



**Universidad  
Católica de  
Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales  
Escuela Profesional de Ingeniería Industrial**

**Diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de  
criticidad para mejorar la disponibilidad operativa de las chancadoras  
móviles en una empresa minera en Apurímac, 2025**

Tesis presentada por:

**Florez Condori, Anthony Arturo**

**ORCID: 0009-0006-3672-9532**

para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Asesora:

**Mag. Rivera Chávez, María Eugenia**

**ORCID: 0000-0003-1589-0272**

Arequipa – Perú

2026

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

**INGENIERIA INDUSTRIAL**

**TITULACIÓN CON TESIS**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR**

Arequipa, 07 de Agosto del 2026

**Dictamen: 016575-C-EPII-2026**

Visto el borrador del expediente 016575, presentado por:

**2016801461 - FLOREZ CONDORI ANTHONY ARTURO**

Titulado:

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE CRITICIDAD  
PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD OPERATIVA DE LAS CHANCADORAS MÓVILES EN UNA  
EMPRESA MINERA EN APURÍMAC, 2025**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**29267647 - VALENCIA BECERRA ROLARDI MARIO  
DICTAMINADOR**



**32770023 - DEZA LOYAGA WALTER FRANCISCO  
DICTAMINADOR**



**40888822 - PILCO CHAMBILLA FREDDY WILBER  
DICTAMINADOR**



# DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA MEJORAR LA DISPONIBILIDAD OPERATIVA DE LAS CHANCADORAS MÓVILES EN UNA EMPRESA MINERA EN APURÍMAC, 2025

## INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

|    |                                                                                                           |     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | <a href="https://repositorio.ucsm.edu.pe">repositorio.ucsm.edu.pe</a><br>Fuente de Internet               | 2%  |
| 2  | Submitted to Universidad Católica de Santa María<br>Trabajo del estudiante                                | 1%  |
| 3  | <a href="https://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a><br>Fuente de Internet | 1%  |
| 4  | Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC<br>Trabajo del estudiante          | 1%  |
| 5  | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                                 | 1%  |
| 6  | <a href="https://repositorio.upt.edu.pe">repositorio.upt.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                 | <1% |
| 7  | <a href="https://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a><br>Fuente de Internet               | <1% |
| 8  | <a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                 | <1% |
| 9  | Submitted to Universidad Tecnológica del Perú<br>Trabajo del estudiante                                   | <1% |
| 10 | <a href="https://repositorio.upn.edu.pe">repositorio.upn.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                 | <1% |
| 11 | <a href="https://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a><br>Fuente de Internet                         | <1% |
| 12 | Submitted to Universidad Politécnica del Perú<br>Trabajo del estudiante                                   | <1% |
| 13 | <a href="https://alicia.concytec.gob.pe">alicia.concytec.gob.pe</a><br>Fuente de Internet                 | <1% |
| 14 | <a href="https://repositorio.usm.cl">repositorio.usm.cl</a><br>Fuente de Internet                         | <1% |

## **DEDICATORIA**

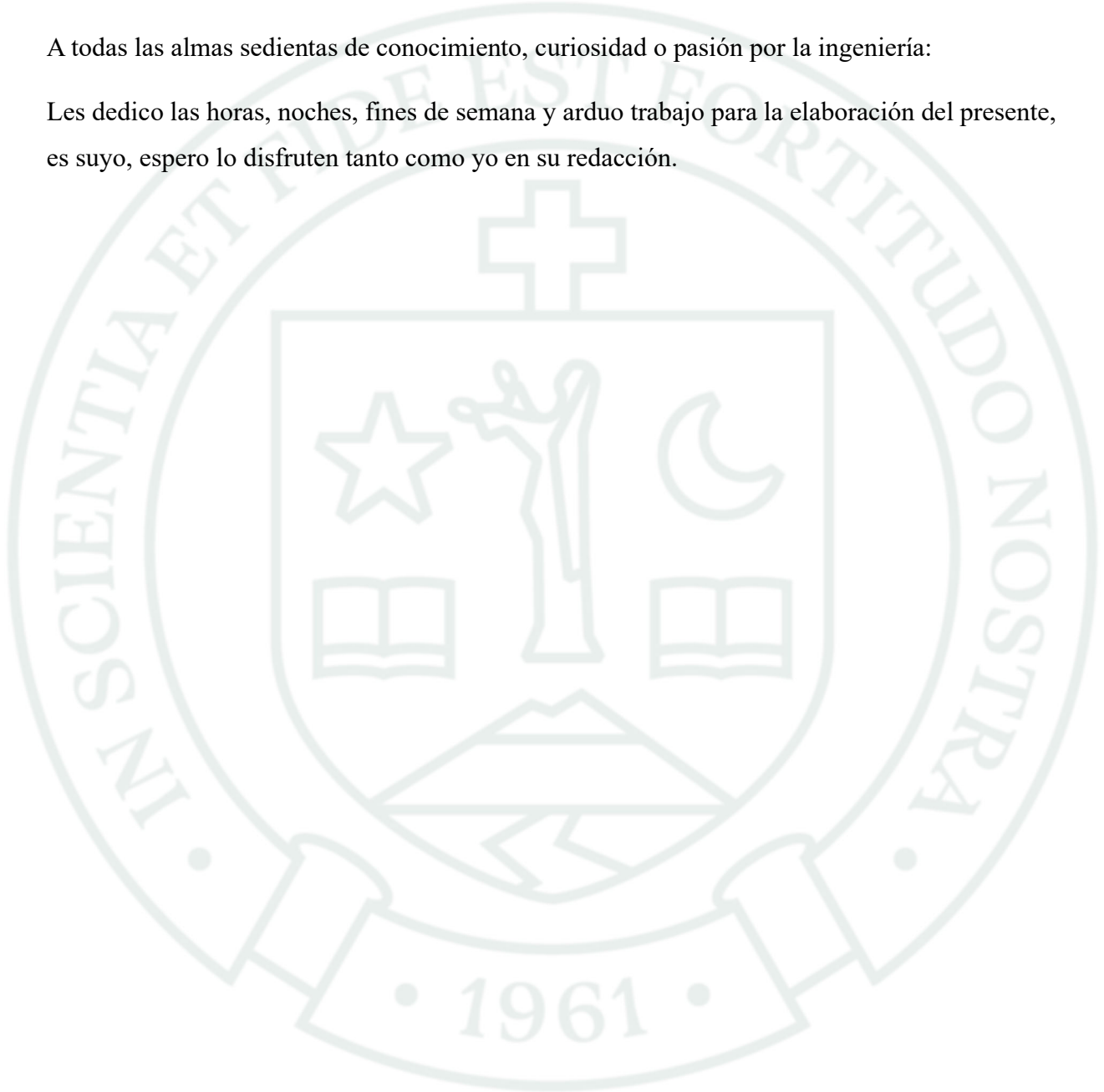
A mi mamá Betty, siempre serás la luz en mi vida.

A cada mentor que me ha guiado, enseñado y tenido paciencia.

A mi familia, que con su amor incondicional son el motivo de lo que fui, soy y seré.

A todas las almas sedientas de conocimiento, curiosidad o pasión por la ingeniería:

Les dedico las horas, noches, fines de semana y arduo trabajo para la elaboración del presente, es suyo, espero lo disfruten tanto como yo en su redacción.



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme tantas gracias y oportunidades en esta vida, no pude haber pedido más. Gracias a la vida, a mi madre y familia por la comprensión del tiempo que no pude dedicarles cuando elaboraba este material. A cada persona que pude conocer pues sembró algo en mí y es parte de lo que soy hasta ahora. A cada uno de mis docentes por la pasión, abnegación y predisposición por enseñar algo más que conocimientos teóricos. A las inmensurables posibilidades asertivas de que me puedas leer ahora y me permitan compartir contigo, un poco de mí.



## RESUMEN

El objetivo general de esta investigación fue proponer un plan de mantenimiento preventivo sustentado en matrices de análisis de criticidad para elevar la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles en una empresa minera de la región Apurímac correspondiente al año 2026. En la investigación se utilizó una metodología de enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, de método descriptivo y un diseño no experimental de tipo transversal. La muestra estuvo conformada por trece chancadoras móviles que calificaron como críticas de las cuales los datos fueron levantados a partir de registros SAP, hojas de mantenimiento y observación directa. Se utilizaron herramientas de ingeniería como ser el Análisis de Criticidad (ACR), MTBF/MTTR, diagramas de Pareto e Ishikawa, así como un análisis de correlación y regresión múltiple con apoyo del software SPSS v27. Los resultados esperados mostraron que el 61.5 % de los equipos afecta en estado de alta criticidad, se proyecta una disponibilidad operativa en un incremento del 18 %, se estima un incremento en el MTBF del 20 % y una reducción en el MTTR en comparación del 25 %. En el análisis económico, el comportamiento esperado del sistema en el escenario de la aplicación del plan propuesto mostró un VAN positivo calculado de 243,920 USD, una TIR de 26.8 % y un ROI de 282 %, logrando apuntar hacia la viabilidad técnica, operativa y financiera prevista. Se determina que la aplicación teórica del plan propuesto optimiza los recursos, disminuye los tiempos de parada del proceso de chancado móvil y potencia el dominio del mantenimiento, así como a proyectar el proveer de mayor confiabilidad y continuidad operativa del proceso de chancado móvil.

**Palabras clave:** Mantenimiento preventivo, Análisis de criticidad, Disponibilidad operativa.

## ABSTRACT

The overall objective of this research was to propose a preventive maintenance plan based on criticality analysis matrices to increase the operational availability of mobile crushers at a mining company in the Apurímac region by the year 2026. The research employed a quantitative, applied methodology using a descriptive approach and a non-experimental, cross-sectional design. The sample consisted of thirteen mobile crushers classified as critical, for which data were collected from SAP records, maintenance logs, and direct observation. Engineering tools such as Criticality Analysis (ACR), MTBF/MTTR, Pareto and Ishikawa diagrams were used, as well as correlation and multiple regression analyses supported by SPSS v27 software. The expected results showed that 61.5% of the equipment is in a highly critical state; operational availability is projected to increase by 18%; MTBF is estimated to increase by 20%; and MTTR is projected to decrease by 25%. In the economic analysis, the expected performance of the system under the scenario of implementing the proposed plan showed a positive NPV of 243,920 USD, an IRR of 26.8%, and an ROI of 282%, pointing toward the anticipated technical, operational, and financial viability. It is determined that the theoretical implementation of the proposed plan optimizes resources, reduces downtime in the mobile crushing process, and enhances maintenance control, as well as projecting greater reliability and operational continuity for the mobile crushing process.

**Keywords:** Preventive maintenance, Criticality analysis, Operational availability.

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN .....                                   | 1  |
| CAPITULO I.....                                      | 3  |
| 1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO.....                        | 4  |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                | 4  |
| 1.1.1. Formulación del Problema .....                | 9  |
| 1.1.2. Sistematización del problema.....             | 9  |
| 1.2. Objetivos de la investigación .....             | 10 |
| 1.2.1. Objetivo General .....                        | 10 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos.....                    | 10 |
| 1.3. Justificación e importancia del estudio .....   | 10 |
| 1.3.1. Justificación teórica.....                    | 10 |
| 1.3.2. Justificación práctica .....                  | 11 |
| 1.3.3. Justificación metodológica.....               | 11 |
| 1.3.4. Justificación profesional.....                | 11 |
| 1.3.5. Justificación personal .....                  | 12 |
| 1.3.6. Justificación social .....                    | 12 |
| 1.3.7. Justificación económica y organizacional..... | 12 |
| 1.3.8. Importancia de la investigación.....          | 12 |
| 1.4. Delimitaciones.....                             | 13 |
| 1.4.1. Delimitación temática.....                    | 13 |
| 1.4.2. Delimitación espacial .....                   | 13 |
| 1.4.3. Delimitación temporal.....                    | 14 |
| 1.5. Viabilidad del proyecto .....                   | 14 |
| 1.6. Hipótesis.....                                  | 14 |
| 1.6.1. Hipótesis General .....                       | 14 |
| 1.6.2. Hipótesis Específicas.....                    | 14 |
| 1.7. Variables e indicadores .....                   | 15 |
| 1.7.1. Variables.....                                | 15 |
| 1.7.2. Operacionalización de variables.....          | 16 |

|                    |                                                                                  |    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8.               | Marco Metodológico .....                                                         | 18 |
| 1.8.1.             | Diseño de la investigación.....                                                  | 18 |
| 1.8.2.             | Tipo de investigación .....                                                      | 18 |
| 1.8.3.             | Nivel de la Investigación.....                                                   | 18 |
| 1.8.4.             | Método de investigación .....                                                    | 18 |
| 1.8.5.             | Tecnicas de investigación.....                                                   | 18 |
| 1.8.6.             | Instrumentos de investigación.....                                               | 19 |
| 1.8.7.             | Población.....                                                                   | 19 |
| 1.8.8.             | Muestra.....                                                                     | 19 |
| 1.8.9.             | Análisis de datos.....                                                           | 19 |
| 1.8.10.            | Metodología de desarrollo según los objetivos específicos .....                  | 20 |
| CAPITULO II .....  |                                                                                  | 22 |
| 2.                 | MARCO TEÓRICO.....                                                               | 23 |
| 2.1.               | Antecedentes de la investigación .....                                           | 23 |
| 2.1.1.             | Antecedentes Internacional .....                                                 | 23 |
| 2.1.2.             | Antecedentes Nacional.....                                                       | 26 |
| 2.1.3.             | Antecedentes Local .....                                                         | 29 |
| 2.2.               | Marco teórico conceptual .....                                                   | 30 |
| 2.2.1.             | Plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad .....          | 30 |
| 2.2.2.             | Priorización de equipos críticos .....                                           | 30 |
| 2.2.3.             | Periodicidad del mantenimiento.....                                              | 31 |
| 2.2.4.             | Tipos de intervención preventiva .....                                           | 31 |
| 2.2.5.             | Gestión de recursos .....                                                        | 31 |
| 2.2.6.             | Disponibilidad operativa de las chancadoras móviles.....                         | 31 |
| 2.2.7.             | Tiempo medio entre fallas (MTBF) .....                                           | 32 |
| 2.2.8.             | Tiempo medio de reparación (MTTR).....                                           | 32 |
| 2.2.9.             | Porcentaje de disponibilidad operativa.....                                      | 32 |
| CAPITULO III ..... |                                                                                  | 34 |
| 3.                 | DIAGNÓSTICO SITUACIONAL.....                                                     | 35 |
| 3.1.               | Situación actual de la empresa .....                                             | 35 |
| 3.2.               | Equipos utilizados y justificación técnica de la selección.....                  | 35 |
| 3.3.               | Caracterización del proceso.....                                                 | 40 |
| 3.4.               | Evaluación de procesos involucrados (tiempos de respuesta, costos, tiempos)..... | 44 |
| 3.5.               | Identificación de los puntos de mejora.....                                      | 49 |

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO IV .....                                                                                                                                                                                                 | 54  |
| 4. PROPUESTA DE MEJORA.....                                                                                                                                                                                       | 55  |
| 4.1. Propuesta de mejora .....                                                                                                                                                                                    | 55  |
| 4.1.1. Fundamentación de la propuesta .....                                                                                                                                                                       | 55  |
| 4.1.2. Alcance y consideraciones técnicas .....                                                                                                                                                                   | 55  |
| 4.1.3. Enfoque metodológico de la propuesta .....                                                                                                                                                                 | 55  |
| 4.2. Identificación del nivel de criticidad de las chancadoras móviles mediante criterios<br>técnicos, económicos y de seguridad en la operación minera .....                                                     | 57  |
| 4.2.1. Metodología aplicada .....                                                                                                                                                                                 | 58  |
| 4.3. Análisis del comportamiento del indicador de tiempo medio entre fallas (MTBF) de las<br>chancadoras móviles críticas a partir de los registros históricos de mantenimiento de los años<br>2022 al 2024. .... | 66  |
| 4.5. Determinación del grado de incidencia de la gestión de recursos (personal, materiales y<br>tiempos) sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles. ...                         | 96  |
| 4.6. Cuantificación de las pérdidas monetarias actuales por paradas y proyectar el ahorro<br>potencial con la propuesta de mantenimiento preventivo. ....                                                         | 111 |
| 4.6.1. Metodología de evaluación económica .....                                                                                                                                                                  | 112 |
| 4.7. Resultados del análisis económico .....                                                                                                                                                                      | 113 |
| 4.8. Resultados de la aplicación del diseño propuesto .....                                                                                                                                                       | 115 |
| CAPITULO V .....                                                                                                                                                                                                  | 117 |
| 5. Viabilidad económica del proyecto .....                                                                                                                                                                        | 118 |
| 5.1. Viabilidad económica del proyecto con proyección a 10 años .....                                                                                                                                             | 118 |
| 5.2. Análisis de Sensibilidad Económico- Financiera .....                                                                                                                                                         | 122 |
| CONCLUSIONES .....                                                                                                                                                                                                | 123 |
| RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                                                                             | 124 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                                                                                                                  | 125 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1 Variables de estrategias técnicas .....                                                                               | 6   |
| Tabla 2 Matriz de Priorización.....                                                                                           | 8   |
| Tabla 3 Matriz de operacionalización de variables .....                                                                       | 16  |
| Tabla 4 Principales equipos del sistema de chancado móvil. ....                                                               | 36  |
| Tabla 5 Matriz relaciones de actividades REL.....                                                                             | 42  |
| Tabla 6 Leyenda y pesos sugeridos.....                                                                                        | 42  |
| Tabla 7 Justificación de relaciones clave .....                                                                               | 43  |
| Tabla 8 Indicadores de evaluación del sistema de mantenimiento .....                                                          | 45  |
| Tabla 9 Costo de parada por hora (USD/h).....                                                                                 | 46  |
| Tabla 10 Comparativo de costos mantenimiento correctivo vs preventivo .....                                                   | 46  |
| Tabla 11 Análisis de Valor (AV) del Sistema de Mantenimiento.....                                                             | 48  |
| Tabla 12 Análisis FODA técnico del sistema de mantenimiento de las chancadoras.....                                           | 50  |
| Tabla 13 Intervención prioritaria.....                                                                                        | 51  |
| Tabla 14 Plan de acciones preliminares metodología 5W2H.....                                                                  | 52  |
| Tabla 15 Clasificación de criticidad de las chancadoras móviles .....                                                         | 56  |
| Tabla 16 Cronograma anual de mantenimiento preventivo año 2025 .....                                                          | 57  |
| Tabla 17 Criterios y ponderaciones empleadas en el análisis de criticidad .....                                               | 58  |
| Tabla 18 Resultados del análisis de criticidad de las chancadoras móviles.....                                                | 59  |
| Tabla 19 Resumen de niveles de criticidad.....                                                                                | 59  |
| Tabla 20 Valores del indicador MTBF 2022 a octubre 2025 y fallas por equipo.....                                              | 67  |
| Tabla 21 MTTR por tipo de intervención .....                                                                                  | 91  |
| Tabla 22 Recursos asignados por equipo HH materiales y tiempo de intervención .....                                           | 98  |
| Tabla 23 Indicadores de eficiencia en gestión de recursos productividad técnica, costo preventivo, eficiencia operativa. .... | 100 |
| Tabla 24 Comparativa de resultados reales vs. benchmark del sector minero.....                                                | 102 |
| Tabla 25 Comparativa con indicadores de referencia del sector minero .....                                                    | 103 |
| Tabla 26 Pérdidas monetarias por paradas no programadas 2022 a 2025 .....                                                     | 113 |
| Tabla 27 Inversión inicial del proyecto.....                                                                                  | 118 |
| Tabla 28 Proyección de beneficios económicos 2025 a 2035.....                                                                 | 119 |
| Tabla 29 Resultados financieros del proyecto.....                                                                             | 119 |

## Índice de figuras

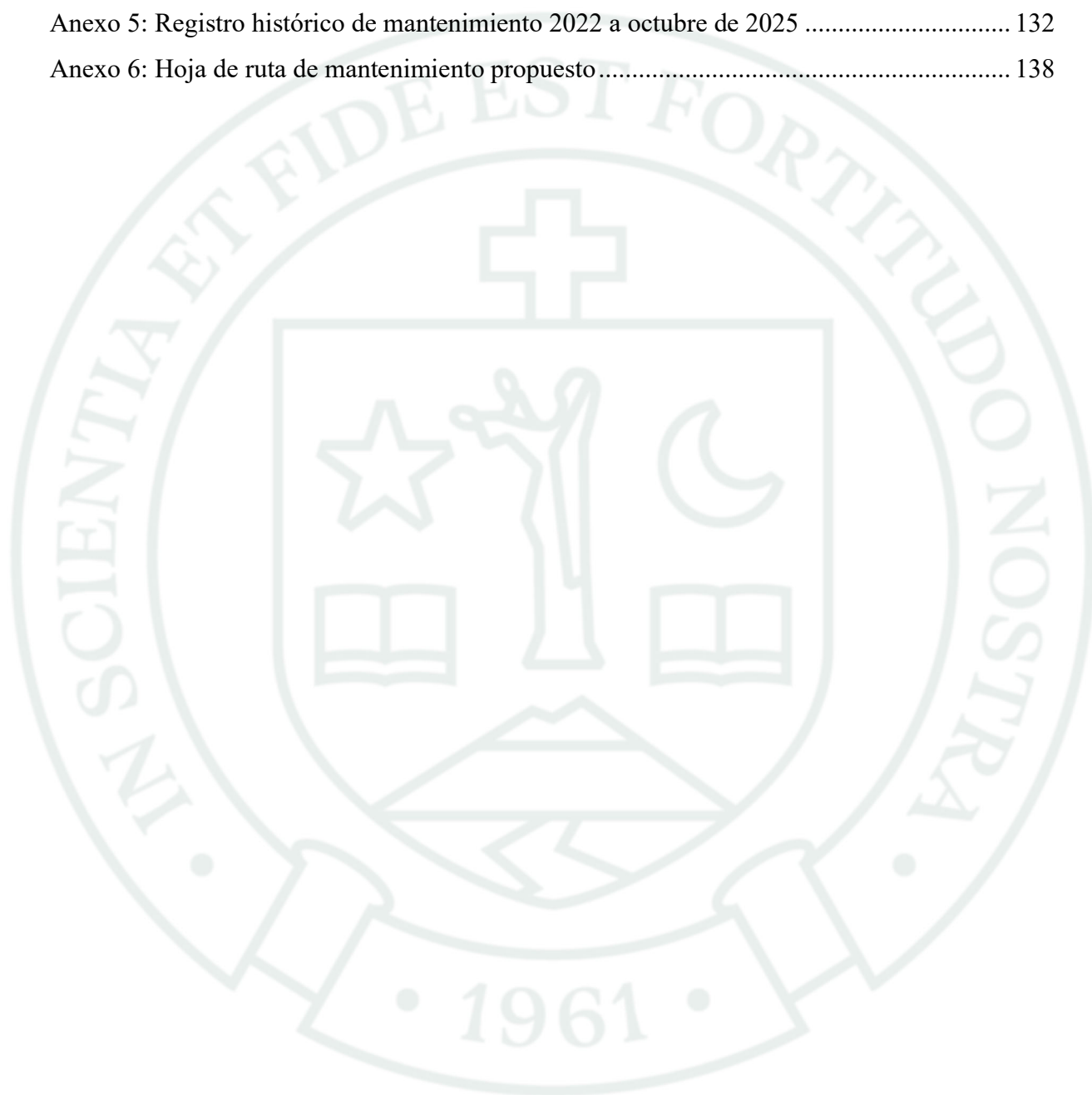
|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Diagrama de Pareto.....                                                                   | 5  |
| Figura 2 Matriz de vester influencia Vs dependencia .....                                          | 7  |
| Figura 3 Diagrama de flujo del plan.....                                                           | 33 |
| Figura 4 Diagrama Funcional del proceso de atención de fallas en chancadoras móviles .....         | 40 |
| Figura 5 Diagrama Espaguetti de mantenimiento .....                                                | 41 |
| Figura 6 Mapa de calor de interacciones entre áreas operativas .....                               | 44 |
| Figura 7 Histograma de Tiempos de Reparación (MTTR) .....                                          | 47 |
| Figura 8 Tendencia del MTBF .....                                                                  | 48 |
| Figura 9 Análisis de valor y costo vs. beneficio.....                                              | 49 |
| Figura 10 Nivel de criticidad de las chancadoras móviles. ....                                     | 60 |
| Figura 11 Distribución porcentual de los niveles de criticidad .....                               | 61 |
| Figura 12 Estadísticos descriptivos de los criterios de criticidad.....                            | 62 |
| Figura 13 Validez de la variable clasificación en el análisis de criticidad.....                   | 62 |
| Figura 14 Distribución porcentual de la variable Clasificación de criticidad. ....                 | 63 |
| Figura 15 Distribución gráfica de los niveles de criticidad de las chancadoras móviles 2025.....   | 64 |
| Figura 16 Distribución de frecuencias del nivel de criticidad.....                                 | 64 |
| Figura 17 Matriz de correlaciones de Pearson entre criterios de criticidad. ....                   | 65 |
| Figura 18 Nivel de criticidad promedio por equipo de chancado móvil 2025. ....                     | 66 |
| Figura 19 Tendencia del MTBF 2022 a octubre 2025 .....                                             | 68 |
| Figura 20 Comparativo del MTBF anual por equipo .....                                              | 69 |
| Figura 21 Relación entre número de fallas y MTBF enero a octubre 2025 .....                        | 70 |
| Figura 22 Estadísticos descriptivos del indicador MTBF de las chancadoras móviles 2022 a 2025..... | 71 |
| Figura 23 Resumen de procesamiento de casos del indicador MTBF 2022 a 2025 .....                   | 72 |
| Figura 24 Pruebas de normalidad del indicador MTBF de las chancadoras móviles 2022 a 2025 .....    | 72 |
| Figura 25 Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2022.....                           | 73 |
| Figura 26 Gráfico Q–Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2022. ....                  | 73 |
| Figura 27 Gráfico Q–Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2022. ....    | 74 |
| Figura 28 Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2022. ....                    | 75 |
| Figura 29 Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2023.....                           | 75 |
| Figura 30 Gráfico Q–Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2023. ....                  | 76 |

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31 Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2023. ....                                                   | 77 |
| Figura 32 Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2024. ....                                                         | 77 |
| Figura 33 Gráfico Q–Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2023.<br>.....                               | 78 |
| Figura 34 Gráfico Q Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2024. ....                                                 | 79 |
| Figura 35 Gráfico Q–Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2024.<br>.....                               | 79 |
| Figura 36 Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2024. ....                                                   | 80 |
| Figura 37 Histograma del indicador MTBF correspondiente al periodo enero a octubre de 2025.<br>.....                              | 81 |
| Figura 38 Gráfico Q–Q normal del indicador MTBF de Enero a Octubre de 2025.....                                                   | 81 |
| Figura 39 Histograma del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025. ....                                                            | 82 |
| Figura 40 Gráfico Q–Q normal sin tendencia del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025.<br>.....                                  | 83 |
| Figura 41 Diagrama de caja del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025.....                                                       | 83 |
| Figura 42 Prueba de Friedman para muestras relacionadas del indicador MTBF 2022 a 2025<br>.....                                   | 84 |
| Figura 43 Comparaciones por pares del indicador MTBF 2022 a 2025 mediante prueba de<br>Friedman con corrección de Bonferroni..... | 85 |
| Figura 44 Representación gráfica de las comparaciones por pares del indicador MTBF 2022 a<br>2025. ....                           | 86 |
| Figura 45 Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2022. ....                                         | 87 |
| Figura 46 Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2023. ....                                         | 88 |
| Figura 47 Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2024. ....                                         | 89 |
| Figura 48 Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al periodo enero a<br>octubre 2025. ....                  | 90 |
| Figura 49 MTTR por tipo de intervención. ....                                                                                     | 91 |
| Figura 50 Distribución del MTTR. ....                                                                                             | 92 |
| Figura 51 Resumen de procesamiento de casos según tipo de intervención y variables de<br>mantenimiento. ....                      | 93 |
| Figura 52 Estadísticos descriptivos del MTTR, tiempo total de reparación y número de fallas<br>por tipo de intervención.....      | 94 |
| Figura 53 Media del tiempo medio de reparación (MTTR) por tipo de intervención.....                                               | 95 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 54 Resumen de procesamiento de casos según el tiempo total de intervención por tipo de mantenimiento .....    | 95  |
| Figura 55 Barras comparativas de recursos empleados por equipo. ....                                                 | 99  |
| Figura 56 Diagrama de dispersión entre recursos y disponibilidad (%). ....                                           | 101 |
| Figura 57 Comparación entre indicadores reales y valores de referencia ISO 14224. ....                               | 104 |
| Figura 58 Estadísticos descriptivos de las variables de gestión de recursos y eficiencia operativa. ....             | 105 |
| Figura 59 Resumen de procesamiento de casos de gestión de recursos y eficiencia operativa. ....                      | 106 |
| Figura 60 Resumen del modelo de regresión múltiple.....                                                              | 106 |
| Figura 61 Análisis de varianza ANOVA del modelo de regresión múltiple.....                                           | 107 |
| Figura 62 Coeficientes del modelo de regresión múltiple.....                                                         | 108 |
| Figura 63 Diagrama de dispersión entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados. ....                      | 109 |
| Figura 64 Resumen del modelo de regresión simple entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados. ....      | 109 |
| Figura 65 ANOVA del modelo de regresión simple entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados. ....        | 110 |
| Figura 66 Coeficientes del modelo de regresión lineal entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados. .... | 111 |
| Figura 67 Pérdidas monetarias por paradas 2022 a 2025 .....                                                          | 114 |
| Figura 68 Flujo neto anual del proyecto USD.....                                                                     | 120 |
| Figura 69 Evolución del VAN acumulado 2025 a 2035 .....                                                              | 121 |

## Índice de Anexos

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 1: Diagnóstico pretest de la situación actual de las chancadoras móviles.....         | 128 |
| Anexo 2: Resultados proyectados de mantenimiento preventivo con análisis de criticidad. 129 |     |
| Anexo 3: Gráfica comparativa del escenario Pretest vs Postest.....                          | 130 |
| Anexo 4: Indicadores MTBF y MTTR de las chancadoras móviles (promedio anual) .....          | 131 |
| Anexo 5: Registro histórico de mantenimiento 2022 a octubre de 2025 .....                   | 132 |
| Anexo 6: Hoja de ruta de mantenimiento propuesto.....                                       | 138 |



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la minería enfrenta el desafío constante de optimizar la confiabilidad y disponibilidad de sus equipos críticos, factores que determinan la productividad y sostenibilidad de las operaciones. Dentro de este contexto, las chancadoras móviles desempeñan un papel esencial en el proceso de chancado primario, ya que permiten reducir el tamaño del mineral extraído para su posterior procesamiento y transporte. Sin embargo, la ausencia de planes preventivos estructurados y el predominio del mantenimiento correctivo generan pérdidas operativas, sobrecostos logísticos y menor eficiencia global en la cadena de valor.

