda Scavenger	31
Figura 2- 3 Posicionamiento del lubricador en el rodamiento 29428	33
Figura 2- 4 sistema Shell Tactic EMV Gadus	43
Figura 2- 5 Ficha técnica del Shell Gadus S3 V220C	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1 Definición de variables	Error! Bookmark not defined.
Tabla 2- 2 Comparativo de principales sistemas de lubricación automático	Error! Bookmark not defined.
Tabla 2- 3 Evaluación de los sistemas automáticos	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 1 Estimación de ciclos de lubricación manual	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 2 Ejecución sistema de lubricación automático	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 3 Características operativas de los lubricadores automáticos	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 4 Comparación ciclo de lubricación	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 5 Análisis de riesgo y mejoras con lubricador automático	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 6 Comparativo de disponibilidad del rodamiento	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 7 Costos de MO de sistema manual	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 8 Costos de MO para sistema automático	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 9 Comparativo de costos totales de los sistemas	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3- 10 Resumen de criterios para sistemas	Error! Bookmark not defined.

SIGLAS Y SIMBOLOGIA

A. SIGLAS

ISO: International Organization for Standardization
 SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería
 RCM: Reliability-Centered Maintenance
 PDCA: Plan – Do – Check – Act
 MTBF: Mean Time Between Failures
 MTTR: Mean Time To Repair

CMMS: Computerized Maintenance Management System

ALS: Automatic Lubrication System

NLGI: National Lubricating Grease Institute

EMV: Electromechanical Ventilation Model

GADUS: Línea de grasas industriales Shell Gadus S3 V220C

LAGD / LAGE: Modelos de SKF System 24

PLC: Programmable Logic Controller

B. SIMBOLOGÍA

°C: grados Celsius

ml: mililitros

bar: unidad de presión

h: horas

min: minutos

g: gramos

CLP: Pesos chilenos

ΔT : Variación de tiempo de intervención

ΔHH : Variación de horas-hombre

ΔL : Variación en el uso de lubricante

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento industrial constituye un pilar estratégico en la gestión de activos productivos dentro de la minería, particularmente en procesos críticos como la flotación, donde la continuidad operacional, la seguridad del personal y la confiabilidad de los equipos son determinantes para alcanzar altos niveles de productividad. En este contexto, la lubricación de componentes mecánicos cumple un rol fundamental al reducir la fricción, minimizar el desgaste y prolongar la vida útil de elementos críticos como rodamientos y ejes. Sin embargo, en muchas faenas mineras aún predominan procedimientos de lubricación manual que presentan importantes limitaciones operacionales, tanto en términos de eficiencia como de seguridad, lo que impacta directamente en la disponibilidad de los equipos y en los costos asociados al mantenimiento.

En el caso específico de las celdas Scavenger del área de flotación, el procedimiento de lubricación manual del sistema de rodamientos se realiza mediante bomba manual con el equipo detenido, lo que obliga a ejecutar múltiples ciclos de bloqueo y desbloqueo para cumplir con los criterios de relubricación establecidos. De acuerdo con el manual de mantenimiento de rodamientos SKF, el sistema compuesto por un rodamiento superior 22224 y un rodamiento inferior 29428 requiere una cantidad total aproximada de 205g de grasa por evento de relubricación, correspondiente a 62g para el rodamiento 22224 y 143g para el 29429. No obstante, debido a restricciones operacionales y a la adopción de un criterio conservador que limita la inyección a un máximo del 5 % de la cantidad total por ciclo, cada intervención permite incorporar solo alrededor de 10,2 g de lubricante. Como consecuencia, se requieren cerca de 20 ciclos completos de bloqueo, lubricación, desbloqueo y giro del equipo para completar el proceso.

Esta condición tiene un impacto directo y cuantificable en los tiempos y costos de mantenimiento. El tiempo total asociado a una lubricación manual completa alcanza aproximadamente 13 horas y 20 minutos por evento, considerando actividades de posicionamiento del equipo, desplazamientos a sala eléctrica, bloqueos y desbloqueos, conexión de la bomba manual y giros intermedios para redistribuir la grasa. Además, el procedimiento demanda la participación simultánea de dos mantenedores mecánicos, un instrumentista y un operador eléctrico, lo que implica elevados costos operacionales que, ascienden a 1.154.883 CLP. Estos antecedentes permiten caracterizar de manera objetiva la problemática del método manual, evidenciando un uso intensivo de recursos, una alta

exposición del personal a riesgos operacionales y una significativa interferencia con la continuidad del proceso productivo.

Frente a este escenario, la presente evaluación técnica se enfoca en el análisis de un sistema de lubricación automática ya implementado en las celdas Scavenger del área de flotación, como alternativa al procedimiento manual tradicional. Desde una perspectiva ingenieril, este cambio no se aborda únicamente como una mejora operativa, sino como una solución técnica orientada a optimizar el desempeño del sistema de lubricación mediante el control preciso de la dosificación, la reducción de intervenciones manuales y la eliminación de detenciones reiteradas del equipo. En contraste con el método manual, la implementación de un sistema de lubricación automática concentra la intervención humana en una única actividad inicial de instalación y puesta en marcha, con un tiempo aproximado de 1 hora y 5 minutos, optimizando además los costos operativos que capitalizan en 175.000 CLP.

En esta investigación se presentó un análisis comparativo del desempeño operativo de un esquema de lubricación manual y uno automático, en aras de optimizar los parámetros fundamentales de: tiempo de ejecución, seguridad, disponibilidad y costos, en donde además, se efectuó un estudio de los principales lubricadores automáticos disponibles en el mercado como fueron: Shell Tactic EMV (Gadus), SKF System 24, Lincoln Easylube y Perma Star Vario. Las variables de evaluación incluirán el tipo de mecanismo de accionamiento, presión de salida, precisión de dosificación, costo total de propiedad (TCO), resistencia a condiciones ambientales severas, compatibilidad con grasas de uso minero y nivel de automatización.

Esta comparación permitirá cuantificar, desde un enfoque ingenieril, las mejoras asociadas a la automatización en términos de reducción de tiempos de intervención, disminución de costos por horas-hombre y mitigación de riesgos derivados de la interacción hombre-máquina. Asimismo, los resultados obtenidos permitirán evaluar el impacto de la lubricación automática sobre la confiabilidad operativa del equipo, aportando antecedentes técnicos que pueden ser extrapolables a otros activos similares dentro del área de flotación. Este trabajo se enmarca en los principios del mantenimiento predictivo y la mejora continua, al integrar análisis cuantitativos, criterios de ingeniería y evaluación económica aplicada, contribuyendo a la gestión eficiente y sustentable de activos críticos en la industria minera.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la efectividad técnico-económica de la implementación del sistema de lubricación automática en las celdas Scavenger de la planta de flotación para la mejora de los tiempos de ejecución, costos operativos, seguridad y disponibilidad de las mismas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar el procedimiento de lubricación manual actual en cuanto a las variables de: desempeño operativo y seguridad perfilando así, el comportamiento del mismo.
2. Realizar un análisis comparativo de mercado entre distintos sistemas de lubricación automática, considerando variables técnicas, económicas y de compatibilidad con las condiciones del proceso de flotación.
3. Establecer comparaciones entre el sistema manual y el sistema automático seleccionado de acuerdo con las variables de desempeño operativo y costos asociados.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Oportunidad

La oportunidad de esta investigación surge a partir de la necesidad de fortalecer la confiabilidad operativa y la seguridad del mantenimiento en equipos críticos de la industria minera, específicamente en las celdas Scavenger del área de flotación. Estos equipos operan bajo condiciones severas, caracterizadas por altos niveles de humedad, presencia de contaminantes y accesos restringidos, lo que convierte las tareas de mantenimiento, particularmente la lubricación manual, en actividades de alto riesgo para el personal. En este contexto, la intervención directa expone a los trabajadores a peligros asociados a atrapamientos, caídas y trabajos en espacios confinados, configurando un escenario crítico desde el punto de vista de la seguridad operacional.

A nivel nacional, la minería chilena es una de las actividades económicas más relevantes, pero también una de las que presenta mayores índices de riesgo laboral. De acuerdo con antecedentes reportados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), durante los últimos años se han registrado de manera recurrente accidentes graves y fatales, muchos de ellos asociados a labores de mantenimiento en equipos críticos, espacios confinados y procedimientos que requieren intervención directa del personal (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2023). Estas situaciones no solo implican pérdidas humanas irreparables, sino también impactos significativos en la continuidad operacional, los costos asociados a detenciones no programadas y la reputación de las compañías del sector.

Dentro de las plantas concentradoras, las áreas de flotación y molienda concentran una alta densidad de equipos ubicados en entornos de difícil acceso, con condiciones de ventilación limitada y elevada humedad. En estos escenarios, los procedimientos de lubricación manual presentan una doble problemática: por una parte, incrementan la exposición del personal a riesgos operacionales; y por otra, introducen una alta variabilidad en la aplicación del lubricante, dependiente del criterio del operador, del número de intervenciones realizadas y de las restricciones operativas del proceso. Esta variabilidad puede derivar en fenómenos de sublubricación o sobrelubricación, los cuales afectan directamente la confiabilidad de los rodamientos, aceleran el desgaste de los componentes mecánicos y aumentan la probabilidad de fallas prematuras.

Desde una perspectiva técnica, esta situación evidencia una brecha relevante entre los procedimientos tradicionales de mantenimiento y las exigencias actuales de confiabilidad, seguridad y eficiencia operacional. En respuesta a esta brecha, el mantenimiento industrial ha evolucionado hacia enfoques basados en la confiabilidad y la predicción, incorporando tecnologías de automatización y

monitoreo remoto como herramientas clave para reducir la intervención humana y mejorar el control de los procesos críticos. En este contexto, los sistemas de lubricación automática se posicionan como una solución tecnológica capaz de asegurar una dosificación precisa y continua del lubricante, independiente de las condiciones operativas del equipo.

La implementación de un sistema de lubricación automática con monitoreo inalámbrico representa, por tanto, una oportunidad concreta de innovación aplicada al mantenimiento industrial minero. Estos sistemas permiten garantizar una película lubricante estable en el tiempo, reduciendo la variabilidad del proceso y disminuyendo la probabilidad de fallas asociadas a una lubricación deficiente. Asimismo, la integración de sensores de variables operacionales como presión, temperatura y caudal posibilita la supervisión en tiempo real del desempeño del sistema, facilitando la detección temprana de desviaciones y la planificación de intervenciones correctivas de manera anticipada (SKF, 2002).

Desde el enfoque del mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), la automatización del proceso de lubricación contribuye directamente a mejorar indicadores clave de desempeño, tales como el aumento del MTBF (Mean Time Between Failures) y la reducción del MTTR (Mean Time To Repair) (Moubray, 1997). Adicionalmente, la disminución de intervenciones manuales permite optimizar el uso de horas-hombre, reducir detenciones no programadas y eliminar condiciones inseguras asociadas a trabajos en espacios confinados.

En síntesis, el reemplazo del método de lubricación manual por un sistema de lubricación automática con monitoreo inalámbrico constituye una oportunidad relevante para avanzar hacia un modelo de mantenimiento más seguro, confiable y eficiente en equipos críticos del área de flotación. Esta transición no solo mejora la precisión y consistencia del proceso de lubricación, sino que también reduce la exposición del personal a riesgos operacionales, prolonga la vida útil de los componentes mecánicos y se alinea con los principios de la Industria 4.0, así como con las políticas de excelencia operacional, seguridad y sustentabilidad promovidas por la industria minera chilena.

1.2. Funcionamiento de las celdas de flotación

La minería constituye uno de los principales motores productivos de Chile, pero también una de las industrias con mayor exposición a riesgos operacionales y laborales. En las plantas concentradoras, los procesos de molienda y flotación concentran una parte significativa de las operaciones críticas, en las que intervienen equipos de gran tamaño, operación continua y alta exigencia mecánica, tales como molinos, celdas de flotación y sistemas auxiliares asociados (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2024).

En particular, las celdas de flotación tipo Scavenger desempeñan un rol fundamental en la recuperación de minerales, operando de forma permanente bajo condiciones exigentes de carga, humedad y presencia de pulpas abrasivas. Entretanto, la celda de flotación busca separar partículas minerales de valor de la ganga, a través de su adhesión selectiva a burbujas de aire que las arrastran a la superficie. Ciertamente, se puede explicar el ciclo de vida de estas celdas mediante la discriminación de los siguientes procesos de acuerdo con Yaya y Marrero (2022).

A. Preparación y Cocción (Pulpa)

La pulpa (agua, mineral molido y reactivos) se introduce en la celda. En este momento, los reactivos colectores ya han recubierto las partículas de valor con una capa hidrofóbica (repelente al agua).

B. Aireación y dispersión

Este proceso ocurre con la consecución de las siguientes etapas:

- Por agitación mecánica (rotor/estator) o por inyección neumática:
- Se inyecta aire a baja presión.
- El rotor trocea el aire en millones de burbujas.
- Se crea una intensa turbulencia en la parte inferior para mantener los sólidos en suspensión.

C. Captura (Colisión y Adhesión)

Es el centro del proceso. Las burbujas se elevan a través de la columna de agua y chocan con las partículas, añadiendo las siguientes etapas:

- Por la capa de reactivo colector, la partícula rompe la película de agua que la envuelve.
- Se forma una unión estable entre el mineral y la burbuja.
- La partícula "se cuelga" de la burbuja y asciende por flotación.

D. Formación de la espuma y descarga

Alcanzando la superficie, las burbujas mineralizadas crean una fase de espuma estable (por los espumantes).

- La espuma se desborda de la celda a los canalones de concentrado.
- Las partículas de ganga (hidrofílicas) se quedan en la pulpa y salen por abajo como colas o relaves.

Las partes internas de la celda están conformadas por tres zonas;

- Zona de Mezcla o Agitación (Fondo): Fuerte turbulencia en el punto de primer contacto.
- Zona de Separación o de Calma (Media): Donde el flujo se hace laminar para que las burbujas asciendan sin que las partículas se desprendan por turbulencia.
- Área de Espuma (Superior): Donde se desagua y concentra el mineral antes de salir.

Variables de control críticas

Para que el principio funcione, el operador debe regular:

- Nivel de la pulpa: Calcula la altura de la capa de espuma.
- Flujo de aire: Demasiado aire genera burbujas grandes que revientan; muy poco aire disminuye la recuperación.
- Velocidad del rotor: Suficiente para suspender sólidos pero no suficiente para colapsar la espuma.
- Dosificación de reactivos: El equilibrio químico para la selectividad.

