



**Mejora en la disponibilidad de sellado en prensaestopas de bombas centrífugas y
rodamientos en vagonetas de transporte: caso de éxito implementado a planta de minería
subterránea de metales preciosos**

Juan David Restrepo Ocampo

Carlos Andrés Sierra Pérez

Seleccione tipo de documento para optar al título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Docente

Noé Alejandro Mesa Quintero, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Restrepo Ocampo & Sierra Pérez, 2025)
Referencia	Restrepo Ocampo, J. D., & Sierra Pérez, C. A. (2025). <i>Mejora en la disponibilidad de sellado en prensaestopas de bombas centrífugas y rodamientos en vagonetas de transporte: caso de éxito implementado a planta de minería subterránea de metales preciosos</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Cohorte XIX.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Introducción	6
1. Objetivos	8
1.1 Objetivo general	8
1.2 Objetivos específicos.....	8
2. Marco teórico	9
2.1 ¿Cuál es el propósito principal del estudio del caso?	9
2.2 ¿Cuáles son los hallazgos más significativos?	10
3. Metodología	13
3.1 Análisis del problema.....	13
3.2 Hipótesis o diagnóstico	14
3.2.1 Posibles causas de los problemas.....	14
3.2.1.1 Desgaste abrasivo.....	15
3.2.1.2 Fatiga.....	16
3.2.1.3 Corrosión.....	17
3.3 Propuesta de solución.....	17
3.4 Implementación de la solución.....	18
3.5 Cronograma	19
4. Resultados	28
5. Conclusiones	30
Referencias	35

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Cronograma de actividades</i>	19
Tabla 2. <i>Datos técnicos de rodamientos</i>	25
Tabla 3. <i>Procedimientos de ajuste</i>	27
Tabla 4. <i>Situación actual empaquetadura</i>	28
Tabla 5. <i>Situación actual rodamientos</i>	29
Tabla 6. <i>Resultados de las pruebas de la empaquetadura</i>	30
Tabla 7. <i>Evaluación de desempeño de la empaquetadura</i>	31
Tabla 8. <i>Resultado de las pruebas de los rodamientos</i>	32
Tabla 9. <i>Evaluación de desempeño de los rodamientos</i>	33

Lista de figuras

Figura 1. <i>Elementos de estudio</i>	13
Figura 2. <i>Vagoneta minera</i>	15
Figura 3. <i>Desgaste abrasivo</i>	15
Figura 4. <i>Fatiga en rodamientos</i>	16
Figura 5. <i>Corrosión</i>	17
Figura 6. <i>Empaquetadura 2773 TEADIT</i>	20
Figura 7. <i>Inicio de la prueba</i>	22
Figura 8. <i>Diagrama de instalación de rodamientos</i>	24
Figura 9. <i>Vagoneta de prueba</i>	26

Introducción

En el presente estudio de caso nos remitiremos a unas necesidades puntuales que tenía uno de nuestros clientes del sector minero, este cliente trabaja con la extracción de minerales preciosos de manera subterránea.

Para el caso de estudio se tendrán en cuenta dos activos los cuales hacen parte de la operación de mina, uno es el transporte del agua del proceso al interior de la mina hacia el exterior por medio de bombas centrífugas, que lo que hacen es transportar desde el nivel más profundo hacia cada uno de los niveles superiores. En este caso las bombas centrífugas presentaban un gran alto recambio de los cordones de empaquetadura de los prensaestopas. Dando así, unos tiempos improductivos de este tipo de equipos muy constantemente en cada mes y de igual manera los costos asociados a este tipo de mantenimientos correctivos en las bombas eran bastante elevados.

Por otro lado, el segundo proceso que veremos a continuación en el caso de estudio es el del transporte del material estéril del interior de la mina, hacia el exterior por medio de trenes de vagonetes, esos se componen de varios vagones los cuales al interior de la mina se cargan de material estéril producto de la voladura al interior, también suelen utilizarse para transportar el mineral hacia los puntos de acopio de las minas. Estos equipos también son de vital importancia para facilitar la logística al interior de la mina ya que en ellas se transporta también insumos, herramientas y equipos al interior de la mina. Estas vagonetes presentaban un alto recambio en los rodamientos de las ruedas, los cuales comenzaban a presentar desgastes entre los quince y veinte días después de realizar su instalación. Lo que comprometía la correcta operación de las vagonetes al interior de la mina, esto aparte de representar un gasto excesivo en rodamiento volvía poco confiables las vagonetes al interior de la mina.

En ambos de los casos mencionados anteriormente se requiere realizar un levantamiento de la información operativa actual de ambos procesos, para poder comprender de una mejor manera el cómo se pueden mejorar ambas situaciones de consumo tanto para las bombas centrífugas y los elementos de sellado, como para la optimización de consumo y recambio de rodamientos en las vagonetes de transporte de mineral.

Este tipo de soluciones e implementaciones en los procesos productivos de una empresa son muy importantes a la hora de realizar el estudio, ya que nos permiten evidenciar de una manera más puntual los costos excesivos en un proceso puntual y las maneras en las que se pueden mejorar

tanto la confiabilidad de los equipos, como el MTBF de los activos y la reducción de los costos asociados a las tareas de mantenimiento y consecución de las materias primas requeridas para las reparaciones de los equipos en mención para el caso de estudio.

Las mejoras de carácter técnico en cada uno de los estudios que se pretenden realizar están limitadas por los catálogos de producto y soluciones de las marcas SKF® y TEADIT®.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Implementar mejoras técnicas y operativas en los sistemas de sellado de prensaestopas en bombas centrífugas (Warman) y en los rodamientos de vagonetas de transporte, con el fin de aumentar la disponibilidad operativa, por ende, reducir tiempos de inactividad y mejorar la eficiencia en la planta de minería subterránea.

1.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar las principales causas de fallas en los sistemas de sellado de prensaestopas y en los rodamientos de las vagonetas
- Implementar soluciones técnicas mediante las marcas Teadit y SKF que busquen aumentar la vida útil de los componentes críticos como mejoras en el tipo de sellado, lubricación y materiales

2. Marco teórico

2.1 ¿Cuál es el propósito principal del estudio del caso?

El siguiente propósito de mejora está correlacionado con la disponibilidad y confiabilidad de equipos rotativos en una planta minera, donde las vagonetas de transporte y bombas Warman 10 x 4, fueron los principales activos protagonistas de este caso de estudio, en el cual se buscó abordar e identificar las fallas recurrentes en términos de sellado y fallo de rodamientos de los equipos mencionados anteriormente.

