Optimization of the lubrication system through automation to increase the operational reliability of excavators at Ángeles Mining and Construction

Rolando Ayay Ayay, Cristhian Jhoel Aquino Gutierrez, Luis Antonio Cerna Medina, Jose Roberto Minchan Huaman
Universidad Privada del Norte, Perú, N00383550@upn.pe, N00351808@upn.pe, N00219066@upn.pe, n00380324@upn.pe

***Abstract*— *Maintenance management of heavy equipment is a strategic factor for ensuring operational reliability, equipment availability, and efficiency in earthmoving and mining service operations. This research was conducted at Angeles Minería y Construcción S.A.C., in Cajamarca Peru, with the objective of optimizing the lubrication system through the implementation of a progressive centralized automatic lubrication system to increase the operational reliability of hydraulic excavators. The study followed a quantitative, applied research approach with a pre-experimental design, evaluating two hydraulic excavators by comparing maintenance indicators before and after the implementation of the proposed system. The methodology included diagnosing the manual lubrication system, analyzing critical components, selecting the appropriate lubricant, sizing lubrication points, designing the centralized automatic lubrication system, and evaluating maintenance management indicators such as mechanical availability, Mean Time Between Failures (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), lubrication-related failures, and maintenance costs. The results showed an increase in mechanical availability from 84.5% to 93.5%, an increase in MTBF from 119 h to 192.5 h, a reduction in MTTR from 11.5 h to 6.5 h, a 69.23% decrease in lubrication-related failures, and a 32.88% reduction in maintenance costs. It is concluded that the implementation of the automatic lubrication system significantly improves the operational reliability of hydraulic excavators, optimizes proactive maintenance management, and contributes to greater operational efficiency and profitability for the company.*

Keywords *– Maintenance, Lubrication, Automation, Reliability, Excavators*

Optimización del sistema de lubricación mediante automatización para incrementar confiabilidad operativa de excavadoras en Ángeles Minería y Construcción

Rolando Ayay Ayay, Cristhian Jhoel Aquino Gutierrez, Luis Antonio Cerna Medina, Jose Roberto Minchan Huaman
Universidad Privada del Norte, Perú, N00383550@upn.pe, N00351808@upn.pe, N00219066@upn.pe, n00380324@upn.pe

Resumen– *La gestión del mantenimiento en maquinaria pesada constituye un factor estratégico para garantizar la confiabilidad operativa, la disponibilidad de los equipos y la eficiencia en las operaciones de movimiento de tierras y servicios mineros. La presente investigación se desarrolló en la empresa Ángeles Minería y Construcción S.A.C., ubicada en la ciudad de Cajamarca en Perú, y tuvo como objetivo optimizar el sistema de lubricación mediante la implementación de un sistema de lubricación automática centralizada progresiva para incrementar la confiabilidad operativa de las excavadoras hidráulicas. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con un diseño preexperimental, evaluando dos excavadoras hidráulicas mediante una comparación de los indicadores de mantenimiento antes y después de la implementación del sistema propuesto. La metodología comprendió el diagnóstico del sistema de lubricación manual, el análisis de los componentes críticos, la selección técnica del lubricante, el dimensionamiento de los puntos de engrase, el diseño del sistema de lubricación automática centralizada y el análisis de indicadores de gestión del mantenimiento, tales como disponibilidad mecánica, tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR), número de fallas relacionadas con la lubricación y costos de mantenimiento. Los resultados evidenciaron un incremento de la disponibilidad mecánica de 84,5 % a 93,5 %, un aumento del MTBF de 119 h a 192,5 h, una reducción del MTTR de 11,5 h a 6,5 h, una disminución del 69,23 % en las fallas relacionadas con la lubricación y una reducción del 32,88 % en los costos de mantenimiento. Se concluye que la implementación del sistema de lubricación automática mejora significativamente la confiabilidad operativa de las excavadoras, optimiza la gestión del mantenimiento proactivo y contribuye a incrementar la eficiencia operativa y la rentabilidad de la empresa.*

Palabras Clave –
Mantenimiento, Lubricación, Automatización, Confiabilidad, Excavadoras

I. INTRODUCCIÓN

La gestión del mantenimiento es esencial para garantizar la confiabilidad y disponibilidad de las excavadoras en minería y construcción, donde las condiciones severas aceleran el desgaste. La automatización de los sistemas de lubricación optimiza la aplicación del lubricante, reduce fallas y costos, y prolonga la vida útil de los equipos. Esta investigación propone implementar un sistema automático centralizado en Ángeles Minería y Construcción S.A.C. para mejorar la confiabilidad operativa.