El correcto funcionamiento de estos equipos depende, entre otros factores, de una lubricación adecuada de sus componentes mecánicos críticos, especialmente de los rodamientos asociados al eje de agitación, los cuales están sometidos a esfuerzos combinados y condiciones ambientales severas. Una lubricación deficiente puede derivar en desgaste prematuro, aumento de la fricción, sobrecalentamiento y, eventualmente, fallas mecánicas que afectan la disponibilidad y continuidad del proceso de flotación.

Tradicionalmente, en muchas faenas mineras la lubricación de estos componentes se realiza mediante procedimientos manuales y periódicos, los cuales requieren la detención del equipo y la intervención directa del personal de mantenimiento en terreno. Este tipo de actividades implica una exposición significativa a riesgos laborales, tales como trabajo en altura, proximidad a partes móviles, superficies resbaladizas y ambientes húmedos, además de la necesidad de ejecutar maniobras repetitivas de bloqueo y desbloqueo del equipo conforme a los procedimientos de seguridad establecidos.

Estas condiciones han sido históricamente una fuente de incidentes y accidentes laborales en el ámbito del mantenimiento industrial, asociados principalmente a atrapamientos, caídas y errores operacionales durante tareas rutinarias. Frente a este escenario, surge la necesidad de modernizar los sistemas de mantenimiento, incorporando soluciones tecnológicas que permitan reducir la intervención manual, estandarizar las tareas críticas y mejorar las condiciones de seguridad y confiabilidad de los equipos.

En este contexto, la implementación de sistemas de lubricación automática aplicados a equipos críticos del área de flotación representa una alternativa técnica relevante para optimizar el proceso de mantenimiento. Este tipo de soluciones permite asegurar una dosificación controlada y continua del lubricante, disminuir la frecuencia de intervención del personal en zonas de riesgo y contribuir a una gestión de activos más eficiente, en línea con las políticas de mejora continua, seguridad y excelencia operacionales que actualmente orientan a la industria minera nacional.

1.2.1. Historia de la Empresa

Berliam SpA es una empresa chilena dedicada a la operación y mantenimiento industrial, creada en octubre de 2020 a partir de la reorganización de Ferrovial Servicios Chile, cuyo negocio orientado a la minería fue reestructurado bajo esta nueva identidad corporativa. El nombre “Berliam”, que significa “diamante”, fue escogido para reflejar valores de solidez, excelencia técnica y profesionalismo en el entorno industrial y minero.

Desde su creación, la empresa ha consolidado una presencia relevante en la gran minería chilena, especialmente en Minera Los Pelambres, ubicada en el sector cordillerano de Chacay, comuna de Salamanca. En esta faena, la empresa desarrolla labores de operación y mantenimiento integral en procesos críticos como molienda, flotación, transporte de pulpas, manejo de relaves y sistemas de bombeo.

La compañía se caracteriza por un enfoque riguroso en seguridad, continuidad operacional y gestión eficiente de activos, incorporando prácticas alineadas con estándares internacionales y promoviendo una cultura basada en la sustentabilidad, la responsabilidad social y la inclusión laboral. Gracias a su desempeño y compromiso con la excelencia, se ha posicionado como un socio estratégico para la industria minera, aportando soluciones confiables y equipos multidisciplinarios altamente calificados.

1.2.2. Descripción general de la empresa Berliam SpA

La empresa presta servicios de operación y mantenimiento en Minera Los Pelambres, asumiendo

la responsabilidad de asegurar la disponibilidad y confiabilidad de equipos ubicados muchas veces en espacios confinados o zonas de difícil acceso, con presencia de humedad, niebla de pulpa y limitaciones de movimiento. En estas condiciones, los esquemas tradicionales de lubricación manual implican tiempos de intervención elevados, alta exposición del personal a riesgos (atrapamientos, caídas, exposición a agentes químicos) y una fuerte dependencia de la ejecución humana para garantizar la cantidad y frecuencia correctas de lubricante.

Estas circunstancias han impulsado la necesidad de modernizar los sistemas de mantenimiento, incorporando tecnologías de lubricación automática y monitoreo remoto que reduzcan la intervención directa del operador, aseguren una dosificación precisa del lubricante y mejoren la trazabilidad del proceso. La adopción de sistemas de lubricación automática en equipos críticos mantenidos por Berliam SpA en Minera Los Pelambres representa una oportunidad concreta para incrementar la confiabilidad y seguridad operativa, optimizar recursos de mantenimiento y contribuir al cumplimiento de las políticas corporativas de mejora continua y excelencia operacional que hoy orientan a la gran minería chilena.

1.2.3. Servicios

Berliam SpA es una empresa dedicada a la prestación de servicios de operación y mantenimiento industrial y minero, con foco en asegurar la disponibilidad, confiabilidad y seguridad de los activos. Su ámbito de acción incluye la operación de plantas y sistemas críticos, tales como molienda, flotación, transporte de pulpas y relaves, celdas de flotación tipo Scavenger y equipos de clasificación.

En el ámbito del mantenimiento, la compañía desarrolla actividades de mantenimiento mecánico y eléctrico, lubricación automática, monitoreo de condición, gestión de repuestos e implementación de planes de mantenimiento basados en indicadores técnicos y análisis de criticidad. Estos servicios se complementan con acciones de ingeniería y mejora continua orientadas a optimizar procesos, reducir costos operacionales y fortalecer la gestión de activos en las faenas donde opera.

También promueve una cultura de “Cero Accidentes”, impulsando el cumplimiento de altos estándares de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente, lo que la ha llevado a convertirse en un actor clave en la operación de Minera Los Pelambres y otras faenas del país, aportando soluciones técnicas alineadas con los desafíos actuales de la industria minera.

- Misión

La misión de Berliam es asegurar la excelencia en la operación de funciones críticas dentro del ámbito minero e industrial, tales como el sistema de transporte de fluidos y la clasificación de relaves. La empresa se compromete a garantizar el cumplimiento de los requisitos del mandante y de sus propias metas organizacionales, generando propuestas y mejoras que aporten valor al negocio. Asimismo, promueve un clima laboral seguro y colaborativo, orientado a los resultados y al servicio al cliente, con foco permanente en la seguridad y eficiencia operacional.

- Visión

La visión de Berliam es consolidarse como un referente nacional en el sector minero e industrial, destacando por su impacto positivo y sostenible en cada uno de sus programas y servicios. La compañía busca posicionarse como líder en excelencia operacional y estabilidad de proyectos, impulsando la innovación tecnológica, la seguridad y la mejora continua como pilares de su desarrollo organizacional.

1.2.4. Ubicación

En el marco del contrato de mantenimiento integral suscrito con Minera Los Pelambres, las operaciones de Berliam SpA se desarrollan en la faena ubicada aproximadamente a 45 km al este de la ciudad de Salamanca, Provincia de Choapa, Región de Coquimbo, en plena cordillera de Los Andes, a una altitud cercana a los 3.600 msnm (coordenadas aproximadas -31.716691, -70.490446).

Complementariamente, Berliam SpA cuenta con una oficina de recursos humanos en el centro de la ciudad de Salamanca, ubicada en calle José T. Medina N° 94, lo que facilita la gestión de personal, la coordinación logística y el vínculo con la comunidad local.



Figura 1- 3 Organigrama de flotación colectiva 2

20

Por último, la empresa tiene áreas de transportes de fluidos y tranques las cuales comprenden las estaciones que se encuentran a lo largo del valle del Choapa hasta su llegada al puerto de punta chungos y el relave el Mauro. Acá los técnicos se desplazan en camionetas, siguiendo un programa de inspecciones y mantenciones

1.3.1. Descripción de cargos jerárquicos

Gerente de contrato:

Es el encargado de planificar, organizar y dirigir la empresa para dar cumplimiento a las políticas de la compañía además se encarga de supervisar a todo el personal administrativo y dividir las responsabilidades para garantizar el rendimiento de todo el personal.

Recursos Humanos:

Se encargan de gestionar todo lo relacionado con las personas de la organización. Además, son los encargados de la selección, reclutamiento, contratación y capacitación del personal antes de ser destinados a las diferentes áreas de trabajo.

Prevención de Riesgo:

Este departamento está encargado de planifica, organizar, asesorar, ejecutar, supervisar y promover acciones permanentes para evitar accidentes del trabajo y enfermedades profesionales.

Jefe de Repuestos:

Es el encargado de gestionar todos los repuestos y equipos auxiliares que se utilizaran en el mantenimiento. Además, debe gestionar el retiro de todos los repuestos utilizados y en mal estado que son salientes de las mantenciones.

Jefe General de Mantenimiento:

Es el que se encuentra encargado de gestionar el mantenimiento programando y autónomo del contrato de acuerdo a los plazos establecidos por planificación, debe mantener actualizados los manuales del mantenimiento, procedimientos e instructivos junto al departamento de prevención de riesgo.

Jefe de planificación:

Es el encargado de cumplir con los programas de mantenimiento establecidos por el mandante, se preocupa de guiar al personal técnico en terreno, además de coordinar en conjunto al jefe de repuestos los repuestos y el apoyo de equipos auxiliares para llevar a cabo el mantenimiento.

Jefe de área:

Es el que se encarga de dirigir el mantenimiento, priorizando las diferentes O.T. distribuye los equipos de trabajos Gestiona los repuestos con el mandante y se preocupa de mantenerlos en terreno al momento de tomar los equipos para el mantenimiento.

Supervisores:

Son los encargados de optimizar los recursos entregados, deben dirigir las labores de mantenimiento, notificar al mandante los avances de los trabajos, mantener la motivación y promover el trabajo en equipo.

Técnicos en Mantenimiento:

Son los encargados de ejecutar el mantenimiento de los equipos de acuerdo a estándares, se preocupan de la aislación de energía, revisión de manuales, el traslado de herramientas al punto de trabajo y operación de equipos auxiliares.

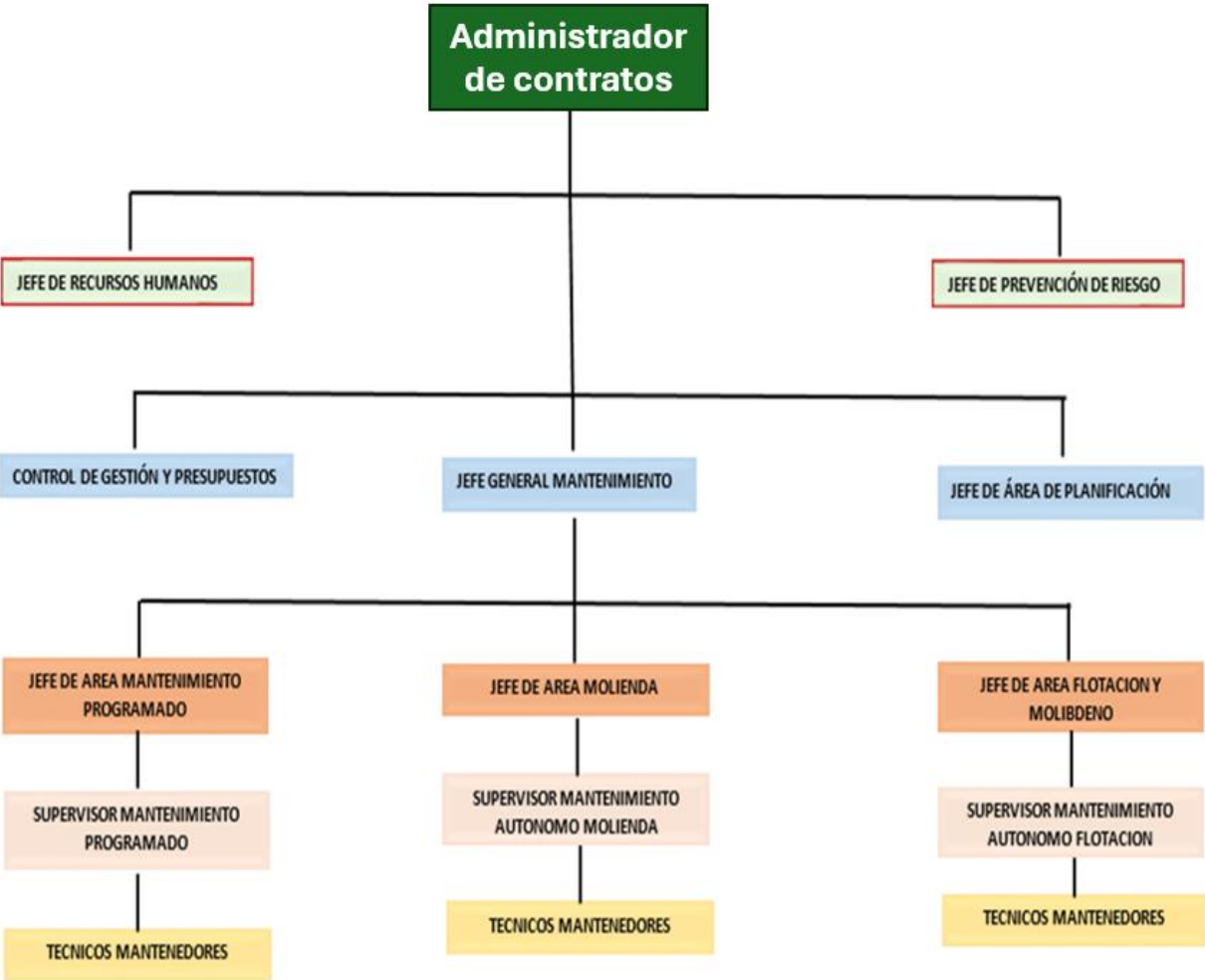


Figura 1- 4 Organigrama de la empresa

Fuente: Información suministrada por Berliam SpA.

1.4. Fundamentos teóricos

1.4.1. Fundamentos del mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial es un proceso estratégico orientado a preservar la funcionalidad, confiabilidad y disponibilidad de los activos físicos que conforman un sistema productivo. Su propósito principal es asegurar que los equipos operen dentro de los parámetros de diseño, minimizando la ocurrencia de fallas imprevistas, los riesgos asociados a la seguridad de las personas y los costos derivados de la ineficiencia operativa. En el contexto minero, donde los activos trabajan sometidos a altas cargas, humedad, abrasión y ambientes fuertemente contaminantes, la gestión del mantenimiento adquiere un carácter crítico y deja de ser una actividad meramente técnica para convertirse en un factor determinante en la continuidad operacional y en la competitividad del negocio (Moubray, 1997).

De acuerdo con la norma ISO 55000:2014, la gestión de activos se define como “la coordinación sistemática de actividades y prácticas a través de la organización para lograr un equilibrio óptimo entre rendimiento, costos y riesgos a lo largo del ciclo de vida de los activos” (ISO 55000, 2024, p. 4). Esta norma propone un enfoque estructurado y basado en el ciclo de vida, estableciendo como pilares el liderazgo, la planificación, el soporte, la operación, la evaluación del desempeño y la mejora continua. La incorporación de estos principios en la industria minera permite que la gestión del mantenimiento deje de ser un proceso reactivo, centrado únicamente en la reparación de fallas, para evolucionar hacia un sistema planificado, trazable y alineado con los objetivos estratégicos de seguridad, productividad y sustentabilidad operacional.