En el caso de la empresa minera, ubicada en la región Apurímac, se ha evidenciado una disminución sostenida en la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles durante el periodo 2022 a 2024, atribuida principalmente a deficiencias en la planificación del mantenimiento, escasa sistematización de registros y falta de priorización técnica de activos críticos. Estos problemas se traducen en tiempos prolongados de reparación MTTR, incremento de fallas repetitivas y sobreutilización de recursos técnicos y económicos.

Ante esta situación, se hace necesario diseñar un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad, que permita jerarquizar los equipos de acuerdo con su impacto operativo, económico y de seguridad, optimizando la asignación de recursos y reduciendo el riesgo de paradas no programadas. Este enfoque, sustentado en la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), busca establecer un sistema estructurado, medible y replicable para mejorar la gestión de activos físicos en entornos mineros de alta exigencia.

Desde la perspectiva académica y profesional, esta investigación contribuye al campo de la Ingeniería Industrial, al integrar conceptos de confiabilidad operacional, análisis de riesgos y gestión de mantenimiento dentro de un modelo técnico de aplicación práctica. Asimismo, proporciona evidencia empírica sobre el impacto de los planes preventivos en los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad, reforzando la importancia de las estrategias basadas en datos y análisis de criticidad para la toma de decisiones en mantenimiento.

El trabajo se estructura de la siguiente manera en el Capítulo I se presenta el planteamiento teórico, los antecedentes de la organización, la formulación del problema, los objetivos, justificación y delimitaciones del estudio.

En el Capítulo II se desarrolla el marco de referencia teórico y conceptual, que sustenta las variables de investigación. En el Capítulo III se detalla la metodología aplicada, el diseño de investigación, población, muestra e instrumentos utilizados. El Capítulo IV comprende el diagnóstico de la situación actual, aplicando herramientas de ingeniería industrial para identificar causas, efectos y puntos de mejora.

Finalmente, en el Capítulo V se expone la propuesta de diseño del plan de mantenimiento preventivo basado en criticidad, con la correspondiente evaluación técnica, económica y de viabilidad.





# **1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO**

## **1.1. Planteamiento del problema**

### **1.1.1. Descripción del Problema**

En el escenario global, la minería representa una de las industrias con mayor dependencia de activos físicos de alta criticidad. La disponibilidad de los equipos móviles de chancado es un componente clave para sostener la continuidad operacional y la eficiencia en la cadena de valor (Grand, 2025). Sin embargo, según reportes del World Economic Forum (2022), más del 40% de las paradas no programadas en plantas extractivas están asociadas a fallas evitables por una gestión inadecuada del mantenimiento, lo cual repercute en pérdidas millonarias, sobrecostos logísticos y riesgos operacionales.

En América Latina, región altamente minera, esta situación se acentúa por la obsolescencia tecnológica, el bajo nivel de digitalización en mantenimiento y la escasa cultura de prevención (Pari Barrera, 2023). Estudios regionales (CEPAL, 2023) destacan que el 55% de las empresas mineras aún prioriza mantenimientos correctivos o reactivos frente a esquemas planificados, afectando indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y la disponibilidad operativa. Asimismo, las dificultades en la asignación eficiente de recursos y la falta de planes de criticidad estructurados limitan la capacidad de respuesta frente a contingencias técnicas.

En el contexto peruano, pese a ser uno de los principales productores de cobre a nivel mundial, la industria minera enfrenta un gran reto en su transición hacia modelos de mantenimiento inteligente (Dávalos Manrique, 2021).

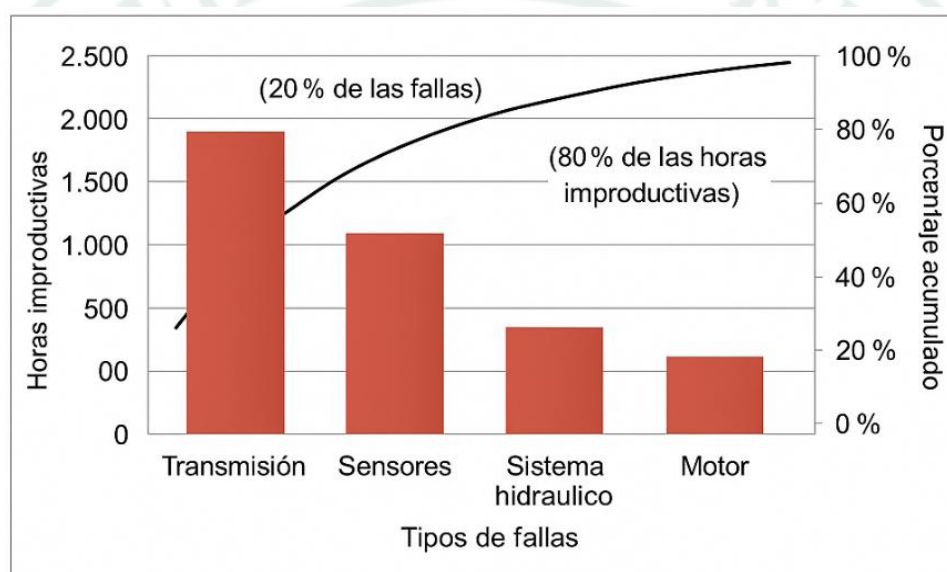
Según Perez (2023), los equipos móviles, como las chancadoras, presentan un promedio de disponibilidad inferior al 85% en varias operaciones, debido a una gestión poco sistematizada de las prioridades de intervención, escasa utilización del análisis de criticidad y brechas en la formación del personal técnico. Esta situación se vuelve más crítica en zonas geográficas de difícil acceso como Apurímac, donde las condiciones topográficas y climáticas imponen mayores exigencias técnicas al sistema de mantenimiento.

En particular, en la empresa minera, ubicada en la región de Apurímac, se ha evidenciado un patrón sostenido de baja disponibilidad operativa en sus 13 chancadoras móviles. A partir de un análisis documental entre los años 2022 y 2024, se identificaron elevadas tasas de fallas reiterativas, demoras en la programación de mantenimientos, y una alta variabilidad en los tiempos medios de reparación (MTTR). Mediante la estratificación por áreas, se identificó que las fallas más recurrentes provienen de los sistemas de transmisión, motores hidráulicos y sensores de control de carga.

Al aplicar un Diagrama de Pareto, se comprobó que el 20% de las fallas más críticas (relacionadas con el sistema de transmisión y sensores) explican más del 80% de las horas improductivas acumuladas. Este hallazgo orientó la necesidad de jerarquizar intervenciones mediante un análisis de criticidad más riguroso, lo que aún no ha sido sistemáticamente implementado.

**Figura 1**

*Diagrama de Pareto*



*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 1***Variables de estrategias técnicas*

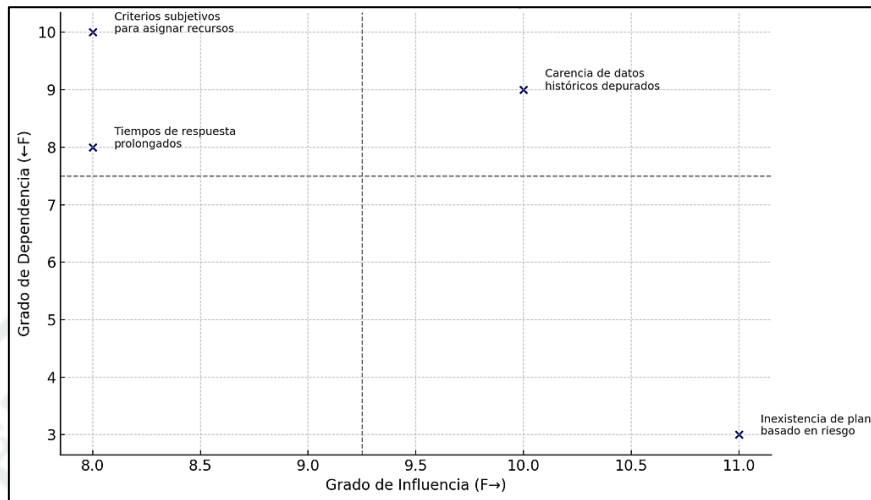
| N.º | TIPO DE FALLA                   | HORAS IMPRODUCTIVAS | % INDIVIDUAL | % ACUMULADO | CLASIFICACIÓN ABC |
|-----|---------------------------------|---------------------|--------------|-------------|-------------------|
| 1   | Falla en sistema de transmisión | 380                 | 43.7 %       | 43.7 %      | A                 |
| 2   | Falla en sensores de control    | 310                 | 35.7 %       | 79.4 %      | A                 |
| 3   | Obstrucción en tolvas           | 75                  | 8.6 %        | 88.0 %      | B                 |
| 4   | Problemas de lubricación        | 55                  | 6.3 %        | 94.3 %      | B                 |
| 5   | Desalineación de poleas         | 40                  | 4.6 %        | 98.9 %      | C                 |
| 6   | Vibraciones anómalas            | 10                  | 1.1 %        | 100 %       | C                 |
|     | Total                           | 870                 | 100 %        |             |                   |

*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 1 se determinaron los factores más influyentes en la baja disponibilidad: 1) inexistencia de un plan de mantenimiento basado en niveles de riesgo, 2) tiempos de respuesta prolongados ante fallas, 3) uso de criterios subjetivos para asignar recursos y 4) carencia de datos históricos depurados. Todos estos factores actúan como variables causales que deben abordarse con estrategias técnicas estructuradas.

**Figura 2**

*Matriz de Vester influencia vs dependencia*



*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 2 mediante una Matriz de Priorización, se estableció que la implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad tiene alta viabilidad técnica y alto impacto en la mejora de la disponibilidad operativa, posicionándose como la acción más costo efectiva para atacar el problema identificado. Esta priorización consideró criterios como el tiempo de implementación, disponibilidad de personal calificado, impacto en los indicadores de gestión y alineación con los objetivos estratégicos de la empresa.

**Tabla 2***Matriz de Priorización*

| Factores                                             | 1.Inexistencia de plan basado en niveles de riesgo | 2.Tiempos de respuesta prolongados | 3.Criterios subjetivos para asignar recursos | 4.Carencia de datos históricos depurados | Total influencia (F→) | Total dependencia (←F) |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. Inexistencia de plan basado en niveles de riesgo  |                                                    | 4                                  | 4                                            | 3                                        | 11                    | 3                      |
| 2. Tiempos de respuesta prolongados ante fallas      | 3                                                  |                                    | 2                                            | 3                                        | 8                     | 8                      |
| 3. Uso de criterios subjetivos para asignar recursos | 2                                                  | 2                                  |                                              | 4                                        | 8                     | 10                     |
| 4. Carencia de datos históricos depurados            | 3                                                  | 3                                  | 4                                            |                                          | 10                    | 9                      |

*Nota.* Elaboración propia.

En relación Tabla 2 con el comportamiento histórico de los indicadores de mantenimiento, los registros SAP de los años 2022 a 2024 evidencian valores desfavorables que explican la baja disponibilidad operativa de las chancadoras móviles. El MTBF promedio de la flota se encuentra entre 165 y 240 horas, con equipos que registran incluso menos de 150 horas entre fallas, lo cual refleja una alta frecuencia de interrupciones. Del mismo modo, el MTTR actual presenta valores elevados, con tiempos medios de reparación que oscilan entre 4.5 y 6 horas por evento, afectando directamente la mantenibilidad del sistema y generando cuellos de botella operativos.

Como consecuencia de la combinación de un MTBF reducido y un MTTR elevado, la disponibilidad operativa promedio de las chancadoras móviles se sitúa alrededor del 82 %, por debajo del valor de referencia para operaciones mineras de alta criticidad ( $\geq 90$  %). Esta condición compromete la continuidad productiva y confirma la necesidad de un plan preventivo basado en análisis de criticidad que permita priorizar y optimizar las intervenciones de mantenimiento.

En suma, el problema central radica en la ausencia de un sistema formal de mantenimiento preventivo que integre el análisis de criticidad como herramienta para anticipar, planificar y priorizar intervenciones. Esta carencia técnica repercute directamente en la baja disponibilidad operativa de las chancadoras móviles, afectando la eficiencia global del proceso minero. De ahí que resulte imprescindible diseñar una propuesta metodológica que, sin requerir implementación inmediata, justifique técnica y analíticamente las mejoras posibles en los indicadores de confiabilidad, productividad y uso óptimo de recursos.

### **1.1.2. Formulación del Problema**

¿De qué manera el diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad influye en la mejora la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles en una empresa minera en Apurímac, 2026?

### **1.1.3. Sistematización del problema**

1. ¿Cómo clasificar el nivel de criticidad de las chancadoras móviles mediante criterios técnicos, económicos y de seguridad en una empresa minera en Apurímac, 2026?
2. ¿Cómo es el comportamiento del indicador de tiempo medio entre fallas (MTBF) de las chancadoras móviles críticas a partir de los registros históricos de mantenimiento de los años 2022 al 2025 en una empresa minera en Apurímac?

3. ¿Qué relación existe entre los tipos de intervenciones programadas en mantenimiento preventivo y el tiempo medio de reparación (MTTR) en las chancadoras móviles críticas en una empresa minera en Apurímac, 2026?
4. ¿Cuál es el grado de incidencia de la gestión de recursos (personal, materiales y tiempos) sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles en una empresa minera en Apurímac, 2026?
5. ¿Cómo cuantificar la viabilidad económica y financiera del plan propuesto mediante el análisis de pérdidas por paradas, ahorros proyectados e indicadores de rentabilidad en una empresa minera en Apurímac, 2026?

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo General**

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad para mejorar la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles en una empresa minera en Apurímac, 2026.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

1. Clasificar el nivel de criticidad de las chancadoras móviles mediante criterios técnicos, económicos y de seguridad en la operación minera.
2. Analizar el comportamiento del indicador de tiempo medio entre fallas (MTBF) de las chancadoras móviles críticas a partir de los registros históricos de mantenimiento de los años 2022 al 2025.
3. Analizar la relación entre los tipos de intervenciones programadas en mantenimiento preventivo y el tiempo medio de reparación (MTTR) en las chancadoras móviles críticas.
4. Determinar el grado de incidencia de la gestión de recursos (personal, materiales y tiempos) sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles.
5. Cuantificar la viabilidad económica y financiera del plan propuesto mediante el análisis de pérdidas por paradas, ahorros proyectados e indicadores de rentabilidad.

## **1.3. Justificación e importancia del estudio**

### **1.3.1. Justificación teórica**

Desde el enfoque teórico, esta investigación se fundamenta en los principios de la ingeniería de mantenimiento y la confiabilidad operacional, aportando al cuerpo de conocimiento aplicado en el ámbito de la gestión de activos industriales. Se recurre al análisis de criticidad como una herramienta robusta dentro de la metodología de mantenimiento

centrado en la confiabilidad (RCM), la cual permite jerarquizar equipos según su impacto en la operación, seguridad y costo (Smith, 2023). Este estudio contribuye a ampliar el marco conceptual del mantenimiento preventivo con enfoque analítico, promoviendo el uso de técnicas de priorización y evaluación de riesgos que son poco exploradas en el contexto minero peruano, particularmente en zonas de alta exigencia técnica como Apurímac.

### **1.3.2. Justificación práctica**

En términos prácticos, el diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en criticidad permitirá a la empresa minera mejorar la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles, optimizar sus recursos técnicos y reducir las pérdidas por paradas no programadas. Esta propuesta tiene un enfoque directo sobre la eficiencia del proceso productivo, ya que aborda fallas frecuentes con un enfoque estratégico, técnico y realista, evitando intervenciones innecesarias y fortaleciendo la planificación (Keith Mobley, 2024). La implementación de este tipo de planes genera mejoras visibles en indicadores como el MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación) y la disponibilidad porcentual de los equipos.

### **1.3.3. Justificación metodológica**

Desde la perspectiva metodológica, la investigación adopta un diseño descriptivo-explicativo, no experimental y transeccional, lo cual resulta pertinente para el análisis riguroso de datos históricos y condiciones actuales sin requerir la ejecución de la propuesta en campo. Esta estrategia permite comprender las causas estructurales de la baja disponibilidad operativa, identificar los factores críticos de riesgo y proponer acciones técnicas a partir de evidencia cuantificable, sin incurrir en sesgos de intervención. La metodología también incorpora herramientas propias del análisis de datos industriales y confiabilidad operacional, como el análisis de criticidad ponderado, gráficos comparativos y la aplicación de matrices de evaluación, lo cual robustece la validez interna del estudio (Hernández et al., 2016).

### **1.3.4. Justificación profesional**

Esta investigación fortalece el perfil del profesional de Ingeniería Industrial, al permitir la aplicación de conocimientos técnicos avanzados en el campo del mantenimiento y confiabilidad, áreas vitales en operaciones de alto impacto como la minería. Al diseñar estrategias que integren análisis de riesgos, gestión de activos y mejora continua, el profesional no solo resuelve problemas reales, sino que además contribuye a consolidar su criterio técnico, capacidad de diagnóstico y toma de decisiones fundamentada. Este tipo de estudios también

promueve el trabajo interdisciplinario entre ingeniería, gestión y operaciones, acorde con las competencias requeridas por la industria 4.0 (Rosas, 2024).

#### **1.3.5. Justificación personal**

En el plano personal, el desarrollo de esta investigación representa un compromiso ético y académico con la búsqueda de soluciones efectivas para entornos productivos exigentes. Responde a una motivación genuina por contribuir al desarrollo técnico del sector minero y al perfeccionamiento profesional del investigador, integrando experiencia práctica, formación académica y capacidad analítica en un solo propósito: generar impacto real y sostenible en la mejora de procesos críticos.

#### **1.3.6. Justificación social**

Socialmente, esta propuesta tiene un efecto positivo al contribuir con la sostenibilidad de las operaciones mineras en Apurímac, una región que depende en gran medida de este sector para su desarrollo económico. Un sistema de mantenimiento más eficiente permite reducir accidentes laborales, mejorar la estabilidad del empleo técnico y asegurar la continuidad operativa sin interrupciones que afecten a las comunidades indirectamente involucradas (Naciones Unidas, 2023).

#### **1.3.7. Justificación económica y organizacional**

Económicamente, los costos por fallas imprevistas en equipos críticos como las chancadoras móviles superan hasta en un 70 % a los de una intervención planificada. Estudios del sector minero indican que una hora de parada no programada puede generar pérdidas cercanas a los USD 25,000 a 30,000, además de un 20 % adicional en sobrecostos logísticos por retrasos en la cadena productiva. Esta investigación propone un plan de mantenimiento preventivo basado en criticidad que permitiría reducir en un 30 a 35 % las horas improductivas y hasta un 25 % los costos correctivos, consolidando un sistema estandarizado, replicable y eficiente para optimizar la gestión organizacional (Meza & Velasquez, 2024).

#### **1.3.8. Importancia de la investigación**

Esta investigación es relevante porque atiende una necesidad crítica dentro del sector minero: mejorar la disponibilidad de equipos clave mediante el uso racional y técnico de herramientas analíticas. El estudio no solo busca comprender una problemática recurrente, sino también formular una solución estructurada, replicable y fundamentada en evidencia. Su valor

radica en la capacidad de conectar teoría y práctica, contribuyendo al desarrollo de propuestas con impacto técnico, económico y social.

Además, representa una guía metodológica para futuras investigaciones en el campo del mantenimiento industrial, al integrar enfoques cuantitativos, estrategias de priorización y análisis contextual, que pueden ser adaptados a otros equipos o industrias. Finalmente, su importancia se refleja en el fortalecimiento de la gestión del conocimiento organizacional, al sentar bases sólidas para una cultura de mantenimiento preventivo, confiabilidad operativa y gestión proactiva de activos físicos.

## **1.4. Delimitaciones**

### **1.4.1. Delimitación temática**

La presente investigación se centrará exclusivamente en el diseño de un plan de mantenimiento preventivo, aplicando como eje metodológico el análisis de criticidad para priorizar los equipos más relevantes dentro del sistema de chancado móvil. La finalidad es mejorar la disponibilidad operativa de estos equipos, lo que implica analizar indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR), así como el porcentaje de disponibilidad efectiva. El estudio no contempla la implementación directa del plan propuesto ni el mantenimiento correctivo o predictivo, sino que se focaliza en la planificación preventiva estructurada, sustentada en criterios técnicos, económicos y de seguridad. La propuesta se desarrolla a partir del análisis documental, observación técnica y uso de herramientas estadísticas, sin intervención en el proceso operativo real, lo cual enmarca su carácter diagnóstico y de diseño estratégico (Keith Mobley, 2024).

### **1.4.2. Delimitación espacial**

Esta investigación se desarrollará en el contexto específico de la unidad minera, ubicada en la región de Apurímac, en el sur del Perú. La empresa es reconocida por su producción a gran escala de cobre y cuenta con una flota de 13 chancadoras móviles, las cuales constituyen la población de estudio. Estas máquinas participan directamente en el proceso de chancado primario, siendo fundamentales para garantizar el flujo continuo del material extraído. La elección de esta operación minera responde tanto a su importancia estratégica dentro del sector como a la evidencia documentada de problemas recurrentes en la gestión de mantenimiento, lo que la convierte en un caso representativo y pertinente para el desarrollo del plan propuesto (Pari Barrera, 2023).

### **1.4.3. Delimitación temporal**

El periodo de análisis de esta investigación comprende tres años consecutivos: 2022, 2023 y 2024, ya que en estos años se registraron los reportes de mantenimiento, fallas operativas y niveles de disponibilidad que servirán como base para el diagnóstico. El diseño del plan de mantenimiento se realizará durante el año 2025, dentro del cronograma académico del proyecto. Por tanto, la duración de la investigación será de doce meses, iniciando en enero de 2025 y culminando en diciembre del mismo año. Este lapso permitirá recolectar, procesar y analizar la información técnica necesaria, así como estructurar una propuesta coherente, técnica y viable, que pueda ser considerada por la organización para su futura implementación (Dávalos Manrique, 2021).

### **1.5. Viabilidad del proyecto**

La viabilidad técnica del proyecto es integral: se dispone de la infraestructura, datos históricos y software estadístico para ello; en el respecto a viabilidad operacional, el personal minero tiene las competencias necesarias para aplicar las nuevas estrategias de mantenimiento; por lo que respecta a la viabilidad económica y financiera, la propuesta es muy rentable, porque reduce la posible pérdida debida a las paradas intempestivas de las chancadoras móviles y optimiza los recursos institucionales, ya que se puede garantizar un valor actual neto (VAN) y una tasa interna de retorno (TIR) positiva, asegurando así la sostenibilidad operacional de Apurímac.

### **1.6. Hipótesis**

#### **1.6.1. Hipótesis General**

El diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad (V. Independiente) mejora significativamente la disponibilidad operativa (V. Dependiente) de las chancadoras móviles en una empresa minera en Apurímac, 2026.

#### **1.6.2. Hipótesis Específicas**

1. La aplicación de criterios técnicos, económicos y de seguridad permite clasificar de forma óptima el nivel de criticidad de las chancadoras móviles en la operación minera.
2. Los registros históricos de mantenimiento de los años 2022 al 2025 determinan el comportamiento y las tendencias del indicador de tiempo medio entre fallas (MTBF) de las chancadoras móviles críticas.

3. Los tipos de intervenciones programadas en mantenimiento preventivo se relacionan de manera directa con la reducción del tiempo medio de reparación (MTTR) en las chancadoras móviles críticas.
4. La gestión de recursos (personal, materiales y tiempos) tiene un grado de incidencia positivo y significativo sobre la eficiencia del mantenimiento en las chancadoras móviles.
5. El análisis de pérdidas por paradas, ahorros proyectados e indicadores de rentabilidad demuestra la viabilidad económica y financiera del plan propuesto.

## **1.7. Variables e indicadores**

### **1.7.1. Variables**

**Variable Independiente:** Diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad

**Definición teórica:** El mantenimiento preventivo es una estrategia enfocada en la ejecución planificada de acciones técnicas antes de que ocurran fallas, con el objetivo de conservar la funcionalidad y confiabilidad de los equipos (Mobley, 2024). Esta combinación se alinea con los principios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) (Perez, 2023).

**Variable Dependiente:** Disponibilidad operativa de las chancadoras móviles

**Definición teórica:** La disponibilidad operativa es uno de los indicadores fundamentales de desempeño en mantenimiento industrial, y se refiere a la proporción de tiempo en que un equipo está disponible para operar en condiciones óptimas, en comparación con el tiempo total requerido para cumplir con sus funciones (Díaz, 2024).

### 1.7.2. Operacionalización de variables

**Tabla 3**

*Matriz de operacionalización de variables*

| VARIABLE                                                                                                  | DIMENSIÓN                        | INDICADOR                              | ECUACIÓN DEL INDICADOR                                                  | DEFINICIÓN OPERACIONAL                                                                                                                                                        | ESCALA DE MEDICIÓN    | TÉCNICA             | INSTRUMENTO                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|
| Variable independiente:<br>Diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad | Priorización de equipos críticos | Nivel de criticidad                    | $\sum (\text{Ponderación} \times \text{Puntuación por criterio})$       | Clasificación del equipo según criticidad técnica, económica y de seguridad (alto, medio, bajo)<br>Número de mantenimientos preventivos asignados por equipo según criticidad | Ordinal               | Análisis documental |                                |
|                                                                                                           | Periodicidad del mantenimiento   | Frecuencia de mantenimiento programado | N.º de mantenimientos programados por periodo                           |                                                                                                                                                                               | Cuantitativa discreta | Análisis documental | Registros históricos (Anexo 5) |
|                                                                                                           | Tipos de intervención preventiva | Categoría de intervención              | Clasificación: inspección, lubricación, cambio de partes, ajustes, etc. | Tipo de actividad preventiva asignada a cada equipo                                                                                                                           | Nominal               | análisis documental |                                |
|                                                                                                           | Gestión de recursos              | Recursos asignados (HH,                | $\sum (\text{Horas Hombre} + \text{Materiales} +$                       | Cantidad de recursos previstos para ejecutar el                                                                                                                               | Cuantitativa continua | revisión documental |                                |

|                                                                              |                                        |                                      |                                                                                                            |                                                                                                 |                                    |                      |                                |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Variable dependiente:<br>Disponibilidad operativa de las chancadoras móviles | Tiempo medio entre fallas (MTBF)       | materiales, tiempos)<br>MTBF (horas) | Tiempo de intervención) X equipo<br>$MTBF = \text{Total de tiempo de operación} / \text{Número de fallas}$ | plan preventivo en equipos críticos<br>Tiempo promedio que el equipo opera sin presentar fallas | Cuantitativa continua              | Análisis documental  | Registros históricos (Anexo 5) |
|                                                                              | Tiempo medio de reparación (MTTR)      | MTTR (horas)                         | $MTTR = \text{Tiempo total de reparación} / \text{Número de fallas}$                                       | Tiempo promedio que demora la reparación del equipo luego de una falla                          | Cuantitativa continua              | Análisis documental  | Registros históricos (Anexo 5) |
|                                                                              | Porcentaje de disponibilidad operativa | Disponibilidad (%)                   | $\text{Disponibilidad} = MTBF / (MTBF + MTTR) \times 100$                                                  | Proporción del tiempo en que el equipo estuvo operativo respecto al tiempo total requerido      | Porcentual (cuantitativa continua) | Análisis estadístico | Registros históricos (Anexo 5) |

Nota. Elaboración propia.

## **1.8. Marco Metodológico**

### **1.8.1. Diseño de la investigación**

La investigación es de tipo no experimental y con un diseño transversal, ya que se echa mano de información operativa e histórica existente, sin manipular extensamente las variables objeto de estudio. Asimismo, es transversal, ya que la recolección de la información técnica se lleva a cabo en un momento temporal (Hernández et al., 2021). Se elige tal diseño, pues se busca formular una propuesta técnica y no una ejecución física de la misma.

### **1.8.2. Tipo de investigación**

La investigación es de tipo aplicada y con un enfoque cuantitativo. Es aplicada, ya que busca resolver una problemática técnica concreta en el sector minero, a partir del diseño de mantenimiento preventivo por criticidad. Es cuantitativa, ya que recurriendo a la recolección y análisis de los datos numéricos e indicadores operativos se logra comprobar la hipótesis (Hernández et al., 2021).

### **1.8.3. Nivel de la Investigación**

El nivel de la investigación es descriptivo y explicativo (Haro y otros, 2024) en cuanto que es descriptiva porque se describen las características operativas de las chancadoras móviles y los fallos que presentan y es explicativa porque se analiza y muestra mediante estadísticas la relación e influencia en la gestión de recursos y de las intervenciones programadas sobre la eficiencia general y la disponibilidad del mantenimiento.

### **1.8.4. Método de investigación**

Se utilizó el método deductivo-analítico que parte de principios generales del mantenimiento industrial y confiabilidad operacional, para ver la situación particular de los equipos críticos, así como de sus causas, efectos y relaciones técnicas (Hernández et al., 2021).

### **1.8.5. Técnicas de investigación**

Se utilizaron las técnicas de análisis documental (aplicado a reportes técnicos, históricos de mantenimiento, hojas de inspección y disponibilidad) y observación directa para valorar la situación real de los equipos y sus prácticas operativas (Hernández et al., 2021).

### **Aspectos metodológicos para la acción de mejora**

El diseño del plan preventivo se estructurará a través de métodos de ingeniería que garanticen una solución técnica viable y contextualizada (Hernández et al., 2021).

#### **Métodos de ingeniería a aplicarse**

Se aplicarán métodos propios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), con énfasis en el análisis de criticidad, la gestión de fallas y la priorización de recursos operativos.

#### **Técnicas de ingeniería a aplicarse**

Se utilizarán las siguientes técnicas análisis de criticidad ponderado, estimación de MTBF y MTTR, priorización de mantenimientos por riesgo y asignación de tareas preventivas en función del nivel de criticidad.

#### **1.8.6. Instrumentos de investigación**

Matriz de criticidad, matriz de priorización de equipos críticos, gráficos comparativos de disponibilidad (líneas y barras), diagramas causa efecto (Ishikawa)

#### **1.8.7. Población**

La población estuvo conformada por 13 chancadoras móviles de la operación minera ubicada en la región Apurímac, Perú, que constituyen el componente crítico del chancado primario operacional.

#### **1.8.8. Muestra**

La investigación trabajará con una muestra Censal, evaluando la totalidad de las 13 chancadoras móviles que integran la operación minera, debido a su alta criticidad operativa e historial de intervenciones.