A nivel mundial, las industrias minera y de construcción buscan aumentar la confiabilidad de sus equipos mediante mantenimiento proactivo y automatización. Las deficiencias en la lubricación generan desgaste y fallas mecánicas, mientras que los sistemas automáticos mejoran la disponibilidad, reducen costos y prolongan la vida útil de componentes críticos [1].

En el Perú, las empresas mineras y de movimiento de tierras presentan problemas por la lubricación manual, lo que incrementa fallas, paradas y costos. Estudios nacionales demuestran que el mantenimiento basado en confiabilidad y monitoreo de lubricantes mejora la disponibilidad mecánica y reduce el desgaste de componentes críticos [2].

En Cajamarca, las empresas contratistas operan excavadoras en ambientes con polvo, humedad y altas cargas, condiciones que aceleran el desgaste cuando la lubricación es deficiente. Investigaciones regionales indican que el mantenimiento preventivo y el uso de indicadores mejoran la disponibilidad de la maquinaria y optimizan los costos operativos [3].

En Ángeles Minería y Construcción S.A.C., las excavadoras son fundamentales para las operaciones de movimiento de tierras y minería. Sin embargo, trabajan en condiciones severas de polvo, humedad, vibraciones y altas cargas, lo que acelera el desgaste de sus componentes. Por ello, una lubricación adecuada resulta indispensable para preservar su vida útil.

Realidad problemática

Actualmente, la lubricación se realiza manualmente, generando variabilidad en el mantenimiento, errores en la aplicación y una cobertura insuficiente de los puntos críticos. Estas deficiencias aumentan las fallas en rodamientos, pasadores, bujes y sistemas de giro, reduciendo la confiabilidad de los equipos.

Frente a esta situación, es necesario implementar un sistema de lubricación automatizado como estrategia de mantenimiento proactivo. Su rediseño permitirá controlar la cantidad y frecuencia de lubricación, reducir la intervención humana y garantizar una lubricación continua. Así, se busca incrementar la disponibilidad y confiabilidad de las excavadoras, disminuir los costos de mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa de la empresa.

1.2 Formulación del problema o necesidad

1.2.1 Pregunta general

¿Cómo influye la optimización del sistema de lubricación mediante automatización en la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción?

1.2.2 Preguntas específicas

PE1. ¿Cómo influye la automatización del sistema de lubricación en la disponibilidad mecánica y en la reducción de las fallas relacionadas con la lubricación de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción?

PE2. ¿Cómo influye la automatización del sistema de lubricación en la reducción de los costos de mantenimiento y en la mejora de los indicadores de confiabilidad (MTBF y MTTR) de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de lubricación mediante automatización para incrementar la confiabilidad operativa de las excavadoras en Ángeles Minería y Construcción.

1.3.2 Objetivos específicos

OE1. Evaluar el efecto de la automatización del sistema de lubricación sobre la disponibilidad mecánica y la reducción de las fallas relacionadas con la lubricación de las excavadoras.

OE2. Determinar el impacto de la automatización del sistema de lubricación en los costos de mantenimiento y en los indicadores de confiabilidad (MTBF y MTTR) de las excavadoras.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La optimización del sistema de lubricación mediante automatización incrementará significativamente la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción, mejorando la disponibilidad mecánica, incrementando el MTBF, reduciendo el MTTR y disminuyendo las fallas y los costos de mantenimiento asociados a la lubricación.

1.4.2 Hipótesis específicas

HE1. La automatización no produce diferencias significativas.