En este marco, la norma ISO 55000 establece que la gestión de los activos físicos debe orientarse a asegurar que los equipos cumplan su función de forma confiable, segura y al menor costo de ciclo de vida posible. En este contexto, la lubricación se reconoce como una actividad central del mantenimiento mecánico, ya que controla la fricción, el desgaste y la temperatura de operación en componentes rotativos, impactando directamente en la eficiencia energética, la vida útil de los rodamientos y la disponibilidad de los equipos. Cuando la lubricación se ejecuta de manera manual, con cantidades variables, intervalos poco precisos y alta exposición del personal a zonas de riesgo, se incrementa la probabilidad de fallas prematuras y se debilita la confiabilidad del activo, lo que va en contra del enfoque sistemático y controlado que promueve la ISO 55000 (ISO 55000, 2024).

Desde la perspectiva de la gestión de activos, la implementación de sistemas de lubricación

automática (ALS) permite estandarizar esta actividad, dosificando cantidades precisas de lubricante en intervalos definidos y reduciendo la dependencia del factor humano. Al integrarse con sensorización y tecnología inalámbrica, estos sistemas generan información de operación que puede ser utilizada en la toma de decisiones, alineándose con la visión de ISO 55000, que exige que las intervenciones sobre los activos estén respaldadas por datos y contribuyan de manera trazable a los objetivos del negocio. En este contexto, conceptos como liderazgo, planificación y soporte logístico cobran relevancia: el liderazgo define la política y la estrategia de mantenimiento; la planificación determina qué equipos se lubrican, con qué frecuencia y con qué recursos; y el soporte logístico asegura la disponibilidad de herramientas, repuestos, lubricantes y cartuchos necesarios para que el sistema funcione de manera continua y segura.

La misma norma enfatiza la importancia de evaluar el desempeño y aplicar la mejora continua sobre los procesos de gestión de activos. Indicadores como el MTBF, el MTTR y la disponibilidad operacional permiten comparar objetivamente el comportamiento de un sistema de lubricación manual frente a uno automático, cuantificando reducciones en tiempos de parada, ahorro de horas-hombre y mejoras en la confiabilidad del equipo. Estos indicadores se integran en el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act), que orienta la revisión y ajuste sistemático de la estrategia de lubricación: se planifican los parámetros y la tecnología a utilizar, se ejecutan las actividades en terreno, se verifican los resultados mediante datos de desempeño y se actúa corrigiendo o mejorando la solución implementada (ISO 55000, 2024).

Finalmente, la ISO 55000 plantea que la operación de los activos debe gestionarse con una visión de sostenibilidad, entendida como la capacidad de mantener el nivel de servicio requerido utilizando de forma eficiente los recursos y controlando los riesgos. La aplicación de sistemas automáticos de lubricación en equipos críticos, como las celdas Scavenger, contribuye a esta visión al disminuir el consumo innecesario de lubricante, reducir la generación de residuos, limitar la exposición del personal a ambientes de alto riesgo y mejorar la estabilidad del proceso productivo. Así, la lubricación automática no solo resuelve un problema técnico puntual, sino que se integra como una herramienta de gestión de activos coherente con los principios de liderazgo, planificación, soporte, desempeño, mejora continua y sostenibilidad establecidos por la ISO 55000, reforzando la transición hacia un modelo de mantenimiento más inteligente y alineado con los desafíos de la industria minera moderna.

En síntesis, este marco teórico sostiene que la transición desde la lubricación manual hacia un sistema automático con monitoreo inalámbrico constituye una evolución técnica y organizacional. Se basa en tres ejes complementarios:

1. Gestión de activos bajo los principios de la norma ISO 55000, que asegura la integración entre estrategia, liderazgo y mejora continua.
2. Aplicación de tecnología avanzada de lubricación automática y sensorización inalámbrica, orientada a aumentar la confiabilidad y reducir riesgos operativos.
3. Desarrollo de una cultura de mantenimiento basada en planificación, evaluación y sostenibilidad, que consolida la eficiencia técnica y el valor a largo plazo de los activos mineros.

1.5. Instrumentos de evaluación

Para evaluar la efectividad técnica de la implementación del sistema de lubricación automática en las celdas *Scavenger*, se emplean instrumentos de evaluación cuantitativos, comparativos y documentales, que permiten medir objetivamente el desempeño del nuevo sistema frente al procedimiento manual tradicional.

1.5.1. Criterios comparativos de lubricantes automáticos análisis de mercado elemento de decisión

Tipo de instrumento: Cuadro de evaluación multicriterio.

Objetivo: Seleccionar la mejor alternativa de lubricador automático según las condiciones operativas de las celdas *Scavenger*.

Descripción:

Este instrumento recopila información técnica de distintos sistemas comerciales de lubricación automática como Shell Tactic EMV, SKF System 24, Lincoln Easylube y Perma Star Vario para compararlos mediante criterios estandarizados de desempeño y compatibilidad.

Criterios de evaluación:

- Tipo de mecanismo (electromecánico o electroquímico).
- Presión máxima de salida (bar).

- Capacidad del cartucho (ml).
- Precisión de dosificación.
- Rango de temperatura de operación (°C).
- Nivel de automatización y control.
- Compatibilidad con grasas NLGI 2.
- Costo total de propiedad (TCO).

Método de análisis:

Se aplica una ponderación numérica a cada criterio (escala 1 a 5) y se obtiene un puntaje final para determinar la alternativa técnicamente más adecuada.

Este análisis multicriterio permite justificar técnicamente la elección del lubricador Shell Tactic EMV, validando su superioridad en presión, precisión y durabilidad frente a otras opciones del mercado.

1.5.2. Registro de cantidad de lubricante versus tiempo de suministro

Tipo de instrumento: Registro experimental de variables operativas.

Objetivo: Determinar la relación entre el tiempo de aplicación y la cantidad total de lubricante suministrado bajo ambos métodos (manual y automático).

Descripción:

Este instrumento registra los datos obtenidos durante las pruebas de campo, midiendo el tiempo total de lubricación (minutos u horas) y la cantidad exacta de grasa aplicada (gramos o cc). Se utilizan cronómetros y balanzas de precisión para asegurar la exactitud de las mediciones. La información se registra tanto para el sistema manual (bomba de engrase y dos operadores) como para el sistema automático (dispositivo Shell Tactic EMV o equivalente).

Variables evaluadas:

- Tiempo de intervención (min).
- Cantidad de lubricante aplicado (g o cc).
- Frecuencia de intervención (n° de secuencias).
- Tipo de lubricante utilizado (Gadus S3 V220C u otros).

Interpretación técnica:

Esta tabla permite analizar la eficiencia de aplicación y la precisión de dosificación entre ambos métodos. Una menor variación en los tiempos y cantidades de grasa aplicadas indica un proceso más controlado, característica fundamental de un sistema de lubricación automática confiable.

1.5.3. Comparativa de desempeño de los sistemas de lubricación (manual vs. automático)

Tipo de instrumento: Matriz comparativa técnica y económica.

Objetivo: Evaluar el impacto operativo y económico de la sustitución del método manual por el sistema automático.

Descripción

Esta tabla consolida los datos obtenidos del experimento y de la observación directa en terreno, comparando variables clave de desempeño entre ambos métodos.

Variables analizadas:

- Tiempo total de mantenimiento (hr).
- Costo de horas-hombre (CLP).
- Cantidad de lubricante utilizado (g).
- Número de trabajadores requeridos.
- Frecuencia de intervención.

Cálculos derivados:

- Ahorro porcentual de tiempo de mantenimiento (ΔT %).
- Reducción del costo de mano de obra (ΔHH %).
- Reducción del número de intervenciones.

Interpretación técnica:

La tabla comparativa permite cuantificar la mejora lograda con la automatización, evidenciando reducción de tiempos de detención, menor dependencia de personal operativo y mayor eficiencia de aplicación, validando el impacto positivo del nuevo sistema en la confiabilidad operativa.

1.5.4. Instrumento documental complementario

Tipo de instrumento: Revisión normativa y técnica.

Objetivo: Respalda la metodología de evaluación con fuentes normativas y documentación técnica actualizada.

Fuentes utilizadas:

- ISO 55000:2014 (Gestión de activos – principios y terminología).
- ISO 14224:2016 (Datos de confiabilidad y mantenimiento – recopilación y análisis).
- Fichas técnicas de lubricantes Shell Gadus S3 V220C.
- Manuales de fabricantes de sistemas automáticos de lubricación (SKF, Lincoln, Perma).
- Reportes del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2023) sobre seguridad en mantenimiento industrial.

Interpretación técnica:

Este instrumento garantiza que las metodologías, parámetros y criterios empleados en la evaluación sean consistentes con los estándares internacionales de confiabilidad y gestión de activos, asegurando la validez técnica de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en la Planta Concentradora de Minera Los Pelambres, en la Región de Coquimbo, interior de la ciudad de Salamanca, Chacay específicamente en el área de flotación colectiva, donde la empresa presta servicios de mantenimiento industrial. Esta área constituye una de las etapas más críticas del proceso productivo, ya que la continuidad operacional depende de la disponibilidad de los equipos encargados de la recuperación final del concentrado mineral.



Fuente: Elaboración propia fotografía tomada el 10/12/2025

Figura 2- 1 Celdas scavenger área de flotación

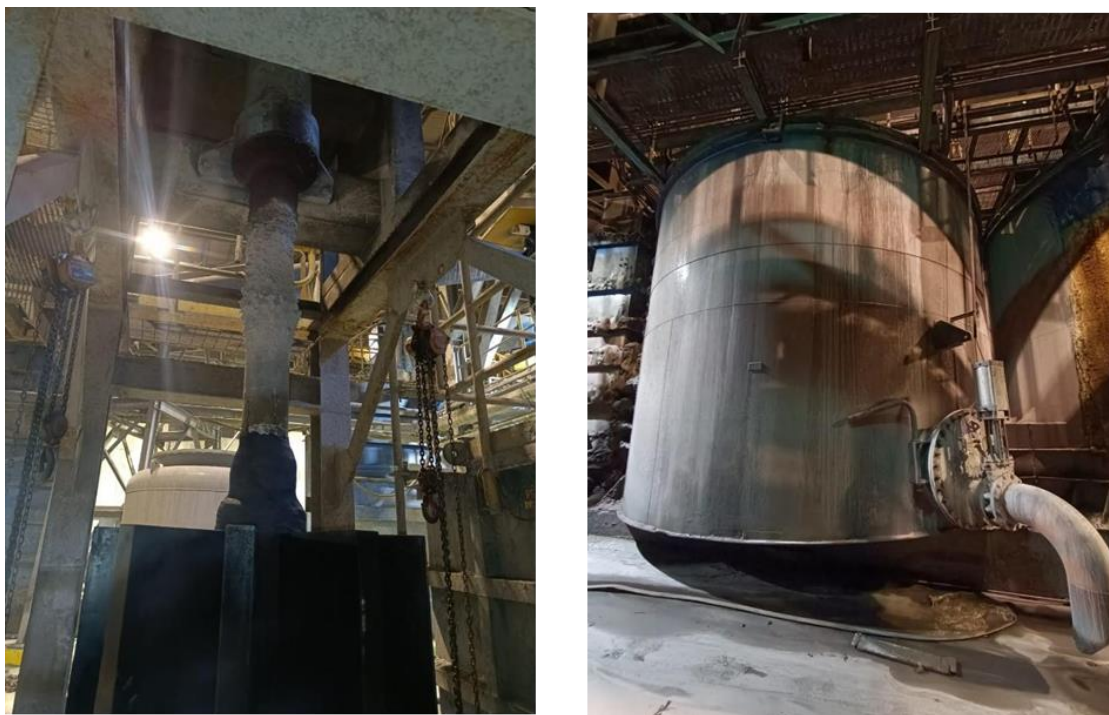
Dentro de este contexto, las celdas Scavenger fueron seleccionadas como el foco principal del estudio, al ser equipos que operan de forma continua bajo condiciones extremas de humedad, abrasión y carga. Su desempeño depende directamente de un sistema de lubricación eficiente que reduzca la fricción y el desgaste de rodamientos y ejes. El método utilizado anteriormente era el manual lo que

implica alta variabilidad, tiempos de intervención prolongados y riesgos asociados a la exposición del personal en espacios confinados.

Por ello, el área de estudio se centra en la evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de lubricación automática Shell Tactic EMV, el cual ya fue implementado, diseñado para mejorar la confiabilidad y la seguridad operacional de las celdas Scavenger del sector norte de la planta, a una altitud aproximada de 3 600 m.s.n.m.

2.2. Descripción del sistema de giro y lubricación de la celda Scavenger

La Figura 2-2 muestran el conjunto de giro de una celda Scavenger del área de flotación, correspondiente a una celda del tipo WEMCO, en la cual el movimiento del rotor es transmitido mediante un eje vertical que conecta el sistema motriz superior con el conjunto rotor-estator sumergido en la pulpa.



Fuente: Elaboración propia fotografía tomada el 10/12/2025

Figura 2- 2 Eje vertical y parte externa de la celda Scavenger

En la Figura 2-2 se observa claramente el eje vertical principal, el cual gira de manera continua durante la operación de la celda y es responsable de transmitir el par desde el accionamiento superior hasta el rotor ubicado en la parte inferior del equipo. Este eje trabaja bajo condiciones severas, caracterizadas por:

- Cargas axiales significativas, asociadas al peso del conjunto eje rotor y al empuje hidráulico generado por la pulpa.
- Cargas radiales, producto del propio peso del eje, desalineaciones menores y vibraciones del proceso.
- Ambiente altamente contaminado, con presencia de humedad, partículas sólidas y agentes corrosivos.

El eje se encuentra soportado mecánicamente por un conjunto de rodamientos alojados en un pedestal o housing, ubicado en la estructura superior de la celda, tal como se aprecia en la Figura 2-2.

Rodamientos lubricados por el sistema automático

El sistema de lubricación automática instalado en la celda alimenta dos puntos de engrase independientes, los cuales corresponden a dos rodamientos distintos, con funciones mecánicas claramente diferenciadas:

1. Rodamiento radial (superior)

El rodamiento ubicado en la parte superior del pedestal cumple la función de soporte radial del eje, manteniendo su correcta alineación durante la rotación y absorbiendo las cargas laterales y vibraciones transmitidas por el sistema.