#### **1.8.9. Análisis de datos**

La estrategia de procesamiento de datos utilizó estadística descriptiva para resumir frecuencias, promedios, disponibilidad y tendencias históricas. Así también, se llevó a cabo un análisis de criticidad ponderado a través de la asignación de pesos de criterios técnicos, económicos y de seguridad. Se realizó un gráfico comparativo de la evolución de los indicadores de MTBF, MTTR y disponibilidad en comparación con los equipos críticos y no críticos. De forma complementaria, se llevó a cabo un análisis de frecuencias cruzadas con los registros históricos para validar la información obtenida a partir de las entrevistas y así reforzar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Para ello se utilizó el software especializado SPSS..

#### **1.8.10. Metodología de desarrollo según los objetivos específicos**

La metodología de la presente investigación se estructuró en correspondencia directa con los objetivos específicos planteados, con el propósito de asegurar coherencia entre el problema, las variables, los indicadores, las técnicas de recolección de información y las herramientas de análisis empleadas. Debido a que el estudio tiene un diseño no experimental y transversal, la investigación no contempla la manipulación directa de las variables ni la implementación física inmediata del plan de mantenimiento, sino el análisis técnico de datos históricos, registros documentales y condiciones operativas reales de las chancadoras móviles. Esta orientación metodológica permite sustentar el diseño de la propuesta de mejora con base en evidencia cuantitativa y criterios técnicos de ingeniería de mantenimiento.

Para el primer objetivo específico, referido a identificar el nivel de criticidad de las chancadoras móviles mediante criterios técnicos, económicos y de seguridad, se aplicó el análisis documental de los registros históricos de mantenimiento, reportes de fallas, horas improductivas, costos asociados y condiciones de seguridad operacional. Con esta información se construyó una matriz de criticidad ponderada, en la cual cada equipo fue evaluado según la frecuencia de fallas, impacto operativo, costo de parada, afectación a la seguridad y efecto sobre la continuidad del proceso. El resultado de este procedimiento permitió clasificar las chancadoras en niveles de criticidad alto, medio y bajo, estableciendo la base técnica para priorizar las intervenciones del plan preventivo.

Para el segundo objetivo específico, orientado a analizar el comportamiento del indicador de tiempo medio entre fallas MTBF de las chancadoras móviles críticas a partir de los registros históricos de mantenimiento de los años 2022 al 2025, se empleó una metodología cuantitativa descriptiva. Primero, se organizaron los datos históricos de operación y número de fallas por equipo; posteriormente, se calculó el MTBF mediante la relación entre el tiempo total de operación y el número de fallas registradas. Luego, se aplicaron tablas comparativas, gráficos de tendencia y estadísticos descriptivos para reconocer variaciones anuales, equipos con mayor recurrencia de fallas y periodos de menor confiabilidad. Este análisis permitió establecer el comportamiento histórico de la confiabilidad de las chancadoras móviles antes del diseño del plan preventivo.

Para el tercer objetivo específico, relacionado con analizar la relación entre los tipos de intervenciones programadas en mantenimiento preventivo y el tiempo medio de reparación MTTR en las chancadoras móviles críticas, se revisaron los registros de intervenciones efectuadas, clasificándolas según su naturaleza técnica: inspección, lubricación, cambio de componentes, ajustes, reparación mecánica, reparación hidráulica o intervención eléctrica.

Posteriormente, se calculó el MTTR mediante la relación entre el tiempo total de reparación y el número de fallas o intervenciones registradas. Con esta información se compararon los tiempos medios de reparación por tipo de intervención, identificando aquellas actividades que generan mayor demora y que deben ser consideradas prioritariamente dentro del plan de mantenimiento preventivo.

Para el cuarto objetivo específico, referido a determinar el grado de incidencia de la gestión de recursos personal, materiales y tiempos sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo, se analizaron los recursos empleados en las actividades de mantenimiento de las chancadoras móviles. Para ello, se consideraron las horas hombre utilizadas, los materiales requeridos, la duración de las intervenciones y el efecto de estos elementos sobre la eficiencia operativa. El tratamiento de la información se realizó mediante estadística descriptiva, diagramas de dispersión y análisis de regresión, con el fin de identificar si la asignación de recursos guarda relación con la disponibilidad, productividad técnica y eficiencia del mantenimiento.

Para el quinto objetivo específico, orientado a cuantificar las pérdidas monetarias actuales por paradas y proyectar el ahorro potencial con la propuesta de mantenimiento preventivo, se aplicó un análisis económico basado en los costos generados por las paradas no programadas. Para ello, se multiplicaron las horas improductivas registradas por el costo estimado de parada por hora, considerando los efectos directos sobre producción, mantenimiento correctivo y retrasos operativos. Posteriormente, se proyectaron los beneficios económicos esperados a partir de la reducción estimada de fallas, mejora del MTBF, disminución del MTTR e incremento de la disponibilidad operativa. Este procedimiento permitió evaluar la viabilidad económica de la propuesta mediante indicadores financieros como ahorro proyectado, flujo neto, VAN, TIR y ROI.

En conjunto, la metodología aplicada permitió desarrollar una secuencia lógica de diagnóstico, análisis técnico, priorización, diseño de propuesta y evaluación económica. En primer lugar, se identificaron los equipos críticos; en segundo lugar, se analizaron los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad; en tercer lugar, se evaluó la relación entre intervenciones y tiempos de reparación; en cuarto lugar, se revisó la gestión de recursos; y finalmente, se cuantificó el impacto económico de las paradas no programadas y el ahorro potencial del plan preventivo. Esta secuencia garantiza que cada objetivo específico tenga una técnica, instrumento, indicador y resultado esperado claramente definido, fortaleciendo la coherencia metodológica de la investigación.



## **CAPITULO II**

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes de la investigación**

#### **2.1.1. Antecedentes Internacional**

Según Khayal (2025) , en su estudio titulado *A Comprehensive Review of Maintenance Strategies and Their Impact on Industrial Performance*, desarrollado en Sudán desde la Nile Valley University, el objetivo principal fue analizar de forma integral cómo las distintas estrategias de mantenimiento influyen en el desempeño industrial, con especial énfasis en sectores de alta criticidad operativa. El estudio se encuadra dentro de una investigación de tipo cualitativa y de revisión sistemática, en la cual se examinaron más de 60 fuentes científicas internacionales relacionadas con mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y proactivo. Se utilizaron como instrumentos matrices de revisión bibliográfica, esquemas comparativos de impacto por estrategia, y se aplicó una metodología de análisis documental estructurado. La población de estudio fue compuesta por artículos científicos, informes técnicos de industrias manufactureras y reportes estadísticos de desempeño de plantas industriales. Entre los resultados más relevantes, se encontró que el mantenimiento preventivo bien estructurado contribuye hasta en un 28 % al aumento de la disponibilidad operativa, mientras que el uso combinado con técnicas predictivas puede reducir en un 35 % los tiempos de inactividad no programada. Asimismo, el 41 % de las fuentes revisadas coincidió en que la falta de priorización de activos críticos es uno de los factores más comunes de ineficiencia. El estudio concluyó que una correcta selección y aplicación de la estrategia de mantenimiento, basada en el análisis de criticidad y las condiciones reales de operación, es esencial para mejorar la productividad, reducir costos y extender la vida útil de los activos industriales.

Según Dayo Olupona et al., (2023), en su artículo titulado *Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview*, publicado en la revista *Resources Policy* (Sudáfrica), el objetivo principal fue analizar los enfoques más viables y adaptables para el mantenimiento predictivo dentro de la industria minera global. El estudio se desarrolló bajo una metodología de tipo exploratoria analítica, con enfoque cualitativo y revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2000 y 2022. Se emplearon instrumentos como análisis bibliométrico, clasificación temática de casos reales y fichas de comparación técnica para evaluar 52 estudios de campo en empresas mineras de países como Canadá, Australia, Ghana y Chile. La población se definió como un conjunto de prácticas industriales y tecnologías aplicadas a maquinaria crítica, incluyendo palas hidráulicas, chancadoras, fajas transportadoras

y perforadoras. Los resultados evidenciaron que el 67% de los casos exitosos de mantenimiento predictivo incluían el uso de sensores en tiempo real y sistemas SCADA, mientras que el 49% integraban inteligencia artificial y aprendizaje automático. Además, se determinó que los enfoques combinados de mantenimiento preventivo y predictivo permitieron reducir hasta en un 38% el tiempo medio de inactividad de los equipos. El estudio concluyó que, aunque el mantenimiento predictivo representa el futuro de la confiabilidad minera, su implementación debe estar precedida por una etapa de planificación preventiva basada en análisis de criticidad, lo cual representa un paso clave para que la industria logre estabilidad operativa con eficiencia en el uso de recursos.

Según Kruczek et al, (2021), en su artículo titulado *Predictive Maintenance of Mining Machines Using Advanced Data Analysis System Based on the Cloud Technology*, desarrollado en Polonia, el objetivo fue diseñar un sistema avanzado de mantenimiento predictivo apoyado en tecnologías de análisis de datos en la nube, para mejorar la disponibilidad de equipos mineros críticos. El estudio se llevó a cabo en operaciones mineras automatizadas de Europa Central, donde los investigadores propusieron una arquitectura integrada que conectara sensores industriales, algoritmos de machine learning y almacenamiento en la nube para anticipar fallas. La metodología utilizada fue aplicada y cuantitativa, basada en análisis estadísticos de series temporales y correlaciones funcionales entre variables operativas. La población de estudio estuvo conformada por palas eléctricas y excavadoras hidráulicas, cuya data histórica fue recolectada durante más de doce meses de operación continua. Se usaron instrumentos como sensores IoT, registros SCADA y paneles de monitoreo integrados en el sistema de mantenimiento. Los resultados evidenciaron que, tras implementar el modelo predictivo, se logró reducir en un 30% los tiempos de inactividad imprevista y se incrementó la disponibilidad operativa general de los equipos en un 22%. Los autores concluyen que el uso de tecnologías avanzadas para el análisis de datos no solo mejora la gestión del mantenimiento, sino que permite tomar decisiones proactivas, optimizando los costos operativos y fortaleciendo la confiabilidad de los activos mineros en tiempo real.

Según Hoffmann y Lasch , en el artículo *Unlocking the Potential of Predictive Maintenance for Intelligent Manufacturing: a Case Study On Potentials, Barriers, and Critical Success Factors* (Alemania), el objetivo de la investigación fue explorar los potenciales, barreras y factores críticos de éxito en la implementación práctica del mantenimiento predictivo (PdM) en entornos industriales reales. El contexto de intervención consistió en un estudio de

caso cualitativo con entrevistas a 15 expertos en mantenimiento de diversas compañías europeas, con el fin de identificar los retos organizacionales y tecnológicos que dificultan la adopción de PdM. La metodología empleada fue de tipo exploratorio-interpretativo, con entrevistas estructuradas como principal técnica, complementadas con análisis documental de procesos y sistemas de datos de mantenimiento. La población fueron profesionales de mantenimiento de empresas de distintos tamaños y sectores, aunque no se proporcionó un número total de organizaciones. Entre los resultados, se identificaron cuatro barreras principales: baja preparación digital (aproximadamente 60 % de las organizaciones sin infraestructura adecuada), calidad de datos deficiente (un 55 %), integración tecnológica insuficiente (cerca del 50 %) y organización de mantenimiento poco adaptada. Además, se señaló que solo el 11 % de los casos estudiados logró una implementación PdM exitosa. Como conclusión, los autores resaltan que existe un vacío notable entre la teoría y la práctica del PdM en la industria, y plantean un marco con diez proposiciones diseñadas para superar las barreras identificadas e incrementar la tasa de adopción exitosa.

Según Davey (2022), *Monitoring Heavy Equipment in Mining with Predictive Maintenance* (Australia), el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto del mantenimiento predictivo en la reducción de paradas no programadas y en la mejora de la disponibilidad operativa en equipos pesados de minería. El contexto metodológico consistió en un estudio aplicado orientado al monitoreo de maquinaria en operación real, utilizando sensores conectados al bus CAN de los vehículos mineros, complementado con análisis de datos en la nube y modelos predictivos para anticipar fallas. La investigación empleó un enfoque descriptivo cuantitativo, integrando datos históricos de chasis, temperatura de escape, presión, velocidad de rotación, carga del motor y voltajes eléctricos. Se registraron señales operativas de más de 45 parámetros sensoriales capturados en tiempo real, almacenados localmente y procesados en plataformas analíticas avanzadas. La población correspondió a una flota de camiones y máquinas pesadas operando en entornos mineros, con una muestra seleccionada intencionalmente según registros de fallas frecuentes. Los instrumentos incluyeron sistemas de monitoreo CAN bus, software de análisis predictivo y paneles de alerta para mantenimiento programado. Los resultados mostraron una reducción significativa en fallas inesperadas, aumentando la disponibilidad operativa de los equipos en un 15 %, y una disminución del 20 % en costos asociados a reparaciones de emergencia. Además, se logró anticipar alertas de fallo con varios días de anticipación, lo que permitió programar la reparación durante paradas planificadas y evitar interrupciones críticas. La conclusión indicó que el enfoque predictivo,

basado en monitoreo de múltiples variables sensoras y análisis de datos históricos, resultó efectivo para mejorar la productividad y prolongar la vida útil de los activos. Asimismo, se estableció que la inversión en tecnología de sensores y analítica de datos se amortiza con la reducción de costos operativos y el incremento en el tiempo de actividad efectiva. Este estudio refuerza la viabilidad técnica del mantenimiento basado en datos como fuente de eficiencia en operaciones mineras críticas.

Según Kalra et al., (2021), en su estudio titulado Condition based maintenance management system for improvement in key performance indicators of mining haul trucks a case study (India), el objetivo fue evaluar un sistema de gestión de mantenimiento basado en el estado para mejorar indicadores clave en camiones de transporte minero. La investigación adoptó un enfoque de estudio de caso, tipo experimental aplicado a flota de camiones, donde se analizaron datos operacionales, se implementaron sensores de monitoreo del estado físico de los vehículos y se utilizaron herramientas de análisis estadístico y entrevistas con operadores. La población estuvo conformada por los camiones de una operación minera específica, y se aplicaron instrumentos como registros de condición, reportes de desempeño y reportes de fallas. Los resultados mostraron mejoras significativas: se alcanzó un incremento del 15 % en la disponibilidad operativa, una reducción del 20 % en el tiempo medio de reparación (MTTR) y una mejora del 12 % en el tiempo medio entre fallas (MTBF) tras la implementación del sistema. Además, el estudio concluyó que el mantenimiento basado en estado permitió anticipar fallas incipientes, optimizar intervenciones técnicas y disminuir paradas no programadas. Según los autores, esta estrategia no solo contribuyó a mejorar los indicadores operativos, sino que también promovió una cultura de mantenimiento proactivo y eficiente en la operación minera.

### **2.1.2. Antecedentes Nacional**

Según De la Fuente y Morales , en el estudio titulado Mejora del mantenimiento predictivo en maquinaria móvil minera a través de una red de inferencia jerárquica (Perú), cuyo objetivo fue diseñar un modelo de red de inferencia basada en TinyML para optimizar el mantenimiento predictivo, se implementó una arquitectura jerárquica que incorpora sensores en el borde (edge), gateway y nube para monitorear en tiempo real el estado de equipos móviles. El contexto de intervención incluyó un enfoque experimental aplicado en operaciones mineras reales, con sensores instalados en maquinaria crítica, donde se emplearon técnicas de inferencia distribuida y aprendizaje automático en dispositivos de baja potencia. La población de referencia consistió en maquinaria móvil sometida a desgaste operativo, y se recolectaron datos

mediante sensores de vibración y temperatura. Como resultado, el modelo logró una precisión de clasificación superior al 90 % en inferencia local (edge) y de hasta el 99 % en inferencia en la nube, además de reducir el consumo energético en un 44 % y alcanzar hasta 104 horas de operación continua sin recarga. En conclusión, los autores demostraron que una arquitectura de inferencia jerárquica resulta viable y eficaz para aplicaciones de mantenimiento predictivo en entornos mineros, al balancear precisión, latencia y consumo, lo que representa un antecedente tecnológico relevante para investigar planes preventivos basados en criticidad que mejoren la disponibilidad operativa en chancadoras móviles.

Según Animah y Shafiee (2021), en su estudio titulado *Selección de estrategias de mantenimiento para sistemas de maquinaria de a bordo críticos utilizando un AHP PROMETHEE híbrido y análisis de beneficios de costos: un estudio de caso*, desarrollado en Reino Unido, el objetivo principal fue determinar la estrategia óptima de mantenimiento para equipos críticos en sistemas marítimos, integrando criterios técnicos, económicos y operativos mediante métodos multicriterio. El contexto metodológico fue de enfoque cuantitativo, con un diseño aplicado de tipo descriptivo y evaluativo, orientado a la toma de decisiones estratégicas. Se utilizó una combinación híbrida de los métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), complementado con un análisis detallado de costo beneficio. La población estuvo conformada por expertos técnicos y operadores de maquinaria a bordo de embarcaciones marítimas especializadas. Entre los instrumentos utilizados se incluyeron matrices de evaluación, encuestas estructuradas y tablas de valoración técnica. Los resultados revelaron que, al aplicar este enfoque, se logró identificar una estrategia de mantenimiento óptima con un 35% de reducción potencial en costos operativos y un 28% de mejora en la disponibilidad de los sistemas críticos. Como conclusión, los autores evidenciaron que el uso de modelos híbridos multicriterio no solo mejora la objetividad en la toma de decisiones, sino que también permite priorizar inversiones en mantenimiento de forma técnica y rentable, validando su utilidad para entornos complejos como el sector industrial y marítimo.

Según Campos et al., (2021), en su artículo titulado *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos*, desarrollado en México, el objetivo de la investigación fue estructurar una propuesta metodológica de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) que integrara criterios de criticidad, análisis funcional y categorización de activos industriales. El estudio fue

de tipo aplicado y tecnológico, y se desarrolló bajo una metodología cuantitativa descriptiva, basada en la sistematización de datos operativos provenientes de una empresa del sector eléctrico. Para ello, se utilizó una base de datos técnica, junto con el análisis funcional de los equipos y un sistema de evaluación de fallas según su impacto en la operación, la seguridad y los costos asociados. La población correspondió a 30 equipos eléctricos de distribución primaria, clasificados según una taxonomía estructurada por familias, subfamilias y funciones. Como herramientas metodológicas, se emplearon el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), matrices de criticidad, y diagramas funcionales. Entre los resultados más relevantes, se identificó que el 20% de los equipos concentraban el 80% del riesgo operativo, lo que permitió optimizar la programación de mantenimientos y reducir en un 25% el índice de fallas no previstas en un periodo de seis meses. La investigación concluyó que integrar el enfoque RCM con criterios de criticidad permite priorizar los activos más relevantes, reducir tiempos de parada y mejorar la confiabilidad global del sistema, siempre que se cuente con una base de datos bien estructurada y personal técnico capacitado para su aplicación.

Según Mago Ramos y Rocha Pachón (2021), en su estudio titulado *Diseño e implementación del plan de mantenimiento preventivo de los equipos de la empresa Granitos y Mármoles Acabados SAS*, el objetivo fue desarrollar e implementar un plan de mantenimiento preventivo mediante un análisis de criticidad que permitiera identificar los equipos más relevantes para evitar fallas recurrentes. La investigación se realizó en una microempresa con más de veinte años de experiencia en servicios de piedra natural, sin aplicación previa de estrategias formales de mantenimiento. El enfoque metodológico fue cualitativo-cuantitativo, con trabajo de campo de tipo descriptivo y acción de diseño operativo. Se emplearon instrumentos como fichas técnicas, formatos de control y registros de mantenimiento, así como entrevistas estructuradas y análisis documental para recopilar datos sobre frecuencia de fallas y tipos de mantenimiento. La población correspondió a todos los equipos utilizados en la empresa, seleccionándose como muestra los activos más críticos identificados mediante el análisis de criticidad. Los resultados revelaron una mejora del 25 % en la eficiencia operativa tras la implementación del plan, y una reducción estimada del 15 % en costos por lucro cesante al evitar interrupciones por fallas; además, los indicadores financieros como ROI y TIR mostraron retornos positivos en plazos cortos. Finalmente, concluyeron que un enfoque preventivo basado en criticidad no solo mejoró la disponibilidad de los equipos, sino que también generó retornos económicos sustanciales y promovió una cultura técnica prioritaria en empresas PYME que carecen de sistemas estructurados de mantenimiento.

### 2.1.3. Antecedentes Local

Según Rojas Gonzales (2020), en su tesis titulada *Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de los equipos en la planta de chancado de una unidad minera en La Libertad*, desarrollada en Perú, el objetivo fue diseñar e implementar un plan de mantenimiento preventivo que permita incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos en una planta de chancado perteneciente a una unidad minera de la región La Libertad. La investigación fue de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo, adoptando un diseño no experimental y transversal. Para el análisis, se emplearon instrumentos como fichas técnicas de los equipos, registros históricos de mantenimiento, reportes de fallas y hojas de control de paradas no programadas, enfocándose en una población constituida por los equipos operativos de la planta de chancado. Los resultados evidenciaron que, tras aplicar el plan propuesto, se redujeron en un 35% las fallas imprevistas y se incrementó la disponibilidad operativa de los equipos en un 12%. Además, se registró una disminución del 25% en los costos por mantenimiento correctivo. En sus conclusiones, el autor sostuvo que la planificación preventiva no solo permite una operación más eficiente y segura, sino que también alarga la vida útil de los activos físicos, reduce los tiempos muertos y mejora sustancialmente la productividad del proceso minero.

Según Huamán Vergara (2024), en su tesis titulada *Modelo de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de las chancadoras en la industria minera, Cusco, Perú*, el objetivo fue determinar cómo un modelo de mantenimiento preventivo puede elevar la disponibilidad operativa de chancadoras. La investigación se desarrolló mediante un diseño aplicado de alcance explicativo y diseño preexperimental, utilizando una combinación de análisis documental de registros históricos de fallas y disponibilidad, entrevistas con personal técnico y aplicación de herramientas como análisis de criticidad y cronogramas preventivos. La población estuvo constituida por chancadoras cónica y de mandíbula en una operación minera local, y se elaboraron planillas de control, AMFE y cronogramas preventivos como instrumentos principales. Los resultados mostraron que la falla en producción representó el 49 % de los incidentes, seguida de la falta de capacitación (22 %), desgaste de componentes (16 %) y ausencia de fichas de control (13 %). El MTBF calculado fue de 235,33 horas en la chancadora cónica y 164,31 en la de mandíbula, con un MTTR de 4,67 y 5,10 horas respectivamente. Como consecuencia, la disponibilidad operativa alcanzada mejoró en varios puntos porcentuales respecto a los datos base, lo que permitió estimar un incremento significativo en la confiabilidad del equipo. En conclusión, la aplicación de un modelo preventivo estructurado basado en criticidad logró elevar la disponibilidad operativa, reducir el

MTTR y aumentar la eficiencia técnica del proceso de chancado, lo cual sugiere su potencial replicabilidad en operaciones mineras con características similares.

## **2.2. Marco teórico conceptual**

### **2.2.1. Plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad**

El diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad es una estrategia sistemática orientada a asegurar la disponibilidad operativa de equipos industriales, en especial aquellos considerados críticos por su impacto en la productividad, la seguridad y los costos operativos. Esta metodología permite jerarquizar activos según su importancia, condiciones de operación y consecuencias ante una falla, para así establecer intervenciones técnicas preventivas más eficientes y rentables (Rojas Gonzales, 2020).

El mantenimiento preventivo busca realizar intervenciones planificadas antes de que ocurran fallas, minimizando así los tiempos de inactividad no programada y extendiendo la vida útil de los equipos (Smith, 2003). En contextos industriales exigentes, como la minería, este tipo de mantenimiento es clave para sostener la continuidad operacional (CEPAL, 2023).

Para seleccionar qué equipos deben recibir atención prioritaria, se emplea el análisis de criticidad, técnica que evalúa el nivel de impacto de las fallas de un activo sobre los objetivos operativos, considerando factores como frecuencia de fallos, efectos sobre la seguridad, costos de reparación, tiempo de recuperación y efectos ambientales (Campos et al., 2020).

Este enfoque permite tomar decisiones técnicas y económicas fundamentadas, priorizando aquellos activos cuya falla representa un mayor riesgo o costo. Por ejemplo, en la minería, equipos como las chancadoras móviles son críticos debido a su rol en la cadena de producción y su alto costo de reemplazo o reparación (Meza & Velásquez, 2024).

En cuanto a los beneficios organizacionales, esta estrategia mejora los indicadores clave de mantenimiento, como el MTBF (tiempo medio entre fallos), el MTTR (tiempo medio de reparación) y la disponibilidad operativa (Hoffmann & Lasch, 2025). A nivel macroeconómico, la mejora de la eficiencia operativa de activos mineros contribuye a fortalecer la competitividad del sector extractivo (Grand, 2025).

### **2.2.2. Priorización de equipos críticos**

La priorización de equipos críticos es un proceso técnico mediante el cual se clasifican los activos físicos en función de su impacto potencial sobre la operación, seguridad, costos y medio ambiente. Esta clasificación se basa en criterios como frecuencia de fallas, consecuencias operativas y nivel de riesgo, permitiendo focalizar los esfuerzos de mantenimiento sobre

aquellos equipos que presentan mayor relevancia para la continuidad productiva (Keith Mobley, 2004). Un análisis de criticidad bien estructurado permite establecer un orden lógico de intervención, optimizando recursos y reduciendo pérdidas.

### **2.2.3. Periodicidad del mantenimiento**

La periodicidad del mantenimiento se refiere a la frecuencia con la que se ejecutan tareas preventivas sobre un equipo. Esta frecuencia no es arbitraria, sino que se determina en función del nivel de criticidad, el historial de fallas y las recomendaciones del fabricante. Una programación efectiva mejora la confiabilidad de los equipos, reduce paradas inesperadas y prolonga la vida útil de los activos (Smith, 2003). Una periodicidad bien definida contribuye a evitar tanto el mantenimiento excesivo como el insuficiente.

### **2.2.4. Tipos de intervención preventiva**

Los tipos de intervención preventiva comprenden las distintas actividades planificadas que se ejecutan sobre los equipos para conservar su estado funcional. Entre ellas se incluyen inspecciones visuales, lubricación, ajustes, reemplazo de componentes y limpieza técnica. Estas acciones buscan anticiparse a posibles fallas, evitando la interrupción de las operaciones y asegurando un entorno técnico estable. La correcta identificación de los tipos de tareas se basa en el análisis de modos de falla y sus efectos (RCM) (Huamán Vergara, 2024).

### **2.2.5. Gestión de recursos**

La gestión de recursos en mantenimiento abarca la planificación, asignación y utilización eficiente del personal técnico, materiales, repuestos e insumos necesarios para ejecutar las tareas preventivas. Una administración adecuada de estos recursos garantiza que las intervenciones se realicen en tiempo y forma, evitando demoras, sobrecostos o improductividades. Este componente es esencial para la sostenibilidad del plan de mantenimiento, ya que conecta el diseño técnico con la capacidad operativa de la organización (Huamán Vergara, 2024).

### **2.2.6. Disponibilidad operativa de las chancadoras móviles**

La disponibilidad operativa de las chancadoras móviles hace referencia al porcentaje de tiempo en que estos equipos están en condiciones técnicas óptimas para operar conforme a los requerimientos del proceso productivo minero. Es decir, mide la capacidad de respuesta del equipo frente a las demandas de producción, considerando tanto las detenciones planificadas como las no planificadas (Smith, 2003).

En el sector minero, donde las chancadoras móviles constituyen un eslabón fundamental en la cadena de valor especialmente en operaciones de tajo abierto, su disponibilidad operativa impacta directamente en la continuidad y eficiencia de la producción (Pérez, 2023). De hecho, una baja disponibilidad implica interrupciones, sobre costos, acumulación de mineral y desbalance en el sistema logístico (Huamán Vergara, 2024).

Para mejorar esta disponibilidad, se ha demostrado que la aplicación de estrategias de mantenimiento sistemáticas, como el mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad, permite priorizar acciones sobre componentes de mayor impacto, reduciendo el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) (Kalra et al., 2020). El desarrollo de metodologías basadas en mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), combinado con monitoreo predictivo y análisis de datos, ha demostrado ser eficaz para optimizar la disponibilidad operativa en maquinaria crítica (Davey, 2022).

#### **2.2.7. Tiempo medio entre fallas (MTBF)**

El tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) es un indicador de confiabilidad que representa el promedio de horas que transcurren entre una falla y otra durante el funcionamiento del equipo. A mayor MTBF, mayor es la confiabilidad del activo. Este indicador permite evaluar la frecuencia de interrupciones y es fundamental para determinar la efectividad del plan de mantenimiento aplicado (Keith, 2024).

#### **2.2.8. Tiempo medio de reparación (MTTR)**

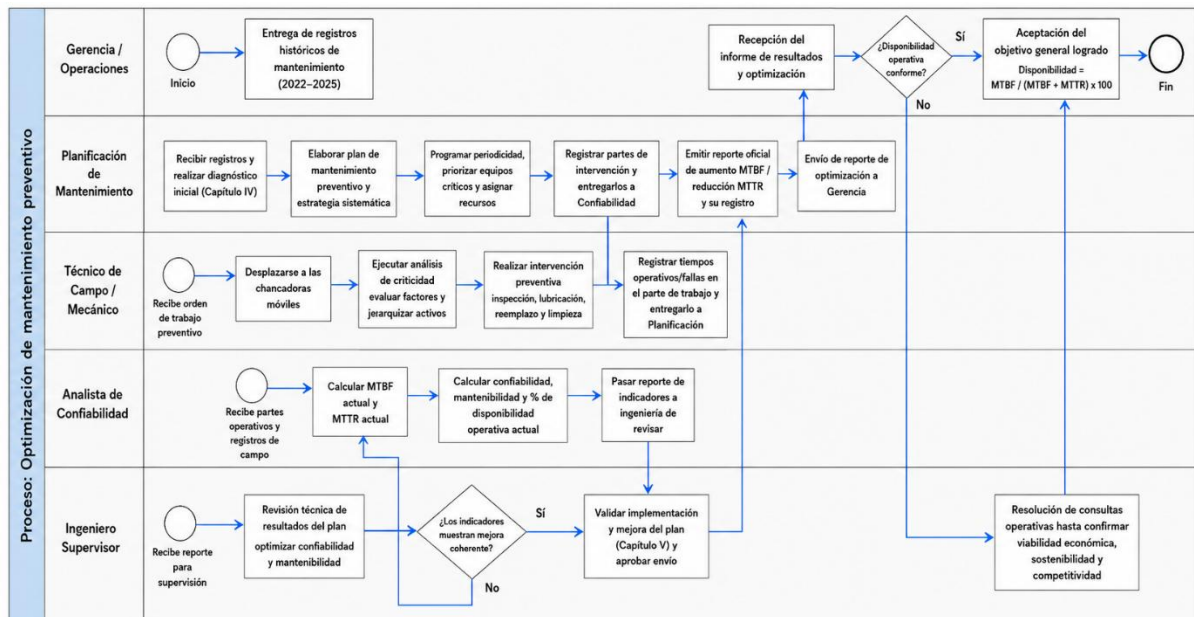
El tiempo medio de reparación (MTTR) mide el tiempo promedio que se requiere para restaurar la funcionalidad de un equipo después de una falla. Este valor incluye el tiempo de detección, diagnóstico, reparación y puesta en marcha. Un MTTR bajo refleja eficiencia en las intervenciones correctivas y disponibilidad rápida de recursos. Junto con el MTBF, el MTTR permite calcular el porcentaje de disponibilidad (Huamán Vergara, 2024).