HE2. La automatización produce diferencias significativas

1.5 MARCO TEÓRICO - definiciones

1.5.1 La gestión del mantenimiento: busca maximizar la confiabilidad, disponibilidad y vida útil de los activos mediante estrategias preventivas, predictivas y proactivas. En excavadoras hidráulicas, la tribología estudia los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación que afectan componentes críticos como el rodamiento de giro (Swing Bearing), la corona de giro, los motores reductores, los motores de traslación y los pasadores y bujes. Estos elementos operan principalmente bajo lubricación elastohidrodinámica (EHL) debido a las altas cargas de contacto, mientras que las bombas hidráulicas y cojinetes lisos trabajan bajo lubricación hidrodinámica, donde una película de aceite separa completamente las superficies metálicas. [4]

1.5.2 Selección de lubricantes y rodamientos: La selección del lubricante depende de factores como carga, velocidad, temperatura, contaminación y recomendaciones del fabricante (OEM). Para el rodamiento de giro y la corona de giro se recomienda grasa NLGI 2 con base de litio complejo y aditivos EP (Extreme Pressure) y AW (Anti-Wear), debido a su elevada resistencia al desgaste y cargas extremas. En los motores reductores y motores de traslación se utilizan aceites ISO VG 220 o ISO VG 320, cuya viscosidad garantiza una adecuada película lubricante y protege los componentes frente a la fatiga superficial y el desgaste adhesivo (SKF, 2020). [5]

1.5.2.1 Sistemas de lubricación

En esta investigación se compara dos sistemas de lubricación:

Sistema actual: Sistema de lubricación manual



Fig. 1. Lubricación manual.

- Aplicación mediante pistola de engrase.
- Depende completamente del operador. • La frecuencia y cantidad de grasa pueden variar.
- Mayor riesgo de sobre lubricación o lubricación insuficiente.
- Requiere detener parcialmente el equipo.
- Mayor exposición del personal a zonas de riesgo.

Sistema propuesto: Sistema de lubricación automática centralizada progresiva (Monolínea)

- Lubricación automática centralizada.
- Distribución automática de grasa mediante una bomba eléctrica.
- Lubricación programada.
- Cantidad exacta de lubricante.
- Todos los puntos reciben grasa simultáneamente.
- Puede lubricar con el equipo en operación (según el diseño y las recomendaciones del fabricante).
- Reduce errores humanos.



Fig. 2. Sistema de lubricación Automática.

1.5.2.2 Tipos de sistemas de lubricación automática

En la industria existen principalmente cuatro tipos.

1.5.2.2.1 Sistema progresivo (Monolínea)

- Es el más utilizado por fabricantes como SKF Lincoln, Groeneveld, Bijur Delimon y DropsA es el sistema ideal para excavadoras hidráulicas.
- Funciona muy bien con grasa NLGI 2.

Soporta ambientes con:

- Polvo
- Agua
- Vibraciones
- Minería

Características:

- Una sola línea principal.
- Distribuidores progresivos.
- Una bomba central.
- Muy utilizado en excavadoras, cargadores y maquinaria pesada.
- Excelente para grasa NLGI 2.

Ventajas:

- Muy confiable.
- Fácil mantenimiento.
- Detecta obstrucciones.
- Ideal para minería.

1.5.2.2.2 Sistema de doble línea

Se utiliza cuando existen:

- Muchos puntos de lubricación
- Largas distancias

Es común en:

- Plantas concentradoras
- Molinos
- Fajas transportadoras

No suele utilizarse en excavadoras.

1.5.2.2.3 Sistema multilínea

Cada punto posee una salida independiente desde la bomba. Normalmente se emplea en maquinaria estacionaria.

Ventajas:

- Gran precisión

Desventajas:

- Instalación costosa
- Muchas tuberías

1.5.2.2.4 Sistema de línea simple (Inyector)

Utiliza inyectores individuales.

Muy usado en:

- Maquinaria agrícola
- Vehículos
- Camiones

No es el más común para excavadoras de gran tamaño.

1.5.3 Cálculos de dimensionamiento: El dimensionamiento del sistema de lubricación permite determinar la cantidad de grasa y la frecuencia óptima de relubricación, optimizando el consumo del lubricante y reduciendo fallas. Para calcular la cantidad de grasa en un rodamiento se emplea la expresión: Donde:
G es la cantidad de grasa (g), D el
diámetro exterior (mm)
B el ancho del rodamiento (mm).