Por el tipo de aplicación, la geometría del alojamiento y las condiciones de operación observadas, este componente corresponde a un rodamiento radial de rodillos, típicamente del tipo rodillos esféricos, sus dimensiones son:

- diámetro del eje (d) es 120mm,
- diámetro exterior (D) 215mm
- ancho (B) 58mm.
- Código 22224 seleccionado por su alta capacidad de carga y su tolerancia a pequeñas

desalineaciones, condición frecuente en equipos de gran tamaño como las celdas de flotación.

Este rodamiento se lubrica mediante uno de los lubricadores automáticos visibles en las imágenes, el cual inyecta grasa directamente al interior del alojamiento, asegurando una película lubricante continua entre los elementos rodantes y las pistas.

2. Rodamiento axial (inferior o de empuje)

En la parte inferior del pedestal se ubica el segundo punto de lubricación, correspondiente a un rodamiento axial de rodillos, también denominado rodamiento de empuje. De diámetro del eje (d)140mm, diámetro exterior (D) 300mm y altura total (T) 95mm, código 29428. Este componente es el encargado de soportar la carga axial principal del sistema, es decir, el peso del eje, del rotor y el empuje hidráulico generado durante la operación de la celda.

Este rodamiento es considerado crítico para la confiabilidad del equipo, ya que trabaja bajo cargas elevadas y su falla puede provocar un colapso completo del sistema de giro. Por esta razón, su lubricación se realiza de manera independiente y controlada, mediante un lubricador automático dedicado, tal como se aprecia claramente en las imágenes de detalle. En efecto, en la Figura 2-3 se aprecia la secuencia de posicionamiento del lubricador y carga de grasa respectiva.



Figura 2- 3 Posicionamiento del lubricador en el rodamiento 29428

Fuente: Elaboración propia fotografía tomada el 10/12/2025

En las imágenes de acercamiento se observan los lubricadores automáticos montados directamente sobre los puntos de engrase del pedestal. Estos dispositivos suministran grasa de forma continua y dosificada hacia:

- Las pistas internas y externas de los rodamientos.
- Los elementos rodantes (rodillos).
- Las superficies de contacto sometidas a fricción durante la rotación del eje.

El uso de lubricación automática permite mantener una película lubricante constante durante la operación, evitando periodos de lubricación insuficiente o excesiva, reduciendo el desgaste, la generación de calor y el riesgo de contaminación interna del rodamiento.

Relación entre los componentes observados:

Las Figura 2-3 de la celda Scavenger, el cual gira solidariamente con el eje vertical. La correcta operación de este conjunto depende directamente del buen estado de los rodamientos superiores, ya que cualquier degradación en estos componentes se traduce en vibraciones, desalineaciones y pérdida de eficiencia en el proceso de flotación.

Por lo tanto, el sistema de lubricación automática no actúa directamente sobre el rotor, sino que lubrica los rodamientos que permiten su giro controlado y continuo, siendo estos los elementos críticos para la disponibilidad mecánica de la celda.

2.3 Muestra de estudio

La muestra de estudio está compuesta por una de las celdas Scavenger la cual se usa para hacer las pruebas, esta se encuentra operativa y en óptimas condiciones de carga. En primer caso se instala el sistema manual tradicional montando una bomba la cual inyectara grasa por dos mantenedores mecánicos a través de un sistema de acople, mientras que en el segundo caso se instala el sistema automático Shell Tactic EMV para cumplir el ciclo de lubricación completa del equipo en ambos casos.

Esta configuración permite realizar un análisis comparativo directo entre ambos métodos, bajo parámetros constantes de operación. Durante el periodo de observación se registran variables como

tiempo total de intervención, cantidad de lubricante aplicado, frecuencia de mantenimiento, consumo energético y recursos humanos involucrados.

El diseño muestral se define como cuasiexperimental, con observación controlada en terreno, lo que posibilita evaluar de forma objetiva las mejoras técnicas y económicas derivadas de la automatización del proceso de lubricación.

2.4 Criterios de exclusión

Para garantizar la validez técnica y comparativa de los resultados, se excluyen del estudio los siguientes elementos:

- Celdas Rougher y Cleaner, por poseer condiciones hidráulicas y cargas de operación diferentes.
- Equipos intervenidos recientemente por reparaciones mayores o reemplazo de componentes, que puedan alterar el comportamiento normal de la lubricación.
- Sistemas de bombeo o válvulas auxiliares no directamente asociados a las celdas seleccionadas.
- Equipos sin acceso seguro o sin disponibilidad continua durante el periodo de monitoreo.

La aplicación de estos criterios de exclusión permite mantener la homogeneidad de la muestra y asegurar que las variaciones observadas correspondan únicamente al cambio de tecnología de lubricación, garantizando la objetividad del análisis.

2.5 Metodología de Solución

La metodología de solución aplicada en este estudio se basa en un enfoque técnico-experimental, descriptivo y comparativo, orientado a evaluar los beneficios operacionales, económicos y de seguridad asociados a la implementación de un sistema de lubricación automática electromecánico con monitoreo

inalámbrico, actualmente implementadas en las celdas Scavenger del área de flotación colectiva de Minera Los Pelambres, donde Berliam SpA desarrolla labores de mantenimiento industrial.

El trabajo metodológico no contempla el diseño del sistema, dado que corresponde a una tecnología ya existente y validada en otros equipos críticos de la planta, tales como bombas de recirculación y celdas rougher. En consecuencia, el presente estudio se centra en analizar su aplicación, desempeño y retorno técnico-económico en un nuevo grupo de equipos Scavenger, bajo condiciones reales de operación minera. La metodología fue desarrollada de forma estructurada y sistemática, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 55000 sobre gestión de activos físicos y los principios del Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM), garantizando la trazabilidad y validez técnica de los resultados.

- Diagnóstico técnico del sistema manual actual

Se efectuó una revisión exhaustiva de los procedimientos de lubricación tradicionales, considerando registros históricos de mantenimiento, frecuencias de engrase, tiempos de intervención y consumo de grasa. Mediante observación directa y entrevistas con personal técnico de Berliam SpA, se identificaron las principales limitaciones del método manual: sobre lubricación, variabilidad en la aplicación, falta de control en la dosificación, detenciones operacionales por bloqueo de áreas (paros y posteriores puestas en marcha) y exposición del personal a riesgos en espacios confinados.

Este levantamiento permitió establecer una línea base de comparación que sustenta la evaluación del sistema automático.

- Caracterización del sistema de lubricación automática existente

Se documentaron las especificaciones técnicas del lubricador automático Shell Tactic EMV, actualmente utilizado en equipos similares dentro de la faena. Se verificó su compatibilidad con las condiciones operacionales de las celdas Scavenger, temperatura, humedad, vibración y tipo de grasa Shell Gadus S3 V220C, y se recopilaron antecedentes de desempeño en otras áreas de la planta, que sirvieron como referencia de funcionamiento comprobado. Esta etapa permitió validar que la tecnología seleccionada era adecuada para su implementación en las celdas objeto del estudio.

- Implementación y seguimiento en las celdas Scavenger

La instalación del sistema Shell Tactic EMV en las celdas Scavenger se realizó bajo los procedimientos de seguridad, control de energía y montaje definidos por Berliam SpA y Minera Los Pelambres. Durante el proceso, se supervisaron las conexiones, la calibración de parámetros de dosificación y la configuración del sistema inalámbrico de control. Posteriormente, se estableció un periodo de observación comparativa entre el sistema manual (control) y el sistema automático (experimental), operando ambos bajo condiciones equivalentes de carga, temperatura y régimen de trabajo. La recopilación de datos se efectuó mediante instrumentos calibrados cronómetros, balanzas de precisión y registros digitales, asegurando la confiabilidad de las mediciones.

- Evaluación comparativa técnica y económica

Con los datos obtenidos, se elaboró un análisis cuantitativo de desempeño considerando variables como el tiempo total de mantenimiento, la cantidad de lubricante aplicado, el número de operarios involucrados y la frecuencia de intervención. Se calcularon indicadores de mejora operacional, tales como reducción del tiempo de intervención (ΔT), ahorro en horas-hombre (ΔHH) y disminución del consumo de lubricante (ΔL), además de métricas económicas como el Retorno de la Inversión (ROI) y el Período de Recuperación (Payback). Esta etapa permitió cuantificar el impacto real de la automatización sobre la eficiencia, la seguridad y la disponibilidad operativa de los equipos, evidenciando los beneficios directos en la gestión de mantenimiento.

- Propuesta de mejora continua y replicabilidad

Finalmente, se desarrolló una propuesta de incorporación formal del sistema Shell Tactic EMV al plan de mantenimiento programado de las celdas Scavenger, con la recomendación de extender gradualmente su uso a otros equipos con condiciones operativas similares, como bombas sumergibles o de recirculación. La metodología de seguimiento se apoya en el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act) establecido desde la norma ISO 9001 en cada uno de los capítulos relacionados con, contexto, liderazgo, planificación, apoyo, operación y evaluación de desempeño, haciéndose extensiva en un plano implícito dentro del apartado de la gestión de riesgos en la ISO 55001, garantizando la mejora continua, la trazabilidad de los resultados y la sostenibilidad de la implementación en el tiempo. Este enfoque

promueve una gestión proactiva de la lubricación, optimizando los recursos técnicos y humanos, y fortaleciendo la cultura de seguridad y excelencia operacional de la compañía.

- Síntesis metodológica

En conjunto, la metodología propuesta permite evaluar con rigor técnico y económico la transición desde la lubricación manual hacia un sistema automático probado, actualmente en proceso de adopción dentro de la planta concentradora. El enfoque aplicado y basado en evidencia busca demostrar que la automatización incrementa la confiabilidad operativa, optimiza los recursos de mantenimiento y reduce la exposición del personal a riesgos, en plena coherencia con los principios de la ISO 55000 y con los objetivos estratégicos de Berliam SpA, orientados a la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad en la gestión de activos industriales.

2.5.1 Descripción de la organización

Como bien se explicó en apartados anteriores, el estudio se desarrolló en la empresa Berliam SpA, específicamente en las celdas de flotación, siendo necesario la revisión de los documentos internos y organigramas vigentes, complementados con información entregada por el área de mantenimiento. Este levantamiento permitió reconocer la distribución de funciones y competencias dentro del sistema de gestión de activos que la empresa mantiene en la faena.

Berliam SpA cuenta con una estructura jerárquica liderada por el Gerente de Contrato, responsable de la planificación, control y cumplimiento de los objetivos operacionales definidos por el mandante. Bajo su supervisión se encuentran las áreas de Mantenimiento, Planificación, Prevención de Riesgos, Repuestos y Recursos Humanos, que trabajan de forma coordinada para asegurar la confiabilidad y seguridad de los equipos críticos.

Esta descripción organizacional permitió entender la relación entre liderazgo, soporte técnico y control operativo, evidenciando que la estructura vigente favorece la aplicación de un sistema de gestión eficiente y alineada con los principios de la ISO 55000 y las políticas de mejora continua de la compañía.

2.5.2 Análisis comparativo para la selección del sistema de lubricación automática

Antes de avanzar al análisis práctico de resultados del Capítulo 3, es necesario fundamentar técnicamente la selección del sistema de lubricación automática y del lubricante que serán evaluados en las celdas Scavenger. Esta sección desarrolla ese análisis comparativo, definiendo los criterios de decisión y aplicándolos a diferentes alternativas disponibles en el mercado. De este modo, se asegura que los ensayos experimentales posteriores se realicen sobre la opción técnicamente más adecuada y no sobre una elección arbitraria, en coherencia con la gestión de activos propuesta por la norma ISO 55000 y los principios del mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM).

En primer lugar, se establecen las variables de decisión que determinan el desempeño global del sistema de lubricación en un entorno minero de alta severidad. La **Tabla 2-1** presenta estas variables, su definición y la justificación de su relevancia para el caso de estudio. Entre ellas destacan:

Tabla 2- 1 Definición de variables

Variable	Definición	Por qué es relevante
<i>Tipo de lubricante (base)</i>	Mineral versus sintético versus bio-basado (nominal)	Diferentes costes, rendimiento, durabilidad. Los lubricantes sintéticos/bio-basados podrían tener ventajas para maquinaria crítica.
<i>Intervalo de cambio / vida útil</i>	Tiempo u horas entre drenajes o reemplazos.	Un lubricante que permite intervalos mayores aporta valor, reduce paradas de mantenimiento.
<i>Coste total de propiedad (TCO)</i>	Incluye coste del lubricante + coste de parada/mantenimiento + efecto en vida útil de componentes.	En minería es clave porque los downtime son muy costosos.
<i>Condiciones operativas</i>	Temperatura °C, presión máxima psi, capacidad en ml.	Las condiciones operativas son extremas por cuanto la

		lubricación debe actuar sin ser vulnerable a la degradación.
<i>Nivel de automatización del sistema de lubricación</i>	Si es sistema de lubricación automática (dosificación; sensores) o manual.	En la celda scavenger, la automatización puede influir mucho.

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

Estas variables constituyen la base conceptual sobre la cual se estructura la comparación entre alternativas tecnológicas. A partir de ellas se construye una matriz de evaluación multicriterio, en la que cada lubricador automático es valorado según su capacidad para responder a las exigencias operacionales de la planta.

Sobre esta base, la Tabla 2-2 presenta el análisis comparativo de distintos sistemas de lubricación automática disponibles en el mercado minero, entre ellos Shell Tactic EMV (GADUS), SKF System 24, Perma FUTURA / STAR VARIO, Lincoln Easylube y Graco G-LCM. En dicha tabla se detallan atributos técnicos como el tipo de accionamiento (electromecánico o electroquímico), la presión máxima de salida, la capacidad del depósito, la fuente de energía, el rango de temperatura de operación, el tipo de control y programación, las principales ventajas y limitaciones de cada equipo, así como una estimación del TCO anual en moneda local

Tabla 2- 2 Comparativo de los principales sistemas de lubricación automático

<i>Atributo</i>	Shell Tactic EMV (GADUS)	SKF SYSTEM 24 (LAGD/LAG E)	Perma FUTURA / STAR VARIO	Lincoln EASYLUBE	Graco G- LCM
<i>Tipo</i>	Electromecánico	Electroquímico	Electromecánico	Electromecánico	Mecánico / aire comprimido
<i>Presión Max</i>	7.5 bar	5 bar	6 bar	10 bar	6–10 bar
<i>Capacidad (ml)</i>	120–500	60–250	60–250	125–500	120–475
<i>Fuente de</i>	Batería	Reacción gas-	Batería / 4.5 V	Batería 6 V	Aire

<i>energía</i>	reemplazable	generador			comprimido / resorte
<i>Rango de temperatura</i>	-20 °C a +60 °C	-20 °C a +55 °C	-10 °C a +60 °C	-20 °C a +60 °C	0 °C a +50 °C
<i>Control / programación</i>	Digital (1–12 meses)	Mecánico (tiempo fijo)	Digital o manual	Digital con Sensor	Manual o PLC
<i>Principales ventajas</i>	Preciso, recargable, sin gases, ideal minería	Económico, fácil instalación	Amplia gama, resistente al polvo	Precisión, alta presión	Ideal para sistemas centralizados
<i>Limitaciones</i>	Precio medio-alto	Menos precisión, no reutilizable	No apto para golpes/vibraciones fuertes	Más costoso, mantenimiento complejo	Requiere línea neumática, no autónomo
<i>TCO anual estimado CLP</i>	\$175.000	\$280.000	\$245.000	\$280.000	\$332.000

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

Todos con una vida útil de 6-12 meses

Del análisis de la Tabla 2-2 se observa que el Shell Tactic EMV se caracteriza por ser un lubricador electromecánico de alta confiabilidad, con una presión máxima suficiente para vencer las pérdidas de carga en líneas de lubricación extensas, y una capacidad de 120–500 mL que permite ajustar el volumen a las necesidades reales de cada punto de engrase. Su control digital programable posibilita configurar intervalos de dosificación de forma precisa hasta 12 meses, reduciendo la variabilidad asociada al operador. Además, la alimentación mediante batería reemplazable facilita la mantención del sistema sin requerir modificaciones eléctricas en las celdas. Si bien su costo de adquisición es superior a

otras alternativas, la estimación del TCO muestra que esta inversión inicial se compensa por la reducción de horas-hombre, la disminución de fallas asociadas a mala lubricación y el aumento de la vida útil de los componentes críticos.