Inicialmente, la principal problemática se estaba generando en las bombas Warman 10 x 4, estas presentaban fallas frecuentes en su sistema de sellado original, en el cual se estaba utilizando una empaquetadura en material grafitado, con un desempeño menor o igual a las 250 horas aproximadamente, traducido a 10 días de operación continua. Posterior a esto, una vez la bomba perdía su sistema de sellado, esta presentaba fugas excesivas del fluido, lo cual conllevaba a un deterioro más rápido de los componentes, específicamente con mayor gravedad en las dimensiones del eje y lo que, a su vez, direccionaba a un paro significativo en el proceso. Como oportunidad de mejora, se buscó implementar un sistema de sellado más robusto con mejores condiciones, y vida útil de los componentes con el fin de impactar directamente en la confiabilidad del sistema. Para este caso, se implementó la empaquetadura 2773 de la marca Teadit, obteniendo notablemente resultados totalmente favorables a diferencia del sistema de sellado anterior.

Por otra parte, el segundo caso de estudio en la mina, se buscó detallar el impacto negativo que se estaba generando en la configuración de los rodamientos que en ese momento se venía utilizando en las vagonetas de transporte. Los rodamientos estaban presentando un alto desgaste recurrente con una frecuencia de fallo de 6 rodamientos en un mes o un tiempo menor a este, conformándose una vagoneta de transporte por una configuración de 8 rodamientos. Por lo tanto, solo 2 de estos rodamientos podían alcanzar un poco más su vida útil a diferencia de los otros. Con el objetivo de mitigar este recambio de rodamientos, se buscó implementar rodamientos SET 123 de la marca SKF, los cuales ayudaron a reducir el tiempo de inactividad del equipo, aumentando así la eficiencia operativa. Los datos comparativos serán presentados más a detalle en el desarrollo del estudio.

Finalmente, el propósito es ilustrar de manera detallada las oportunidades de mejora que se pueden identificar en algunas aplicaciones, especialmente en el sector minero, en este caso mediante una correcta selección con tecnologías más avanzadas, teniendo en cuenta que hoy día en la industria aún se encuentran equipos con una antigüedad considerable y bastante robustos. Por lo tanto, como cualquier equipo mecánico, estos requieren de una rutina de mantenimiento con mayor frecuencia en el transcurrir del tiempo. En algunas ocasiones, estos equipos sus componentes, ya se encuentran obsoletos debido a que las fábricas los descontinuaron, los cuales, debido a su dimensionamiento se puede considerar el cambio de algunos componentes sin tener que modificar parámetros operativos aun así asegurando y manteniendo el objetivo de optimizar aún más el proceso de funcionamiento, la confiabilidad y la eficiencia operativa de los equipos, siempre y cuando se tenga toda la información de procesos para la respectiva selección (Apaza, 2019).

2.2 ¿Cuáles son los hallazgos más significativos?

Indagando un poco más sobre la literatura debemos primero comprender el funcionamiento de una bomba centrífuga, las cuales constan de componentes principales que cumplen un funcionamiento específico tales como; impulsor o también llamado rotor que se encuentra alojado dentro de una carcasa, este se encarga de generar una fuerza de empuje al fluido el cual, se convierte en un movimiento en espiral o también llamado movimiento tangencial y radial. Dicho movimiento es recibido en la voluta, haciendo su respectivo recorrido con el objetivo de aumentar la presión y desacelerar el fluido, finalmente este sale por la descarga (Bravo, 2021). Clasificándose las bombas centrífugas como turbomáquinas generadoras basadas en el principio de funcionamiento de la ecuación de Euler, convirtiendo la energía mecánica entregada desde otro dispositivo para esta ser convertida en energía hidráulica aumentando la energía del fluido. Por ende, al incrementar esta energía se aumentarán condiciones como altura, caudal, velocidad y presión relacionadas estas con la ecuación de Bernoulli (Amo, 2020).

Teniendo en cuenta los principales componentes que conforman una bomba centrífuga como rodete o impulsor, voluta, anillo de desgaste y eje. Los cuales, son los encargados principales de mover el fluido, estos trabajan directamente asociados a otros componentes adyacentes pertenecientes al cierre hidráulico los cuales, están conformados por empaquetaduras,

prensaestopas, anillo interno y estopa, estos son los encargados de reducir el rozamiento mecánico entre el eje y evitar fugas externas (Paredes, 2019; Amo, 2020).

Revisando el caso de estudio Palpa (2022), donde aplicaron un programa de mantenimiento centrado en confiabilidad a bombas WARMAN 10X4, según este estudio podemos observar que las principales causas de falla en las bombas WARMAN, en este caso están asociadas a fallas mecánicas, en comparación de eléctricas o de instrumentación. Estas fallas mecánicas están representadas en fallo de rodamientos afectando directamente eje y alojamientos, motor quemado, mala tensión de correas, alienación de poleas o acople y sellado de partes húmedas, esto nos brinda una orientación clara hacia donde centrar un mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, teniendo un mayor énfasis e importancia en los equipos que representen un grado de criticidad alto.

El sistema de sellado de las bombas puede ser implementado por sellos mecánicos o empaquetaduras, ambos cumplen con el mismo objetivo de mantener la prevención de fugas, prolongar la vida útil de la bomba, y la seguridad operativa obteniendo una mejor eficiencia de esta. Los sellos mecánicos clasificados en internos y externos están conformados por superficies planas, actuando como un elemento mecánico de empuje axial. El asiento que viene siendo una de las caras se incorpora en el alojamiento, mientras que la otra cara, sella con un empaque mediante el empuje realizado por el árbol, de esta forma permitiendo el desplazamiento axial compensando el desgaste. Los sellos mecánicos son una excelente opción a la hora de querer garantizar un sellado confiable, tener un mejor control de los fluidos y reducir las fugas, aun así, este trae consigo algunos efectos de falla que se deben tener en cuenta para cumplir las características resaltadas anteriormente.

Estas fallas en los sellos se deben a los efectos de calentamiento, instalación y mantenimiento inadecuados, utilizados principalmente en bombas, mezcladores y agitadores, generando fallas catastróficas y comprometiendo la seguridad del personal, impactos medioambientales y los procesos operativos (Lizárraga, 2016), un claro ejemplo de estos fallos se encuentra en el documento (Puga, 2018), donde se evidencia el fallo prematuro del sello mecánico, por contaminación de agua en la línea, una vez retirado el sello detectan contaminación en la cámara de refrigeración proveniente del agua de sello. por lo tanto, la solución planteada fue la implementación de un sistema de recirculación de agua limpia con el fin de que llegue agua más limpia al sello. Sin embargo, fue instalado un sistema de sello por medio de retenes como protección adicional al sello mecánico. Aunque la implementación del sello mecánico genero

mayor impacto económico que los prensaestopas inicialmente, a lo largo del tiempo este fue reflejando mejores condiciones de fiabilidad, eficiencia, y reducción de costos operativos.

Por otra parte, las empaquetaduras comprenden la misma construcción de trenzado que se usan para equipos de servicio reciprocantes compuesto de diferentes materiales de fibra como Grafito Flexible, Grafito Flexible/Carbono, PTFE Expandido, PTFE – grafito, Fenólica, sintética entre otras, aunque los sellos mecánicos puedan alcanzar mayores prestaciones a comparación de las empaquetaduras, estas también son una excelente opción de sellado para este tipo de aplicaciones, teniendo una información detallada del proceso, fluidos, sólidos en suspensión, temperatura, presión y dureza del eje se podrá seleccionar una empaquetadura adecuada para la aplicación, y teniendo en cuenta factores de tolerancias dimensionales, lubricación y correcta instalación se alcanzará una vida útil de la empaquetadura esperada (TEADIT, 2023; Lizárraga, 2016).