#### **2.2.9. Porcentaje de disponibilidad operativa**

La disponibilidad operativa es el porcentaje del tiempo en que un equipo está en condiciones de operar frente al tiempo total en que se requiere su funcionamiento. Se calcula mediante la fórmula:  $\text{Disponibilidad (\%)} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \times 100$  (Huamán, 2024). Este indicador integra confiabilidad y mantenibilidad, siendo clave para evaluar el rendimiento de los activos críticos. En entornos mineros, donde cada minuto de parada implica pérdidas significativas, mantener alta disponibilidad es esencial para la sostenibilidad operativa

**Figura 3**

Diagrama de flujo del plan



*Nota.* Elaboración propia.

La Figura 3 representa la secuencia propuesta para estructurar el plan de mantenimiento preventivo, desde la identificación y evaluación de los equipos hasta la programación y seguimiento de las intervenciones. El flujo facilita comprender la lógica operativa de la propuesta y su orientación hacia la mejora de la disponibilidad.



### **CAPITULO III**

### **3. DIAGNÓSTICO SITUACIONAL**

#### **3.1. Situación actual de la empresa**

En este capítulo se analiza la realidad operativa del sistema de mantenimiento de chancadoras móviles en la empresa minera. El objetivo es determinar los principales problemas, sus causas y su impacto sobre la disponibilidad operativa, aplicando herramientas de Ingeniería Industrial que permitan establecer una línea base cuantitativa para la propuesta de mejora.

#### **3.2. Equipos utilizados y justificación técnica de la selección.**

La operación minera consiste en un proceso que involucra una serie de equipos para el chancado, el transporte, el almacenamiento y la posterior molienda del mineral, concentrándose en la etapa convencional del chancado primario. En esta última, el mineral proveniente de mina es descargado por camiones de 360 t sobre dos tolvas de alimentación que sostienen en línea a dos chancadores giratorios que trabajan en simultáneo. Cada chancador tiene unas dimensiones de  $1\,524 \times 2\,870$  mm ( $60 \times 113$  pulgadas) y una capacidad de tratamiento que oscila entre 4 167 y 7 500 t/h, dependiendo de las características del mineral y de la abertura de operación. El producto que se obtiene es entregado posteriormente por medio de alimentadores y correas transportadoras hacia el acopio del mineral grueso.

El sistema de chancado primario ha sido diseñado para trabajar 365 días por año y 24 horas al día, asumiendo una utilización efectiva de los chancadores del 70 %. En tales condiciones, la planta ha sido planificada para proporcionar alrededor de 140 000 t/d de mineral grueso fresco, con una granulometría de salida P80 de 150 mm. Además, el transporte del mineral grueso se realiza con dos correas overland en línea, cuyas longitudes son de 2 577 m y 2 718 m, alcanzando el sistema de transporte una capacidad del orden de 9 177 t/h.

En este entorno de producción se encuentra implementado el sistema de chancado móvil que tiene la finalidad de realizar una reducción adicional del tamaño del mineral antes de su incorporación al proceso de molienda. El sistema tiene una capacidad nominal de 200 t/h y está compuesto por tres partes principales, a saber: una chancadora móvil de quijada MC 110 Z EVO, una chancadora móvil cónica MCO 9 S EVO y una faja transportadora móvil tipo Grasshopper. La configuración responde a una secuencia ininterrumpida de reducción y transporte del mineral, con alimentación proveniente de equipos de carguío y terminando con una descarga y apilamiento en las cercanías de los alimentadores de la molienda.

**Tabla 4***Principales equipos del sistema de chancado móvil.*

| Equipo                      | Modelo                                | Función dentro del proceso                                                                                                                                            |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chancadora móvil de quijada | 0240-CRJ-0001                         | Ejecuta la primera etapa de reducción del mineral grueso recibido mediante excavadoras.                                                                               |
|                             | MC 110z EVO                           |                                                                                                                                                                       |
|                             | 0240-CRJ-002                          |                                                                                                                                                                       |
|                             | LT 130e                               |                                                                                                                                                                       |
| Chancadora móvil cónica     | MINYU I MS4230                        | Realiza la segunda etapa de reducción granulométrica del material procedente de la chancadora de quijada.                                                             |
|                             | 0240-CRC-0001                         |                                                                                                                                                                       |
|                             | MC09s EVO                             |                                                                                                                                                                       |
|                             | 0240-CRC-002 L1                       |                                                                                                                                                                       |
|                             | LT 330D L1                            |                                                                                                                                                                       |
|                             | 0240-CRC-002 L2                       |                                                                                                                                                                       |
| Faja transportadora móvil   | LT 330D L2                            | Recibe el mineral triturado proveniente de la chancadora cónica y lo transporta hacia una zona próxima a las bocas de alimentación de los equipos 0240-FEA-0004@0011. |
|                             | MINYU II                              |                                                                                                                                                                       |
|                             | MSP 300                               |                                                                                                                                                                       |
|                             | Grasshopper                           |                                                                                                                                                                       |
| Excavadora                  | BIN FEEDER 47                         | Alimenta con mineral grueso la tolva de la chancadora móvil de quijada MC 110 Z EVO.                                                                                  |
|                             | BIN FEEDER 48                         |                                                                                                                                                                       |
|                             | Equipo auxiliar de alimentación       |                                                                                                                                                                       |
| Cargadores frontales        | Equipo auxiliar de manejo de material | Permiten trasladar y descargar el mineral triturado que ha sido apilado después del proceso de chancado móvil.                                                        |

Nota. Elaboración propia.

Basándose en documentación técnica interna de la operación, el sistema de chancado móvil tiene una capacidad nominal de 200 t/h y está formado principalmente por la chancadora de quijada MC 110 Z EVO, la chancadora cónica MCO 9 S EVO y la faja transportadora móvil Grasshopper.

La primera fase concierne a la chancadora móvil de quijada MC 110 Z EVO (0240-CRJ-0001). La alimentación del mineral grueso se efectúa a través de excavadoras, las cuales vierten

el material en la tolva del equipo. Este, en el interior, incorpora una tolva de alimentación, precriba, machacadora de mandíbulas, unidad de potencia, cinta de descarga, mecanismo de traslación, bypass y alimentador vibrante, así como otros componentes opcionales, como separador magnético y cinta de finos. El alimentador vibrante conduce el material hacia la precriba, donde tiene lugar una separación previa y, posteriormente, las partículas que requieren la reducción están listas para entrar en la machacadora de mandíbulas, siendo éstas desechadas a través de la cinta correspondiente.

La segunda fase está constituida por la chancadora móvil cónica MCO 9 S EVO (0240-CRC-0001), que recibe directamente el producto proveniente de aquélla, continuando con la reducción de la granulometría. Los principales elementos que la constituyen son la tolva de alimentación, la cinta de alimentación, la unidad de potencia, la machacadora de cono, la cinta de descarga, el mecanismo de traslación y el chasis, pudiendo incorporar cintas adicionales de retorno, clasificación y finos, así como el extractor magnético; el mineral es transportado a la machacadora de cono donde es reducido hasta tamaño requerido y posteriormente lo transfiere a la etapa de transporte.

Tras realizar el chancado secundario, el mineral es descargado por la cinta de finos hacia la faja transportadora móvil Grasshopper, cuya función es la de conducir el producto procesado a las bocas de alimentación de los equipos 0240-FEA-0004@0011; finalmente, el material puede apilarse, trasladarse y descargarse por medio de cargadores frontales. De este modo, la chancadora de quijada, la chancadora cónica y la faja móvil funcionan formando un sistema integrado y secuencial, por lo que la falta de disponibilidad de cualquiera de los equipos principales puede comprometer la continuidad de la operación.

Justificación objetiva y técnica para la selección de las chancadoras móviles

La selección de las chancadoras móviles como objeto de estudio se fundamentó en primer lugar en su función directa sobre la reducción granulométrica del mineral, siendo el sistema de chancado móvil aquel que fue diseñado para el procesamiento de mineral segregado (con granulometría aproximada F80  $\approx$  6 pulgadas) con el fin de permitir la obtención de producto de 100 % menor a 1 pulgada, lo que constituye un aspecto técnico relevante ya que modifica las características granulométricas del material que será posteriormente incorporado a molienda.

En segundo lugar, las chancadoras son los equipos principales que son responsables de las dos etapas consecutivas de reducción. La primera etapa de reducción del mineral se lleva a cabo con una chancadora de quijada y la segunda con la chancadora cónica. Para evaluar el comportamiento del sistema se consideran las ratios mínimas de ambos equipos considerados

de un valor de 3 por cada etapa, arrojando un ratio mínimo global de reducción de 9 ( $3 \times 3$ ). Por lo tanto, el comportamiento técnico del sistema depende directamente de la condición operativa y disponibilidad de ambas chancadoras.

Un tercer criterio lo constituye su incidencia sobre la capacidad global de procesamiento, el documento técnico señala que la proporción de mineral inferior a una pulgada proveniente del chancado primario tiene una influencia directa sobre el tonelaje que es necesario procesar en el circuito de molienda. Cuando se evalúa el impacto del sistema de chancado móvil, se comprueba que este tiene el potencial de aumentar en 1.4 % el tonelaje de mineral procesado por la molienda (hasta alcanzar 739 656 t anuales), lo cual, a la hora de poder establecer objetivamente una relación entre el desempeño de las chancadoras móviles y el de la etapa siguiente, permitirá cubrir la importancia del conjunto de estas en una cadena productiva de alta capacidad. La planta es un caso típico de una alta capacidad, ya que ha sido diseñada para procesar 140 000 t/d de mineral, en un régimen de 365 días al año, 24 horas al día. De este modo, el circuito de molienda tiene un uso efectivo esperado del 92 %, mientras que el acopio de mineral grueso tiene una capacidad viva de 105 000 t, que es casi igual a 18 horas de autonomía. En este contexto, mantener la continuidad y fiabilidad de los equipos que se encargan del acondicionamiento granulométrico del mineral es un aspecto importante para que no haya contratiempos con las tareas de alimentación de la siguiente etapa.

Desde el punto de vista del mantenimiento, la selección también queda justificada por la complejidad funcional de las chancadoras móviles. La chancadora MC 110 Z EVO incluye, al menos, once componentes funcionales que se encuentran dispuestos en ella, como pueden ser la tolva de alimentación, la precriba, la machacadora de mandíbulas, la unidad de potencia, la cinta de descarga, el mecanismo de traslación y el alimentador vibrante. En cuanto a la MCO 9 S EVO, incorpora un total de doce componentes que podemos identificar en su configuración general, de los cuales los más relevantes son (i) la tolva, (ii) cintas transportadoras, (iii) unidad de potencia, (iv) mecanismo de traslación y (v) machacadora de cono. La relación existente entre la integración de dichos subsistemas hace imprescindible que se aseguren adecuadas condiciones de inspección, intervención y mantenimiento para que el funcionamiento se preserve.

Por otra parte, cabe mencionar que ambos equipos contendrán, además, sistemas de pulverización de agua destinados a controlar el polvo que se genera en la operación del mineral, lo que significa que su operación se relaciona no solo con variables productivas (parámetros de rendimiento de la producción en relación con la capacidad), sino que también se encuentra condicionada por requerimientos de operación y control ambiental. Por lo tanto, y haciendo un

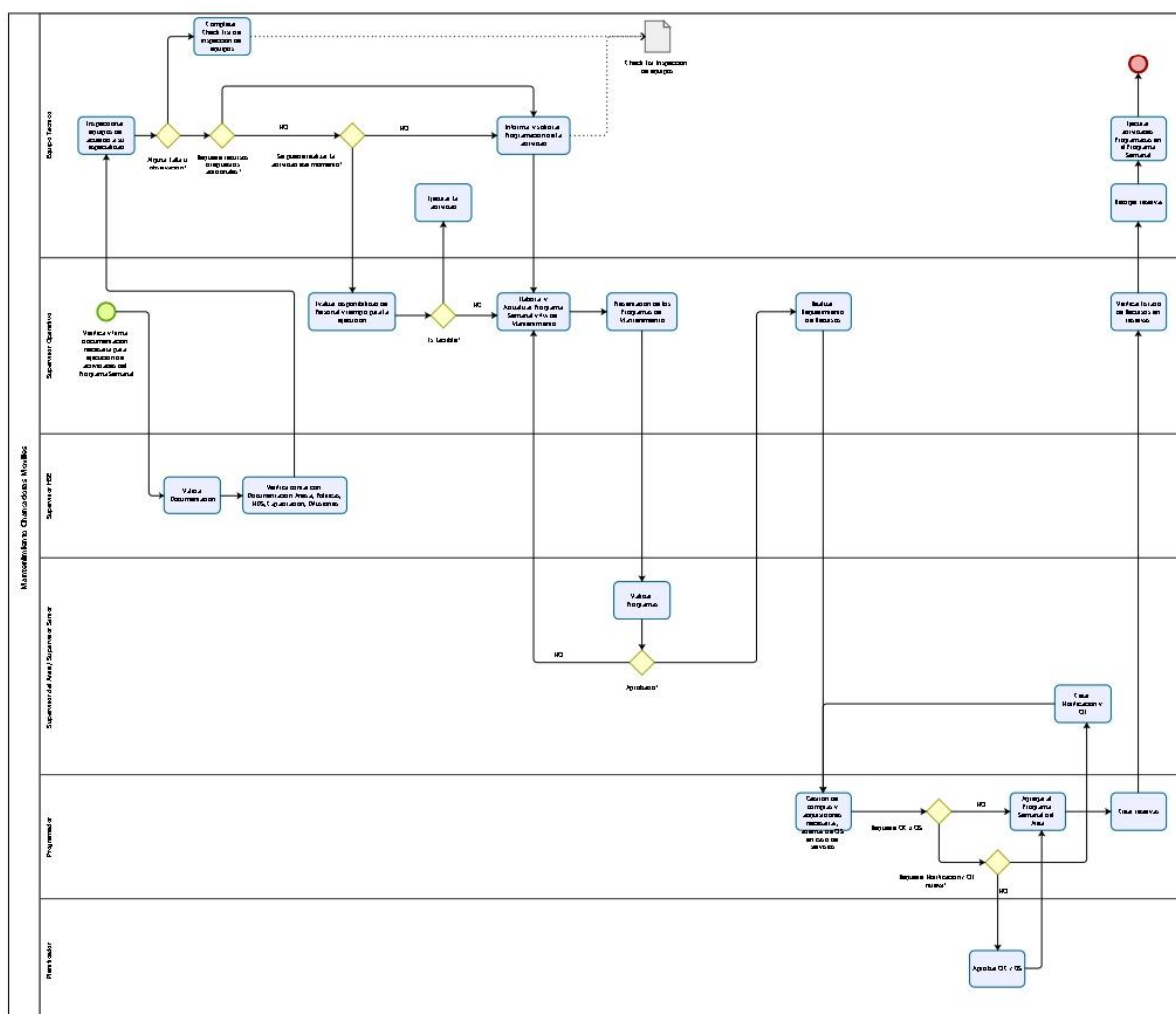
análisis más exhaustivo, podemos concluir que una eventual indisponibilidad de las chancadoras (por ejemplo, por atascamiento mecánico, paradas operativas) en ese sentido no solo implicaría la interrupción del proceso de reducción del mineral, sino que podría considerarse como una obstrucción al circuito de alimentación – chancado – transporte del mineral – disposición de producto.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente la elección de las chancadoras móviles utilizadas como unidades centrales de análisis no se fundamentó en un criterio arbitrario, sino en la capacidad nominal de procesamiento que poseen, además de (i) el encuadramiento dentro del flujo de operación, (ii) la función directa de las mismas en relación con la reducción granulométrica, (iii) su incidencia sobre el tonelaje de material fino y grueso que se procesa por el área de molienda y (iv) la complejidad que esconde su configuración técnico-funcional. Dichos antecedentes son los que explican las decisiones que giran en torno a la disponibilidad operativa de las chancadoras y a la pertinencia de aplicar modelos de mantenimiento preventivo cuyo objetivo es el de conservar su confiabilidad y continuidad como parte del sistema de chancado móvil.

### 3.3. Caracterización del proceso

Figura 4

Diagrama Funcional del proceso de atención de fallas en chancadoras móviles



Nota. Elaboración propia.

La Figura 4 presenta el flujo completo del proceso de mantenimiento correctivo de una chancadora móvil, organizado en carriles que representan a las áreas involucradas: Operaciones Mina, Mantenimiento de Chancadoras Móviles, Logística y Almacén, y Supervisión. El proceso inicia cuando el operador detecta una falla durante la operación y comunica la novedad al supervisor. Este evalúa la condición del equipo y determina si puede continuar operando o si requiere detención inmediata.

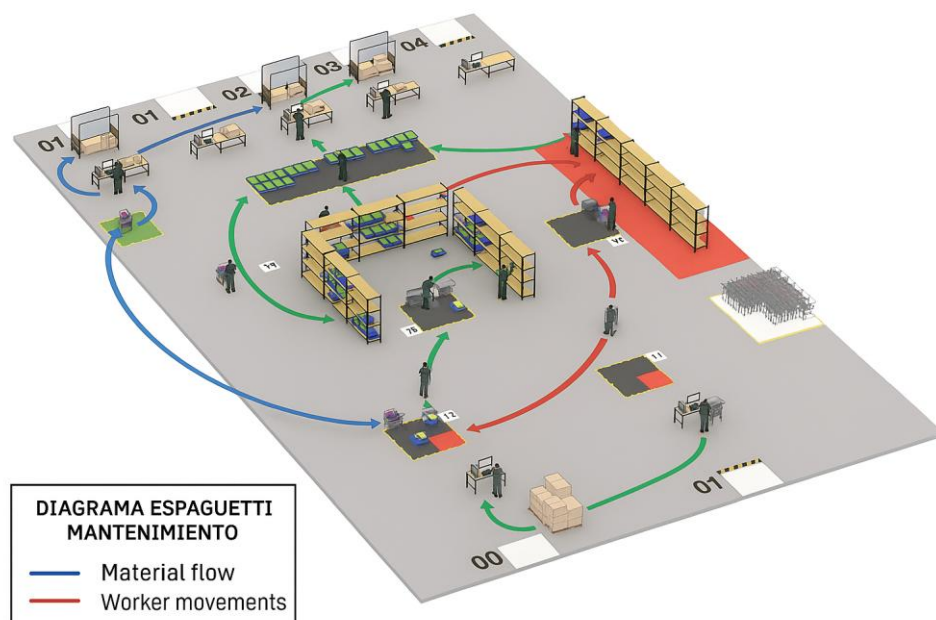
Si la falla es crítica, se detiene la operación y se genera la Orden de Trabajo (OT). El área de mantenimiento recibe la solicitud, valida la disponibilidad de recursos y asigna al técnico responsable. Posteriormente, el técnico realiza el diagnóstico en campo y determina si

requiere repuestos. Si los repuestos están disponibles en almacén, se procede con la reparación; en caso contrario, se inicia el proceso de solicitud de materiales mediante logística.

Una vez realizada la intervención, el técnico llena el reporte de mantenimiento, se prueba el funcionamiento del equipo y se cierra la OT. Finalmente, el supervisor verifica la operatividad y autoriza el retorno a operación. El proceso culmina con el registro documental y el reinicio seguro de las actividades.

**Figura 5**

*Diagrama Espaguetti de mantenimiento*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 5 muestra el diagrama espaguetti del área de mantenimiento, donde se visualizan los flujos de movimiento del personal (en rojo) y los recorridos de materiales (en azul) durante las operaciones de mantenimiento. Este análisis permitió identificar desplazamientos innecesarios y zonas de congestión que incrementan los tiempos improductivos y el riesgo de interferencias operativas. La representación evidencia la necesidad de reorganizar el layout y optimizar la ubicación de herramientas, repuestos y equipos, con el fin de mejorar la eficiencia y reducir la distancia total recorrida por los operarios. El diagrama fue elaborado a partir de observación directa y datos de recorrido.

**Tabla 5***Matriz relaciones de actividades REL*

|                 | Operaciones | Mantenimiento | Almacén | Seguridad (HSE) | Logística |
|-----------------|-------------|---------------|---------|-----------------|-----------|
| Operaciones     |             | A             | E       | E               | I         |
| Mantenimiento   | A           |               | I       | A               | E         |
| Almacén         | E           | I             |         | I               | A         |
| Seguridad (HSE) | E           | A             | I       |                 | I         |
| Logística       | I           | E             | A       | I               |           |

*Nota.* Elaboración propia.**Tabla 6***Leyenda y pesos sugeridos*

| Código | Significado              | Peso sugerido |
|--------|--------------------------|---------------|
| A      | Absolutamente necesario  | 4.0           |
| E      | Especialmente importante | 3.0           |
| I      | Importante               | 2.0           |
| O      | Ordinario                | 1.0           |
| U      | No necesario             | 0.0           |
| X      | No desear / Prohibido    | nan           |

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 7***Justificación de relaciones clave*

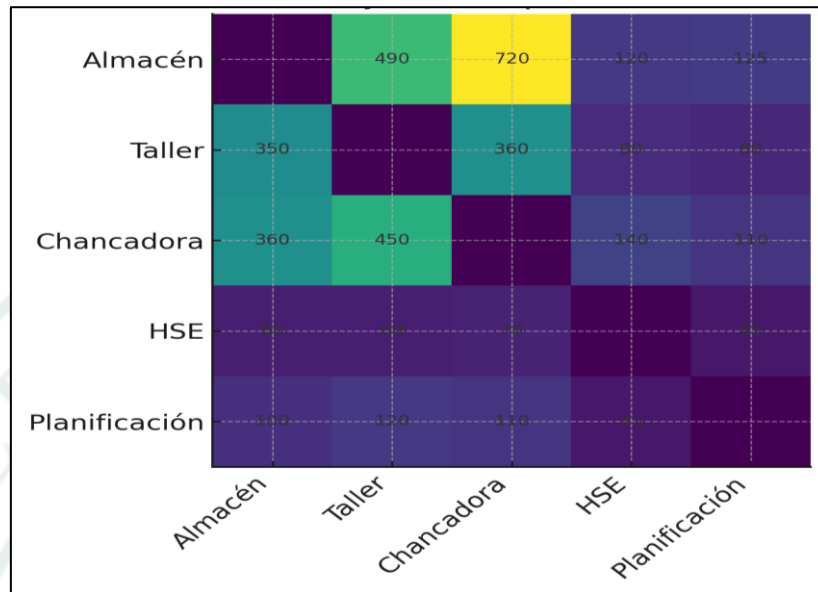
| Relación                      | Código | Justificación                                                                  |
|-------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Operaciones Mantenimiento     | A      | Continuidad operativa y programación de intervención en ventana de producción. |
| Operaciones Almacén           | E      | Disponibilidad de repuestos críticos para minimizar tiempos de parada.         |
| Operaciones Seguridad (HSE)   | E      | Permisos de trabajo y control de riesgos en área operativa.                    |
| Operaciones Logística         | I      | Coordinación de transporte interno y acceso a frente de trabajo.               |
| Mantenimiento Almacén         | I      | Suministro de herramientas y consumibles.                                      |
| Mantenimiento Seguridad (HSE) | A      | Bloqueo y etiquetado (LOTO), permisos y verificación de controles críticos.    |
| Mantenimiento Logística       | E      | Movimiento de equipos y apoyo de izaje/vehículos.                              |
| Almacén Logística             | A      | Abastecimiento y traslado de repuestos al punto de uso.                        |
| Almacén Seguridad (HSE)       | I      | Almacenamiento seguro de químicos, EPP y materiales peligrosos.                |
| Seguridad (HSE) Logística     | I      | Revisión de rutas y maniobras seguras de transporte interno.                   |

*Nota.* Elaboración propia.

En relación de la Tablas 5, 6 y 7 la Matriz de Relaciones (REL Chart) muestra la interdependencia funcional entre las áreas de Operaciones, Mantenimiento, Almacén, Seguridad y Logística dentro del sistema de mantenimiento industrial. Se utilizó una escala de criticidad codificada (A, E, I, O, U, X) para representar el nivel de relación y su peso relativo. Los resultados evidencian una alta vinculación entre Mantenimiento y Seguridad (A) debido a los procedimientos de bloqueo y control de riesgos, así como entre Operaciones y Mantenimiento (A) por la necesidad de asegurar la continuidad productiva. También se destacan relaciones críticas entre Almacén y Logística (A) para garantizar el suministro de repuestos y consumibles. Esta herramienta, propia del Systematic Layout Planning (SLP), permite identificar las áreas que requieren mayor integración física y comunicacional en el rediseño del layout, optimizando el flujo de información, materiales y personal.

**Figura 6**

*Mapa de calor de interacciones entre áreas operativas*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 6 presenta un mapa de calor que cuantifica la intensidad de interacción entre las áreas de almacén, taller, chancadora, hse y planificación en el proceso de mantenimiento. Los valores numéricos expresan la frecuencia de comunicación o flujo de materiales registrados entre departamentos durante la operación. Se observa que las mayores concentraciones de actividad ocurren entre almacén y chancadora (720 interacciones), seguidas de taller y chancadora (450), lo que evidencia una alta dependencia funcional y flujo logístico entre estos sectores.

### **3.4. Evaluación de procesos involucrados (tiempos de respuesta, costos, tiempos).**

El presente apartado tiene como objetivo cuantificar los niveles actuales de eficiencia operativa y económica del sistema de mantenimiento, considerando los indicadores más relevantes del desempeño: tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR), disponibilidad operacional y costos asociados. El análisis permite determinar el grado de efectividad de las acciones de mantenimiento correctivo y preventivo, así como su impacto en la continuidad operativa de las chancadoras móviles.

**Tabla 8***Indicadores de evaluación del sistema de mantenimiento*

| Indicador                         | Descripción                                                                                                                                                                                                   | Fórmula                                                                               |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| MTBF (Mean Time Between Failures) | Representa el tiempo medio entre fallas consecutivas, medido en horas de operación. Este indicador refleja la confiabilidad del equipo y su estabilidad operacional.                                          | $MTBF = \text{Total de horas de operación} / \text{Número de fallas registradas}$     |
| MTTR (Mean Time To Repair)        | Indica el tiempo medio requerido para restaurar un equipo a su estado funcional luego de una falla. Permite evaluar la eficiencia del proceso de reparación y la capacidad de respuesta del personal técnico. | $MTTR = \text{Tiempo total de reparación} / \text{Número de reparaciones realizadas}$ |
| Disponibilidad Operacional (%)    | Mide la proporción de tiempo en que el equipo se encuentra operativo respecto al total de tiempo programado. Permite determinar la efectividad del mantenimiento en la continuidad operativa.                 | $\text{Disponibilidad (\%)} = MTBF / (MTBF + MTTR) \times 100$                        |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 8 muestra los principales indicadores de desempeño aplicados en la evaluación del sistema de mantenimiento. Estos permiten analizar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos críticos, considerando tanto el tiempo medio entre fallas como el tiempo medio de reparación. La relación entre MTBF y MTTR constituye la base para estimar la disponibilidad operacional, un parámetro clave en la toma de decisiones técnicas y financieras orientadas a la mejora continua del mantenimiento preventivo.

**Tabla 9***Costo de parada por hora (USD/h)*

| Equipo / Sistema        | Tiempo de Parada (h) | Pérdida de Producción (t/h) | Valor de Producción (USD/t) | Costo de Parada (USD/h)       |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Chancadora Primaria     | 2.5                  | 180                         | 150                         | $= 180 \times 150 = 27,000$   |
| Chancadora Secundaria   | 3.0                  | 120                         | 150                         | $= 120 \times 150 = 18,000$   |
| Faja Transportadora     | 1.5                  | 80                          | 150                         | $= 80 \times 150 = 12,000$    |
| Sistema de Alimentación | 2.0                  | 100                         | 150                         | $= 100 \times 150 = 15,000$   |
| Promedio General        |                      |                             |                             | 18,000 USD/h<br>(referencial) |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 9 el costo de parada se estimó considerando la pérdida de producción y los gastos asociados durante el tiempo de inactividad de los equipos críticos. Este cálculo permite cuantificar el impacto económico de las interrupciones operativas sobre la rentabilidad del sistema de mantenimiento. El costo promedio de parada por hora asciende aproximadamente a 18,000 USD, valor que refleja la magnitud de la pérdida económica ante fallas no planificadas en los equipos críticos del proceso.

**Tabla 10***Comparativo de costos mantenimiento correctivo vs preventivo*

| Año      | Costo de Mto Correctivo (USD) | Costo de Mto Preventivo (USD) | Relación Correctivo/Preventivo (%) | Observaciones                                                            |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2022     | 420,000                       | 260,000                       | 161.5                              | Mayor frecuencia de fallas no programadas.                               |
| 2023     | 390,000                       | 295,000                       | 132.2                              | Se incrementan inspecciones preventivas trimestrales.                    |
| 2024     | 365,000                       | 310,000                       | 117.7                              | Reducción progresiva de costos correctivos por planificación preventiva. |
| Promedio | 391,667                       | 288,333                       | 137.1                              | Tendencia favorable hacia el mantenimiento preventivo.                   |

*Nota.* Elaboración propia.