En contraste, alternativas como SKF System 24 o algunos modelos Perma y Graco presentan limitaciones relevantes para el entorno de flotación: en ciertos casos dependen de mecanismos electroquímicos desechables, con menor precisión en la dosificación; en otros, poseen capacidades fijas de cartucho y menor flexibilidad de programación, o bien no permiten una integración sencilla con sistemas de control más avanzados. Asimismo, algunas opciones muestran rangos de temperatura o tipos de control menos adecuados para condiciones de alta humedad, presencia de polvo y vibraciones, lo que incrementa el riesgo de sobre lubricación, sub-lubricación o fallas prematuras del equipo. Atendiendo a los instrumentos presentados para la valoración de los sistemas analizados, se añade la Tabla 2-3 con la consideración y ponderación de estos criterios, las ponderaciones asignadas se establecieron mediante un enfoque de evaluación multicriterio en escala de 1 a 5, donde el valor 1 representa un desempeño bajo y el valor 5 un desempeño sobresaliente respecto a las exigencias operacionales de las celdas Scavenger. Estas valoraciones no son arbitrarias, sino que responden al análisis técnico desarrollado previamente en la Tabla 2-2 y a la experiencia operativa en terreno, considerando variables críticas como condiciones ambientales severas, continuidad operacional y confiabilidad del sistema. De esta forma, las ponderaciones reflejan una combinación entre desempeño técnico, adaptabilidad al entorno minero y eficiencia económica, permitiendo obtener un puntaje promedio representativo para la toma de decisión, observándose que, el sistema más idóneo para cumplir con los requerimientos operativos de flotación es el Shell Táctic EMV.

Tabla 2- 3 Evaluación de sistemas automáticos

CRITERIO DE SELECCIÓN	Shell Tactic EMV (GADUS)	SKF SYSTEM 24 (LAGD/LAGE)	Perma FUTURA / STAR VARIO	Lincoln EASYLUBE	Graco G- LCM
Tipo de mecanismo	4	4	4	4	5
Presión máxima de salida (Bar)	4	5	5	3	3
Capacidad del cartucho (ml)	5	3	3	5	4
Precisión de dosificación	4	5	5	3	3
Rango de temperatura de operación (°C)	5	5	5	5	4
Nivel de automatización	5	3	4	4	4

Compatibilidad con grasas NLG2	5	3	3	3	3
Costo Total de propiedad TCO	5	3	3	3	3
Promedio de puntajes	4,63	3,88	4,00	3,75	3,63

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

Considerando en conjunto los criterios definidos en la Tabla 2-3 y los resultados del análisis comparativo de la Tabla 2, se concluye que la alternativa que mejor equilibra desempeño técnico, adaptabilidad a las condiciones operativas de las celdas Scavenger y coste total de propiedad es el sistema Shell Tactic EMV, en combinación con la grasa Shell Gadus S3 V220C, que aporta buena adherencia, estabilidad mecánica y comportamiento adecuado a alta temperatura.



Figura 2- 4 sistema Shell Tactic EMV Gadus

Fuente: Shell, Ficha técnica del sistema de lubricación automática Shell Tactic EMV (Gadus).

Esta selección no solo responde a los requisitos de confiabilidad y seguridad, sino que además proporciona la base para demostrar, en el Capítulo 3, los beneficios cuantificables de la automatización de la lubricación mediante pruebas en terreno y análisis de resultados.

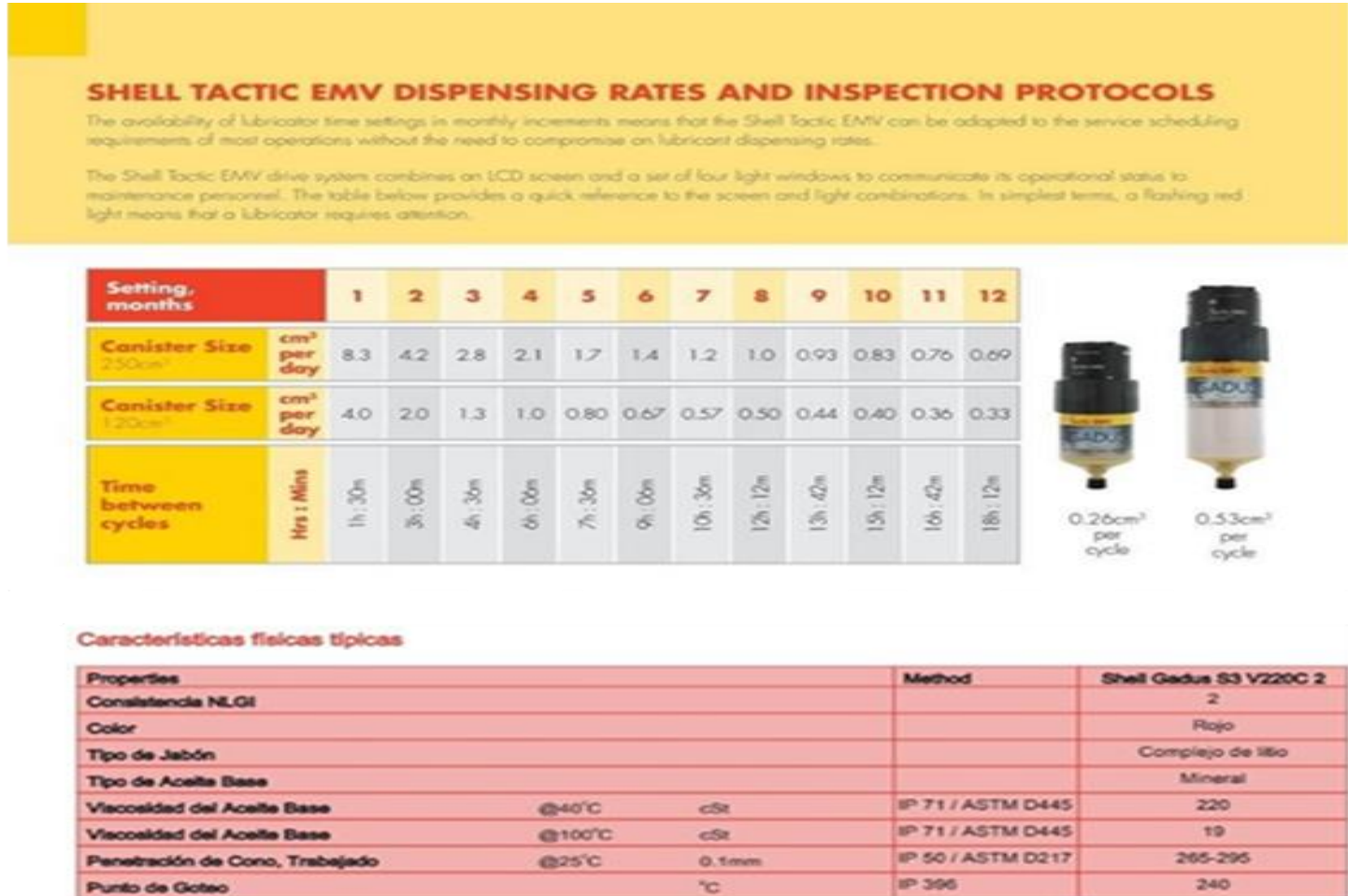


Figura 2- 5 Ficha técnica del Shell Gadus S3 V220C

Fuente: Shell, Manual técnico y ficha de producto Shell Tactic EMV y grasa Shell Gadus S3 V220C.

El sistema Shell Tactic EMV es un lubricador automático electro mecánico de un punto, que permite programar el caudal de grasa entre 1 y 12 meses, adaptándose a distintos planes de mantenimiento. Tal como se muestra en la Figura 2-5, el equipo dispone de dos tamaños de cartucho (120 y 250 cm³) y una tabla de referencia que indica el volumen dispensado por día y el intervalo entre ciclos para cada ajuste de tiempo, lo que facilita calcular la cantidad de grasa requerida por el rodamiento. Además, incorpora una pantalla LCD y un código de luces LED (dwell, run, purge, canister empty, overload, low battery) que informan en forma simple el estado operativo, posibles bloqueos y necesidad de reemplazar cartucho o baterías.

Por estas características dosificación controlada, posibilidad de ajustar el periodo de suministro a las condiciones reales del equipo, y monitoreo visual del estado el Shell Tactic EMV fue seleccionado como la mejor alternativa para el sistema de lubricación automática del rodamiento crítico analizado en este trabajo, ya que reduce la intervención manual, mejora la confiabilidad del engrase y facilita las inspecciones en terreno.

2.5.3 Sugerencias para la integración y cumplimiento de las normas

La implementación de un sistema de lubricación automática electromecánico con monitoreo inalámbrico en las celdas Scavenger no solo implica un cambio tecnológico, sino también la integración de esta solución dentro del sistema de gestión de activos y del marco normativo aplicable a la faena. En coherencia con la metodología planteada en los apartados anteriores, se proponen a continuación una serie de sugerencias orientadas a asegurar el cumplimiento de las normas ISO 55000/55001 y de los lineamientos de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM), de manera que la solución no sea un proyecto aislado, sino parte de una estrategia de gestión integral del activo.

En primer lugar, se recomienda vincular formalmente el proyecto al Sistema de Gestión de Activos de la organización. Esto implica incorporar las celdas Scavenger y su nuevo sistema de lubricación automática en el registro de activos, actualizar su criticidad y asociar el cambio tecnológico a los objetivos del Plan Estratégico de Gestión de Activos (por ejemplo, reducción de fallas por lubricación deficiente, disminución de horas de mantenimiento correctivo y mejora de la disponibilidad mecánica). De esta forma, la solución propuesta queda alineada con los principios de valor, liderazgo y gestión del ciclo de vida establecidos por la norma ISO 55000.

En segundo lugar, durante la etapa de diseño e instalación descrita en la metodología, se sugiere documentar todos los requerimientos técnicos y normativos asociados, de modo que la configuración del

lubricador, la selección de la grasa, los intervalos de dosificación y la integración del control inalámbrico queden respaldados en procedimientos formales. Estos documentos deben considerar las recomendaciones del fabricante, las normas internas de la compañía, los estándares eléctricos y mecánicos de la faena, así como los requisitos de seguridad ocupacional (bloqueo y etiquetado, trabajos en altura, atmósferas corrosivas, etc.). Esto facilita la trazabilidad del proyecto, requisito central de los sistemas de gestión certificados.

En tercer lugar, para dar cumplimiento efectivo a los principios del RCM, en cuanto a una alta disponibilidad de las celdas de flotación, de cara a la criticidad de estos equipos en el proceso minero, se recomienda incorporar el nuevo sistema en los planes de mantenimiento programado, redefiniendo las tareas asociadas a la lubricación. El cambio desde un esquema manual a uno automático debe reflejarse en la planificación de órdenes de trabajo, en la frecuencia de inspecciones y en las actividades de verificación del correcto funcionamiento del equipo (por ejemplo, revisión periódica de niveles de grasa, chequeo de parámetros de dosificación y testeo de comunicación inalámbrica). Estas actividades deben cargarse en el sistema de gestión computarizada de mantenimiento (CMMS), de manera que los datos generados en terreno puedan ser analizados posteriormente en el Capítulo 3 como parte de los resultados.

En cuarto lugar, se sugiere establecer indicadores de desempeño específicos asociados a la lubricación, coherentes con la evaluación de resultados planteada en la metodología. Entre ellos se pueden considerar: número de fallas asociadas a lubricación antes y después del proyecto, variación en el consumo de grasa, reducción de horas-hombre de mantenimiento, cambios en el MTBF de componentes críticos y disponibilidad operativa de las celdas Scavenger. Estos indicadores permiten demostrar cuantitativamente el aporte del sistema automático y, al mismo tiempo, facilitan el cumplimiento del enfoque de mejora continua exigido por la ISO 55001.

Asimismo, resulta fundamental fortalecer la capacitación y la cultura de cumplimiento normativo. Se recomienda desarrollar sesiones de entrenamiento específicas para el personal de mantenimiento y operación, donde se aborden el funcionamiento del Shell Tactic EMV, las características de la grasa seleccionada, los riesgos asociados a una manipulación incorrecta y los procedimientos seguros de intervención. Al incorporar estos contenidos en el programa regular de formación de la faena, se asegura que el cambio tecnológico vaya acompañado de un cambio conductual y organizacional, condición clave para mantener la confiabilidad a largo plazo.

Finalmente, se propone realizar revisiones periódicas y auditorías internas del sistema de lubricación automática, utilizando los criterios de la ISO 55001 y las metodologías de RCM. Estas

revisiones deben contrastar los resultados obtenidos en operación real con las hipótesis de diseño y los beneficios esperados definidos en la metodología, identificando brechas y oportunidades de mejora (por ejemplo, ajustes en los intervalos de dosificación, cambios en la ubicación de los lubricadores o ampliación del sistema a otros activos como bombas o celdas rougher). Este ciclo de revisión y ajuste asegura que la solución permanezca alineada con el marco normativo y que los resultados que se presentarán en el Capítulo 3 puedan interpretarse como parte de un proceso de mejora continua y no solo como un ejercicio puntual de comparación.