3. Metodología

3.1 Análisis del problema

- **Inspección inicial:** estado de los prensaestopas, materiales, condiciones de operación.

Figura 1.

Elementos de estudio



- **Recopilación de datos:** historial de fallos, frecuencia de mantenimiento, costos asociados.

Para el sistema de prensaestopas en las bombas de transporte de agua con materiales particulados hacia la superficie, los cordones de empaquetaduras estaban durando alrededor de las 240 horas o 10 días. Sin embargo, en algunas ocasiones era necesario cambiarlas varias veces en un turno ya que por la calidad de los cordones y el principio de funcionamiento en contacto con materiales altamente abrasivos hacía que redujera esa vida útil del elemento sellante, las empaquetaduras en un ámbito ideal de funcionamiento como mínimo en esa aplicación debían durar 500 horas de trabajo.

Para el sistema los rodamientos en las ruedas de las vagonetas el MTBF de estos se pudo evidenciar que por las condiciones en las que en ciertas ocasiones operaban podría ser de alrededor de las 120 horas de funcionamiento o 5 días, lo que para un rodamiento SET 123 que es un rodamiento de rodillos cónicos es demasiado poco, el proyecto en este punto estaba dimensionado

para que según las recomendaciones técnicas que se realizaron y la implementación de la referencia de la marca SKF SET 123P se dieran unos seguimientos cada quince días al avance de la prueba en esta aplicación.

3.2 Hipótesis o diagnóstico

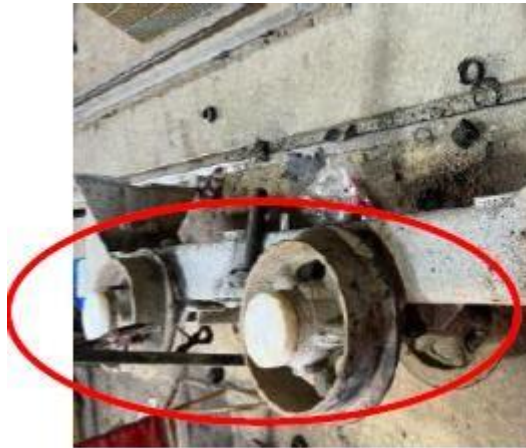
3.2.1 Posibles causas de los problemas

Según la literatura, las principales causantes de fallas en las bombas centrífugas están asociadas a fallas mecánicas e hidráulicas, en la cuales se pueden encontrar fenómenos como cavitación, presiones, empuje axial y radial, fallas de cojinetes, sellos, lubricación y vibraciones especialmente cuando las condiciones ambientales son altas (O. A. Audisio a, 2021). Esto concuerda con los comentarios iniciales que se recopilaron bajo el testimonio de los técnicos y operarios de la planta, donde básicamente señalan que debido al tipo de trabajo que desempeñan estos activos en la operación minera suelen estar expuestas a ambientes y condiciones de trabajo bastante agresivas, por ejemplo; en este caso las bombas suelen bombear agua con materiales particulados producto de la operación (como residuos de lodo, tierra o arenas) si en los prensaestopas no se tiene bien seleccionado el elemento de sellado estos Pueden resultar ser dañinos para elementos como el eje o alojamiento de la empaquetadura, adicionalmente la empaquetadura también podría sufrir un daño prematuro generando así un acortamiento en términos de MTBF.

Para el caso de los rodamientos de las vagonetas de extracción de mineral y material estéril, se evidenciaba un grave problema al interior de la mina ya que por la operación de estos estaban expuestos al lodo y humedad excesiva, en algunos casos los retenedores estaban bastante deteriorados y adicionalmente en algunos de los casos los tapacubos de los extremos de las ruedas no estaban instalados, dando así vía libre a la contaminación para que ingresara directamente a los rodamientos de las ruedas.

Figura 2.

Vagoneta minera



Al tener esta exposición directa a los contaminantes se pueden desencadenar varios tipos de modos de falla de rodamientos, los cuales pueden ser:

3.2.1.1 Desgaste abrasivo

Figura 3.

Desgaste abrasivo



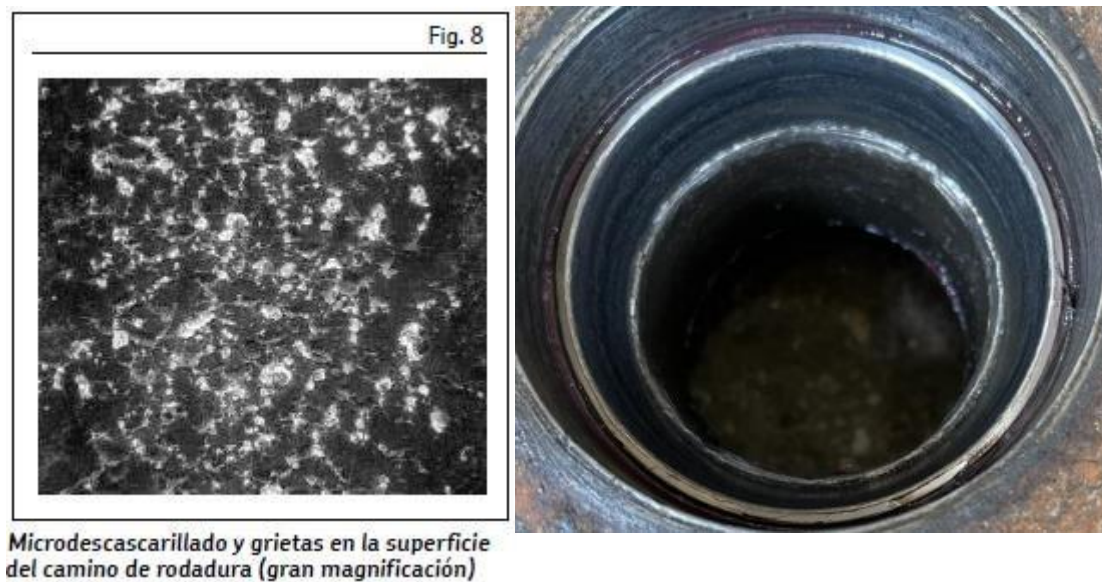
El desgaste abrasivo se da cuando al rodamiento le ingresan partículas contaminantes abrasivas del ambiente o por un lubricante contaminado. Este desgaste se suele caracterizar por lo general por dejar ver superficies opacas, este es un proceso degenerativo que eventualmente destruye la micro geometría del rodamiento, porque las partículas de desgaste también reducen

la eficacia del lubricante, estas desgastan rápidamente los caminos de rodadura de los aros y los elementos rodantes, así como las cavidades de las jaulas o canastillas (SKF, 2017).

3.2.1.2 Fatiga

Figura 4.