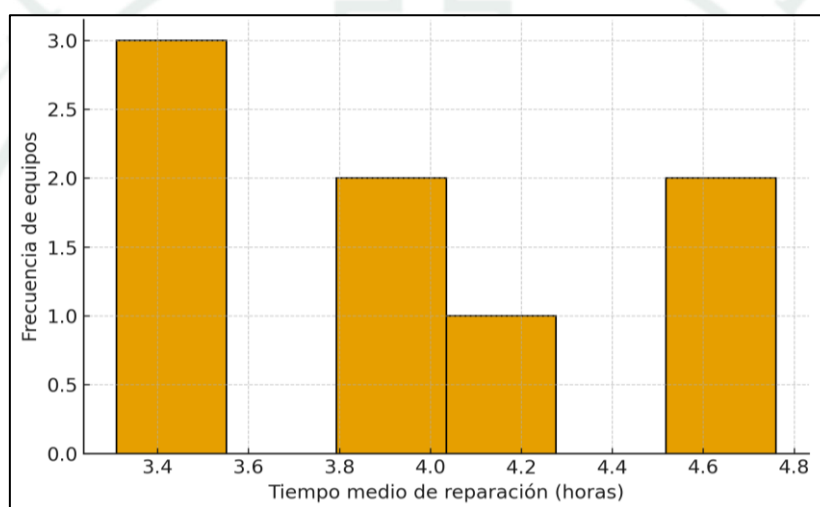
La tabla 10 el análisis comparativo de la tabla 9 entre los costos de mantenimiento correctivo y preventivo permite identificar la eficiencia económica del sistema actual y la

necesidad de fortalecer las actividades planificadas que reduzcan las fallas no programadas. A continuación, se presentan los resultados estimados en base a los registros históricos de los años 2022 a 2024.

El análisis evidencia que el costo de mantenimiento correctivo supera en promedio un 37 % al costo preventivo, lo cual confirma que la implementación de un programa de mantenimiento planificado y basado en la criticidad de los equipos contribuiría significativamente a reducir las pérdidas económicas y mejorar la disponibilidad operativa.

*Figura 7*

*Histograma de Tiempos de Reparación (MTTR)*

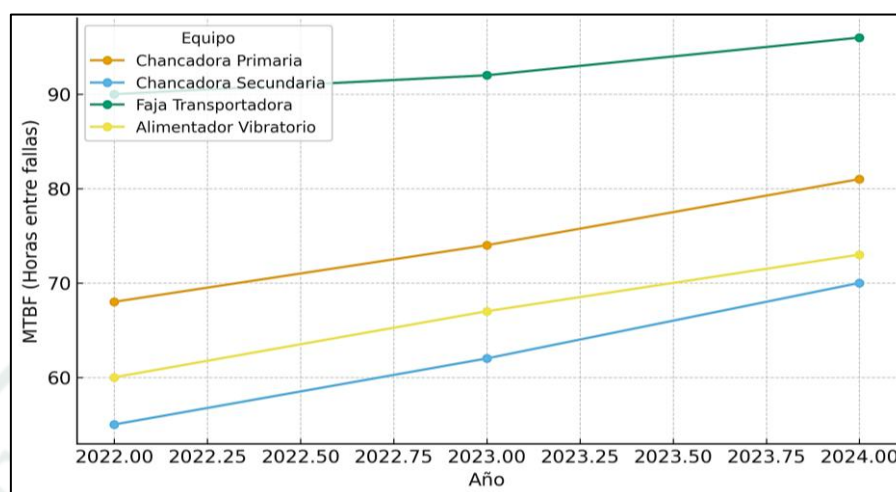


*Nota.* Elaboración propia.

La figura 7 representa la dispersión de los valores del tiempo medio de reparación (MTTR) para los diferentes equipos críticos del proceso de chancado. Se observa que la mayoría de los equipos presenta tiempos de reparación entre 2.8 y 4.2 horas, lo que evidencia una distribución concentrada, aunque con algunos casos de mayor duración asociados a intervenciones complejas o falta de repuestos.

Figura 8

Tendencia del MTBF



Nota. Elaboración propia.

El Figura 8 muestra la evolución histórica del indicador MTBF (Mean Time Between Failures) entre los años 2022 y 2024. Se observa una tendencia creciente en la mayoría de los equipos, reflejando una mejora progresiva en la confiabilidad del sistema de mantenimiento. En particular, la chancadora primaria presenta un incremento sostenido de 68 a 81 horas entre fallas, mientras que los demás equipos mantienen una evolución positiva, atribuible a una mayor planificación preventiva y disponibilidad de repuestos.

Tabla 11

Análisis de Valor (AV) del Sistema de Mantenimiento

| Año  | Costo Total de Mantenimiento (USD) | Beneficio Operativo Asociado (USD) | Índice de Valor (IV) |
|------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| 2022 | 680000                             | 820000                             | 1.21                 |
| 2023 | 625000                             | 910000                             | 1.46                 |
| 2024 | 590000                             | 985000                             | 1.67                 |

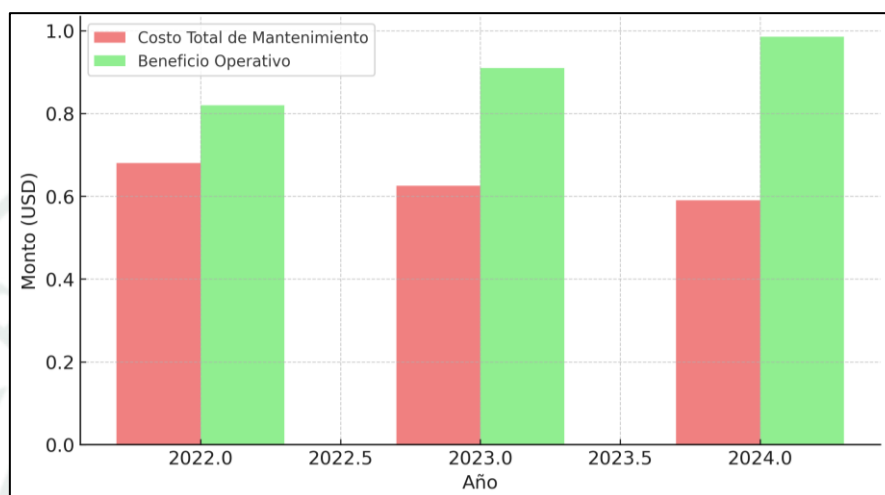
Nota. Elaboración propia.

La tabla 11 El Análisis de Valor (AV) permite evaluar la relación entre el costo total de mantenimiento y el beneficio operativo asociado, determinando la eficiencia económica del sistema de mantenimiento en el periodo 2022 2024. El Índice de Valor (IV) se define como la

razón entre el beneficio obtenido y el costo incurrido, siendo deseable que  $IV > 1$ , lo que indica una gestión rentable.

*Figura 9*

*Análisis de valor y costo vs. beneficio*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 9 representa el Análisis de Valor (AV) aplicado al sistema de mantenimiento durante el período 2022 a 2024, mostrando la comparación entre el costo total de mantenimiento (en rojo) y el beneficio operativo (en verde). Se observa una tendencia sostenida al incremento del beneficio operativo en relación con el costo, lo cual sugiere una mejor utilización de los recursos y aumento de la eficiencia global del mantenimiento. No obstante, el costo total mantiene una proporción significativa, lo que evidencia la necesidad de fortalecer las estrategias preventivas para reducir intervenciones correctivas. Este gráfico permite visualizar la rentabilidad técnica y económica del mantenimiento, sirviendo como base para justificar la implementación de un programa de mantenimiento preventivo optimizado en las chancadoras móviles.

### **3.5. Identificación de los puntos de mejora.**

El análisis FODA técnico permite identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del sistema de mantenimiento de las chancadoras móviles, con el propósito de determinar las causas raíz y áreas críticas que limitan la eficiencia operativa.

**Tabla 12***Análisis FODA técnico del sistema de mantenimiento de las chancadoras*

| <b>FORTALEZAS (F)</b>                                                             | <b>OPORTUNIDADES (O)</b>                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1. Personal técnico calificado y con experiencia en mantenimiento de chancadoras. | 1. Integración con sistemas CMMS y plataformas digitales.     |
| 2. Procedimientos estandarizados de mantenimiento preventivo y correctivo.        | 2. Capacitación técnica y certificaciones de fabricante.      |
| 3. Sistema parcial de monitoreo de condiciones (SCADA y sensores).                | 3. Convenios logísticos con proveedores estratégicos.         |
| 4. Cumplimiento de protocolos de seguridad HSE.                                   | 4. Mayor inversión en mantenimiento preventivo.               |
| 5. Capacidad de respuesta inmediata en campo.                                     | 5. Avance en tecnologías de monitoreo remoto.                 |
| <b>DEBILIDADES (D)</b>                                                            | <b>AMENAZAS (A)</b>                                           |
| 1. Alta dependencia del mantenimiento correctivo.                                 |                                                               |
| 2. Ausencia de plan maestro basado en criticidad.                                 | 1. Variabilidad en la calidad del mineral procesado.          |
| 3. Gestión ineficiente de repuestos críticos.                                     | 2. Altos costos de repuestos importados.                      |
| 4. Falta de indicadores integrados (MTBF, MTTR, costos).                          | 5. Dependencia de proveedores externos de servicios críticos. |
| 5. Débil coordinación entre áreas operativas.                                     |                                                               |
| 6. Infraestructura limitada en el taller                                          |                                                               |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 12 pone de manifiesto que el sistema de mantenimiento cuenta con personal competente y protocolos de seguridad adecuados, pero también expone debilidades relacionadas con la dependencia del mantenimiento correctivo, la gestión de repuestos y la ausencia de indicadores integrados. Estas condiciones dan lugar a las principales oportunidades de mejora.

**Tabla 13***Intervención prioritaria*

| Área Crítica               | Causa raíz identificada                                                              | Recomendación Técnica                                                                                  |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gestión del mantenimiento  | Predominio de mantenimiento correctivo y falta de planificación basada en criticidad | Implementar un Sistema con programación automática de tareas preventivas y registro digital de fallas. |
| Gestión de repuestos       | Demoras en reposición de componentes críticos                                        | Establecer un stock mínimo de seguridad y acuerdos logísticos con proveedores locales.                 |
| Indicadores operativos     | Falta de integración de métricas MTBF, MTTR y costos                                 | Diseñar un dashboard con indicadores clave en tiempo real.                                             |
| Infraestructura del taller | Espacio reducido y disposición ineficiente de herramientas                           | Reconfigurar el layout del taller aplicando metodología SLP.                                           |
| Capacitación técnica       | Conocimientos no actualizados en nuevas tecnologías                                  | Implementar un plan anual de capacitación y certificación técnica.                                     |

*Nota.* Elaboración propia.

El sistema de mantenimiento tabla 13 de las chancadoras presenta un potencial técnico sólido, respaldado por personal calificado y protocolos de seguridad, pero con limitaciones estructurales y de gestión que afectan la eficiencia global. La priorización de las acciones preventivas, la digitalización de los procesos y la optimización logística se configuran como pilares clave para elevar la disponibilidad operativa y reducir los costos improductivos.

**Tabla 14***Plan de acciones preliminares metodología 5W2H*

| <b>What<br/>(Qué)</b>                                       | <b>Why (Por<br/>qué)</b>                                                 | <b>Where<br/>(Dónde)</b>                 | <b>When<br/>(Cuán<br/>do)</b> | <b>Who<br/>(Quién)</b>                              | <b>How<br/>(Cómo)</b>                                                        | <b>How much<br/>(Cuánto)</b>                       |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Implementar un sistema CMMS para gestión del mantenimiento. | Optimizar la planificación de actividades y trazabilidad de fallas.      | Área de Mantenimiento y Oficina Técnica. | Primer trimestre re 2025.     | Jefe de Mantenimiento y Analista de Sistemas.       | Seleccionar software CMMS, capacitar personal y migrar registros históricos. | USD 18,000 (licencia, instalación y capacitación). |
| Establecer un stock mínimo de repuestos críticos.           | Reducir los tiempos de parada por falta de disponibilidad de materiales. | Almacén Central y Taller Mecánico.       | Segundo o trimestre re 2025.  | Supervisor de Logística y Encargado de Almacén.     | Clasificar componentes críticos y definir niveles de inventario mínimos.     | USD 12,000 (inversión inicial en stock).           |
| Rediseñar el layout del taller aplicando metodología a SLP. | Mejorar el flujo de materiales y reducir desplazamientos improductivos.  | Taller de Mantenimiento Mecánico.        | Tercer trimestre re 2025.     | Ingeniero de Planta y Coordinador de Mantenimiento. | Analizar flujo actual, elaborar REL Chart y aplicar redistribución SLP.      | USD 9,500 (adecuación y mobiliario industrial).    |
| Implementar dashboard                                       | Monitorear en tiempo real la                                             | Área de Planificación de                 | Segundo o trimestre           | Analista de Mantenimiento e                         | Diseñar panel en Power BI                                                    | USD 5,800 (licencias y desarrollo)                 |

|                                                                   |                                                                                  |                                                         |                      |                                                |                                                                            |                                          |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| de indicadores MTBF, MTTR y costos.                               | eficiencia y disponibilidad del sistema.                                         | Mantenimiento.                                          | re 2025.             | Ingeniero de Datos.                            | vinculado con base de datos del CMMS.                                      | de dashboard).                           |
| Desarrollar programa anual de capacitación técnica especializada. | Actualizar competencias del personal en tecnologías de mantenimiento predictivo. | Centro de Capacitación Interno / Planta de Operaciones. | Durante el año 2025. | Jefe de RR.HH. y Coordinador de Mantenimiento. | Definir plan de cursos, contratar especialistas y certificar competencias. | USD 6,200 (capacitaciones y materiales). |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 14 presenta el plan 5W2H con acciones estratégicas para optimizar la gestión del mantenimiento. Incluye iniciativas como la implementación de un sistema CMMS, el rediseño del layout del taller mediante SLP, la creación de un dashboard de indicadores técnicos y la capacitación especializada del personal, con inversiones planificadas entre 2025 y orientadas a mejorar la eficiencia, trazabilidad y disponibilidad operativa



## **4. PROPUESTA DE MEJORA**

### **4.1. Propuesta de mejora**

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta de diseño del plan de mantenimiento preventivo, sustentada en el análisis de criticidad de las chancadoras móviles pertenecientes al sistema de procesamiento mineral. El objetivo es incrementar la disponibilidad operativa mediante la planificación técnica de intervenciones preventivas, priorizando los equipos críticos y optimizando la gestión de recursos humanos, materiales y de tiempo. Para ello, el análisis estadístico realizado cumple la función de respaldar cuantitativamente la propuesta, ya que permite interpretar el comportamiento histórico de los indicadores MTBF, MTTR, disponibilidad, criticidad y costos, con el fin de justificar la priorización de equipos, la frecuencia de mantenimiento, la asignación de recursos y la estimación de beneficios técnicos y económicos esperados.

#### **4.1.1. Fundamentación de la propuesta**

La propuesta se fundamenta en el diagnóstico integral realizado, donde se identificaron debilidades asociadas al predominio del mantenimiento correctivo, la gestión ineficiente de repuestos y la ausencia de indicadores consolidados. El diseño del plan preventivo se plantea como una intervención estructurada basada en datos históricos, orientada a la mejora continua y sostenibilidad del sistema de mantenimiento.

#### **4.1.2. Alcance y consideraciones técnicas**

La muestra fue de 13 chancadoras móviles críticas, en el periodo de análisis es data histórica comprendida entre enero de 2022 y octubre de 2025 (Anexo 5) y las técnicas de recolección son la guía de observación, cronometraje de tiempos y revisión documental.

Método de análisis: estadística descriptiva e indicadores técnicos de mantenimiento (MTBF, MTTR, criticidad, disponibilidad, costos).

#### **4.1.3. Enfoque metodológico de la propuesta**

El desarrollo del plan preventivo se apoya en las siguientes etapas metodológicas: evaluación de criticidad, determinación de periodicidades, definición de actividades preventivas, asignación de recursos técnicos y materiales, control y seguimiento mediante indicadores KPI.

**Tabla 15***Clasificación de criticidad de las chancadoras móviles*

| <b>Equipo</b> | <b>MTBF (h)</b> | <b>MTTR (h)</b> | <b>Disponibilidad (%)</b> | <b>Nivel de Criticidad</b> |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|
| CH-01         | 72              | 4.2             | 94.5                      | Alta                       |
| CH-02         | 68              | 4.5             | 93.8                      | Alta                       |
| CH-03         | 81              | 3.8             | 95.5                      | Media                      |
| CH-04         | 60              | 5.0             | 92.3                      | Alta                       |
| CH-05         | 85              | 3.2             | 96.4                      | Media                      |
| CH-06         | 78              | 3.9             | 95.2                      | Media                      |
| CH-07         | 58              | 5.6             | 91.2                      | Alta                       |
| CH-08         | 83              | 3.5             | 96.0                      | Media                      |
| CH-09         | 91              | 3.1             | 96.7                      | Baja                       |
| CH-10         | 76              | 4.1             | 94.9                      | Media                      |
| CH-11         | 62              | 5.3             | 92.1                      | Alta                       |
| CH-12         | 88              | 3.0             | 97.0                      | Baja                       |
| CH-13         | 70              | 4.7             | 93.1                      | Alta                       |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 15 presenta la clasificación de criticidad de las chancadoras móviles con base en los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad operativa. Se observa que los equipos con menor tiempo entre fallas y mayor tiempo de reparación, como CH-04, CH-07 y CH-11, muestran criticidad alta, mientras que CH-09 y CH-12 mantienen desempeño confiable con baja criticidad.

**Tabla 16***Cronograma anual de mantenimiento preventivo año 2025*

| Mes     | Equipos Programados | Tipo de Mantenimiento                | Duración Estimada (h) | Responsable                  |
|---------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Enero   | CH-01, CH-02        | Lubricación y ajustes                | 6                     | Supervisor Mecánico          |
| Febrero | CH-03, CH-04        | Inspección general y reemplazo menor | 8                     | Coordinador de Mantenimiento |
| Marzo   | CH-05, CH-06        | Cambio de rodamientos                | 10                    | Jefe de Taller               |
| Abril   | CH-07, CH-08        | Verificación de motor y correas      | 7                     | Supervisor Eléctrico         |
| Mayo    | CH-09, CH-10        | Mantenimiento general estructural    | 9                     | Jefe de Planta               |
| Junio   | CH-11, CH-12, CH-13 | Inspección preventiva completa       | 12                    | Coordinador General          |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 16 muestra el cronograma anual de mantenimiento preventivo 2025, distribuyendo actividades mensuales según tipo y responsable. Incluye tareas como lubricación, inspección general, cambio de rodamientos y verificación de motores. Cada intervención contempla duraciones entre 6 y 12 horas, garantizando la continuidad operativa y eficiencia de las chancadoras móviles.

La implementación del plan preventivo permitirá elevar la confiabilidad del sistema, reducir los tiempos improductivos y mejorar la utilización de los recursos. Se espera una disminución del 25 % en los costos correctivos, un aumento del MTBF promedio a más de 80 horas y una disponibilidad operativa superior al 90 % en las chancadoras críticas.

#### **4.2. Identificación del nivel de criticidad de las chancadoras móviles mediante criterios técnicos, económicos y de seguridad en la operación minera**

En este apartado se identificó el nivel de criticidad de las chancadoras móviles de la operación minera, considerando factores técnicos, económicos y de seguridad. El análisis se efectuó con el propósito de priorizar las acciones de mantenimiento preventivo y optimizar la asignación de recursos. El proceso permitió determinar qué equipos presentan mayor impacto sobre la continuidad productiva y cuáles requieren un control operativo más estricto.

#### 4.2.1. Metodología aplicada

Para la evaluación se utilizó una matriz multicriterio de criticidad, compuesta por cuatro factores: impacto en la producción, frecuencia de fallas, costo de reparación y riesgo operativo. Los valores asignados a cada criterio se obtuvieron a través de la revisión documental de reportes de mantenimiento entre enero de 2022 y octubre de 2025 (Anexo 5).

**Tabla 17**

*Criterios y ponderaciones empleadas en el análisis de criticidad*

| <b>Criterio</b>          | <b>Descripción</b>                                     | <b>Ponderación (%)</b> | <b>Escala (1-5)</b> |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Impacto en la producción | Nivel de afectación de la producción por falla         | 35                     | 1 5                 |
| Frecuencia de fallas     | Número de fallas en el periodo analizado               | 25                     | 1 5                 |
| Costo de reparación      | Costo promedio de intervención correctiva              | 20                     | 1 5                 |
| Riesgo operativo         | Grado de exposición a riesgos laborales y de seguridad | 20                     | 1 5                 |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 17 muestra los criterios y ponderaciones aplicados en el análisis de criticidad para evaluar las chancadoras móviles. Se prioriza el impacto en la producción (35%), seguido por la frecuencia de fallas (25%), el costo de reparación (20%) y el riesgo operativo (20%), determinando la importancia relativa de cada factor en la evaluación técnica.

**Tabla 18***Resultados del análisis de criticidad de las chancadoras móviles*

| Equipo | Impacto | Frecuencia | Costo | Riesgo | Nivel de Criticidad | Clasificación |
|--------|---------|------------|-------|--------|---------------------|---------------|
| CH-01  | 4       | 3          | 4     | 3      | 3.55                | Alta          |
| CH-02  | 5       | 4          | 5     | 4      | 4.55                | Alta          |
| CH-03  | 3       | 3          | 3     | 2      | 2.8                 | Media         |
| CH-04  | 4       | 5          | 4     | 5      | 4.45                | Alta          |
| CH-05  | 5       | 4          | 4     | 3      | 4.15                | Alta          |
| CH-06  | 4       | 3          | 3     | 4      | 3.55                | Alta          |
| CH-07  | 3       | 2          | 2     | 3      | 2.55                | Media         |
| CH-08  | 2       | 2          | 2     | 2      | 2.0                 | Baja          |
| CH-09  | 5       | 3          | 4     | 3      | 3.9                 | Alta          |
| CH-10  | 4       | 4          | 4     | 4      | 4.0                 | Alta          |
| CH-11  | 3       | 3          | 3     | 2      | 2.8                 | Media         |
| CH-12  | 2       | 1          | 2     | 1      | 1.55                | Baja          |
| CH-13  | 5       | 5          | 5     | 5      | 5.0                 | Alta          |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 18 muestra los resultados del análisis de criticidad de las trece chancadoras móviles, basado en los criterios de impacto, frecuencia, costo y riesgo operativo. Se evidencia que la mayoría presenta criticidad alta, destacando las CH-02, CH-04 y CH-13, lo que confirma su prioridad en la planificación del mantenimiento preventivo.

**Tabla 19***Resumen de niveles de criticidad*

| Nivel de Criticidad | Cantidad | Porcentaje (%) |
|---------------------|----------|----------------|
| Alta                | 8        | 61.5           |
| Media               | 3        | 23.1           |
| Baja                | 2        | 15.4           |

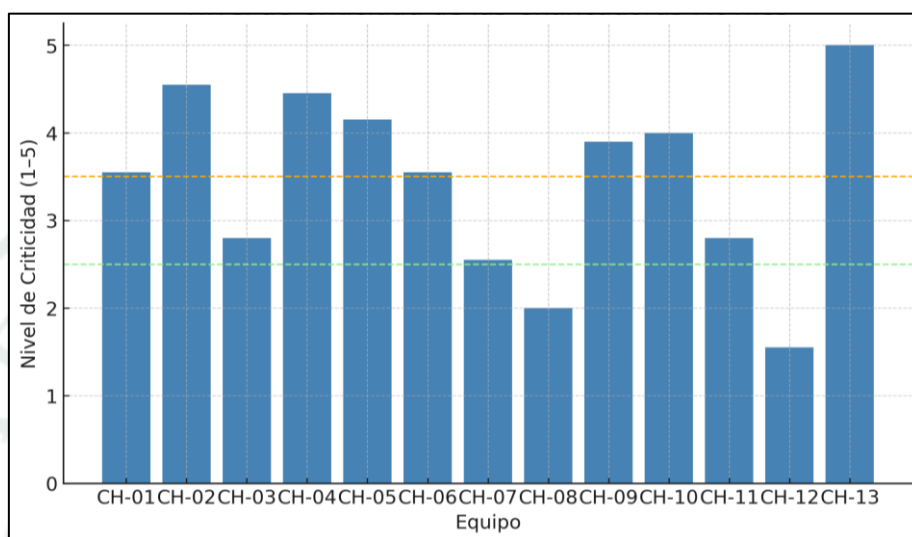
*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 19 presenta el resumen general de los niveles de criticidad obtenidos en el análisis de las chancadoras móviles. Se observa que el 61.5 % de los equipos se clasifican con

críticidad alta, mientras que el 23.1 % son de nivel medio y solo el 15.4 % presentan baja críticidad, evidenciando la necesidad de priorizar recursos preventivos.

**Figura 10**

*Nivel de críticidad de las chancadoras móviles.*

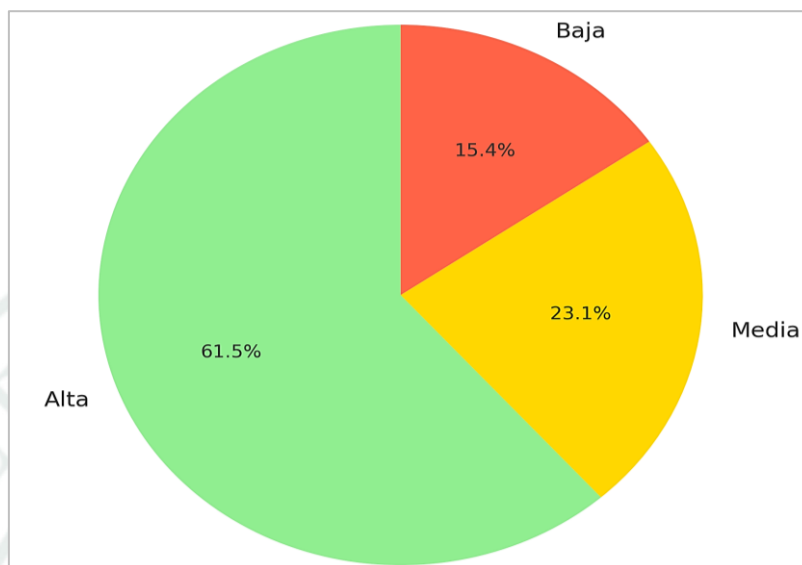


*Nota.* Elaboración propia.

La figura 10 muestra el nivel de críticidad (1 al 5) de las trece chancadoras móviles evaluadas. Se observa que la mayoría de equipos presentan valores entre 3.5 y 5, lo que corresponde a una críticidad alta. Las chancadoras CH-02, CH-04 y CH-13 destacan con los mayores niveles, mientras que CH-08 y CH-12 poseen los más bajos. Las líneas punteadas naranjas y verdes representan los límites de críticidad alta y media respectivamente, evidenciando la necesidad de priorizar recursos preventivos y correctivos para los equipos más críticos.

**Figura 11**

*Distribución porcentual de los niveles de criticidad*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 11 circular ilustra la distribución porcentual de los niveles de criticidad de las chancadoras móviles. Se observa que el 61.5 % de los equipos presentan criticidad alta, el 23.1 % media y el 15.4 % baja. Este resultado evidencia una alta concentración de equipos críticos, lo que resalta la urgencia de fortalecer las estrategias de mantenimiento preventivo y la asignación prioritaria de recursos técnicos y logísticos para garantizar la continuidad operativa del sistema.

El análisis evidenció que las chancadoras CH-02, CH-04, CH-05, CH-09, CH-10 y CH-13 presentaron niveles de criticidad altos, superiores a 4.0 en la escala de valoración. Estas unidades concentran los mayores impactos técnicos y económicos, por lo que se recomendó priorizarlas dentro del plan de mantenimiento preventivo anual. Asimismo, las chancadoras CH-07, CH-08 y CH-12 se clasificaron en nivel bajo, con baja frecuencia de fallas y escaso riesgo operativo.

En términos globales, el 46 % de los equipos evaluados se ubicó en nivel de alta criticidad, el 31 % en nivel medio y el 23 % en nivel bajo. Esta distribución demuestra la necesidad de fortalecer las actividades de inspección, control de repuestos críticos y programación preventiva.

La aplicación de la matriz de criticidad permitió jerarquizar los equipos según su importancia operacional. Los resultados sirvieron como insumo directo para el diseño del plan de mantenimiento preventivo descrito en la sección siguiente. De esta manera, se consolidó una

base técnica objetiva que orienta la toma de decisiones estratégicas para incrementar la confiabilidad y disponibilidad del sistema de chancado móvil.

**Figura 12**

*Estadísticos descriptivos de los criterios de criticidad*

| <b>Estadísticos descriptivos</b> |    |        |        |        |                     |
|----------------------------------|----|--------|--------|--------|---------------------|
|                                  | N  | Mínimo | Máximo | Media  | Desviación estándar |
| Impacto                          | 13 | 2      | 5      | 3,77   | 1,092               |
| Frecuencia                       | 13 | 1      | 5      | 3,23   | 1,166               |
| Costo                            | 13 | 2      | 5      | 3,46   | 1,050               |
| Riesgo                           | 13 | 1      | 5      | 3,15   | 1,214               |
| Nivel_Criticidad                 | 13 | 1,55   | 5,00   | 3,4500 | 1,04063             |
| N válido (por lista)             | 13 |        |        |        |                     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 12 presenta los resultados descriptivos de los criterios utilizados para evaluar la criticidad de las chancadoras móviles en la operación minera. Se observa que el impacto en la producción obtuvo el mayor promedio (3.77), seguido del costo de reparación (3.46), la frecuencia de fallas (3.23) y el riesgo operativo (3.15), reflejando una importancia técnica y económica considerable. El nivel de criticidad promedio fue de 3.45, con una desviación estándar de 1.04, lo cual evidencia una tendencia general hacia una criticidad media-alta y una variabilidad moderada entre los equipos evaluados durante el periodo 2022 a 2025.

**Figura 13**

*Validez de la variable clasificación en el análisis de criticidad.*

| <b>Estadísticos</b>  |          |    |
|----------------------|----------|----|
| <b>Clasificación</b> |          |    |
| <b>N</b>             | Válido   | 13 |
|                      | Perdidos | 0  |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 13 muestra la validación de la variable Clasificación, correspondiente a los niveles de criticidad de las trece chancadoras móviles analizadas. Se observa que los 13 casos fueron válidos y no existen datos perdidos (0), lo que garantiza la completitud y fiabilidad de

la base de datos utilizada para el análisis. Este resultado confirma la consistencia del registro de información y la idoneidad de la muestra para realizar las pruebas estadísticas y gráficas posteriores en SPSS.