La frecuencia de reengrase se ajusta considerando las condiciones de operación, como polvo, vibraciones, temperatura y horas de servicio, recomendándose intervalos cercanos a
100 horas para excavadoras que trabajan en minería bajo condiciones severas (SKF, 2020). [6]

1.5.4 Propuesta de automatización sistema de lubricación automática progresivo (Monolínea): es un sistema centralizado que distribuye de forma automática y secuencial cantidades precisas de lubricante a múltiples puntos de engrase mediante una única línea principal y distribuidores progresivos. Está conformado por una bomba, depósito de grasa, distribuidores, tuberías y una unidad de control, **permitiendo lubricar componentes críticos de las excavadoras, como el rodamiento de giro, la corona de giro, los pasadores y bujes. Su implementación mejora la confiabilidad operativa, incrementa la disponibilidad mecánica, aumenta el MTBF, reduce el MTTR, disminuye el consumo** de lubricante y minimiza el desgaste de los componentes, además de reducir la exposición del personal a riesgos durante las actividades de mantenimiento (SKF, 2020; Lincoln Industrial, 2021). [7]

1.5.5 Indicadores de Gestión del Mantenimiento: Los indicadores de gestión del mantenimiento permiten evaluar el desempeño de los activos físicos y medir la efectividad de las estrategias implementadas. En esta investigación se utilizarán los indicadores de Disponibilidad Mecánica, Confiabilidad (MTBF), Mantenibilidad (MTTR) y Costo de Mantenimiento, los cuales permitirán cuantificar el impacto de la automatización del sistema de lubricación sobre el desempeño de las excavadoras (Moubray, 1997).

Disponibilidad Mecánica (DM): La disponibilidad mecánica representa el porcentaje de tiempo en que un equipo permanece apto para operar respecto al tiempo total programado. Un incremento de este indicador refleja una mayor continuidad operacional y una reducción de las paradas no programadas.

$$G = D \times B \times 0.005$$

$$DM = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$$

DM: Disponibilidad mecánica (%) **MTBF:** Tiempo medio entre fallas (h) **MTTR:** Tiempo medio de reparación (h). [8]

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF): Mide la confiabilidad de un equipo mediante el tiempo promedio que transcurre entre una falla y otra durante su operación. Cuanto mayor sea este indicador, mayor será la confiabilidad operativa de la excavadora. [9]

$$MTBF = \frac{\text{Horas Totales de Operación}}{\text{Número de Fallas}}$$

Tiempo Medio de Reparación (MTTR) representa el tiempo promedio requerido para restaurar un equipo después de una falla. La automatización del sistema de lubricación contribuye a disminuir este indicador al reducir las intervenciones correctivas ocasionadas por problemas de lubricación. [10]

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Reparación}}{\text{Número de Reparaciones}}$$

El costo de mantenimiento: comprende los recursos económicos destinados a actividades preventivas, predictivas y correctivas, incluyendo mano de obra, repuestos, lubricantes y tiempos de parada. La implementación de sistemas automáticos de lubricación permite disminuir estos costos al reducir el desgaste de componentes, optimizar el consumo de grasa y minimizar las fallas relacionadas con la lubricación (Wireman, 2005). [11]

1.5.6 Confiabilidad Operativa

La confiabilidad operativa es la capacidad de un equipo para desempeñar la función para la cual fue diseñado durante un período determinado y bajo condiciones específicas de operación. En excavadoras hidráulicas, la confiabilidad depende del adecuado funcionamiento de componentes críticos como el rodamiento de giro, la corona de giro, los motores reductores y el sistema de lubricación. La automatización del proceso de lubricación contribuye a mantener una película lubricante adecuada, reducir el desgaste prematuro y aumentar la vida útil de los componentes, mejorando así la continuidad de las operaciones y la productividad de la empresa (Moubray, 1997). [12]

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca resolver un problema específico relacionado con la gestión del mantenimiento mediante la implementación de un sistema de lubricación

automática que incremente la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción.

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, ya que evalúa el efecto de la automatización del sistema de lubricación mediante indicadores de mantenimiento como la disponibilidad mecánica, el MTBF, el MTTR, el número de fallas y los costos de mantenimiento, permitiendo comparar los resultados antes y después de la implementación.

El estudio es de nivel explicativo, debido a que analiza la influencia de la automatización del sistema de lubricación sobre la confiabilidad operativa de las excavadoras, estableciendo una relación de causa y efecto entre las variables de estudio.

Se empleará un **diseño de investigación preexperimental** con preprueba y posprueba en un solo grupo, donde inicialmente se evaluarán los indicadores de mantenimiento de las excavadoras y, posteriormente, se implementará el sistema de lubricación automática para comparar los resultados obtenidos.