Fatiga en rodamientos



La fatiga en los rodamientos se da por los esfuerzos cíclicos que pueden actuar en un elemento dinámico como lo son los rodamientos, y se refiere al deterioro progresivo de sus superficies. Estos esfuerzos generan tensiones debajo de las superficies, generando microfisuras que se propagan con el tiempo, las fases de las fallas por fatiga incluyen el inicio de las microfisuras, la extensión de estas y por último la falla catastrófica del elemento afectado. Los factores o razones que inciden directamente en la elevación local de los esfuerzos y por tanto, en la etapa de inicio de la fatiga suelen ser de tipo geométrico, mecánico, metalúrgico, de tamaño y ambiental (Balseiro, 1995).

3.2.1.3 Corrosión

Figura 5.

Corrosión



De este modo de falla se derivan dos submodos de corrosión, corrosión por humedad y corrosión por fricción o contacto. La corrosión por fricción o contacto ocurre cuando se presenta un movimiento relativo entre el rodamiento y el alojamiento donde se encuentra montado, puede suceder en condiciones en donde existe una alta humedad, agua o químicos corrosivos, y se presenta también frecuentemente donde los ajustes del rodamiento no fueron bien seleccionados y por errores en la forma del rodamiento o alojamiento (Sedisa, s.f.).

En este caso de estudio la mayor parte de este tipo de falla es la corrosión por humedad, esta se da cuando los rodamientos de la vagoneta quedan expuestos por la pérdida del tapacubos e ingresa humedad por los lodos y los fluidos de proceso en el apique.

3.3 Propuesta de solución

- Uso de empaquetaduras mejoradas o alternativas, como sellos mecánicos.
- Optimización de lubricación y uso de materiales confiables y genuinos.

3.4 Implementación de la solución

Mantener la confiabilidad operacional de los sistemas es el reto más grande que tienen los ingenieros de mantenimiento en las plantas, pero es importante resaltar que este depende de muchas variables asociadas a dichos procesos, como por ejemplo las actividades preventivas durante la operación de los equipos, la mantenibilidad, los procedimientos de montaje de componentes mecánicos, eléctricos o de instrumentación. El mantenimiento permite formular estrategias que respondan a las nuevas expectativas; estas incluyen la toma de conciencia para analizar y evaluar los puntos de fallas de los equipos, maquinarias y vehículos que afectan a la seguridad, al medio ambiente y al consumo energético. Esto permite identificar las características de gestión y clasificarlas en el análisis de datos para la gestión del servicio, producto, comunicación y satisfacción al cliente para la estructura de la ingeniería de confiabilidad operacional (Páez, 2022).

La probabilidad de que los equipos puedan operar sin tener problemas en un determinado periodo de tiempo es lo que se le conoce como confiabilidad operacional. Enfocándose esta en una serie de procesos de mejora continua integrando tecnologías avanzadas, materiales, análisis, herramientas de diagnóstico, gestión de mantenimiento, planeación, ejecución y personal calificado, en busca de comprender una excelente gestión de los activos mediante la elaboración de programas y planes de mantenimiento, inspecciones constantes a los equipos de forma visual y mediante herramientas de condición, solución de problemas que se presenten con alta frecuencia que afecten los costos operativos entre otros (Valladares, 2020).

3.5 Cronograma

Tabla 1.

Cronograma de actividades

Número	Etapas/Actividad	Descripción / Acción	Objetivo Principal
1	Atención inicial a la solicitud	Reuniones y correos con el área de ingeniería sobre fallas frecuentes en bombas WARMAN y vagonetas.	Entender el problema reportado por el cliente.
2	Visita a planta	Recolección de información técnica, operativa, ambiental, y muestras de equipos en sitio.	Obtener datos reales del entorno y del proceso para el análisis.
3	Análisis de fallas	Evaluación de empaquetaduras y rodamientos con apoyo de catálogos e historial técnico.	Diagnosticar las causas de las fallas.
4	Selección técnica	Recomendación de productos adecuados (empaquetaduras/rodamientos) según el análisis anterior.	Elegir soluciones técnicas apropiadas.
5	Socialización con el cliente	Reunión con confiabilidad y mantenimiento para definir equipos donde se realizará la prueba piloto.	Alinear decisiones con el cliente antes de la implementación.
6	Capacitación en campo	Formación técnica al personal de mantenimiento para el montaje correcto.	Asegurar que la instalación se realice adecuadamente.
7	Puesta en marcha	Supervisión directa del montaje e inicio de operación de los nuevos componentes.	Garantizar el correcto funcionamiento desde el inicio.
8	Seguimiento técnico	Inspecciones visuales y reportes periódicos al área de confiabilidad.	Verificar desempeño y detectar posibles desviaciones a tiempo.

Fase de implementación y pruebas:

Para el caso de estudio de las empaquetaduras de los prensaestopas el cliente nos permitió hacer una prueba piloto con la empaquetadura que se había seleccionado en la marca TEADIT según los parámetros, condiciones ambientales y de operación, la cual es la empaquetadura 2773.

Figura 6.