En síntesis, las sugerencias presentadas en este apartado permiten que la propuesta de automatización de la lubricación no se limite a un cambio de equipo, sino que se integre de manera ordenada al sistema de gestión de activos y al cumplimiento de normas. Esto establece las bases para que el análisis y los resultados del Capítulo 3 se sustenten en un contexto normativamente robusto, demostrando que la solución propuesta es técnica, operacional y reglamentariamente viable.

CAPÍTULO 3: ANALISIS Y RESULTADOS

3.1. Diagnóstico del sistema tradicional

Con el fin de identificar y comparar de manera objetiva las diferencias entre el método tradicional v/s el actual de lubricación automática, se registraron mediciones en terreno.

La lubricación del equipo se ejecuta mediante el sistema convencional, el cual requiere el uso de una bomba lubricadora manual y la participación de dos mecánicos de mantenimiento. A ello se suma la intervención obligatoria de un técnico eléctrico, quien es el único autorizado para realizar las maniobras de bloqueo y desbloqueo de la celda Scavenger, siguiendo lo estipulado en el procedimiento oficial de mantenimiento desde la sala eléctrica N°18.

Desde el punto de vista técnico, la grasa aplicada mediante la bomba manual solo puede inyectarse con el equipo completamente detenido, con el propósito de evitar cualquier interacción hombre-máquina. Sin embargo, debido a que el rodamiento permanece bloqueado durante este proceso, solo es posible introducir una fracción mínima de grasa por ciclo. Para continuar la lubricación, el personal debe retirarse del área segura de trabajo, solicitar un nuevo giro del equipo y repetir la operación. Este procedimiento debe iterarse varias veces hasta alcanzar la cantidad total requerida.

Usando las dimensiones nominales de los rodamientos instalados, 22224 (120 × 215 × 58 mm) como rodamiento superior y 29428 (140 × 300 × 95 mm) como rodamiento inferior, y considerando su tipo (rodamientos de rodillos a rótula, típicamente empleados en apoyos con cargas combinadas y posible desalineación), se adoptó el criterio SKF de replenishment (grasa de relubricación a reponer) en lugar de un cálculo volumétrico idealizado, ya que el volumen interno disponible no puede aproximarse como un cilindro vacío debido a la ocupación de rodillos, jaula y pistas (Manual de Lubricación SKF, 2022).

Con este enfoque, la grasa de relubricación estimada se calculó para reposición desde el costado, todos los cálculos y ecuaciones se realizaron en base al libro manual de mantenimiento de rodamientos SKF citado en bibliografía.

$$G_p = 0.005 D B$$

donde D es el diámetro exterior del rodamiento y B su ancho (mm), obteniéndose aproximadamente $G_p \approx 62\text{g}$ para el 22224 ($D=215\text{ mm}$; $B=58\text{ mm}$) y $G_p \approx 143\text{g}$ para el 29428 ($D=300\text{ mm}$; $B=95\text{ mm}$), en otras palabras 204 g para el sistema completo.

Usando el criterio conservador de no inyectar más del 5% de G_p por ciclo, el sistema admite

aproximadamente 3.1 g/ciclo en el rodamiento 22224 y 7.1 g/ciclo en el rodamiento 29428, es decir, 10,2g/ciclo en total, equivalentes a 0.8 g y 1.8 g por bombeo respectivamente (considerando 4 bombeos por ciclo). En consecuencia, el número de ciclos requeridos para completar la relubricación estimada es:

$$N_{ciclos} = \frac{G_p}{0.05 G_p} = 20$$

es decir, 20 ciclos por rodamiento bajo este límite. Este procedimiento reduce el riesgo de sobrepresión y sobrelubricación en condiciones donde no se ha confirmado una purga/escape efectivo de grasa, y además es coherente con la práctica de relubricación gradual para rodamientos de rodillos en aplicaciones de carga elevada.

Tabla 3- 1 Estimación de ciclos de lubricación manual

	MOVIMIENTO DEL EQUIPO (Celda Scavenger)			10.2 g	Fin primer ciclo	20 ciclos
	CRONOMETRO (h)	0:15:00	0:05:00	0:20:00	0:40:00	13:20:00
1er secuencia	Bloqueo equipo	0:15:00				
	Conexión de bomba lubricadora manual y aplicación de 4 bombeadas – aprox. 10.2 grs de grasa aplicados		0:05:00			
	Desbloqueo del equipo y giro del equipo para la distribución de la grasa en interior del rodamiento			0:20:00		

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

De acuerdo con la secuencia mostrada en la Tabla 3-1, el procedimiento parte con la ejecución de un bloqueo total del equipo, donde se desenergizan eléctricamente todos los motores asociados al movimiento de la celda Scavenger, maniobra que debe realizarse en la sala eléctrica N°18 por personal autorizado (eléctrico/instrumentista). Una vez confirmado el bloqueo y aplicado el bloqueo departamental por parte de los dos mecánicos mantenedores, estos conectan la bomba manual mediante

un flexible hidráulico en el conector de lubricación del rodamiento. Posteriormente, accionan la palanca de la bomba y aplican 4 pulsos, inyectando aproximadamente 0.8 g en el rodamiento radial superior y 1.8 g en el rodamiento axial inferior de lubricante por pulso. Dado que los rodamientos permanecen detenidos y la grasa encuentra una alta resistencia al ingreso, en esta condición solo es posible introducir una cantidad limitada por secuencia, del orden de 10.2 gr de lubricante considerando ambos rodamientos en la primera intervención.

Completada esta fase, se debe desconectar la bomba, retirar el flexible y proceder al desbloqueo eléctrico de todo el equipo, para que el operador haga girar la celda y así permitir la redistribución interna de la grasa previamente inyectada. Sin embargo, como la cantidad de lubricante incorporada en cada ciclo está muy por debajo de la cantidad objetivo, esta secuencia de bloqueo–lubricación–desbloqueo–giro debe repetirse alrededor de 20 veces hasta alcanzar los aproximadamente 204 g requeridos en el sistema completo. El resultado global es un tiempo total de mantenimiento de 13 horas 20 minutos.

3.2. Análisis del sistema con lubricador automático

Si este sistema manual se reemplazara por un lubricador automático instalado en el punto de engrase del rodamiento, el cuello de botella se elimina prácticamente por completo. El equipo podría ser lubricado en línea o con un único bloqueo inicial para instalación y programación, quedando luego la dosificación de grasa automatizada, continua y controlada en caudal y tiempo.

A continuación, se muestra la Tabla 3-2 que describe el paso a paso de la ejecución del sistema de lubricación automático.

Tabla 3- 2 Ejecución sistema de lubricación automático

MOVIMIENTO DEL EQUIPO (Celda Scavenger)						
CRONOMETRO (H)		0:00:00	0:15:00	0:35:00	0:45:00	1:05:00
1er secuencia	Posicionamiento del equipo para mtto.	0:15:00				
	Bloqueo equipo		0:20:00			

	Conexión y montaje de Lubricador Automático - encendido Mode Stand-Bye			0:10:00	
	Desbloqueo y giro del equipo, puesta en marcha del lubricador automático				0:20:00

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

A partir del diagnóstico del sistema tradicional, donde la lubricación del rodamiento de la celda Scavenger se realiza mediante bomba manual y requiere la repetición de múltiples secuencias de bloqueo, conexión y giro del equipo, se instalan dos lubricadores automáticos directamente en los puntos de engrase, tal y cómo se aprecia en la Figura 3-1.



Figura 3- 1 Ubicación de los lubricadores automáticos

Fuente: Elaboración propia fotografía tomada el 10/12/2025

Esta modificación transforma por completo la lógica del proceso de mantenimiento: desde una tarea cíclica, intensiva en horas-hombre y en tiempos de detención, hacia una actividad puntual de montaje y puesta en marcha, tras la cual la dosificación de grasa pasa a ser continua y autónoma.

La Tabla 3.2 detalla el paso a paso de la intervención con lubricador automático. La secuencia

parte, al igual que en el sistema manual, con el posicionamiento del equipo para mantenimiento (≈ 15 min) y el bloqueo eléctrico de la celda (≈ 20 min) para asegurar condiciones seguras de trabajo. A continuación, un único mecánico ejecuta la conexión y montaje del lubricador automático en el punto de engrase y realiza la configuración inicial del equipo en modo stand-by, actividad que requiere del orden de 10 min. Una vez fijado el dispositivo y verificados los parámetros de caudal y frecuencia, se procede al desbloqueo y giro del equipo, permitiendo que el rodamiento opere mientras el lubricador comienza a inyectar grasa de forma controlada hasta completar una lubricación progresiva equivalente a la cantidad de grasa de relubricación estimada (G_p). A diferencia de una aplicación concentrada, esta etapa de operación asistida se desarrolla de forma continua y gradual, con el rodamiento en movimiento y recibiendo el lubricante en condiciones reales de carga, lo que favorece la redistribución interna de la grasa y la formación uniforme de la película lubricante sobre las pistas de rodadura y los elementos rodantes.

De este modo, el tiempo de mantenimiento asociado a la implementación inicial del sistema automático se limita a la instalación y puesta en servicio del lubricador, concentrándose en una única intervención de corta duración y con participación de solo un mecánico. En tal sentido, se aprecia las principales características operativas de los lubricadores automáticos en la Tabla 3-3.

Tabla 3- 3 Características operativas de los lubricadores automáticos

Tamaño de los lubricadores	250 cm ³ modelo LC250
Duración	6 meses
Descarga nominal	1,37 cm ³ /24hr por cada lubricador
Cantidad de lubricadores	2
Caudal total	2,74 cm ³ /24hr ó 2,5 gr/día
Densidad de la grasa	0,9 g/cm ³
Cantidad de grasa	205gr
Tiempo de entrega	83días

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

Desde la perspectiva de ingeniería de procesos, la incorporación del lubricador automático no busca reducir el tiempo total necesario para alcanzar la masa total de lubricante estimada, sino eliminar las intervenciones manuales repetitivas y las detenciones asociadas a la actividad de engrase. A

diferencia del sistema tradicional, no es necesario repetir múltiples secuencias de bloqueo–lubricación–desbloqueo para alcanzar una cantidad acumulada de grasa equivalente; el suministro se realiza de manera progresiva y controlada, sin interrumpir la operación normal del equipo.

3.3. Comparación técnica entre el sistema de lubricación tradicional y el automático.

La comparación entre el sistema de lubricación tradicional y la alternativa con lubricador automático se basa en los estudios de tiempos presentados para el sistema manual (Tabla 3.1) y en la secuencia resumida para el sistema automático (Tabla 3.2), junto con la relación tiempo versus lubricante obtenida experimentalmente. Complementariamente, la Tabla 3.3 (caso 1) y la Tabla 3.4 (caso 2) presentan el análisis económico de la mano de obra involucrada en cada metodología. En ellas se detalla la dotación requerida (mantenedores mecánicos, instrumentista y operador eléctrico), el costo horario de cada rol, el costo total por hora y el costo global del ciclo de mantenimiento, considerando los tiempos de intervención definidos en las Tablas 3.1 y 3.2. De esta forma, es posible evaluar ambos enfoques no solo desde la operación y la confiabilidad, sino también desde su impacto directo en los costos de mantenimiento.

En síntesis, el análisis se estructura en cuatro dimensiones: comportamiento de linealidad, seguridad del trabajo, confiabilidad operativa del rodamiento e impacto económico.

3.3.1. Comportamiento de linealidad y capacidad del proceso

En el sistema manual, la relación entre tiempo de intervención y cantidad de grasa acumulada presenta un comportamiento prácticamente lineal, ya que cada incremento en la masa de lubricante aplicada requiere repetir una secuencia completa de bloqueo, engrase y desbloqueo. En consecuencia, el tiempo total de detención crece de forma directamente proporcional a la cantidad de grasa requerida, sin que se observen economías de escala en la etapa de lubricación. La capacidad del proceso queda, por tanto, rígidamente limitada por el tiempo necesario para ejecutar cada ciclo manual.

En el sistema automático, la lógica del proceso es fundamentalmente distinta. El tiempo de intervención del personal se concentra en la instalación y configuración inicial del lubricador, mientras que la incorporación de la grasa se realiza posteriormente de forma continua y controlada, con el

rodamiento en operación. Bajo este esquema, el aumento de la cantidad total de grasa suministrada no se traduce en un incremento proporcional del tiempo de mantenimiento, ya que no se requieren nuevas detenciones ni intervenciones manuales adicionales. Desde el punto de vista de ingeniería de procesos, esto implica un aumento efectivo de la capacidad de la etapa de lubricación y la eliminación del cuello de botella asociado al sistema tradicional. En la Tabla 3-4 se aprecia la comparación de tiempos para el ciclo de comparación.

Tabla 3- 4 Comparación de ciclos de lubricación

Ciclo de lubricación	Manual	Automático
	13:20 hrs	1:05

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

3.3.2. Seguridad y exposición al riesgo

Otro aspecto crítico es la seguridad operacional. En el sistema manual, la necesidad de repetir múltiples secuencias de bloqueo, conexión de bomba y trabajo cercano a partes móviles incrementa la frecuencia de exposición del personal a condiciones de riesgo, tales como trabajo en altura, proximidad a ejes y poleas, y presencia de superficies resbaladizas debido a pulpas o humedad. Cada nueva intervención implica el reingreso del personal a la zona de la celda y la reiteración de maniobras de bloqueo y etiquetado, aumentando la probabilidad de desviaciones operacionales o errores humanos.

Con el lubricador automático, la frecuencia de intervención se reduce de forma significativa. Una vez instalado y programado, el dispositivo puede operar durante períodos prolongados sin requerir la presencia del mecánico en el área, disminuyendo la cantidad de maniobras de bloqueo y desbloqueo y reduciendo el tiempo de permanencia en zonas de riesgo. Desde la perspectiva de gestión de seguridad, esta metodología permite disminuir la exposición global del personal y facilita el cumplimiento de estándares de seguridad industrial y sistemas de gestión asociados. (por ejemplo, ISO 45001). En la Tabla 3-5 se analizan las categorías de riesgos, su descripción y mitigación mediante lubricación automática.

Tabla 3- 5 Análisis de riesgos y mejoras con lubricador automático

Categoría de Riesgo	Descripción del Peligro	Mitigación mediante SLA
Trabajo en Altura	Acceso a motores y transmisiones en la parte superior de las celdas.	Se elimina la necesidad de subir; la bomba está a nivel del suelo.
Superficies Resbaladizas	Derrame de pulpa, agua y espumas sobre pasarelas.	El personal no necesita transitar por estas zonas con frecuencia.
Partes Móviles	Engrase cerca de ejes y correas en movimiento.	La lubricación es automática y remota; no hay interacción manual.
Riesgos Químicos	Contacto con xantatos, espumantes y cal.	Minimiza el tiempo de permanencia del técnico cerca de la pulpa.
Ergonomía	Posturas forzadas para alcanzar graseras ocultas.	Elimina la manipulación manual de pistolas y baldes.