Esquema del diseño:

$O_1 \rightarrow X \rightarrow O_2$

Donde:

O_1: Medición inicial de los indicadores de mantenimiento.
X: Implementación del sistema de lubricación automática.
O_2: Medición final de los indicadores de mantenimiento.

La población estará conformada por 24 las excavadoras hidráulicas de la empresa Ángeles Minería y Construcción que realizan operaciones de movimiento de tierras.
La muestra será no probabilística e intencional, conformada por dos excavadoras seleccionadas para la implementación del sistema de lubricación automática, por ser el equipo con mayor criticidad y frecuencia de operación.

2.6 Técnicas y materiales
Técnicas

- Observación directa.
- Análisis documental.
- Inspección técnica.
- Registro de datos de mantenimiento.
- Análisis de indicadores de confiabilidad.

Instrumentos

- Ficha de inspección.
- Registro de fallas.
- Historial de mantenimiento.
- Hojas de control de lubricación.
- Cronómetro.
- Check list de inspección.

Materiales y equipos

- Sistema de lubricación automática.
- Bomba eléctrica de lubricación.
- Distribuidor progresivo.
- Mangueras y tuberías.
- Sensores de nivel y presión.
- Grasa NLGI 2 con aditivos EP.
- Herramientas mecánicas.
- Computadora con Microsoft Excel para el procesamiento de datos.

2.7 Procedimiento para la elaboración: La implementación del sistema de lubricación automática se desarrollará mediante las siguientes etapas:

Paso 1. Diagnóstico inicial: Se recopilará información del historial de mantenimiento de las excavadoras, identificando fallas relacionadas con la lubricación, tiempos de parada, consumo de grasa y costos de mantenimiento.

Paso 2. Inspección de los puntos de lubricación: Se identificarán y verificarán todos los puntos de engrase de la excavadora, tales como el rodamiento de giro, corona de giro, pasadores, bujes, brazo, cucharón y articulaciones.

Paso 3. Dimensionamiento del sistema: Se determinará la cantidad de grasa requerida, la frecuencia óptima de lubricación, la capacidad del depósito, el caudal de la bomba y la distribución de las líneas de lubricación.

Paso 4. Diseño del sistema automático: Se elaborará el esquema del sistema de lubricación automática tipo progresivo, definiendo la ubicación de la bomba, distribuidores progresivos, tuberías, sensores y conexiones.

Paso 5. Instalación del sistema: Se instalarán los componentes del sistema de lubricación automática y se realizarán las conexiones mecánicas y eléctricas de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante.

Paso 6. Programación y calibración: Se configurarán los ciclos automáticos de lubricación, ajustando la cantidad de grasa y la frecuencia de suministro según las condiciones de operación de la excavadora.

Paso 7. Puesta en marcha: Se realizarán pruebas de funcionamiento para verificar la correcta distribución del lubricante hacia todos los puntos de engrase y corregir posibles fugas u obstrucciones.

Paso 8. Evaluación de resultados: Se compararán los indicadores de mantenimiento antes y después de la implementación, evaluando la disponibilidad mecánica, el MTBF, el MTTR, las fallas por lubricación y los costos de mantenimiento para determinar el impacto de la automatización del sistema.

ANALISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizará mediante estadística descriptiva, con el propósito de comparar el comportamiento de los indicadores de mantenimiento antes y después de la implementación del sistema de lubricación automática en las dos excavadoras seleccionadas.

Para ello, se registrarán los valores de disponibilidad mecánica, MTBF, MTTR, número de fallas relacionadas con la lubricación y costos de mantenimiento, los cuales serán organizados en tablas comparativas. Posteriormente, se calcularán los promedios y el porcentaje de variación de cada indicador para evaluar el impacto de la implementación del sistema.

TABLA I
OBSERVACIONES DE LOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO DE LA EXCAVADORA E-01

Mes	Estado	Disponibilidad (%)	MTBF (h)	MTTR (h)	Fallas	Costos (S/.)
Enero	Antes	84	118	12	6	18 200.00
Febrero	Antes	85	120	11	6	18 000.00
Marzo	Antes	86	122	11	6	17 800.00
Abril	Después	92	188	7	2	12 700.00
Mayo	Después	93	190	7	2	12 500.00
Junio	Después	94	192	6	2	12 300.00

En la Excavadora E-01 se observa que, después de implementar el sistema de lubricación automática, la disponibilidad mecánica aumentó de 85 % en promedio a 93 %, mientras que el MTBF pasó de aproximadamente 120 horas a 190 horas. Asimismo, el MTTR disminuyó de 11 a 7 horas, las fallas por lubricación se redujeron de 6 a 2, y los costos de mantenimiento descendieron de aproximadamente S/ 18 000.00 a S/ 12 500.00, evidenciando una mejora en el desempeño del equipo.