Empaquetadura 2773 TEADIT

 **Límites de Trabajo:**

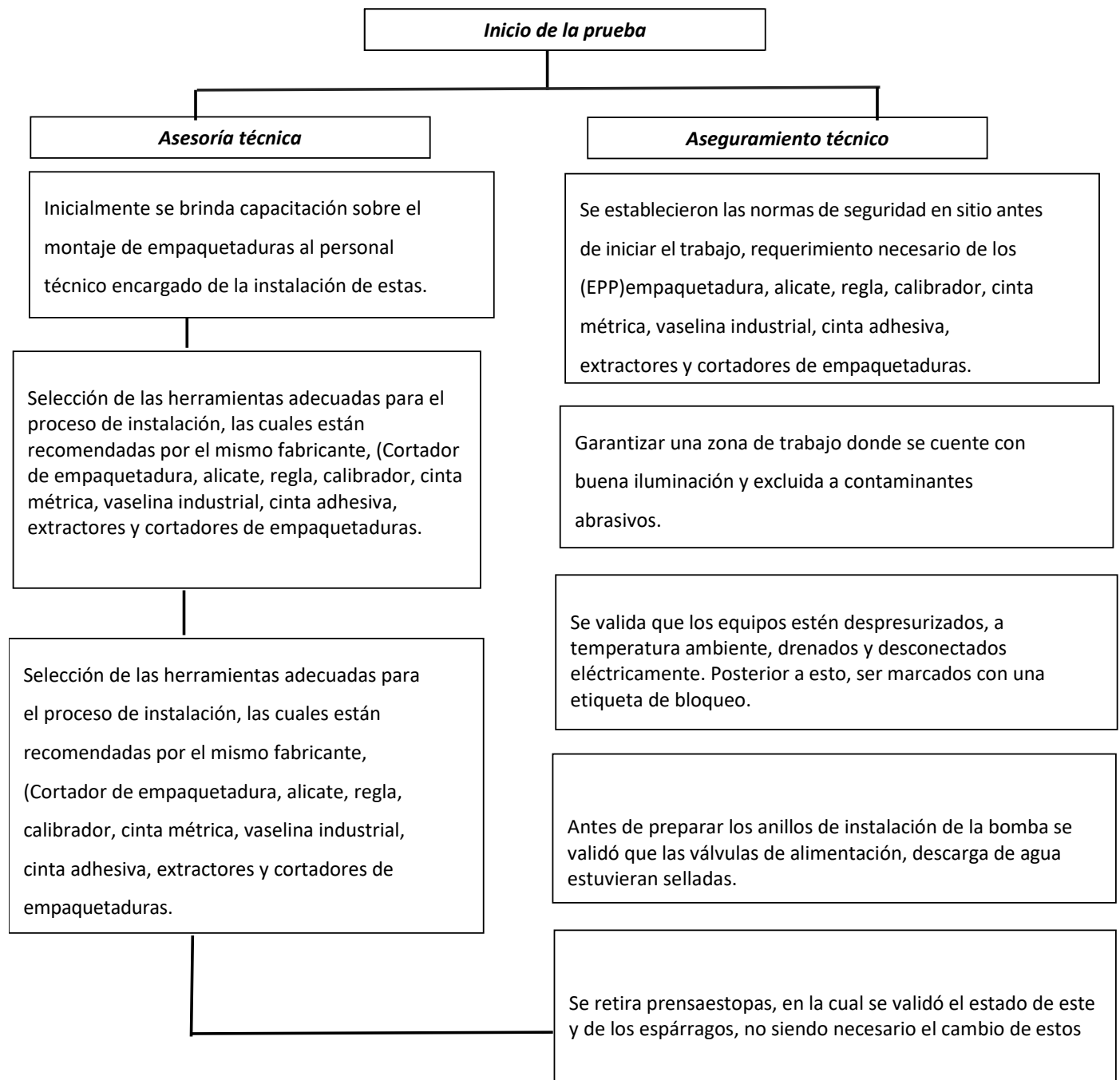
Temperatura	Mínima	-100° C
	Máxima	250° C
Presión	Rotativos	20 bar
	Alternativos	60 bar
	Válvulas	120 bar
pH		1-13
Velocidad		20 m/s

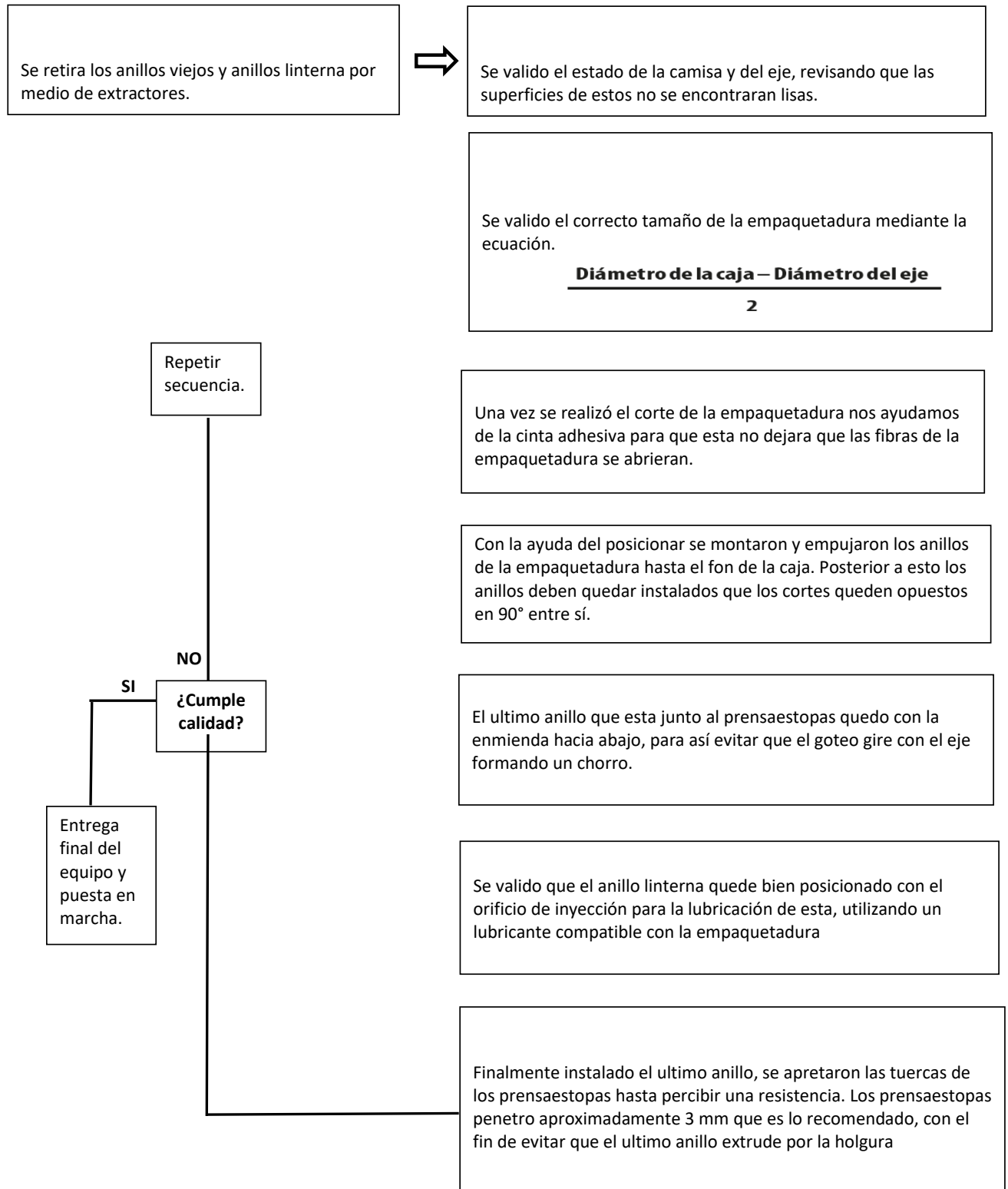


La composición de la empaquetadura TEADIT 2773®, junto con su alto contenido de lubricación, elimina el riesgo la quema prematura de la empaquetadura, incluso cuando está sometida a mayores aprietos superpuestos, lo que garantiza una excelente capacidad de sellado. Su impregnación diferenciada permite el uso en equipos con fluidos químicamente agresivos, incluso cuando se opera a altas velocidades periféricas. Es especialmente adecuada para la minería, se puede utilizar con éxito en aplicaciones donde el fluido sea abrasivo en industrias siderúrgicas, de cemento, entre otras. Posee excelente desempeño en bombas de escoria, pulpa de mineral, captación de aguas de río, de las minas, plantas de tratamiento de aguas residuales, y otros dispositivos que en funcionan con fluidos que contienen sólidos en suspensión. Para un resultado aún mejor en aplicaciones con presencia de fluidos abrasivos, se recomienda el uso de camisas para usar con acabado superficial con dureza ≥ 60 HRC (TEADIT, s.f.).