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

3.3.3. Confiabilidad operativa y calidad de la lubricación

Desde el punto de vista de la confiabilidad operativa, el sistema automático presenta ventajas relevantes. En el esquema manual, la cantidad de grasa aplicada depende directamente de la ejecución del operador y de su interpretación respecto a la necesidad de lubricación, lo que introduce variabilidad y puede derivar en situaciones de sobrelubricación o sublubricación. Además, la aplicación se realiza con el rodamiento detenido, requiriendo posteriormente un giro del equipo para intentar redistribuir el lubricante, lo que puede generar una distribución no homogénea, especialmente bajo condiciones de carga variables.

En el sistema con lubricador automático, el volumen de grasa y la frecuencia de aplicación quedan determinados por parámetros de diseño y ajustes del equipo, estandarizando el suministro de lubricante y reduciendo significativamente la variabilidad asociada a la intervención humana. Al inyectar la grasa con el rodamiento girando, se favorece una distribución más uniforme del lubricante sobre las pistas y los elementos rodantes, mejorando la estabilidad de la película lubricante y reduciendo

la probabilidad de desgaste acelerado o sobrecalentamiento. Como consecuencia, se espera una mejora en los indicadores de MTBF del rodamiento y una mayor disponibilidad operacional de la celda, al disminuir la incidencia de fallas mecánicas asociadas a deficiencias de lubricación. En la Tabla 3-6 se aprecia el comparativo de disponibilidad del rodamiento.

Tabla 3- 6 Comparativo de disponibilidad de rodamiento

Disponibilidad	Manual	Automático
	86%	92%

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

3.3.4. Impacto económico y costos de mano de obra

Las diferencias operacionales descritas se reflejan directamente en los costos de mano de obra, resumidos en las Tablas 3-1 (caso 1: sistema tradicional) y 3-2 (caso 2: sistema con lubricador automático).

En el caso 1, correspondiente al sistema tradicional, se requieren:

- 2 mantenedores mecánicos a CLP 17.500/h (subtotal CLP 35.000),
- 1 instrumentista a CLP 28.000/h,
- 1 operador eléctrico a CLP 17.500/h.

El costo horario conjunto asciende a CLP 80.500/h. Considerando un tiempo total de mantenimiento de 13,33 h = 13 horas y 20 min (Tabla 3-1), el costo de mano de obra del sistema manual alcanza aproximadamente CLP 1,073,333 por evento, sólo asociado a la aplicación de ~205 g de grasa en el sistema completo.

Tabla 3- 7 Costos MO sistema manual

caso 1			
Cant.	Mano de obra	costo /h	Subtotal
2	MANTENDOR MECANICO	\$17,500	\$35,000
1	INSTRUMENTISTA	\$28,000	\$28,000
1	OPERADOR ELECTRICO	\$17,500	\$17,500
			\$80,500
			HH
			13.33333333
			Tiempo de Mantenimiento en caso 1 (h)
			\$1,073,333 (1181 USD)
			Costo mano de obra especializada x Lubricación equipo - caso 1

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

En el caso 2, asociado al sistema con lubricador automático, la dotación se reduce a:

- 1 mantenedor mecánico,
- 1 instrumentista,
- 1 operador eléctrico,

manteniéndose los mismos costos horarios unitarios. El costo total por hora es entonces de CLP 63.000/h. Dado que el tiempo de intervención se reduce a 1 h 5 min por ciclo (Tabla 3.4), el costo de mano de obra del sistema automático es del orden de CLP 68.250 por evento.

Al comparar ambos escenarios, se observa que la implementación del lubricador automático reduce el costo directo de mano de obra en aproximadamente un 94 % para una misma cantidad de lubricante aplicada. Además, al disminuir el tiempo de detención del equipo de casi seis horas a poco más de una hora, se reducen también los costos de oportunidad asociados a la indisponibilidad de la celda (pérdida de producción, reprogramación de operaciones, consumo energético no productivo, etc.), los cuales no están explicitados en las tablas, pero amplifican el beneficio económico de la automatización.

En consecuencia, incluso considerando la inversión inicial en el lubricador automático, el ahorro

recurrente en costos de mano de obra y en horas de detención sugiere un periodo de recuperación de la inversión (payback) corto, especialmente en equipos críticos que requieren lubricaciones frecuentes a lo largo del año.

Tabla 3- 8 Costos MO sistema automático

caso 2			
Cant.	Mano de obra	costo /h	Subtotal
1	MANTENDOR MECANICO	\$17,500	\$17,500
1	INSTRUMENTISTA	\$28,000	\$28,000
1	OPERADOR ELECTRICO	\$17,500	\$17,500
		\$63,000	HH
		1.083333333	Tiempo de Mantenimiento en caso 1 (h)
		\$68,250 (75 USD)	Costo mano de obra especializada x Lubricación equipo - caso 2

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

En síntesis, el análisis comparativo muestra que el sistema de lubricación tradicional, aunque funcional, introduce un cuello de botella significativo en términos de tiempo de mantención, uso de recursos, exposición al riesgo y costo de mano de obra. La incorporación de un lubricador automático permite romper la proporcionalidad lineal entre tiempo de intervención y cantidad de grasa, mejora la seguridad y la calidad de la lubricación y, en última instancia, incrementa la eficiencia global, la confiabilidad operativa y la viabilidad económica del mantenimiento del rodamiento en la celda Scavenger.

Tabla 3- 9 Comparativo de costos totales de los sistemas

Costos	Manual	Automático
MO	1.073.333 (1181 USD)	68.250 (75 USD)
MP	70.750 (78 USD)	70.750 (78 USD)
Inversión	0	175.000 (192 USD)
Costo Total	1.144.083	314.000

Tabla 3- 10 Resumen de criterios para sistemas

Criterio	Manual	Automático	Mejora
Tiempo de lubricación	13:20 hrs	1:05 hrs	92% (+)
Disponibilidad del rodamiento	86%	92%	7% (+)
Costos	1.144.083 CLP	314.000	72% (+)

Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía

3.4. Recomendaciones

En base a la evaluación técnica realizada sobre el sistema de lubricación automática instalado en los rodamientos de la celda Scavenger, y considerando los resultados de tiempo, costo, seguridad y confiabilidad, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Mantener el sistema de lubricación automática como estándar para el equipo crítico. Dado el alto nivel de reducción de tiempo de mantenimiento, disminución de costos de mano de obra y mejora en la seguridad y confiabilidad de los rodamientos, se recomienda mantener el sistema de lubricación automática como la solución base para este punto crítico, evitando volver a esquemas de lubricación manual salvo en casos de contingencia.
2. Asegurar disponibilidad de insumos y unidades de reemplazo. Cada intervención programada debe contar con al menos un cartucho de grasa compatible y una unidad de lubricador automática de respaldo completamente configurada. Esto permite responder rápidamente ante fallas del equipo o agotamiento inesperado del cartucho, evitando detenciones no planificadas del equipo crítico.
3. Establecer un programa formal de inspección y verificación del sistema. Se recomienda definir

en el plan de mantenimiento preventivo actividades específicas para:

- Verificar periódicamente el estado físico del lubricador (anclajes, carcasa, conexiones).
- Comprobar el caudal y la configuración de dosificación según los parámetros definidos en la tesis.
- Revisar visualmente las líneas de alimentación de grasa y los puntos de engrase para detectar fugas, obstrucciones o daños en cañerías y racores.

4. Integrar completamente la información del sistema al CMMS. Se debe registrar en el sistema computarizado de mantenimiento (CMMS) todos los eventos asociados al lubricador automático: fechas de instalación, recarga de cartuchos, cambios de configuración, fallas y reemplazos. Con esta información se podrán calcular indicadores como:

- Horas-hombre ahorradas por año.
- Número de fallas de rodamiento antes/después de la automatización.
- Consumo de grasa por período.

Esto permitirá validar en el tiempo los beneficios técnicos y económicos identificados en la evaluación.

5. Capacitar y reentrenar periódicamente al personal involucrado. Aunque el sistema reduce la intervención humana, sigue siendo crítico que mecánicos, instrumentistas y operadores conozcan:

- El principio de funcionamiento del lubricador automático.
 - Los efectos de una mala configuración (sublubricación/sobrelubricación).
 - El procedimiento correcto de bloqueo, instalación, puesta en marcha y verificación.
- Se recomienda realizar instancias de capacitación periódicas y actualizar los procedimientos cada vez que se introduzcan cambios de modelo de lubricador o de grasa.

6. Monitorear la confiabilidad del rodamiento y ajustar parámetros si es necesario. Se sugiere llevar un seguimiento sistemático de la condición del rodamiento (vibraciones, temperatura, historial de fallas) y contrastarlo con la configuración del lubricador (caudal e intervalo). Si se detectan tendencias de aumento de temperatura, fallas prematuras o consumo excesivo de grasa, se deberán ajustar los parámetros de dosificación y documentar dichos cambios para futuras evaluaciones.

7. Evaluar la extensión de la solución a otros equipos críticos de la planta. Considerando los resultados obtenidos en la celda Scavenger, se recomienda analizar la factibilidad técnica y económica de replicar la misma metodología en otros activos rotativos de alta criticidad (bombas, ventiladores, otras celdas, etc.). La experiencia y los datos generados en esta evaluación técnica constituyen una base sólida para justificar proyectos de automatización de lubricación en otros puntos de la instalación.

CONCLUSIONES

La presente memoria evaluó técnica, operativa y económicamente la implementación de un sistema de lubricación automática en el rodamiento crítico de la celda Scavenger, comparándolo con el esquema de lubricación manual previamente utilizado en la planta. El análisis se basó en estudios de tiempos y movimientos, evaluación de eficiencia operativa, análisis de costos de mano de obra y consideraciones de seguridad y confiabilidad, lo que permitió cuantificar de manera objetiva el impacto de la automatización del proceso de lubricación sobre la operación del equipo.

Desde el punto de vista operativo, el sistema de lubricación manual presentó limitaciones estructurales relevantes. Para alcanzar la relubricación estimada del sistema (≈ 205 g), fue necesario ejecutar 20 ciclos completos de engrase, acumulando aproximadamente 13 h 20 min de intervención directa, con participación simultánea de personal mecánico, instrumentista y operador eléctrico. Esta relación prácticamente lineal entre cantidad de lubricante aplicada y tiempo de intervención evidenció que el proceso manual no escala eficientemente, generando un uso intensivo de horas-hombre y una disminución significativa de la disponibilidad operacional de la celda.

En contraste, la lubricación automática concentró la intervención humana en una única actividad inicial de montaje y puesta en marcha, con un tiempo del orden de 1 h 5 min, desacoplando posteriormente la cantidad de lubricante suministrada del tiempo de intervención del personal. Este cambio permitió reducir en más de un 90 % las horas de intervención directa asociadas a la actividad de lubricación y eliminar la repetición de ciclos de bloqueo–lubricación–desbloqueo, constituyendo una mejora sustantiva en la eficiencia operativa del mantenimiento.

El impacto económico respalda cuantitativamente esta mejora operacional. El costo directo de mano de obra asociado al esquema de lubricación manual fue estimado en \$1.073.333 CLP por evento, mientras que el costo equivalente mediante el sistema de lubricación automática se redujo a \$68.250 CLP. Esta diferencia representa una reducción aproximada del 94 % en los costos directos de mano de obra asociados a la actividad de lubricación, a lo que se suma la disminución de más de 12 h de detención directa del equipo, con el consiguiente impacto positivo en la continuidad operacional y la utilización eficiente de los recursos productivos. Además, los costos totales se optimizan en un 84,84% al capitalizar el sistema automático 175.000 CLP de cara a 1.154.883 CLP del sistema manual.

Desde la perspectiva de seguridad operacional, la automatización permitió reducir la frecuencia de ingreso del personal a zonas de riesgo desde múltiples intervenciones manuales a una única intervención inicial, disminuyendo significativamente la exposición a maniobras repetitivas de bloqueo,

trabajo en altura y proximidad a partes móviles. Este resultado constituye una mejora relevante en términos de control de riesgos y alineación con los estándares de seguridad industrial aplicables a la operación minera.

Finalmente, en términos de confiabilidad del activo, la dosificación controlada y repetible del sistema automático reduce la variabilidad asociada a la intervención humana, minimiza los riesgos de sobrelubricación o sublubricación y favorece una distribución más homogénea del lubricante bajo condiciones reales de operación. Si bien la consolidación del aumento del MTBF del rodamiento requiere seguimiento en el tiempo, los resultados obtenidos permiten anticipar una mejora sostenida en la estabilidad operativa y en la disponibilidad mecánica de la celda Scavenger. La disponibilidad del rodamiento se mejora en un 7% pasando de 86% a 92% en un lapso de 6 meses.

En síntesis, los resultados cuantitativos obtenidos confirman que la implementación del sistema de lubricación automática en el rodamiento crítico de la celda Scavenger es técnica y económicamente superior al esquema manual, al reducir de manera significativa las horas-hombre, los costos directos de mantenimiento, la exposición al riesgo del personal y las detenciones del equipo. La metodología desarrollada en esta memoria constituye una base objetiva y replicable para la evaluación e implementación de soluciones de automatización del mantenimiento en otros equipos rotativos de alta criticidad de la planta, en coherencia con los principios de eficiencia operativa, gestión de activos y mejora continua exigidos por la industria minera moderna.

BIBLIOGRAFÍA

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2024). Estadísticas de accidentabilidad. Industria extractiva minera año 2023 (reporte al 30 de abril 2023). https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/05/Accidentabilidad-Minera-2023_web.pdf

International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management – Overview, principles and terminology. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 55001:2014 Asset management – Management systems – Requirements. ISO.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2023). Balance nacional de accidentabilidad minera en Chile 2023. Gobierno de Chile. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/05/Accidentabilidad-Minera-2023_web.pdf

Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance (RCM II). Butterworth-Heinemann.
Smith, A. M., & Hawkins, B. K. (2004). Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share. Elsevier.