TABLA II
OBSERVACIONES DE LOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO DE LA EXCAVADORA E-02

Mes	Estado	Disponibilidad (%)	MTBF (h)	MTTR (h)	Fallas	Costos (S/.)
Enero	Antes	84	116	12	7	18 700.00
Febrero	Antes	84	118	11	7	18 500.00
Marzo	Antes	84	120	11	6	18 300.00
Abril	Después	93	193	7	2	12 400.00
Mayo	Después	94	195	6	2	12 200.00
Junio	Después	94	197	6	2	12 000.00

En la Excavadora E-02 también se evidencia una mejora de los indicadores de mantenimiento luego de la implementación del sistema de lubricación automática. La disponibilidad mecánica aumentó de 84 % a 94 %, el MTBF se incrementó de aproximadamente 118 horas a 195 horas, el MTTR disminuyó de 11 a 6 horas, las fallas relacionadas con la lubricación se redujeron de 7 a 2, y los costos de mantenimiento descendieron de aproximadamente S/ 18 500.00 a S/ 12 200.00.

TABLA III
CONSOLIDADO DE LAS OBSERVACIONES DE AMBAS EXCAVADORAS

Indicador	Promedio Antes	Promedio Después
Disponibilidad mecánica (%)	84,5	93,5
MTBF (h)	119	192,5
MTTR (h)	11,5	6,5
Fallas por lubricación	6,5	2,0
Costos de mantenimiento (S/.)	18 250.00	12 250.00

El consolidado de ambas excavadoras muestra que la implementación del sistema de lubricación automática produjo mejoras en todos los indicadores evaluados. La disponibilidad mecánica y el MTBF aumentaron, mientras que el MTTR, las fallas por lubricación y los costos de mantenimiento disminuyeron. Estos resultados evidencian una mejora en la confiabilidad operativa y en la eficiencia de la gestión del mantenimiento.

TABLA IV
OBSERVACIONES DE LOS INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Excavadora	Evaluación	Disponibilidad (%)	MTBF (h)	MTTR (h)	Fallas por lubricación	Costo de mantenimiento (S/.)
E-01	Antes	85	120	12	6	18 000.00
E-01	Después	93	190	7	2	12 500.00
E-02	Antes	84	118	11	7	18 500.00
E-02	Después	94	195	6	2	12 000.00

Los valores registrados para los indicadores de mantenimiento de las dos excavadoras antes y después de la implementación del sistema de lubricación automática. Se observa que ambas excavadoras incrementaron su disponibilidad mecánica y el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), mientras que el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), el número de fallas relacionadas con la lubricación y los costos de mantenimiento disminuyeron después de la intervención. Estos resultados evidencian un comportamiento favorable de los equipos tras la automatización del sistema de lubricación, indicando una mejora en su desempeño operativo.

TABLA V
PROMEDIO DE LOS INDICADORES ANTES Y DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN

Indicador	Antes	Después	Variación
Disponibilidad mecánica (%)	84,5	93,5	+9,0
MTBF (h)	119	192,5	+73,5
MTTR (h)	11,5	6,5	-5,0
Fallas por lubricación	6,5	2,0	-4,5
Costos de mantenimiento (S/.)	18 250.00	12 250.00	-6 000.00

El promedio de los indicadores evaluados antes y después de la implementación del sistema de lubricación automática. Se observa que la disponibilidad mecánica aumentó de 84,5 % a 93,5 %, mientras que el MTBF se incrementó de 119 horas a 192,5 horas, reflejando una mayor continuidad operativa y confiabilidad de las excavadoras. Asimismo, el MTTR disminuyó de 11,5 horas a 6,5 horas, lo que indica una reducción en el tiempo requerido para efectuar las reparaciones. De igual manera, el número de fallas por lubricación y los costos de mantenimiento presentaron una disminución significativa, lo que evidencia una mejora en la eficiencia del proceso de mantenimiento.