Para el éxito de la prueba a petición del cliente, la empaquetadura debía trabajar al menos 500 horas de trabajo (el doble de la operación que les estaba entregando el material que estaban implementando inicialmente 250 horas).

Con el objetivo de garantizar la calidad del producto y un sellado eficiente. Teadit como marca líder en fabricación de empaquetaduras, recomienda la siguiente secuencia de montaje para una empaquetadura nueva en equipos rotativos, el cual se tuvo presente para la instalación de la prueba la cual conto con el acompañamiento del área de ingeniería de aplicaciones al personal técnico y de mantenimiento de la mina (TEADIT, 2016).

Figura 7.*Inicio de la prueba*



Para el caso de los rodamientos de las vagonetas inicialmente los rodamientos que estaban implementando tenían una duración aproximada de 5 días, debido a las condiciones en las que se instalaban los rodamientos, el ambiente al que estaban expuestos y otras apreciaciones la duración era exageradamente baja, para esta prueba se decidió tomar una vagoneta e instalar las dos soluciones en las ruedas de manera cruzada con el fin de garantizar que ambos juegos de rodamientos iban a estar sometidos a las mismas condiciones de carga de la siguiente manera.

Figura 8.

Diagrama de instalación de rodamientos

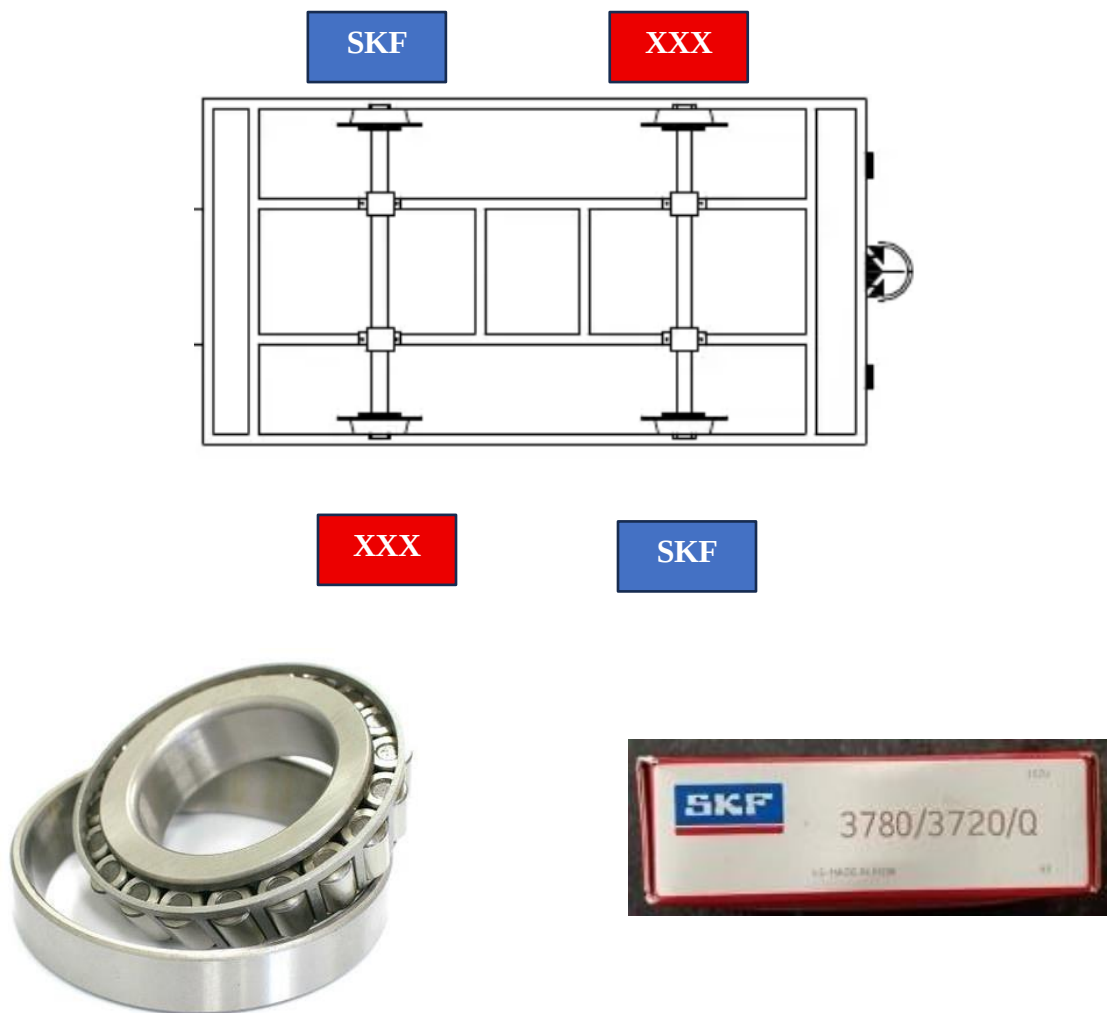


Tabla 2.*Datos técnicos de rodamientos***Dimensiones**

Diámetro interno	50.8 mm
Diámetro exterior	93.264 mm
Ancho total	30.302 mm
Ancho del aro interior	30.302 mm
Ancho del aro exterior	23.812 mm
Ángulo de contacto	12.717 °

Rendimiento

Capacidad de carga dinámica básica	110 kN
Capacidad de carga estática básica	146 kN

Los rodamientos de una hilera de rodillos cónicos están diseñados para admitir cargas radiales y axiales combinadas, y proporcionar una baja fricción durante el funcionamiento. El aro interior, con rodillos y jaula, puede montarse por separado del aro exterior. Estos componentes desmontables e intercambiables facilitan el montaje, el desmontaje y el mantenimiento. Al montar un rodamiento de una hilera de rodillos cónicos contra otro y aplicar una precarga, se puede conseguir una aplicación de rodamiento rígida.

Las cualidades más destacables de este tipo de rodamientos son:

- Alta capacidad de carga radial y axial.
- Soportan cargas axiales en un sentido.
- Baja fricción y larga vida útil.
- Componentes desmontables e intercambiables. (SKF, 2024).

Adicionalmente se identificó la vagoneta que se extrajo para realizar la prueba y poderla distinguir entre el conjunto de vagonetas que existían en la mina.

Figura 9.

Vagoneta de prueba



Para realizar un montaje adecuado de los rodamientos en los extremos de las ruedas de las vagonetas debemos tener en cuenta algunas recomendaciones del fabricante a la hora de realizar el procedimiento de montaje y ajuste de las ruedas; para esto debemos tener en cuenta que no se debe martillar por ningún motivo directamente el rodamiento con el fin de evitar daños en alguno de sus componentes. También se deben inspeccionar los ejes y alojamientos cada 12 meses según recomendaciones de SKF. Y para el correcto ajuste debemos seguir el siguiente procedimiento: (Group, 2015).