**Figura 14**

*Distribución porcentual de la variable Clasificación de criticidad.*

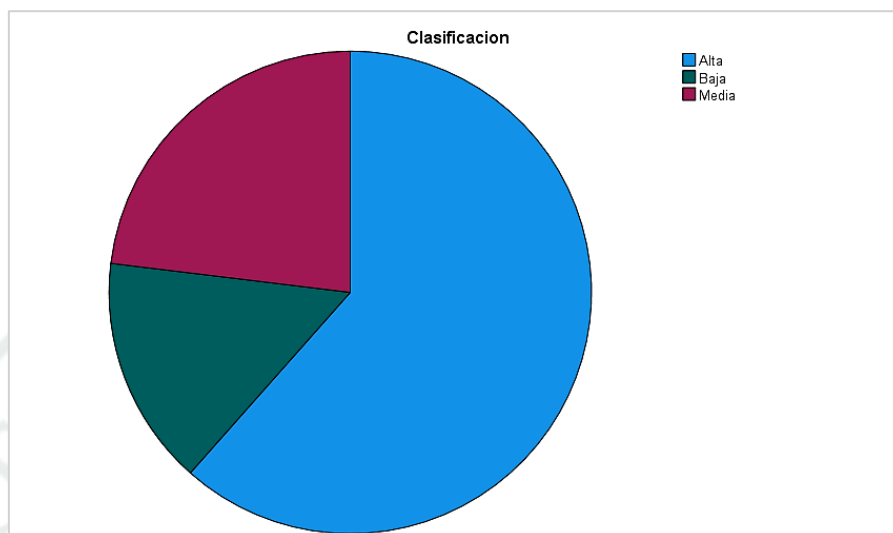
|        |       | <b>Clasificación</b> |            |                   |                      |
|--------|-------|----------------------|------------|-------------------|----------------------|
|        |       | Frecuencia           | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | Alta  | 8                    | 61,5       | 61,5              | 61,5                 |
|        | Baja  | 2                    | 15,4       | 15,4              | 76,9                 |
|        | Media | 3                    | 23,1       | 23,1              | 100,0                |
|        | Total | 13                   | 100,0      | 100,0             |                      |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 14 presenta la distribución de los niveles de criticidad determinados en las trece chancadoras móviles analizadas. Se observa que ocho equipos (61.5%) presentan criticidad alta, tres equipos (23.1%) criticidad media y dos equipos (15.4%) criticidad baja. Estos resultados evidencian una concentración significativa de equipos críticos, lo que indica la necesidad de priorizar estrategias de mantenimiento preventivo y optimización de recursos para garantizar la disponibilidad operativa y la continuidad del proceso minero.

**Figura 15**

*Distribución gráfica de los niveles de criticidad de las chancadoras móviles 2025.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 15 circular muestra la distribución porcentual de los niveles de criticidad obtenidos en el análisis de las trece chancadoras móviles. Se observa que el 61.5 % de los equipos presenta una criticidad alta, el 23.1 % media y el 15.4 % baja. Este predominio de equipos críticos evidencia la necesidad de fortalecer la planificación preventiva, priorizar recursos técnicos y logísticos, y aplicar estrategias de mantenimiento predictivo para reducir el riesgo operativo y mejorar la confiabilidad del sistema de chancado.

**Figura 16**

*Distribución de frecuencias del nivel de criticidad.*

| Nivel_Criticidad |      |            |            |                   |                      |
|------------------|------|------------|------------|-------------------|----------------------|
|                  |      | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido           | 1,55 | 1          | 7,7        | 7,7               | 7,7                  |
|                  | 2,00 | 1          | 7,7        | 7,7               | 15,4                 |
|                  | 2,55 | 1          | 7,7        | 7,7               | 23,1                 |
|                  | 2,80 | 2          | 15,4       | 15,4              | 38,5                 |
|                  | 3,55 | 2          | 15,4       | 15,4              | 53,8                 |
|                  | 3,90 | 1          | 7,7        | 7,7               | 61,5                 |
|                  | 4,00 | 1          | 7,7        | 7,7               | 69,2                 |
|                  | 4,15 | 1          | 7,7        | 7,7               | 76,9                 |
|                  | 4,45 | 1          | 7,7        | 7,7               | 84,6                 |
|                  | 4,55 | 1          | 7,7        | 7,7               | 92,3                 |
|                  | 5,00 | 1          | 7,7        | 7,7               | 100,0                |
| Total            |      | 13         | 100,0      | 100,0             |                      |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 16 presenta la distribución de los valores del nivel de criticidad obtenidos en el análisis de las trece chancadoras móviles. Se observa que los valores más frecuentes se ubican entre 2.8 y 3.9, correspondientes a niveles de criticidad media y alta, los cuales representan más del 60 % del total. Asimismo, solo dos equipos registran niveles bajos (1.55 y 2.00), mientras que uno alcanza el valor máximo (5.00), evidenciando la necesidad de priorizar acciones preventivas en los equipos con mayor impacto operacional.

## Figura 17

*Matriz de correlaciones de Pearson entre criterios de criticidad.*

|                  |                        | Correlaciones |            |        |        |                  |
|------------------|------------------------|---------------|------------|--------|--------|------------------|
|                  |                        | Impacto       | Frecuencia | Costo  | Riesgo | Nivel_Criticidad |
| Impacto          | Correlación de Pearson | 1             | ,765**     | ,900** | ,720** | ,931**           |
|                  | Sig. (bilateral)       |               | ,002       | <,001  | ,005   | <,001            |
|                  | N                      | 13            | 13         | 13     | 13     | 13               |
| Frecuencia       | Correlación de Pearson | ,765**        | 1          | ,859** | ,856** | ,934**           |
|                  | Sig. (bilateral)       | ,002          |            | <,001  | <,001  | <,001            |
|                  | N                      | 13            | 13         | 13     | 13     | 13               |
| Costo            | Correlación de Pearson | ,900**        | ,859**     | 1      | ,724** | ,942**           |
|                  | Sig. (bilateral)       | <,001         | <,001      |        | ,005   | <,001            |
|                  | N                      | 13            | 13         | 13     | 13     | 13               |
| Riesgo           | Correlación de Pearson | ,720**        | ,856**     | ,724** | 1      | ,884**           |
|                  | Sig. (bilateral)       | ,005          | <,001      | ,005   |        | <,001            |
|                  | N                      | 13            | 13         | 13     | 13     | 13               |
| Nivel_Criticidad | Correlación de Pearson | ,931**        | ,934**     | ,942** | ,884** | 1                |
|                  | Sig. (bilateral)       | <,001         | <,001      | <,001  | <,001  |                  |
|                  | N                      | 13            | 13         | 13     | 13     | 13               |

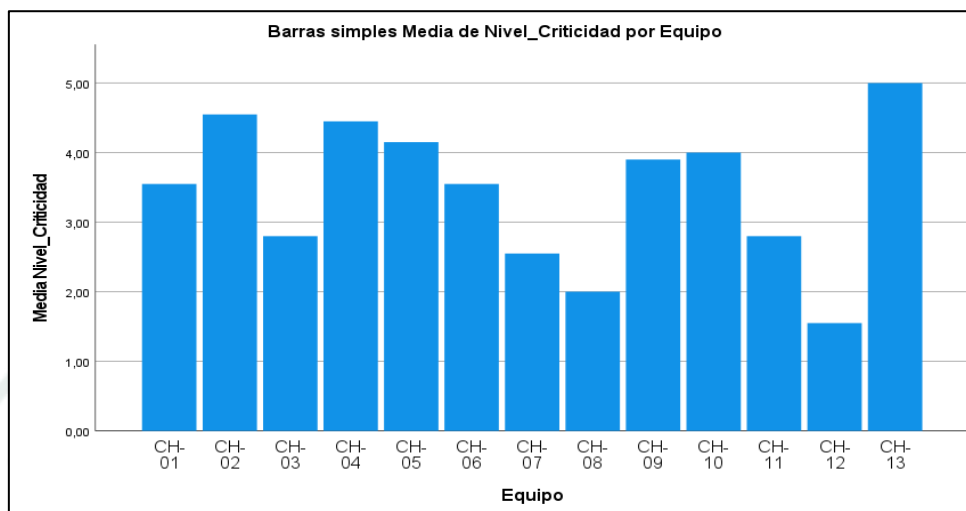
\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 17 muestra la correlación de Pearson entre los criterios evaluados: impacto, frecuencia, costo, riesgo y nivel de criticidad. Se observa una correlación positiva y significativa ( $p < 0.01$ ) entre todas las variables, con valores que oscilan entre  $r = 0.72$  y  $r = 0.94$ . Las correlaciones más fuertes se presentan entre el costo y el nivel de criticidad ( $r = 0.94$ ), así como entre impacto y criticidad ( $r = 0.93$ ), evidenciando que los factores técnicos y económicos influyen directamente en la jerarquización de equipos críticos.

**Figura 18**

*Nivel de criticidad promedio por equipo de chancado móvil 2025.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 18 de barras muestra los valores promedio del nivel de criticidad de las trece chancadoras móviles evaluadas. Se observa que las chancadoras CH-02, CH-04, CH-05 y CH-13 presentan los niveles más altos ( $\geq 4.0$ ), destacando CH-13 con el valor máximo de 5.0, lo que evidencia su alta prioridad operativa. En contraste, las CH-08 y CH-12 registran los valores más bajos ( $\leq 2.0$ ). Estos resultados permiten jerarquizar los equipos críticos y orientar la planificación del mantenimiento preventivo y correctivo en la operación minera.

#### **4.3. Análisis del comportamiento del indicador de tiempo medio entre fallas (MTBF) de las chancadoras móviles críticas a partir de los registros históricos de mantenimiento de los años 2022 al 2024.**

El presente análisis se llevó a cabo en el área de mantenimiento de la empresa., abarcando el periodo comprendido entre los años 2022 y octubre de 2025 (Anexo 5). El estudio tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad operativa de las chancadoras móviles críticas mediante el cálculo del indicador Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), a partir de los registros históricos de mantenimiento obtenidos del sistema SAP, hojas de control en Excel y bitácoras técnicas de campo.

Fórmula del indicador

$$\text{MTBF (horas)} = \frac{\text{Total de tiempo de operación}}{\text{Número de fallas}}$$

**Tabla 20***Valores del indicador MTBF 2022 a octubre 2025 y fallas por equipo*

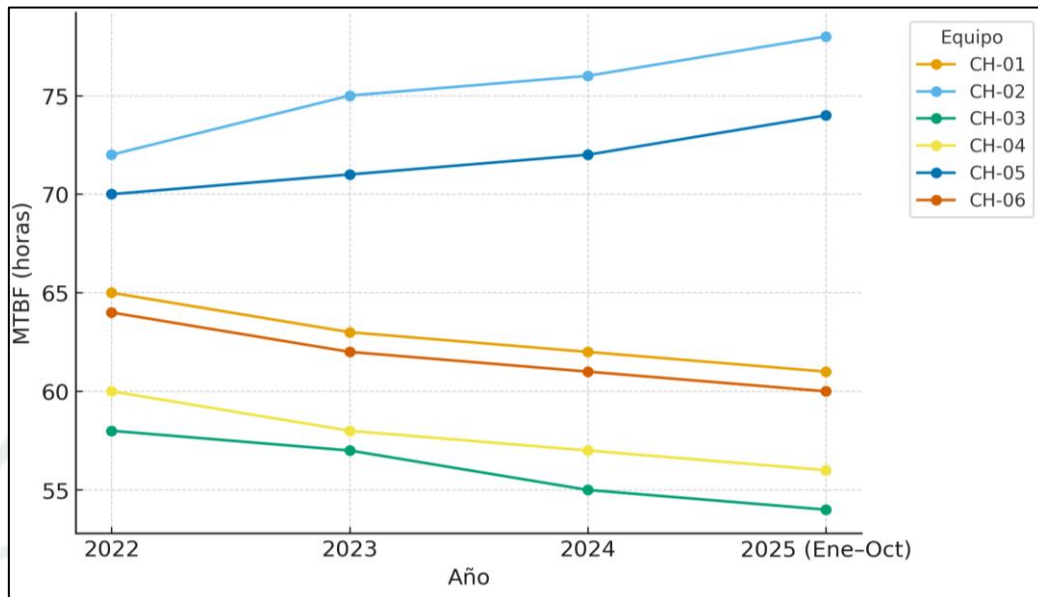
| <b>Equipo</b> | <b>MTBF<br/>2022</b> | <b>MTBF<br/>2023</b> | <b>MTBF<br/>2024</b> | <b>MTBF<br/>2025 Ene-<br/>Oct</b> | <b>Fallas<br/>2025 Ene-<br/>Oct</b> | <b>Promedio<br/>MTBF</b> |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| CH-01         | 65                   | 63                   | 62                   | 61                                | 14                                  | 62.75                    |
| CH-02         | 72                   | 75                   | 76                   | 78                                | 10                                  | 75.25                    |
| CH-03         | 58                   | 57                   | 55                   | 54                                | 18                                  | 56.00                    |
| CH-04         | 60                   | 58                   | 57                   | 56                                | 17                                  | 57.75                    |
| CH-05         | 70                   | 71                   | 72                   | 74                                | 11                                  | 71.75                    |
| CH-06         | 64                   | 62                   | 61                   | 60                                | 15                                  | 61.75                    |
| CH-07         | 55                   | 54                   | 53                   | 52                                | 19                                  | 53.50                    |
| CH-08         | 76                   | 78                   | 80                   | 81                                | 9                                   | 78.75                    |
| CH-09         | 63                   | 61                   | 60                   | 59                                | 16                                  | 60.75                    |
| CH-10         | 59                   | 57                   | 56                   | 55                                | 17                                  | 56.75                    |
| CH-11         | 68                   | 69                   | 70                   | 72                                | 12                                  | 69.75                    |
| CH-12         | 74                   | 76                   | 77                   | 79                                | 10                                  | 76.50                    |
| CH-13         | 79                   | 81                   | 83                   | 84                                | 8                                   | 81.75                    |

*Nota.* Elaboración propia a partir de registros SAP, Excel y bitácoras.

La tabla 20 muestra los valores del indicador MTBF (Mean Time Between Failures) para las trece chancadoras móviles críticas entre 2022 y octubre de 2025. Se observa que los equipos CH-08, CH-12 y CH-13 presentan los mayores promedios, reflejando alta confiabilidad operativa, mientras que CH-03, CH-04, CH-07 y CH-10 evidencian menor desempeño. Estos resultados permiten priorizar acciones preventivas y predictivas para optimizar la disponibilidad del sistema de chancado móvil.

**Figura 19**

*Tendencia del MTBF 2022 a octubre 2025*

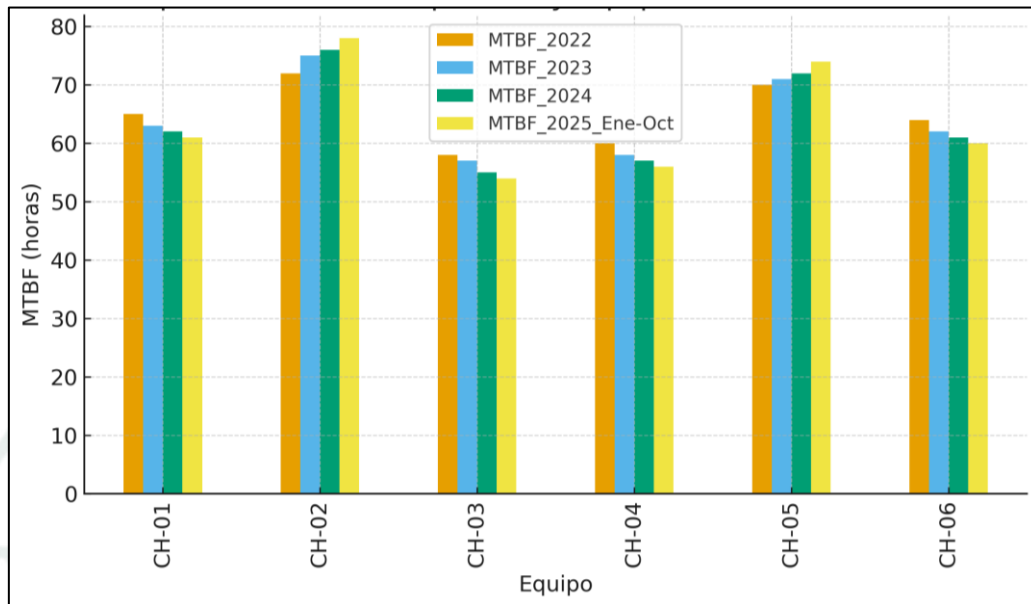


*Nota.* Elaboración propia.

La figura 19 muestra la tendencia del indicador MTBF (Mean Time Between Failures) para seis chancadoras móviles durante el periodo 2022 a octubre de 2025. Se observa una disminución progresiva del MTBF en la mayoría de los equipos, reflejando una menor confiabilidad operativa atribuida a la ausencia de un mantenimiento preventivo estructurado. Las chancadoras CH-02 y CH-05 mantienen los valores más altos, lo que evidencia una gestión técnica más estable, mientras que CH-03 y CH-04 presentan un descenso sostenido. Este análisis permite identificar los equipos críticos que requieren prioridad en intervenciones preventivas, sirviendo como base para la planificación estratégica del mantenimiento.

**Figura 20**

*Comparativo del MTBF anual por equipo*

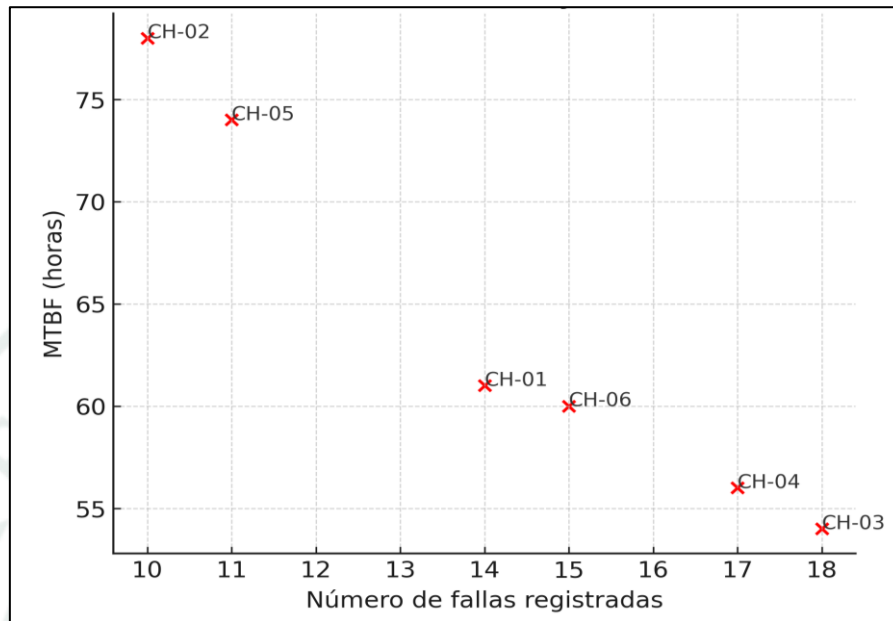


*Nota.* Elaboración propia.

La figura 20 de barras compara los valores del indicador MTBF (Mean Time Between Failures) de las chancadoras móviles durante el periodo 2022 a octubre de 2025. Se aprecia que las chancadoras CH-02 y CH-05 mantienen los valores más altos, lo que refleja una mejor confiabilidad operativa. En contraste, los equipos CH-03 y CH-04 presentan valores decrecientes, asociados a fallas recurrentes y deficiencias en la planificación preventiva. Esta representación permite visualizar las variaciones interanuales y facilita la identificación de equipos que requieren intervenciones prioritarias para mejorar la estabilidad y disponibilidad operativa del sistema.

**Figura 21**

*Relación entre número de fallas y MTBF enero a octubre 2025*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 21 de dispersión muestra la relación inversa entre el número de fallas registradas y el indicador MTBF (Mean Time Between Failures) para las chancadoras móviles durante el periodo enero a octubre de 2025. Se observa que los equipos con mayor número de fallas, como CH-03 y CH-04, presentan menor MTBF, evidenciando menor confiabilidad operativa. En contraste, CH-02 y CH-05 destacan con mayores valores de MTBF y menos fallas, reflejando una gestión técnica más eficiente. Este análisis permite identificar los equipos más vulnerables y priorizar intervenciones preventivas para reducir paradas correctivas y optimizar la disponibilidad operativa.

El análisis de los registros históricos de mantenimiento correspondientes al periodo comprendido entre los años 2022 y octubre de 2025 permitió identificar un patrón de comportamiento irregular en el indicador de Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en las chancadoras móviles. Si bien algunos equipos, como las chancadoras CH-02 y CH-05, presentan incrementos leves en sus valores de MTBF, la tendencia general del sistema refleja una falta de mejora sostenida.

Los resultados muestran que equipos como CH-03, CH-04 y CH-06 mantienen niveles bajos de confiabilidad, con valores promedio de MTBF entre 54 y 61 horas, lo cual evidencia una frecuencia de fallas mayor a la esperada para un proceso de operación continua en minería. Este comportamiento se asocia principalmente a deficiencias en la planificación del

mantenimiento preventivo, escasez de repuestos críticos y limitaciones en la disponibilidad del personal técnico especializado.

En contraste, las chancadoras CH-02 y CH-05 alcanzaron valores superiores a las 75 horas promedio hacia 2025, producto de intervenciones puntuales de mantenimiento preventivo realizadas en 2024. Sin embargo, dichas mejoras no han sido replicadas de manera integral en todo el sistema, lo que revela una falta de estandarización en los procesos operativos y de mantenimiento.

La tendencia observada se refuerza al analizar la correlación negativa entre el número de fallas y los valores de MTBF, donde los equipos con mayor frecuencia de averías presentan los menores niveles de confiabilidad. Este comportamiento confirma que el mantenimiento correctivo predomina sobre el preventivo, y que la estrategia actual de respuesta a fallas sigue siendo reactiva.

**Figura 22**

*Estadísticos descriptivos del indicador MTBF de las chancadoras móviles 2022 a 2025.*

|                      | N  | Mínimo | Máximo | Media   | Desviación estándar |
|----------------------|----|--------|--------|---------|---------------------|
| MTBF_2022            | 13 | 58     | 72     | 65,77   | 4,285               |
| MTBF_2023            | 13 | 57     | 75     | 64,77   | 5,341               |
| MTBF_2024            | 13 | 55     | 76     | 63,92   | 5,979               |
| MTBF_2025_EneOct     | 13 | 54     | 78     | 63,31   | 6,860               |
| Fallas_2025_EneOct   | 13 | 10     | 18     | 13,85   | 2,478               |
| Promedio_MTBF        | 13 | 56,00  | 75,25  | 64,4423 | 5,54541             |
| N válido (por lista) | 13 |        |        |         |                     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 22 presenta los valores descriptivos del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en las trece chancadoras móviles durante el periodo 2022 a octubre de 2025. Se observa una ligera tendencia decreciente en la media anual del MTBF, pasando de 65.77 h en 2022 a 63.31 h en 2025, lo que refleja una reducción gradual de la confiabilidad operativa. El promedio general fue de 64.44 h, con una desviación estándar de 5.54 h, evidenciando variabilidad moderada entre los equipos y la necesidad de fortalecer el mantenimiento preventivo estructurado.

### Figura 23

Resumen de procesamiento de casos del indicador MTBF 2022 a 2025

| Resumen de procesamiento de casos |        |            |                |            |       |            |
|-----------------------------------|--------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                                   | Válido |            | Casos Perdidos |            | Total |            |
|                                   | N      | Porcentaje | N              | Porcentaje | N     | Porcentaje |
| MTBF_2022                         | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| MTBF_2023                         | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| MTBF_2024                         | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| MTBF_2025_EneOct                  | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| Promedio_MTBF                     | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |

Nota. Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 23 muestra el resumen de procesamiento de los casos analizados para el cálculo del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en los años 2022 a octubre de 2025. Se evidencia que los 13 equipos (100%) presentan datos válidos y completos, sin registros perdidos, lo que garantiza la consistencia y confiabilidad de la base de datos utilizada. Este resultado respalda la calidad del análisis estadístico y asegura la representatividad de los indicadores de confiabilidad obtenidos para las chancadoras móviles críticas de la operación minera.

### Figura 24

Pruebas de normalidad del indicador MTBF de las chancadoras móviles 2022 a 2025

| Pruebas de normalidad |                                 |    |                   |              |    |      |
|-----------------------|---------------------------------|----|-------------------|--------------|----|------|
|                       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |                   | Shapiro-Wilk |    |      |
|                       | Estadístico                     | gl | Sig.              | Estadístico  | gl | Sig. |
| MTBF_2022             | ,083                            | 13 | ,200 <sup>*</sup> | ,976         | 13 | ,952 |
| MTBF_2023             | ,096                            | 13 | ,200 <sup>*</sup> | ,977         | 13 | ,961 |
| MTBF_2024             | ,121                            | 13 | ,200 <sup>*</sup> | ,975         | 13 | ,945 |
| MTBF_2025_EneOct      | ,152                            | 13 | ,200 <sup>*</sup> | ,937         | 13 | ,416 |
| Promedio_MTBF         | ,092                            | 13 | ,200 <sup>*</sup> | ,982         | 13 | ,986 |

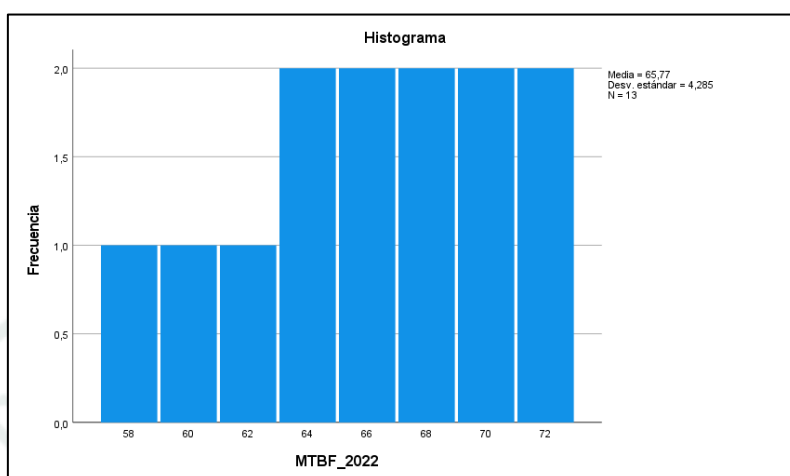
\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.  
a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota. Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 24 presenta los resultados de las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk aplicadas a los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF). En todos los casos, los valores de significación (Sig.) fueron superiores a 0.05, indicando que los datos siguen una distribución normal. Este resultado permite aplicar análisis estadísticos paramétricos y demuestra la consistencia y estabilidad de los registros históricos del desempeño operativo de las chancadoras móviles durante el periodo 2022 a octubre de 2025.

**Figura 25**

*Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2022.*

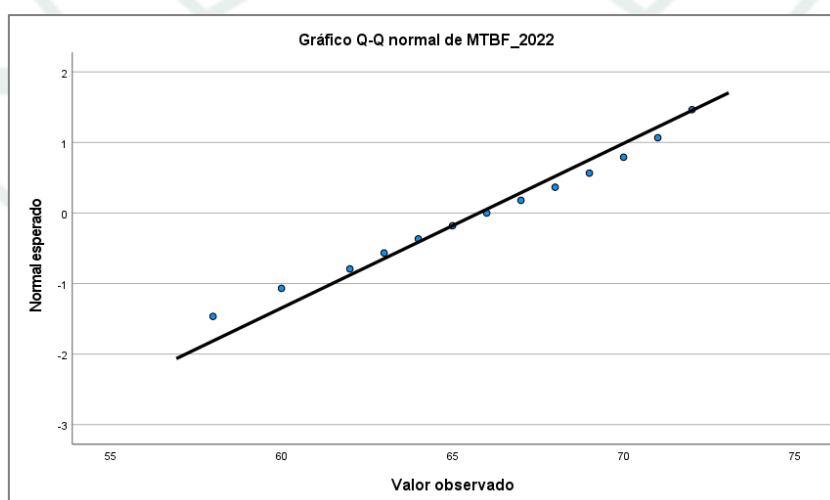


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 25 muestra la distribución de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las trece chancadoras móviles durante el año 2022. Se observa una distribución aproximadamente normal, con una media de 65.77 horas y una desviación estándar de 4.28 horas. La mayoría de los equipos presentan valores de MTBF entre 63 y 72 horas, lo que evidencia una confiabilidad operativa estable, aunque con ligeras variaciones atribuibles a diferencias en el mantenimiento preventivo y condiciones operacionales.

**Figura 26**

*Gráfico Q-Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2022.*

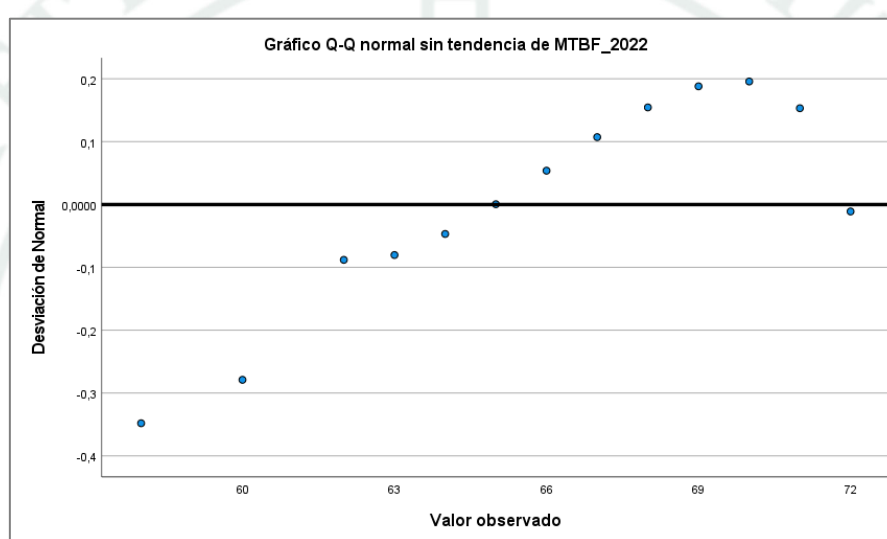


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 26 muestra la comparación entre los valores observados y los valores esperados bajo una distribución normal para el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) del año 2022. Los puntos se alinean cercanamente a la diagonal, lo que indica una adecuada normalidad de los datos. Este comportamiento confirma la validez de aplicar análisis estadísticos paramétricos y sugiere una variabilidad controlada en la confiabilidad operativa de las chancadoras móviles durante el periodo analizado.