TABLA VI
PORCENTAJE DE MEJORA

Indicador	Mejora (%)
Disponibilidad mecánica	**10,65 %**
MTBF	**61,76 %**
MTTR	**43,48 %**
Fallas por lubricación	**69,23 %**
Costos de mantenimiento	**32,88 %**

El porcentaje de mejora alcanzado en cada uno de los indicadores evaluados. Se aprecia que el mayor incremento corresponde al MTBF, con una mejora del 61,76 %, lo que demuestra un aumento considerable en el tiempo de operación entre fallas. Asimismo, las fallas relacionadas con la lubricación disminuyeron en 69,23 %, mientras que el MTTR se redujo en 43,48 %, evidenciando una mayor mantenibilidad de los equipos. Por otro lado, la disponibilidad mecánica se incrementó en 10,65 %, alcanzando valores superiores al 93 %, y los costos de mantenimiento disminuyeron en 32,88 %, lo que representa un ahorro importante para la empresa. En conjunto, estos resultados muestran que la implementación del sistema de lubricación automática tuvo un impacto positivo en los principales indicadores de gestión del mantenimiento y en la confiabilidad operativa de las excavadoras.

III.RESULTADOS

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar el sistema de lubricación mediante automatización para incrementar la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción S.A.C. Para ello, se evaluaron los indicadores de mantenimiento antes y después de la implementación del sistema de lubricación automática en dos excavadoras hidráulicas.

Los resultados obtenidos muestran una mejora en todos los indicadores analizados, evidenciando el efecto positivo de la automatización sobre la gestión del mantenimiento.

La Tabla 3 presenta las observaciones de los indicadores de mantenimiento de la Excavadora E-01. Después de la implementación del sistema de lubricación automática, la disponibilidad mecánica aumentó de un promedio de 85 % a 93 %, mientras que el MTBF se incrementó de aproximadamente 120 horas a 190 horas. Asimismo, el MTTR disminuyó de 11 horas a 7 horas, las fallas relacionadas con la lubricación se redujeron de 6 a 2 y los costos de mantenimiento disminuyeron de aproximadamente S/ 18 000 a S/ 12 500.

De manera similar, la Tabla 4 muestra el comportamiento de la Excavadora E-02. En este equipo la disponibilidad mecánica aumentó de 84 % a 94 %, el MTBF pasó de 118 horas a 195 horas, el MTTR disminuyó de 11 horas a 6 horas, las fallas por lubricación se redujeron de 7 a 2 y los costos de mantenimiento descendieron de S/ 18 500 a S/ 12 200.

El análisis consolidado de ambas excavadoras (Tabla 5) evidencia que la disponibilidad mecánica promedio aumentó de 84,5 % a 93,5 %, mientras que el MTBF se incrementó de 119 horas a 192,5 horas. Por su parte, el MTTR disminuyó de 11,5 horas a 6,5 horas, el número promedio de fallas relacionadas con la lubricación pasó de 6,5 a 2 fallas, y los costos promedio de mantenimiento disminuyeron de S/ 18 250 a S/ 12 250.

Asimismo, el porcentaje de mejora obtenido muestra un incremento de 10,65 % en la disponibilidad mecánica y de 61,76 % en el MTBF. Del mismo modo, el MTTR se redujo en 43,48 %, las fallas relacionadas con la lubricación disminuyeron en 69,23 % y los costos de mantenimiento presentaron una reducción de 32,88 %.

Estos resultados permiten evidenciar que la implementación del sistema de lubricación automática contribuye significativamente a mejorar la confiabilidad operativa de las excavadoras, incrementando su disponibilidad y reduciendo las fallas y los costos asociados al mantenimiento.

IV.DISCUSION

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación del sistema de lubricación automática mejoró la confiabilidad operativa de las excavadoras evaluadas, cumpliéndose el objetivo general de la investigación. El incremento de la disponibilidad mecánica, el aumento del MTBF y la disminución del MTTR, de las fallas por lubricación y de los costos de mantenimiento evidencian que la automatización constituye una estrategia efectiva para optimizar la gestión del mantenimiento en maquinaria pesada.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Nevzorov et al. (2024), quienes concluyen que los sistemas automáticos de lubricación centralizada incrementan la confiabilidad de las excavadoras mineras al garantizar un suministro continuo y uniforme del lubricante hacia los componentes críticos, reduciendo el desgaste prematuro y las fallas mecánicas. En la presente investigación también se observó una disminución importante de las fallas relacionadas con la lubricación, lo que permitió incrementar el tiempo de operación entre fallas y mejorar la disponibilidad de los equipos.