Tabla 3.*Procedimientos de ajuste***Procedimientos de ajuste del rodamiento de rueda**

Paso 1: Lubrique el rodamiento de la rueda con lubricante para ejes limpio del mismo tipo usado en el sumidero del eje o el ensamblaje del cubo.
Nota: Nunca use una llave de impacto para apretar o aflojar tuercas o tornillos durante el procedimiento.

Torque inicial de la tuerca de ajuste	Aflojamiento inicial	Torque final de la tuerca de ajuste	Aflojamiento			Torque de contratuerca		Juego de extremo aceptable
			Tipo de eje	Roscas por pulgada	Aflojamiento final	Tamaño de tuerca	Especificaciones de torque	
Paso 2	Paso 3	Paso 4		Paso 5	Paso 6	Paso 7		Paso 8
200 lb-pie (271 N-m) mientras gira las llantas	Un giro completo	50 lb-pie (68 N-m) mientras gira las llantas	Direccional (frente) no-motriz	12	1/8 Giro ¹⁾	Instale una clavija para bloquear la tuerca del eje en posición	200–300 lb-pie (271–407 N-m)	0.001 pulg – 0.005 pulg (0.025 mm– 0.127 mm)
				18	1/4 Giro ¹⁾			
				14	1/2 Giro			
				18				
			Motriz	12	1/4 Giro	Arandela tipo clavija	300–400 lb-pie (407–542 N-m)	Medido por procedimiento con indicador de aguja
				16		Arandela tipo espiga ²⁾	200–275 lb-pie (271–373 N-m)	
			Remolque	12	1/4 Giro	2 5/8 pulg (66.7 mm) y más	200–300 lb-pie (271–407 N-m)	
				16				

¹⁾ Si la clavija y la arandela (o la arandela de espiga y la tuerca plana) no están alineadas, quite la arandela, dele vuelta, y vuelva a instalar. Si es necesario, afloje la tuerca (de ajuste) interna sólo lo suficiente para la alineación.

²⁾ Sólo arandela de bloqueo tipo flexible: Bloquee las tuercas doblando una pestaña de la arandela de tuerca de rueda sobre la tuerca interna y externa. Doble las pestañas sobre la parte plana perpendicular más cercana a la espiga.

4. Resultados

El estudio comenzó teniendo en cuenta los siguientes datos que se tenían que llevar a cabo para las labores de mantenimiento de los prensaestopas y las vagonetas de las minas.

- Datos para el análisis de los prensaestopas:

Tabla 4.

Situación actual empaquetadura

Situación actual empaquetaduras de las bombas WARMAN PLANTA xxxxxx			
Tiempo medio entre fallos de las empaquetaduras.	10 días	240	horas
Mano de obra requerida para el recambio de la empaquetadura en 1 bomba.			
		Valor	Unidad
Operarios requeridos para el cambio.		2	Personas
Tiempo requerido para recambio de la empaquetadura en 1 bomba.		3	Horas
Recambio de empaquetadura por bomba.		6	Veces/2 meses
Horas improductivas de 1 bomba cada 2 meses.		18	Horas
Total, de bombas en la planta xxxxx.		6	Bombas
Total, de horas improductivas de las bombas en xxxxx cada 2 meses.		108	Horas
Total, Horas / Hombre MO	\$ 10.000	216	\$ 2.160.000

HORAS DE PRODUCCIÓN PERDIDAS AL AÑO	648	VALOR TOTAL
Valor Unitario	\$ 5.000	\$ 3.240.000

- Datos para el análisis de los rodamientos SET 123P de la marca SKF instalados con la grasa SKF LGHB 2.

Tabla 5.*Situación actual rodamientos*

Situación actual Rodamientos SET 123 TK de las vagonetas de la mina xxxx.			
Tiempo medio entre fallos de los rodamientos.	5 días	120	Horas
Mano de obra requerida para el recambio de los rodamientos en 1 vagoneta.			
		Valor	Unidad
Operarios requeridos para el cambio.		2	Personas
Tiempo requerido para recambio de los rodamientos en 1 vagoneta.		3	Horas
Recambio de rodamientos en 1 mes en 1 vagoneta.		6	Veces
Horas improductivas de 1 vagoneta cada mes.		18	Horas
Total, horas/Hombre MO	\$ 10.000	36	\$ 360.000

HORAS DE OPERACIÓN PERDIDAS AL AÑO EN 1 VAGONETA	216	Valor total
Valor unitario	\$ 100.000	\$ 21.600.000

Total, de rodamientos que lleva instalados 1 vagoneta	8	Unidades
Total, de rodamientos que se consume 1 vagoneta al año	576	Unidades
Valor de 1 unidad rodamiento otra marca	\$ 165.800	\$ 95.500.800
Inversión del recambio de rodamientos en 1 vagoneta al año (Costo Total de Operación Actual)	\$ 99.820.800	COP

5. Conclusiones

- Para la prueba de las empaquetaduras TEADIT 2773 de 5/8" en las bombas WARMAN, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 6.

Resultados de las pruebas de la empaquetadura

Resultados de las pruebas de la empaquetadura TEADIT 2773 5/8" en las bombas WARMAN PLANTA xxxx.				
PROPUESTA	Tiempo estimado de fallo para éxito de la prueba piloto.	21 días	500	Horas
VALIDACION	Tiempo real de cambio de la empaquetadura por condición de otros componentes de la bomba.	41 días	1000	Horas
Mano de obra requerida para el recambio de la empaquetadura en 1 bomba.				
		Valor		Unidad
Operarios requeridos para el cambio.		2		Personas
Tiempo requerido para recambio de la empaquetadura en 1 bomba.		3		Horas
Recambio de la empaquetadura en 1 bomba		1		Vez/41 días
Horas improductivas de 1 bomba cada 2 meses		3		Horas
Total, de bombas en Planta xxxxxx		6		Unidades
Total, de horas improductivas de las bombas en 2 meses		18		Horas
Total, Horas / Hombre MO	\$ 10.000	36		\$ 360.000
HORAS DE PRODUCCIÓN PERDIDAS AL AÑO		108		VALOR TOTAL
Valor Unitario		\$ 5.000		\$ 540.000

Después de analizar la información podemos concluir con los siguientes datos de ahorros para la operación de las bombas.

Tabla 7.