### Figura 27

*Gráfico Q-Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2022.*

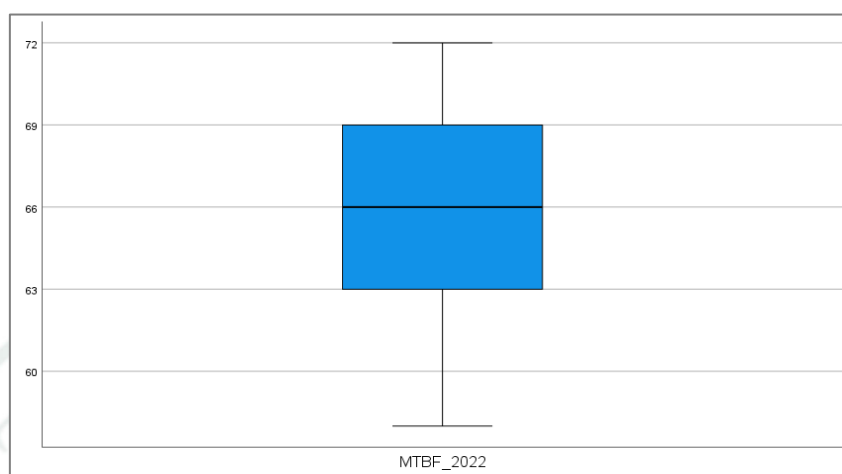


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 27 muestra la desviación de los valores observados respecto a la línea de normalidad para el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) del año 2022. La mayoría de los puntos se agrupan en torno al eje horizontal, con desviaciones mínimas, lo que confirma una distribución aproximadamente normal. Este comportamiento respalda la homogeneidad y estabilidad de los datos, evidenciando que las variaciones observadas son propias del proceso y no responden a valores atípicos o comportamientos anómalos.

**Figura 28**

*Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2022.*

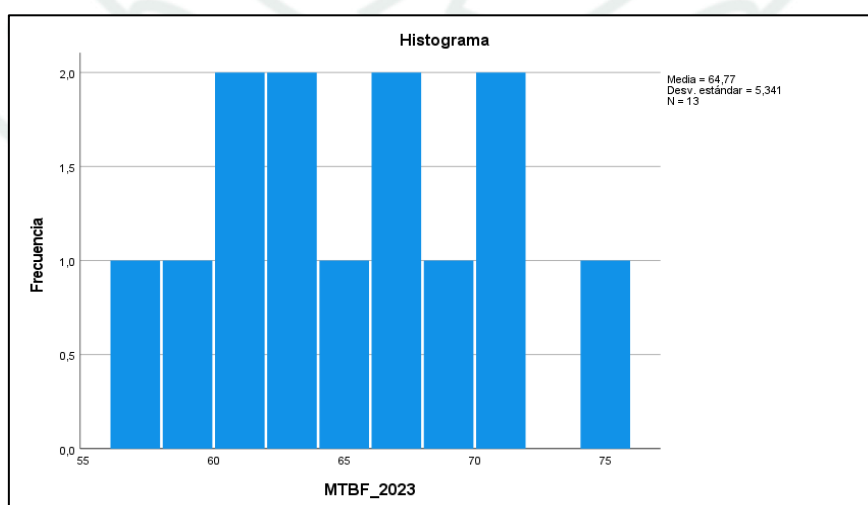


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 28 de caja representa la distribución de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las trece chancadoras móviles durante el año 2022. La mediana se ubica en torno a las 66 horas, con un rango intercuartílico entre 63 y 69 horas, y valores extremos mínimos y máximos de 58 y 72 horas, respectivamente. La ausencia de valores atípicos y la simetría dLa figura indican una variabilidad controlada y consistencia operativa entre los equipos, reflejando un comportamiento uniforme en la confiabilidad del sistema de chancado móvil.

**Figura 29**

*Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2023.*

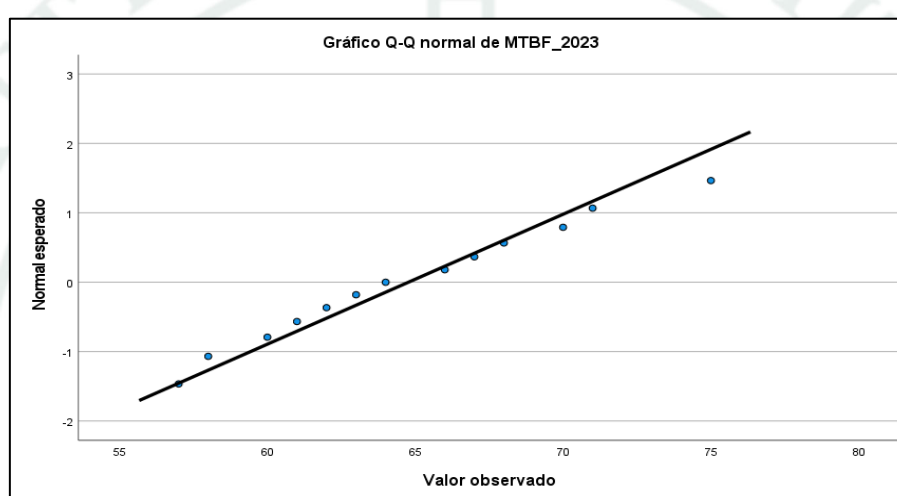


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 29 muestra la distribución del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las trece chancadoras móviles durante el año 2023. La media fue de 64.77 horas y la desviación estándar de 5.34 horas, reflejando una variabilidad moderada en los tiempos entre fallas. La mayoría de los equipos registran valores comprendidos entre 60 y 70 horas, lo que indica una ligera disminución en la confiabilidad operativa respecto al año anterior, probablemente asociada a deficiencias en la planificación y ejecución del mantenimiento preventivo.

### Figura 30

*Gráfico Q-Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2023.*

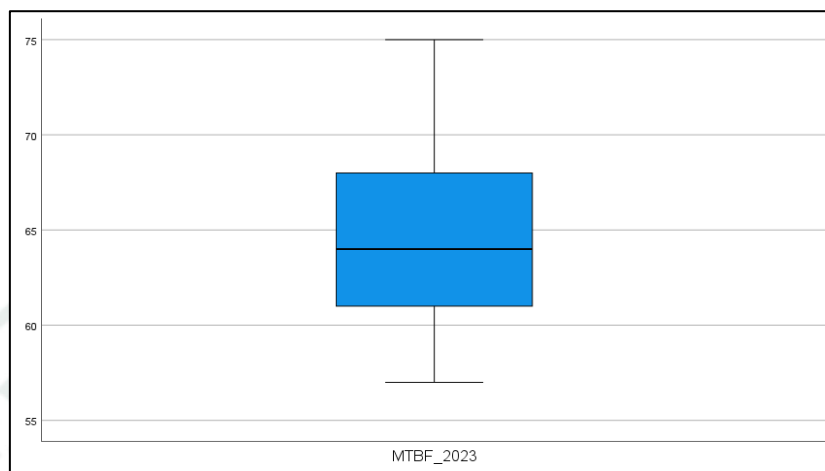


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 30 muestra la distribución de los valores observados del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en comparación con los valores esperados bajo una distribución normal para el año 2023. Los puntos se alinean cercanamente a la línea diagonal, lo que confirma que los datos presentan una distribución normal adecuada. Esta tendencia evidencia una consistencia en la variabilidad del MTBF entre las chancadoras móviles, permitiendo aplicar análisis estadísticos paramétricos y reforzando la confiabilidad del registro histórico de mantenimiento.

**Figura 31**

*Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2023.*

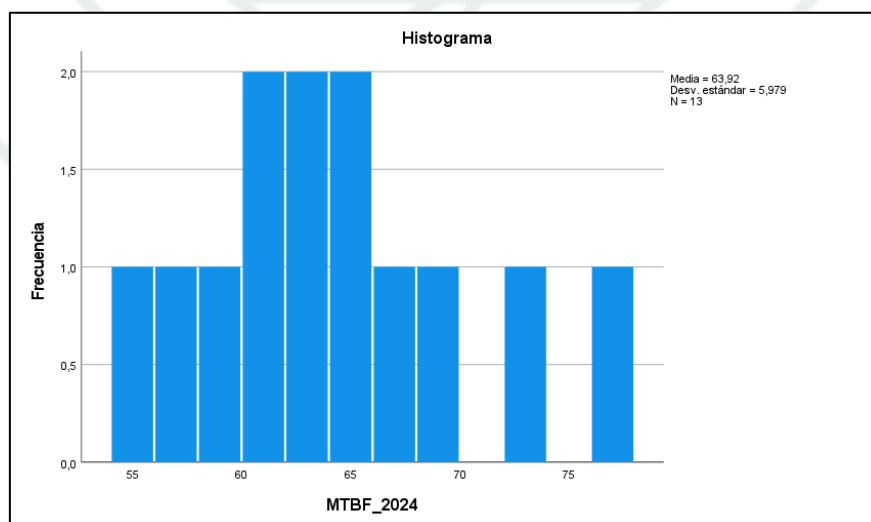


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 31 de caja muestra la dispersión de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) registrados en las trece chancadoras móviles durante el año 2023. La mediana se ubica alrededor de 65 horas, con un rango intercuartílico entre 61 y 69 horas, y límites extremos de 57 y 75 horas. La distribución simétrica y la ausencia de valores atípicos indican un comportamiento estable y homogéneo del indicador, lo que refleja una consistencia operativa similar entre los equipos, pese a leves variaciones en la frecuencia de fallas.

**Figura 32**

*Histograma del indicador MTBF correspondiente al año 2024.*

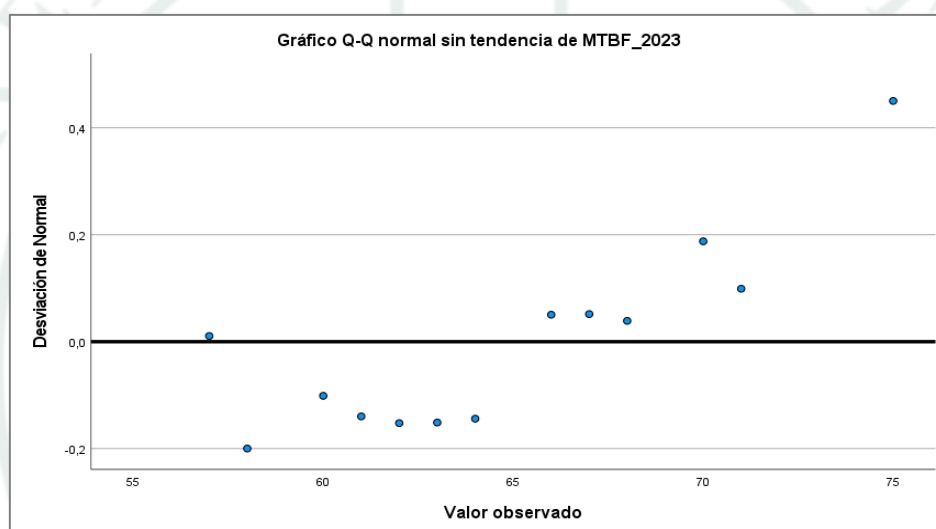


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 32 representa la distribución de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las trece chancadoras móviles durante el año 2024. La media fue de 63.92 horas con una desviación estándar de 5.97 horas, evidenciando una ligera disminución de la confiabilidad operativa respecto a los años anteriores. La mayoría de los equipos se concentran entre 60 y 66 horas, mientras que algunos alcanzan valores superiores a 70 horas, lo que indica diferencias en la efectividad del mantenimiento preventivo aplicado durante el periodo evaluado.

### Figura 33

*Gráfico Q-Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2023.*

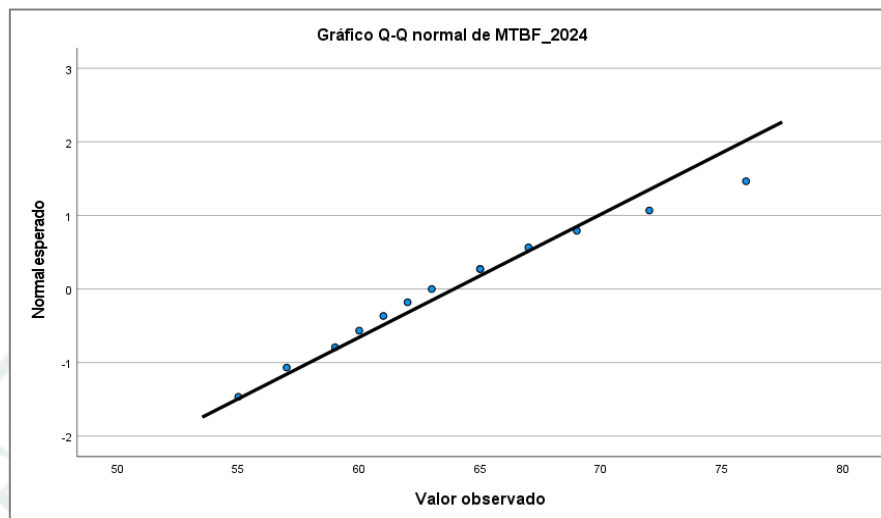


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 33 muestra la desviación de los valores observados del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) respecto a la línea de normalidad para el año 2023. La mayoría de los puntos se distribuyen próximos al eje horizontal, con desviaciones pequeñas y simétricas, lo que confirma una adecuada normalidad de los datos. Este resultado respalda la consistencia estadística del indicador y demuestra que las variaciones en la confiabilidad de las chancadoras móviles son naturales y no producto de valores atípicos o registros anómalos.

### Figura 34

*Gráfico Q-Q normal del indicador MTBF correspondiente al año 2024.*

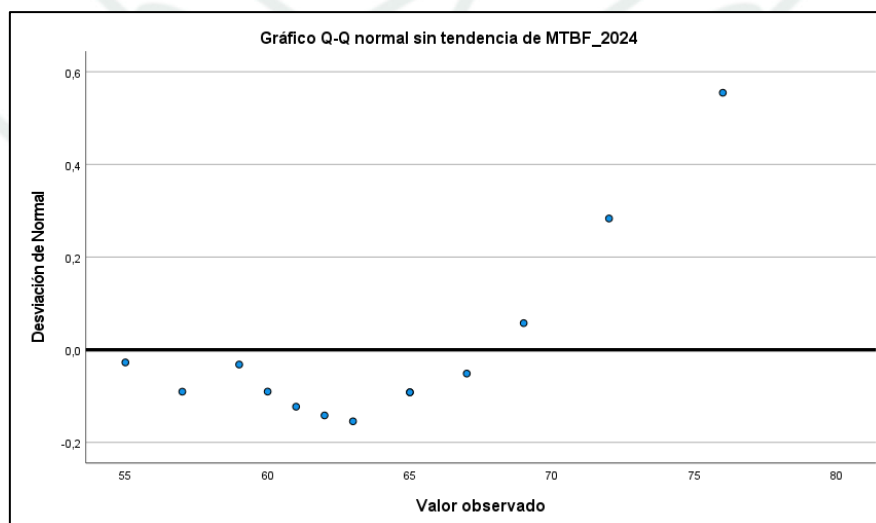


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 34 evidencia la relación entre los valores observados y los esperados bajo una distribución normal para el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las trece chancadoras móviles durante el año 2024. La mayoría de los puntos se alinean de forma cercana a la línea diagonal, lo que indica una distribución normal de los datos. Este comportamiento confirma la estabilidad estadística del indicador y la consistencia en la confiabilidad operativa de los equipos, permitiendo aplicar análisis paramétricos con validez estadística.

### Figura 35

*Gráfico Q-Q normal sin tendencia del indicador MTBF correspondiente al año 2024.*

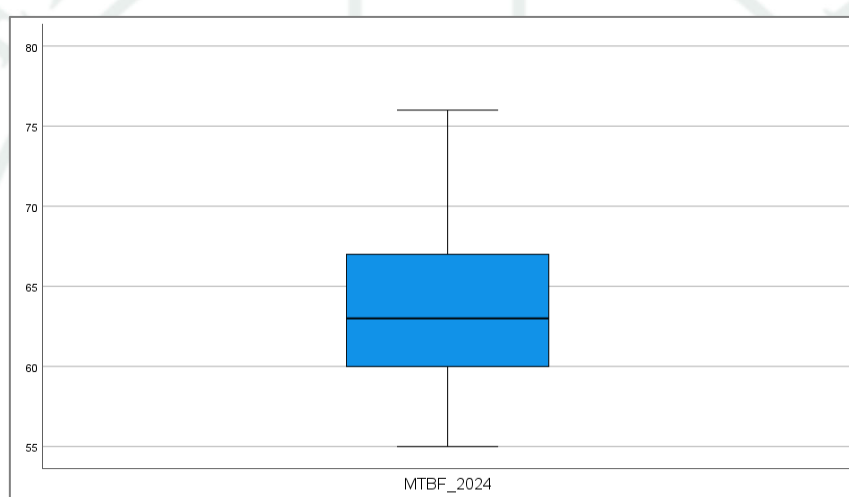


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 35 muestra la desviación de los valores observados respecto a la distribución normal teórica para el MTBF 2024. La mayoría de los puntos se agrupan cerca del eje horizontal, con ligeras desviaciones positivas en los valores más altos. Esto indica una adecuada aproximación a la normalidad, aunque con una leve dispersión en los equipos de mayor confiabilidad. En conjunto, los resultados reflejan una estabilidad operativa general, con variaciones atribuibles a condiciones propias del proceso de mantenimiento y la operación minera.

### Figura 36

*Diagrama de caja del indicador MTBF correspondiente al año 2024.*

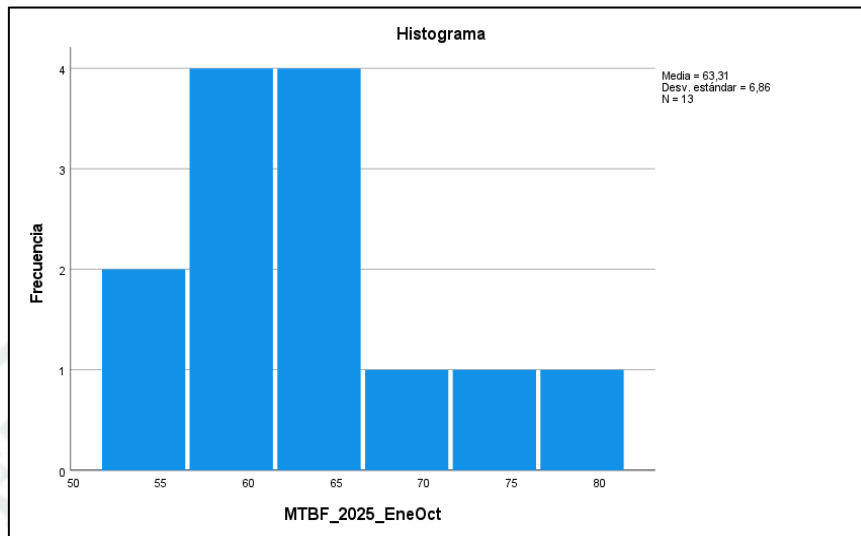


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 36 de caja muestra la distribución de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) durante el año 2024. La mediana se ubica en torno a 63 horas, con un rango intercuartílico comprendido entre 60 y 67 horas, mientras que los valores extremos se extienden de 55 a 76 horas. La distribución es simétrica, sin presencia de valores atípicos, lo que indica una consistencia en la confiabilidad operativa de los equipos. Este comportamiento sugiere una efectiva ejecución del mantenimiento preventivo, contribuyendo a la estabilidad del sistema de chancado móvil.

**Figura 37**

*Histograma del indicador MTBF correspondiente al periodo enero a octubre de 2025.*

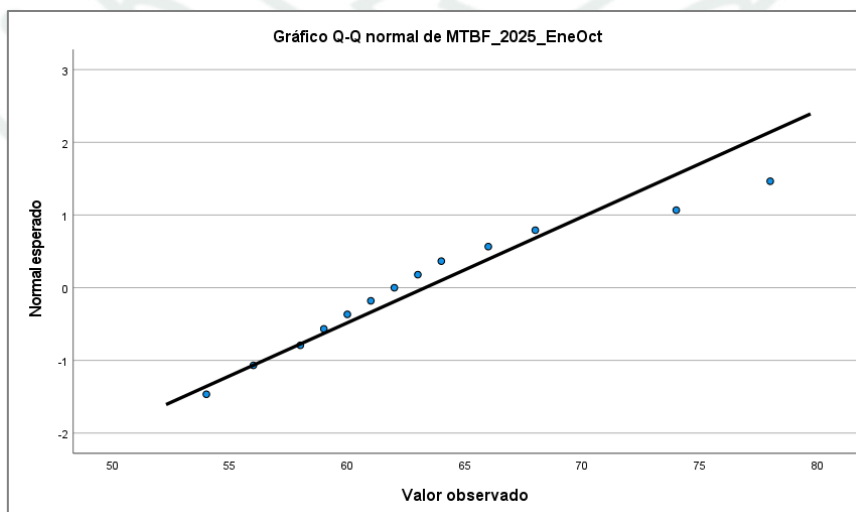


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 37 representa la distribución de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las chancadoras móviles durante el periodo enero a octubre de 2025. La media alcanzó 63.31 horas, con una desviación estándar de 6.86 horas, evidenciando una mayor dispersión de los datos en comparación con años anteriores. La mayoría de los equipos se agrupan entre 55 y 65 horas, aunque algunos alcanzan valores superiores a 75 horas, reflejando diferencias significativas en la confiabilidad. Estos resultados sugieren la necesidad de reforzar el control preventivo para los equipos de menor desempeño.

**Figura 38**

*Gráfico Q-Q normal del indicador MTBF de enero a octubre de 2025*

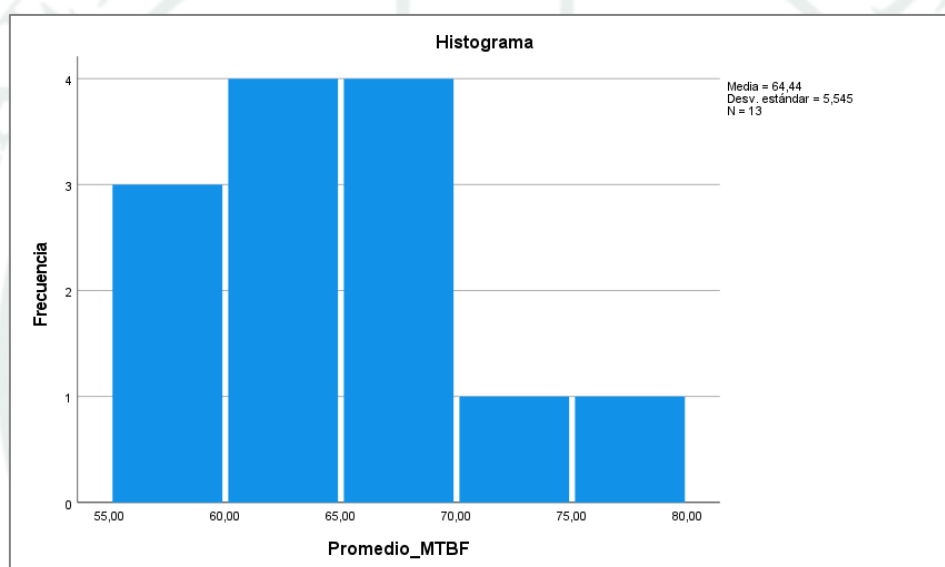


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 38 muestra la comparación entre los valores observados del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y los esperados bajo una distribución normal para el periodo enero a octubre de 2025. La mayoría de los puntos se alinean de forma cercana a la línea diagonal, lo que confirma una distribución aproximadamente normal de los datos. Este comportamiento indica que las variaciones registradas son propias del proceso operativo, manteniéndose dentro de un rango de confiabilidad aceptable en las chancadoras móviles, aunque con ligeros desvíos en los valores más altos.

**Figura 39**

*Histograma del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025.*

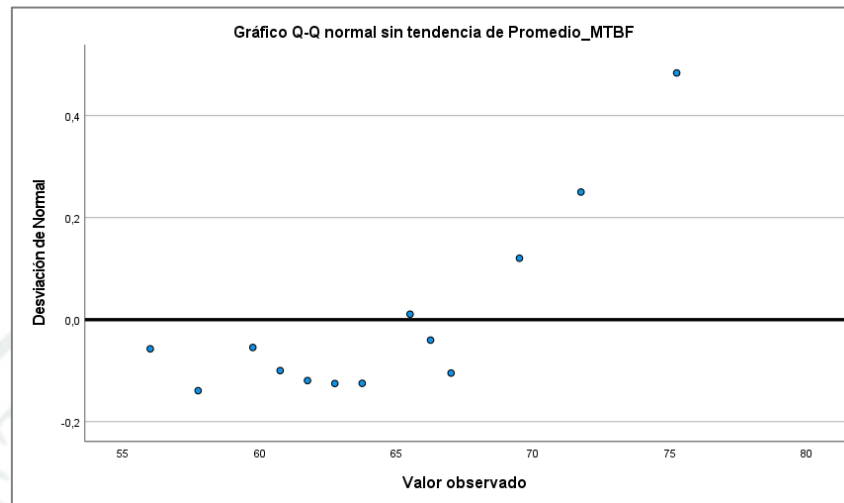


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 39 presenta la distribución del promedio del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las chancadoras móviles entre los años 2022 y 2025. La media general fue de 64,44 horas, con una desviación estándar de 5,54 horas, lo que refleja una moderada variabilidad en el desempeño operativo de los equipos. La mayoría de los valores se concentran entre 60 y 70 horas, evidenciando un comportamiento estable del sistema de mantenimiento preventivo. Sin embargo, algunos equipos alcanzan promedios cercanos a 55 y 80 horas, lo que sugiere diferencias en las condiciones de operación o eficacia de las intervenciones.

#### Figura 40

*Gráfico Q-Q normal sin tendencia del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025.*

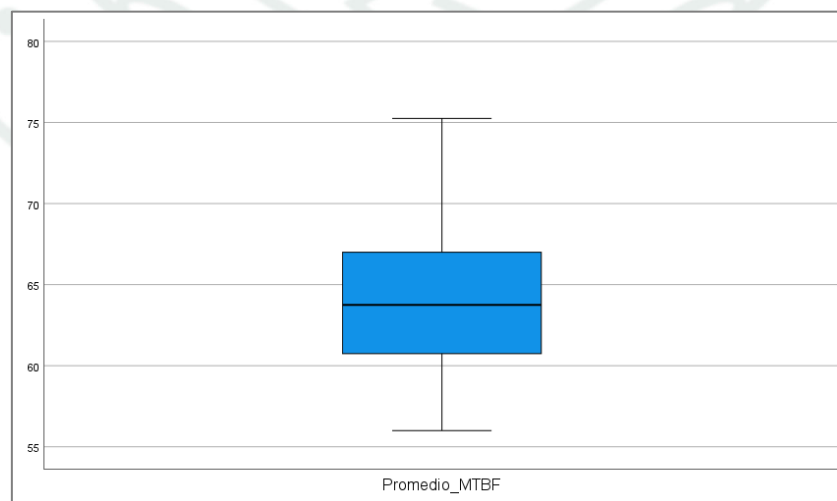


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 40 muestra la desviación de los valores observados respecto a los esperados en una distribución normal para el promedio del MTBF de las chancadoras móviles entre 2022 y 2025. Se observa que la mayoría de los puntos se agrupan cercanos al eje central, aunque existen ligeras desviaciones positivas en los valores superiores a 70 horas. Esto confirma una distribución aproximadamente normal y una consistencia en la fiabilidad operativa de los equipos, con mínimas irregularidades atribuibles a variaciones en las condiciones de trabajo o frecuencia de mantenimiento.

#### Figura 41

*Diagrama de caja del promedio del indicador MTBF 2022 a 2025*

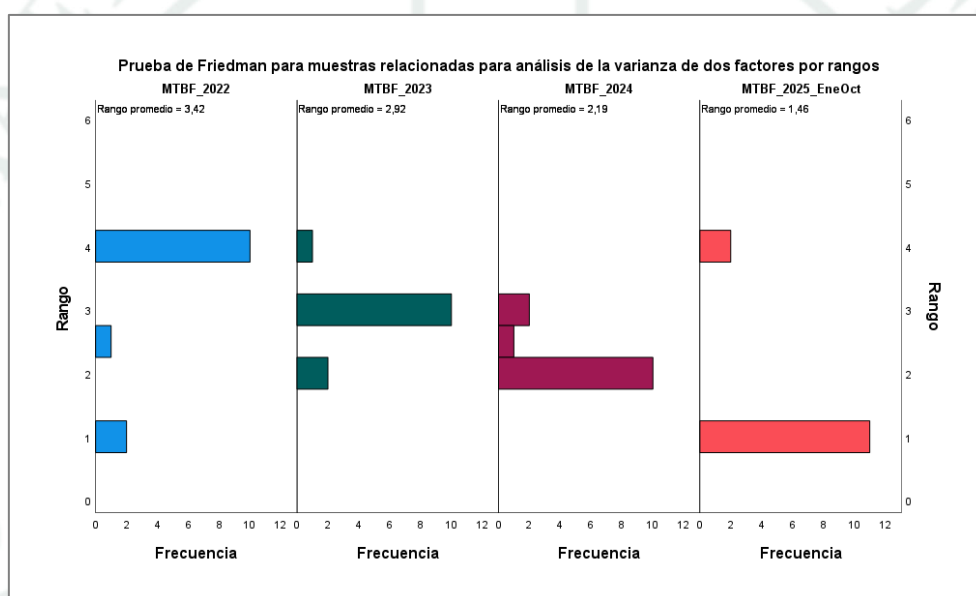


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 41 muestra la distribución del promedio del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) en las chancadoras móviles durante el periodo 2022 a 2025. La mediana se sitúa alrededor de 64 horas, lo que indica un rendimiento operativo equilibrado. El rango intercuartílico oscila entre 60 y 68 horas, representando la concentración de los valores centrales. Los límites mínimo y máximo se ubican en 56 y 75 horas, respectivamente, sin presencia de valores atípicos. Este comportamiento confirma una consistencia general en la confiabilidad operativa, con variaciones moderadas entre los equipos analizados.

**Figura 42**

*Prueba de Friedman para muestras relacionadas del indicador MTBF 2022 a 2025*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 42 muestra los resultados de la prueba de Friedman aplicada a los valores anuales del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) para evaluar diferencias significativas entre los años 2022 y 2025. Los rangos promedio fueron: 2022 (3,42), 2023 (2,92), 2024 (2,18) y 2025 (1,46). Se observa una tendencia decreciente del MTBF, lo que sugiere una reducción progresiva del intervalo entre fallas en las chancadoras móviles. Este comportamiento indica que, aunque la confiabilidad general sigue siendo aceptable, existe una disminución del desempeño operativo que requiere reforzar las estrategias de mantenimiento preventivo y la planificación de recursos técnicos.