De igual manera, los resultados son consistentes con la investigación desarrollada por Quispe (2022), quien evidenció que la aplicación de estrategias de mantenimiento orientadas a la confiabilidad permite mejorar la disponibilidad mecánica y optimizar el desempeño de las excavadoras hidráulicas. En el presente estudio, la disponibilidad mecánica aumentó de 84,5 % a 93,5 %, demostrando que una adecuada gestión del sistema de lubricación tiene un impacto directo en la continuidad operacional.

Asimismo, los resultados concuerdan con el modelo propuesto por la Pontificia Universidad Católica del Perú (2023), donde se señala que la incorporación de herramientas de gestión del mantenimiento reduce los tiempos de parada y mejora la eficiencia operacional de la maquinaria pesada. En este trabajo, la reducción del MTTR y de los costos de mantenimiento confirma que la automatización disminuye la necesidad de intervenciones correctivas y optimiza el uso de los recursos destinados al mantenimiento.

Desde el punto de vista técnico, los resultados también respaldan los fundamentos planteados por Moubray (1997) sobre el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), al demostrar que la aplicación de estrategias preventivas y proactivas permite incrementar la confiabilidad de los activos mediante la reducción de las causas que originan las fallas funcionales. Del mismo modo, los criterios técnicos de SKF (2020) respecto al uso de sistemas de lubricación automática se reflejan en la disminución del desgaste de los componentes y en el incremento del MTBF observado en las excavadoras evaluadas.

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis general de la investigación, al evidenciar que la optimización del sistema de lubricación mediante automatización incrementa la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción S.A.C, mejorando los principales indicadores de gestión del mantenimiento.

V. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la implementación del sistema de lubricación automática optimizó la gestión del mantenimiento e incrementó la confiabilidad operativa de las excavadoras de Ángeles Minería y Construcción S.A.C., evidenciado por el aumento de la disponibilidad mecánica y del MTBF, así como por la reducción del MTTR, las fallas relacionadas con la lubricación y los costos de mantenimiento.
2. Se comprobó que la automatización del sistema de lubricación incrementó la disponibilidad mecánica promedio de 84,5 % a 93,5 %, lo que representa una mejora del 10,65 %, favoreciendo una mayor continuidad operativa de los equipos.
3. Se evidenció que el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) aumentó de 119 horas a 192,5 horas, mientras que el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) disminuyó de 11,5 horas a 6,5 horas, demostrando una mejora en la confiabilidad y mantenibilidad de las excavadoras.
4. La implementación del sistema de lubricación automática permitió reducir las fallas relacionadas con la lubricación en 69,23 % y disminuir los costos de mantenimiento en 32,88 %, generando un uso más eficiente de los recursos destinados al mantenimiento y contribuyendo a la rentabilidad de la empresa.
5. Los resultados obtenidos permitieron aceptar la hipótesis general y las hipótesis específicas de la investigación, al comprobar que la automatización del sistema de lubricación constituye una estrategia efectiva para incrementar la confiabilidad operativa y fortalecer la gestión del mantenimiento en excavadoras utilizadas en operaciones de movimiento de tierras y servicios mineros.

REFERENCIAS

[1] Nevzorov, V. et al. (2024). Influence of Automatic Centralized Lubrication Systems Readiness on the Reliability of Mining Excavators.

[2] Quispe, R. (2022). Aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad para optimizar la disponibilidad de excavadoras hidráulicas. Universidad Nacional del Altiplano.

[3] Pontificia Universidad Católica del Perú. (2023). Modelo de gestión de mantenimiento para maquinaria pesada en proyectos de movimiento de tierras. Repositorio PUCP.

[4] Mang, T., & Dresel, W. (2017). Lubricants and Lubrication (3rd ed.). Wiley-VCH.

[5] SKF. (2020). SKF Rolling Bearings Catalogue. SKF Group.

[6] SKF. (2020). SKF Rolling Bearings Catalogue. SKF Group.

[7] (2020). SKF Lincoln Automatic Lubrication Systems Catalogue. SKF Group.

[8] Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance (2nd ed.). Industrial Press.

[9] Moubray, J. (1997). Reliability - Centered Maintenance (2nd ed.). Industrial Press.