Shell Lubricants. (n.d.). [Brochure sobre grasas Shell Gadus S3 V220C y sistema automático Shell Tactic EMV] [Folleto técnico]. Shell. Recuperado de https://geo-group.co/images/pdf/shell_brochure.pdf geo-group

SKF Maintenance Products. (2002). SKF single-point automatic lubricator SYSTEM 24 [Hoja de datos MP3501E]. SKF Group. Recuperado de <https://docs.rs-online.com/e34b/0900766b80e03814.pdf> RS Components

perma-tec GmbH & Co. KG. (2024). Product flyer perma CLASSIC / perma FUTURA [Folleto de producto 118445]. perma-tec. Recuperado de https://www.perma-tec.com/_Resources/Persistent/5/f/9/5/5f957a6cf96f7fb102892534cac8ba4aaa78c3ee/Product_flyer_perma_CLASSIC_FUTURA_118445_en.pdf perma-tec.com

perma-tec GmbH & Co. KG. (2022). perma STAR VARIO & perma STAR VARIO BLUETOOTH [Folleto de producto 117191]. perma-tec. Recuperado de https://www.perma-tec.com/_Resources/Persistent/3/b/0/3/3b03e8b399b37a1d16baf36e8f900e67908dbc9/perma_STAR_VARIO_Flyer_en_117191.pdf perma-tec.com

Hornche Corporation. (n.d.). Easylube automatic single-point lubricators [Información de producto]. Easylube. Recuperado de <https://www.easylube.com> easylube.com

FloSolve (Pty) Ltd. (2018). Graco G3 Standard automatic lubrication pump [Ficha técnica]. FloSolve. Recuperado de <https://www.flosolve.co.za/product/graco-g3-standard-automatic-lubrication-pump/> FloSolve a member of the Hudaco Group+1

SKF. (2011). SKF bearing maintenance handbook. SKF Group.

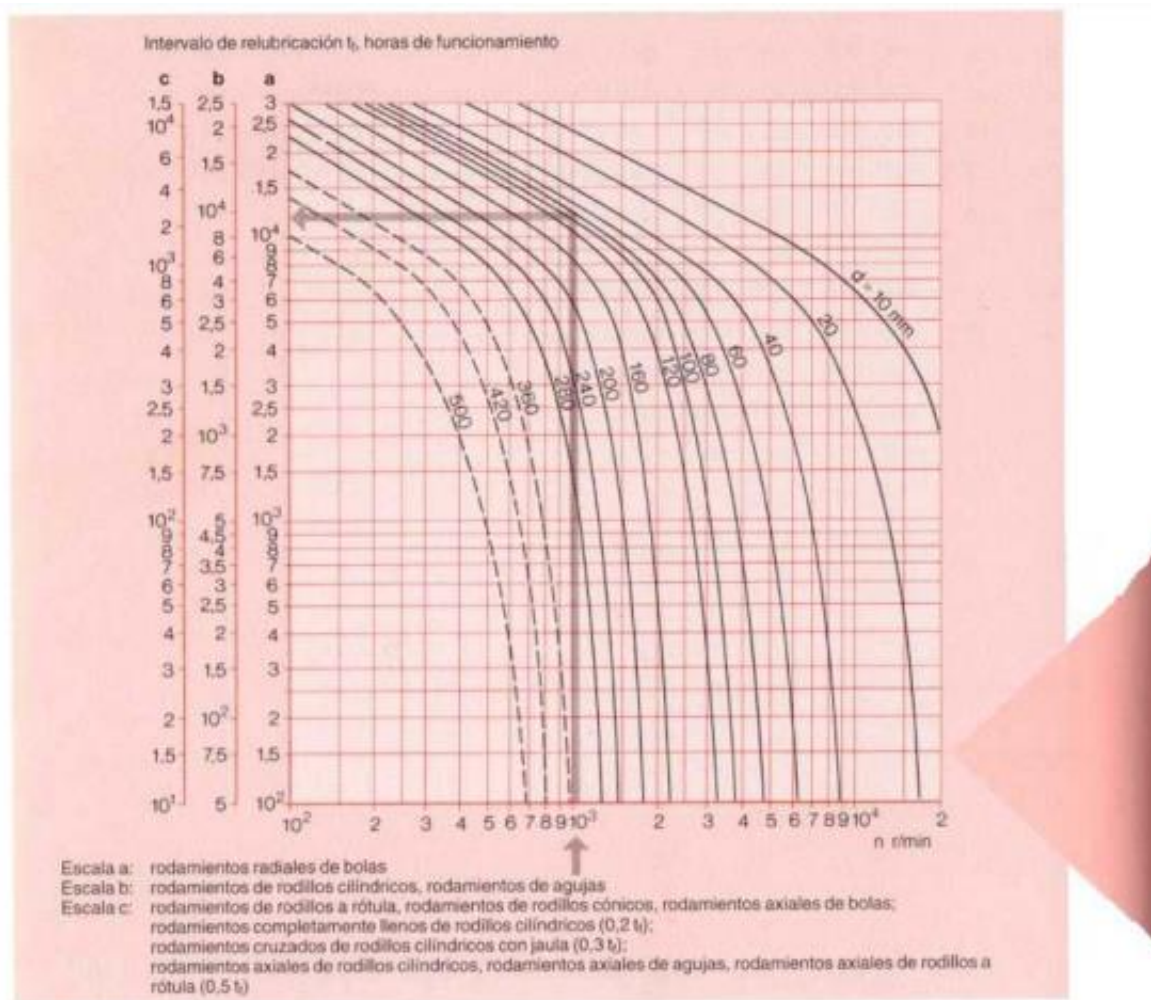
Yaya, E. y Marrero, F. (2022). Diseño e implementación de un aplicativo móvil de mantenimiento de celdas de flotación para plantas concentradoras. Revista de Investigación Científica Ñauparisum, Vol 3, Núm 4.

Norma ISO 55000. (2024). Sistema de Gestión de Activos.

Manual de Lubricación SKF. (2022). Cantidad y frecuencia de engrase en grasas. Documento disponible en <https://mantenimientoplanificado.com/manual%20skf/lubricacion%20grasa/CANTIDAD%20Y%20FRECUENCIA%20GRASA.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Intervalos de relubricación propuestos por SKF.



Fuente: Manual de lubricación SKF

Anexo 2. Intervalos de relubricación propuestos por SKF por horas de funcionamiento.

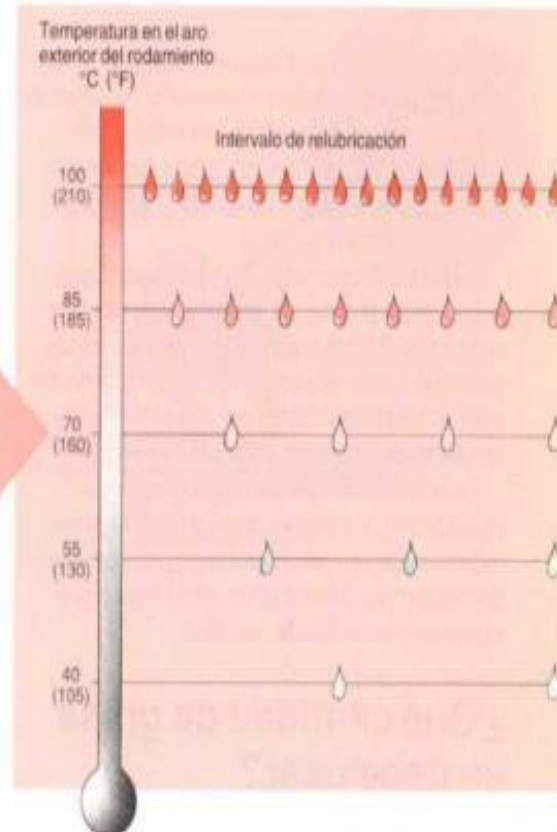
Diagrama de intervalos de relubricación

El diagrama adyacente muestra los intervalos de relubricación, expresados en horas de funcionamiento, para grasas liticas de buena calidad resistentes a la oxidación. Se puede usar para rodamientos montados en ejes horizontales en máquinas estacionarias bajo condiciones normales de funcionamiento. A unas temperaturas del rodamiento de más de 70 °C, el intervalo de relubricación se debe reducir a la mitad por cada 15 °C de aumento de temperatura. Los intervalos pueden ser más largos para temperaturas inferiores a 70 °C.

Es necesario lubricar con mayor frecuencia en las aplicaciones donde existe el riesgo de una fuerte contaminación. Lo mismo es válido para los rodamientos en ambientes húmedos. Por ejemplo, los rodamientos que funcionan en máquinas papeleras, cuyos soportes son lavados por el agua.

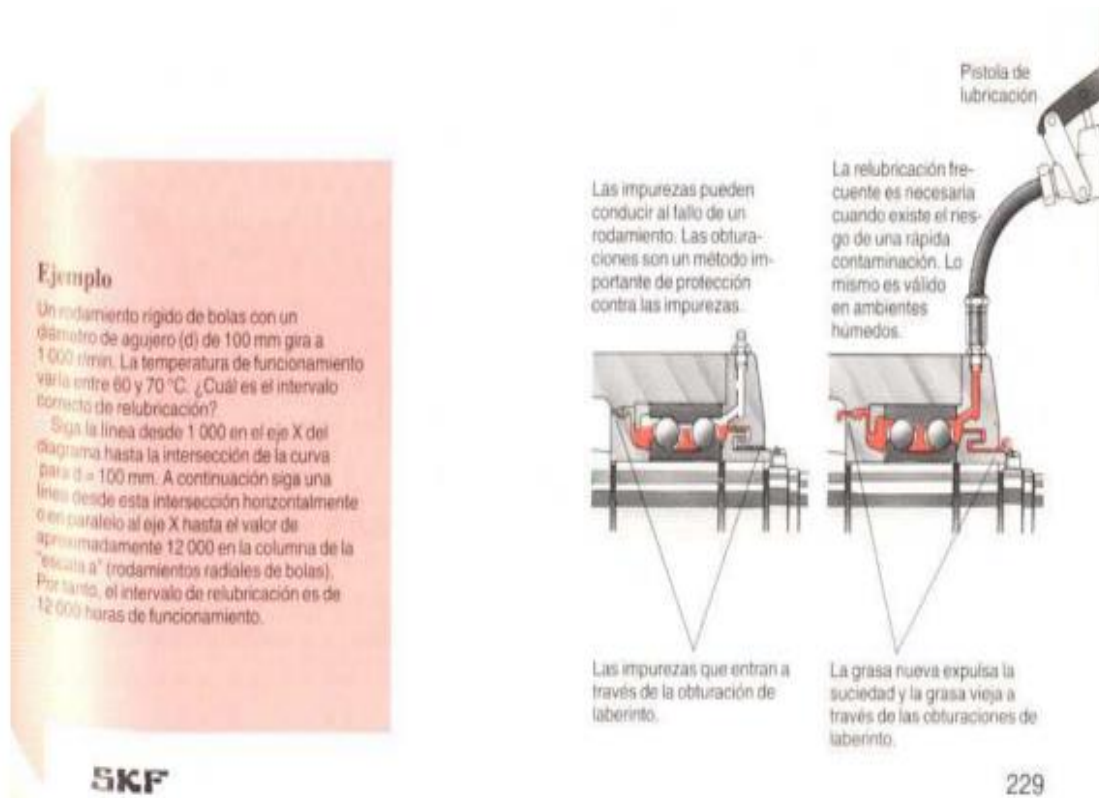
Para los rodamientos en ejes verticales hay que reducir a la mitad los intervalos obtenidos en el diagrama.

Intervalo de relubricación de acuerdo con el diagrama de la página 228.



Fuente: Manual de lubricación SKF

Anexo 3. Aplicación para relubricación de rodamiento.



Fuente: Manual de lubricación SKF

Cambio de la grasa usada

Use siempre el mismo tipo de grasa que se ha utilizado previamente en el rodamiento. Algunas grasas pierden su capacidad de lubricación cuando se mezclan con otra grasa. No mezcle nunca grasas a menos de que esté seguro de que son compatibles.

Cuando los intervalos de relubricación son largos, debe resultar fácil abrir el soporte. Si se requiere una lubricación más frecuente, el soporte debe estar equipado con algún tipo de dispositivo de llenado de grasa, preferiblemente un conducto de lubricación con un engrasador.

En la situación óptima, la grasa se puede inyectar con una pistola de engrasar. Algunos rodamientos van provistos de una ranura y conductos para la relubricación; otros tienen que ser relubricados desde una cara.



Si el soporte es del tipo enterizo, desmonte por lo menos una tapa, o ambas si es posible, para la relubricación.

La fórmula de cantidad de grasa

Esta fórmula ayuda a determinar la cantidad correcta de grasa para la relubricación.



$$G_g = 0,005 D B \text{ gramos}$$

donde

G_g = cantidad de grasa en gramos
 D = diámetro exterior del rodamiento en mm
 B = anchura total del rodamiento en mm
(la dimensión correspondiente para los rodamientos axiales es H)

¿Qué cantidad de grasa se debe usar?

Sólo se debe cambiar la grasa que hay en el rodamiento. Por lo tanto, la cantidad de grasa depende del tamaño del rodamiento. Si dispone de las instrucciones de relubricación, atégase a ellas. Si no, o si sospecha que la cantidad de lubricación es inadecuada, use la fórmula adyacente para determinar la cantidad correcta.

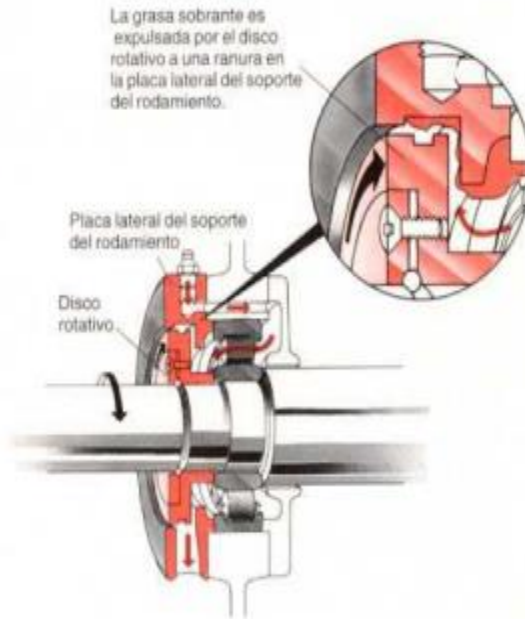
Fuente: Manual de lubricación SKF

Válvulas de escape de grasa

Cuando un rodamiento gira a una elevada velocidad y necesita una relubricación frecuente, se puede acumular una cantidad excesiva de grasa en el soporte. Para evitarlo, permita que la grasa salga a través de la válvula de escape. La válvula puede consistir en un disco que gira con el eje, formando un espacio estrecho con la placa lateral del soporte. El exceso de grasa se recoge en el disco, se descarga a una cavidad en la placa lateral, y se expulsa a través de una abertura en el lado inferior del soporte del rodamiento. Si es posible, diseñe la tapa en el lado de alimentación de modo que la grasa sea guiada al rodamiento.

Los soportes SAF se pueden equipar con un racor de alivio en el resalte que abre cuando la presión interior está en la gama de 1–5 psi. Esto se designa con el sufijo WR.

Los soportes SAF con obturaciones rozantes, sufijo -20, van siempre provistos de racores de alivio. Los números de referencia de estos racores figuran en la tabla "Sistemas de lubricación para soportes de pie SAF" en las páginas 244 y 245.



Fuente: Manual de lubricación SKF