Evaluación de desempeño de la empaquetadura

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO EMPAQUETADURAS			
	TEADIT 2773 5/8"	Empaquetadura otra marca 5/8"	Unidades
Horas improductivas de 1 bomba al año	108	648	horas
Consumo de empaquetadura en metros de 1 bomba al año	33,9	137,6	metros
Recambios de empaquetaduras anuales en 1 bomba	9	36,5	veces/año
Inversión en recambio de las empaquetaduras en 1 bomba al año	\$ 26.826.994	\$ 40.055.339	COP

AHORRO		
Horas de producción ganadas al año en 1 bomba	540	horas
Reducción de consumo de empaquetadura	-103,7	metros/año
Reducción en paradas de mto	-27,5	veces/año
Ahorro económico en recambios de empaquetaduras de una bomba en 1 año	-\$ 13.228.345	COP/AÑO

La prueba piloto de la empaquetadura TEADIT 2773 de 5/8" en las bombas WARMAN superó ampliamente las expectativas iniciales, alcanzando una duración real de 41 días o 1000 horas, frente a los 21 días o 500 horas estimados, lo que representa un aumento del 95% en la vida útil esperada. Este desempeño demuestra una alta resistencia del producto y su adecuada adaptación a las condiciones operativas de la planta, reduciendo significativamente la frecuencia de mantenimiento, ya que solo se requiere un recambio cada 41 días. Además, el proceso de recambio es eficiente, demandando únicamente 2 operarios y 3 horas por bomba, lo que minimiza el impacto operativo. Desde el punto de vista económico, las horas improductivas se reducen a 18 cada dos

meses para las 6 bombas en operación, totalizando 108 horas anuales. Esto representa un costo por pérdida de producción de \$540.000 al año, considerando un valor unitario de \$5.000 por hora, mientras que el costo de mano de obra para los recambios es de \$360.000 bimensuales. En conjunto, estos resultados evidencian que la empaquetadura TEADIT 2773 es una solución técnica y económicamente eficiente para este tipo de aplicación.

Tabla 8.

Resultado de las pruebas de los rodamientos

Resultado de las pruebas piloto realizadas con los rodamientos SET 123P de la marca SKF lubricados con grasa LGHB 2 SKF.			
Tiempo de seguimiento de la prueba		15 días	360 horas
		Valor	Unidad
Operarios requeridos para el recambio de los rodamientos en 1 vagoneta		2	Personas
Tiempo requerido para recambio de los rodamientos en 1 vagoneta.		3	Horas
Recambio de los rodamientos en 1 mes en 1 vagoneta		2	Veces
Horas improductivas de 1 vagoneta cada mes		6	Horas
Total, hombre/MO	\$ 10.000	12	\$ 120.000

Horas de operación perdidas al año en 1 vagoneta	72	valor total
Valor unitario	\$ 100.000	\$ 7.200.000

Total, de rodamientos que lleva instalados 1 vagoneta	8	Unidades
Total, de rodamientos que se consume 1 vagoneta al año	192	Unidades
Valor de 1 unidad rod. SET 123P SKF	\$ 54.988	\$ 10.557.696
Inversión del recambio de rodamientos en 1 vagoneta al año (Costo Total de operación SKF)	\$ 11.997.696	COP

Después de analizar la información en este caso se puede concluir con los siguientes datos de ahorro para la operación de los rodamientos en las vagonetas mineras:

Tabla 9.

Evaluación de desempeño de los rodamientos

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO RODAMIENTOS			
	SET 123P SKF	Otra marca	UNIDADES
Horas improductivas de 1 vagoneta al año	72	216	horas
Consumo de rodamientos en 1 vagoneta al año	192	576	unidades
Recambios de rodamientos anuales en 1 vagoneta	192	576	veces/año
Inversión en recambio de los rodamientos en 1 vagoneta al año	\$ 11.997.696	\$ 99.820.800	COP

INVERSIÓN	Rtos/Año/Vagoneta	Total
Utilización rodamientos actuales (otra marca)	576	\$ 95.500.800
Utilización rodamientos SKF SET 123P	192	\$ 10.557.696
	INVERSION	-\$ 84.943.104

AHORROS	
Horas de producción recuperadas	144
Reducción en el consumo de rodamientos	-384
Intervenciones por mantenimiento de ruedas evitadas en 1 vagoneta al año	-384
Ahorro en capital por recambio de rodamientos al año	-\$ 87.823.104

La implementación de los rodamientos SKF SET 123P permitió reducir las horas improductivas anuales por vagoneta de 216 a 72, recuperando 144 horas de operación al año, lo cual representa una mejora notable en la disponibilidad del equipo. Además, se disminuyó el consumo de rodamientos de 576 a 192 unidades anuales, lo que también implicó una reducción en las intervenciones de mantenimiento en la misma proporción, optimizando los recursos humanos y operativos.

Económicamente, el cambio generó un ahorro sustancial: la inversión anual en recambio de rodamientos se redujo de \$99.820.800 COP (otra marca) a \$11.997.696 COP (SKF), generando un ahorro neto de aproximadamente \$87.8 millones de pesos anuales por vagoneta, gracias al menor consumo de repuestos y menor tiempo de mantenimiento.

Referencias

- Amo, Á. G. (2020). *Diseño y simulación de una bomba*. Atena.
- Apaza, H. S. (2019). *Implementación de un sistema de gestión del mantenimiento de bombas centrífugas a través de monitoreos subjetivos*. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- Audisio, O. A. (2021). Modos de Fallas en Bombas Centrífugas utilizadas como Turbinas Hidráulicas. *Jornadas de Investigación Desarrollo Tecnológico y Vinculación*. 1, 1-13.
- Balseiro, J. W. (1995). La fatiga: Principal causa de falla de los elementos mecánicos. *Ingeniería & Desarrollo*. 1, 48-50.
- Bravo, H. F. (2021). *Mejoramiento de la eficiencia hidráulica de una bomba*. Universidad de los Andes.
- Group, S. (2015). *Mantenimiento de extremo de rueda TFO*. <https://n9.cl/h9zkh>
- Lizárraga, O. E. (20165). *Análisis y selección de un sistema de sellado para una bomba de impulsión de lodos basada en la metodología de análisis de costo de ciclo de vida*. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- Palpa, M. J. (2022). *Programa de mantenimiento centrado en confiabilidad para aumentar la disponibilidad de la bomba centrífuga horizontal warman 6"x4" ah de la planta de espesamiento de relaves de una unidad minera en la provincia de Oyón – Lima* [tesis de pregrado, Universidad Nacional de Callado]. Biblioteca Digital Universidad Nacional de Callado.
- Páez, R. R. (2022). *Importancia de la ingeniería de confiabilidad operacional para el desarrollo empresarial*. Industrial Data.
- Paredes Ego-Aguirre, C. A. (2019). *Diseño y construcción de un módulo de bombas*. [tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María Arequipa]. Biblioteca Digital Universidad Católica de Santa María.
- Puga, A. R. (2018). *Intervención en bombas con plan de mejoramiento continuo en planta concentradora* [tesis de pregrado, Universidad de Acatama Copiapó]. Biblioteca Digital Universidad de Acatama.
- Sedisa. (s.f.) *¿Qué es la corrosión por contacto en rodamientos?* <https://n9.cl/ycfyi>
- SKF. (2017). *Daño de rodamientos y análisis de fallas*. <https://n9.cl/qpfm5>

SKF. (2024). Rodamiento de una hilera de rodillos. <https://n9.cl/y2nf1>

TEADIT. (2016). *Procedimiento de instalación de empaquetaduras*. Grupo TEADIT.

TEADIT. (2023). *Curso de sellado*. Grupo TEADIT.

TEADIT. (s.f.). *Aplicaciones y beneficios*. <https://n9.cl/p9q xv>

Valladares, R. J. (2020). *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) a bombas de carga en una refinería*. Piura.