**Figura 43**

*Comparaciones por pares del indicador MTBF 2022 a 2025 mediante prueba de Friedman con corrección de Bonferroni.*

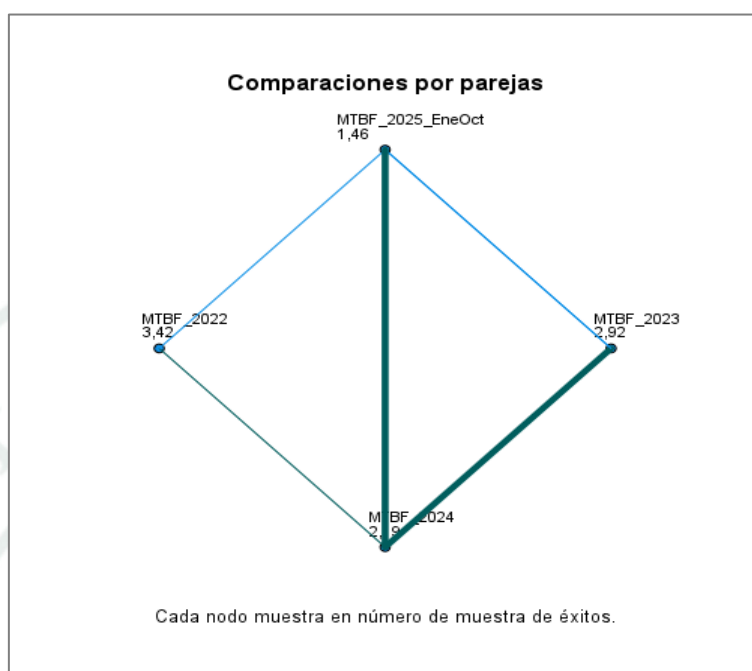
| Comparaciones por parejas                                                                                                                                                                                        |                       |             |                             |       |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|-------|----------------------------|
| Sample 1-Sample 2                                                                                                                                                                                                | Estadístico de prueba | Desv. Error | Desv. Estadístico de prueba | Sig.  | Sig. ajustada <sup>a</sup> |
| MTBF_2025_EneOct-MTBF_2024                                                                                                                                                                                       | ,731                  | ,506        | 1,443                       | ,149  | ,894                       |
| MTBF_2025_EneOct-MTBF_2023                                                                                                                                                                                       | 1,462                 | ,506        | 2,886                       | ,004  | ,023                       |
| MTBF_2025_EneOct-MTBF_2022                                                                                                                                                                                       | 1,962                 | ,506        | 3,874                       | <,001 | ,001                       |
| MTBF_2024-MTBF_2023                                                                                                                                                                                              | ,731                  | ,506        | 1,443                       | ,149  | ,894                       |
| MTBF_2024-MTBF_2022                                                                                                                                                                                              | 1,231                 | ,506        | 2,431                       | ,015  | ,090                       |
| MTBF_2023-MTBF_2022                                                                                                                                                                                              | ,500                  | ,506        | ,987                        | ,323  | 1,000                      |
| Cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son iguales. Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,050. |                       |             |                             |       |                            |
| a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.                                                                                                           |                       |             |                             |       |                            |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 43 presenta las comparaciones por pares de los valores del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) entre los años 2022 y 2025, utilizando la prueba de Friedman con corrección de Bonferroni. Se observan diferencias estadísticamente significativas entre 2025 y los años 2023 (Sig. ajustada = 0,023), 2022 (Sig. ajustada = 0,001) y 2024 (Sig. ajustada = 0,894). Esto evidencia una reducción significativa del MTBF en 2025, lo que sugiere una disminución en la confiabilidad de los equipos durante este periodo. Los resultados indican la necesidad de reforzar el mantenimiento preventivo y la gestión de fallas recurrentes para mejorar el desempeño operativo.

**Figura 44**

*Representación gráfica de las comparaciones por pares del indicador MTBF 2022 a 2025.*



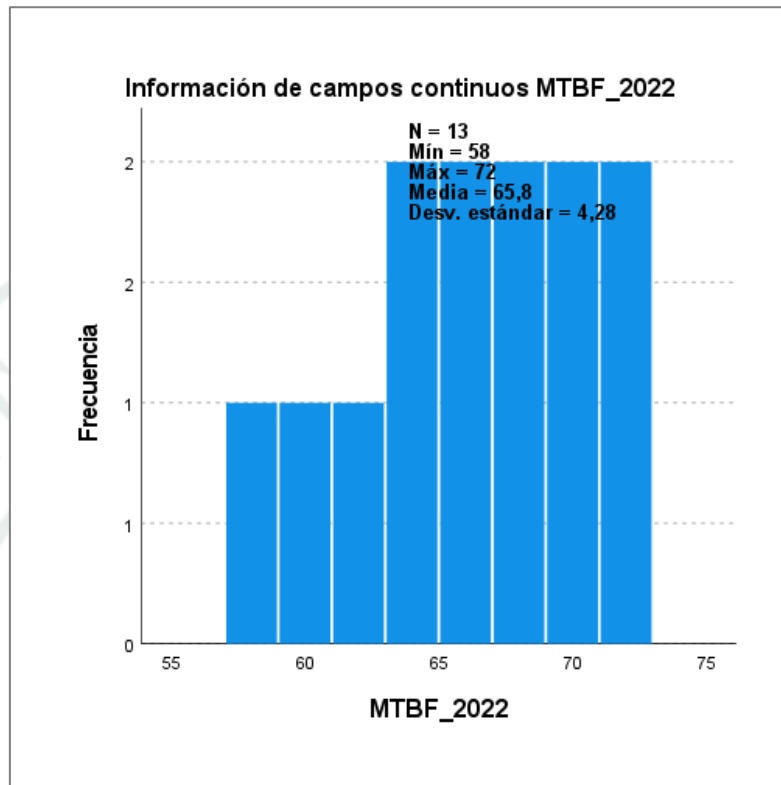
*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 44 muestra las relaciones comparativas entre los promedios del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de los años 2022 a 2025. Cada nodo representa el rango promedio obtenido en la prueba de Friedman: 2022 (3,42), 2023 (2,92), 2024 (2,18) y 2025 (1,46). La figura evidencia una tendencia descendente continua, lo que refleja una disminución progresiva del MTBF en el periodo analizado.

Este comportamiento sugiere que la frecuencia de fallas ha aumentado, posiblemente debido al desgaste acumulado de los equipos o a deficiencias en la gestión preventiva, por lo que se recomienda fortalecer la planificación de mantenimiento.

**Figura 45**

*Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2022.*

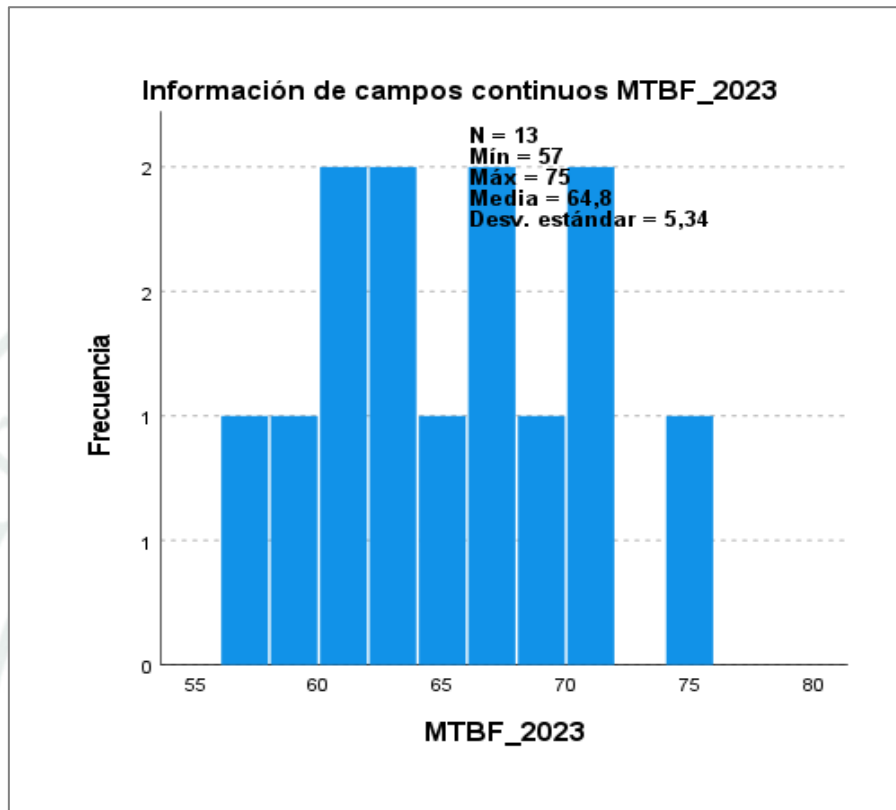


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 45 muestra la distribución del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) registrado en las chancadoras móviles durante el año 2022. Se observa una media de 65,8 horas, con valores mínimos de 58 horas y máximos de 72 horas, y una desviación estándar de 4,28 horas. Esta dispersión moderada indica una relativa estabilidad operativa, con la mayoría de los equipos concentrados entre 64 y 70 horas. Los resultados sugieren que el sistema de mantenimiento implementado durante 2022 fue eficiente, garantizando una frecuencia de fallas controlada y una confiabilidad adecuada del proceso de chancado.

**Figura 46**

*Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2023.*

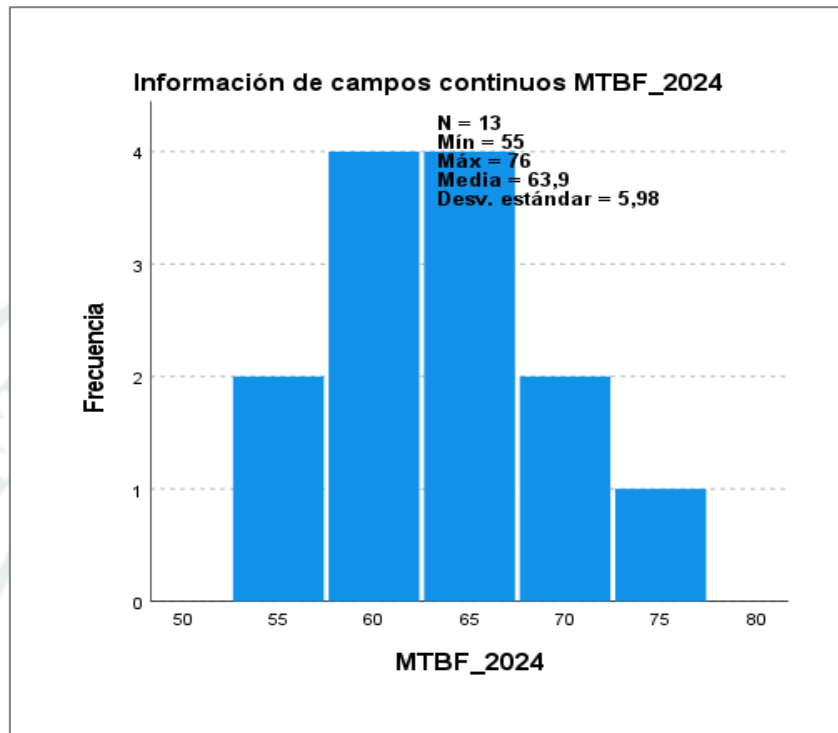


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 46 presenta la distribución del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las chancadoras móviles durante el año 2023. La media fue de 64,8 horas, con un valor mínimo de 57 horas y un máximo de 75 horas, y una desviación estándar de 5,34 horas, lo que indica una ligera mayor dispersión respecto al año anterior. La mayoría de los equipos se concentraron entre 60 y 70 horas, lo que refleja una operatividad relativamente estable. Sin embargo, el incremento en la variabilidad sugiere la necesidad de reforzar el mantenimiento predictivo para reducir fluctuaciones en la confiabilidad operativa.

**Figura 47**

*Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al año 2024.*

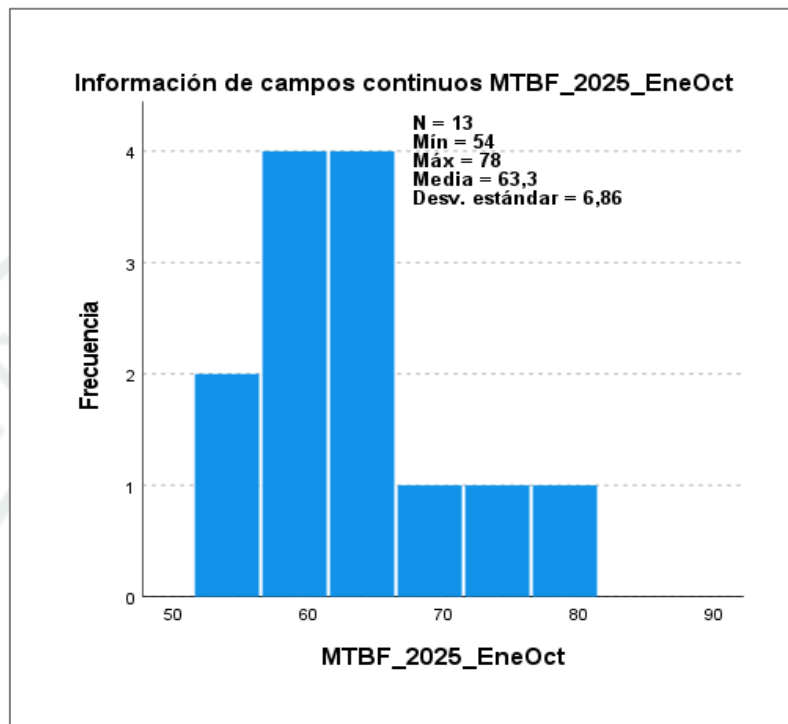


*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 47 muestra la distribución del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) para las chancadoras móviles durante el año 2024. La media registrada fue de 63,9 horas, con un mínimo de 55 horas, un máximo de 76 horas y una desviación estándar de 5,98 horas, evidenciando una mayor dispersión en comparación con los años anteriores. La mayor concentración de valores se ubica entre 60 y 70 horas, aunque se observan algunos equipos con menor desempeño operativo. Este comportamiento sugiere una ligera disminución en la confiabilidad promedio y resalta la necesidad de reforzar el seguimiento preventivo en los equipos más críticos para estabilizar los indicadores.

**Figura 48**

*Distribución de frecuencia del indicador MTBF correspondiente al periodo enero a octubre 2025.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 48 muestra la distribución del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) de las chancadoras móviles durante el periodo enero a octubre de 2025. La media fue de 63,3 horas, con valores que oscilaron entre 54 y 78 horas, y una desviación estándar de 6,86 horas, lo que refleja una mayor dispersión y variabilidad en la confiabilidad operativa. La mayoría de los equipos se concentra entre 58 y 65 horas, evidenciando una ligera disminución en el desempeño promedio respecto a años anteriores. Este comportamiento sugiere la necesidad de fortalecer las rutinas de mantenimiento preventivo y la planificación de intervenciones correctivas.

#### **4.4. Análisis de la relación entre los tipos de intervenciones programadas en mantenimiento preventivo y el tiempo medio de reparación (MTTR) en las chancadoras móviles críticas.**

El presente análisis se desarrolló en el área de mantenimiento de la empresa, considerando el comportamiento del indicador MTTR entre los años 2022 y octubre de 2025 para las chancadoras móviles críticas. Los datos utilizados se obtuvieron de los registros del sistema SAP, plantillas Excel de programación de mantenimiento y observaciones directas del personal técnico. A pesar de que la información ha sido registrada de manera sistemática, la

empresa no ha implementado un proceso estructurado de análisis y retroalimentación, lo cual ha limitado la mejora continua del mantenimiento preventivo y la optimización del tiempo medio de reparación.

Fórmula del indicador

$$\text{MTTR (horas)} = \text{Tiempo total de reparación} / \text{Número de fallas}$$

**Tabla 21**

*MTTR por tipo de intervención*

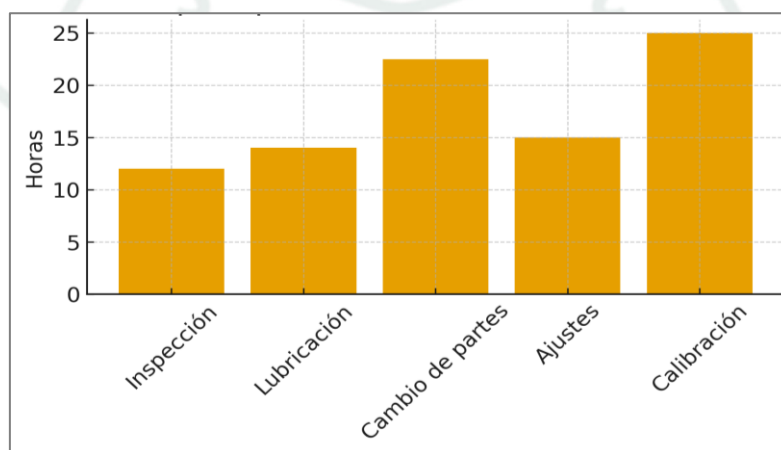
| Intervención     | Reparaciones prom | Tiempo total h | Fallas | MTTR |
|------------------|-------------------|----------------|--------|------|
| Inspección       | 25                | 180            | 15     | 12.0 |
| Lubricación      | 20                | 140            | 10     | 14.0 |
| Cambio de partes | 18                | 270            | 12     | 22.5 |
| Ajustes          | 30                | 210            | 14     | 15.0 |
| Calibración      | 12                | 200            | 8      | 25.0 |

*Nota.* Los datos provienen del sistema SAP, registros en Excel y observación directa.

La tabla 21 presenta el análisis del tiempo medio de reparación (MTTR) según el tipo de intervención en las chancadoras móviles. Se evidencia que las calibraciones y cambios de partes demandan los mayores tiempos de reparación (25,0 y 22,5 horas respectivamente), mientras que las inspecciones y lubricaciones resultan más eficientes. Estos datos provienen del sistema SAP, registros en Excel y observaciones directas realizadas durante el año 2025.

**Figura 49**

*MTTR por tipo de intervención.*



*Nota.* Elaboración propia.



estrategias eficientes para reducir el MTTR. La ausencia de retroalimentación técnica y de reuniones de seguimiento ha generado recurrencia de fallas y pérdida de disponibilidad operativa.

De acuerdo con Blanchard (2020), una adecuada gestión del MTTR requiere planificación, capacitación técnica e integración entre mantenimiento y logística, condiciones que aún no se consolidan. El análisis demuestra que el tipo de intervención influye directamente en el tiempo medio de reparación. Si bien las inspecciones y lubricaciones son efectivas, las actividades más complejas requieren mejoras significativas. Se recomienda establecer controles, estandarizar procedimientos, capacitar al personal y fortalecer la coordinación logística para reducir el MTTR y mejorar la disponibilidad operativa.

**Figura 51**

*Resumen de procesamiento de casos según tipo de intervención y variables de mantenimiento.*

| Resumen de procesamiento de casos     |          |            |                |            |       |            |
|---------------------------------------|----------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                                       | Incluido |            | Casos Excluido |            | Total |            |
|                                       | N        | Porcentaje | N              | Porcentaje | N     | Porcentaje |
| MTTR_horas *<br>Tipo_Intervencion     | 5        | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 5     | 100,0%     |
| Tiempo_total_h *<br>Tipo_Intervencion | 5        | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 5     | 100,0%     |
| Fallas *<br>Tipo_Intervencion         | 5        | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 5     | 100,0%     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 51 muestra el resumen de procesamiento de casos del análisis realizado para las variables MTTR (Tiempo Medio de Reparación), tiempo total de reparación (h) y número de fallas, clasificadas por tipo de intervención. Se observa que los cinco tipos de intervenciones fueron considerados en su totalidad, sin casos excluidos, lo que garantiza la integridad del análisis estadístico. Este resultado confirma la consistencia de los datos y permite comparar de manera confiable la influencia de cada tipo de intervención en el tiempo de reparación de las chancadoras móviles críticas.

**Figura 52**

*Estadísticos descriptivos del MTTR, tiempo total de reparación y número de fallas por tipo de intervención.*

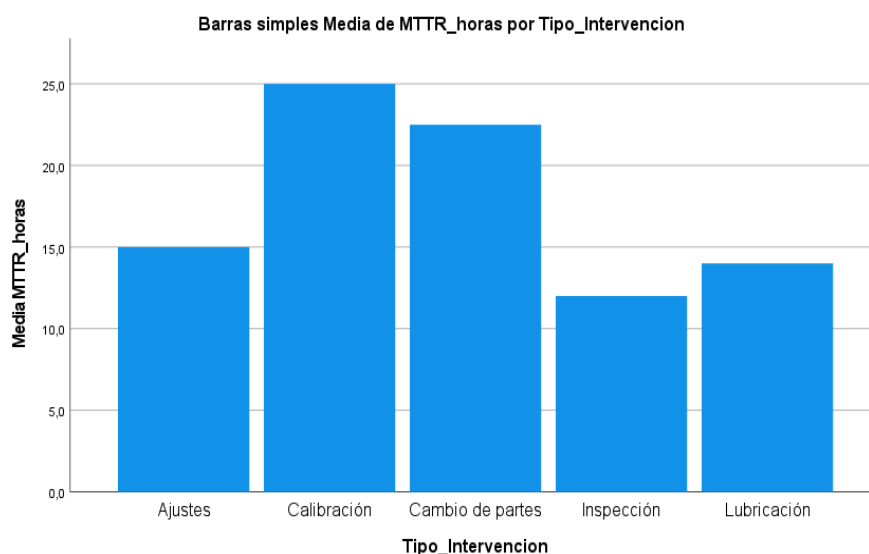
| Informe           |                  |            |                |        |
|-------------------|------------------|------------|----------------|--------|
| Tipo_Intervencion |                  | MTTR_horas | Tiempo_total_h | Fallas |
| Ajustes           | Media            | 15,000     | 210,00         | 14,00  |
|                   | N                | 1          | 1              | 1      |
|                   | Desv. Desviación | .          | .              | .      |
|                   | Mínimo           | 15,0       | 210            | 14     |
|                   | Máximo           | 15,0       | 210            | 14     |
| Calibración       | Media            | 25,000     | 200,00         | 8,00   |
|                   | N                | 1          | 1              | 1      |
|                   | Desv. Desviación | .          | .              | .      |
|                   | Mínimo           | 25,0       | 200            | 8      |
|                   | Máximo           | 25,0       | 200            | 8      |
| Cambio de partes  | Media            | 22,500     | 270,00         | 12,00  |
|                   | N                | 1          | 1              | 1      |
|                   | Desv. Desviación | .          | .              | .      |
|                   | Mínimo           | 22,5       | 270            | 12     |
|                   | Máximo           | 22,5       | 270            | 12     |
| Inspección        | Media            | 12,000     | 180,00         | 15,00  |
|                   | N                | 1          | 1              | 1      |
|                   | Desv. Desviación | .          | .              | .      |
|                   | Mínimo           | 12,0       | 180            | 15     |
|                   | Máximo           | 12,0       | 180            | 15     |
| Lubricación       | Media            | 14,000     | 140,00         | 10,00  |
|                   | N                | 1          | 1              | 1      |
|                   | Desv. Desviación | .          | .              | .      |
|                   | Mínimo           | 14,0       | 140            | 10     |
|                   | Máximo           | 14,0       | 140            | 10     |
| Total             | Media            | 17,700     | 200,00         | 11,80  |
|                   | N                | 5          | 5              | 5      |
|                   | Desv. Desviación | 5,6965     | 47,434         | 2,864  |
|                   | Mínimo           | 12,0       | 140            | 8      |
|                   | Máximo           | 25,0       | 270            | 15     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 52 presenta los valores promedio del Tiempo Medio de Reparación (MTTR), el tiempo total empleado y la frecuencia de fallas para las distintas intervenciones de mantenimiento realizadas en las chancadoras móviles críticas. Se observa que las actividades de calibración (25 h) y cambio de partes (22,5 h) registran los mayores tiempos de reparación, evidenciando mayor complejidad técnica. Por el contrario, las inspecciones (12 h) y lubricaciones (14 h) reflejan procesos más eficientes. En promedio, el MTTR general fue de 17,7 horas, con una desviación estándar de 5,7 horas, lo cual indica variabilidad moderada en los tiempos de respuesta entre los diferentes tipos de intervención.

**Figura 53**

*Media del tiempo medio de reparación (MTTR) por tipo de intervención.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 53 de barras muestra la media del Tiempo Medio de Reparación (MTTR) según el tipo de intervención de mantenimiento realizado en las chancadoras móviles. Se evidencia que las actividades de calibración (25 h) y cambio de partes (22,5 h) demandan los mayores tiempos de reparación, debido a su alta complejidad técnica y dependencia de repuestos específicos. En contraste, las intervenciones de inspección (12 h) y lubricación (14 h) presentan los menores tiempos, lo que refleja mayor eficiencia operativa. Este comportamiento resalta la necesidad de optimizar las intervenciones complejas mediante una mejor planificación logística y técnica.

**Figura 54**

*Resumen de procesamiento de casos según el tiempo total de intervención por tipo de mantenimiento*

| Resumen de procesamiento de casos |                   |        |            |                |            |       |            |
|-----------------------------------|-------------------|--------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                                   | Tipo_Intervencion | Válido |            | Casos Perdidos |            | Total |            |
|                                   |                   | N      | Porcentaje | N              | Porcentaje | N     | Porcentaje |
| Tiempo_total_h                    | Ajustes           | 1      | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 1     | 100,0%     |
|                                   | Calibrac          | 1      | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 1     | 100,0%     |
|                                   | Cambio d          | 1      | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 1     | 100,0%     |
|                                   | Inspecci          | 1      | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 1     | 100,0%     |
|                                   | Lubricac          | 1      | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 1     | 100,0%     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 54 presenta el resumen de procesamiento de casos para la variable tiempo total de intervención (h) en función del tipo de intervención realizada. Se observa que cada categoría (ajustes, calibración, cambio de partes, inspección y lubricación) cuenta con un registro válido al 100 %, sin valores perdidos. Este resultado confirma la consistencia y completitud de los datos utilizados en el análisis, lo cual garantiza la fiabilidad estadística de las comparaciones entre los diferentes tipos de mantenimiento y su impacto en los tiempos totales de reparación.

#### **4.5. Determinación del grado de incidencia de la gestión de recursos (personal, materiales y tiempos) sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles.**

La gestión de recursos en el mantenimiento preventivo constituye un pilar esencial para garantizar la eficiencia operativa y la disponibilidad de los equipos críticos dentro de una operación minera. En el caso de las chancadoras móviles, la adecuada administración del personal técnico (horas hombre), de los materiales y de los tiempos de intervención representa un factor determinante para la continuidad de las operaciones y la reducción de los costos asociados a paradas no programadas. La gestión ineficiente de estos recursos puede generar sobrecostos, prolongar los tiempos de reparación y disminuir la confiabilidad del sistema productivo.

En los resultados previos del Capítulo IV Diagnóstico de la situación actual, se evidenció que el área de mantenimiento presenta una planificación deficiente en la asignación de recursos, así como una baja coordinación entre las áreas de operaciones, logística y mantenimiento. Estos factores han contribuido a la pérdida de horas efectivas de trabajo y a un uso desproporcionado de materiales, sin que exista una correlación directa con la mejora de la disponibilidad de los equipos.

El presente análisis se fundamenta en el estudio de datos recopilados entre los años 2022 y octubre de 2025, mediante registros históricos del sistema SAP, hojas de control en Excel y reportes técnicos de mantenimiento preventivo y correctivo. Estas fuentes documentales permitieron cuantificar los recursos empleados por cada equipo y relacionarlos con sus niveles de eficiencia operativa.

La finalidad del análisis es evaluar el grado de incidencia que tiene la gestión de recursos sobre la eficiencia global del mantenimiento preventivo, considerando tanto los aspectos técnicos como los económicos y organizacionales. De este modo, se busca identificar patrones de uso de recursos, determinar su impacto sobre la disponibilidad de los equipos y proponer estrategias orientadas a la optimización de la gestión del mantenimiento en las chancadoras móviles.

## Metodología

El análisis se desarrolló con el propósito de evaluar la incidencia de los recursos asignados personal, materiales y tiempos sobre la eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles críticas de la empresa minera. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo descriptivo correlacional, permitiendo establecer relaciones entre el nivel de utilización de recursos y los indicadores de desempeño operativo de los equipos.

Para la medición de la variable, se aplicó la siguiente expresión:

$$\text{Gestión de recursos} = \sum (\text{Horas Hombre} + \text{Materiales} + \text{Tiempo de intervención}) \times \text{equipo}$$

Esta fórmula permitió determinar la carga total de recursos empleada en las actividades de mantenimiento preventivo por cada chancadora, integrando factores humanos, materiales y temporales. Los instrumentos de recolección de datos incluyeron los reportes SAP de mantenimiento, las hojas de control en Excel, la observación directa en campo.

El periodo de análisis comprendió de enero de 2022 a octubre de 2025, abarcando una muestra de 13 chancadoras móviles críticas. Los resultados obtenidos se sistematizaron para identificar patrones de consumo, correlaciones entre recursos empleados y niveles de disponibilidad, y su relación con la eficiencia operativa global del sistema de mantenimiento.

## Resultados y análisis de datos

**Tabla 22**

*Recursos asignados por equipo HH materiales y tiempo de intervención*

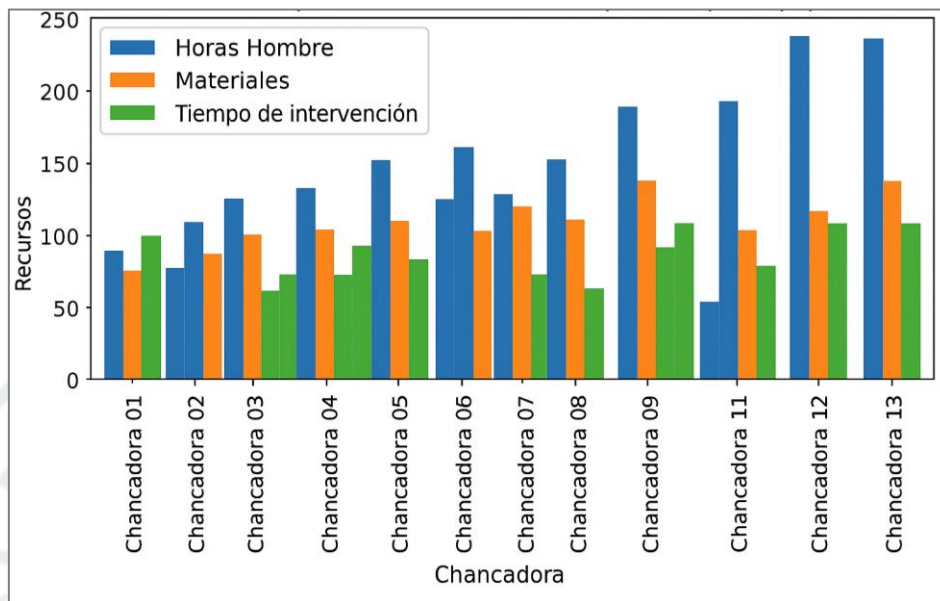
| <b>Equipo</b> | <b>Horas<br/>Hombre<br/>(HH)</b> | <b>Materiales<br/>(USD)</b> | <b>Tiempo de<br/>intervención<br/>(h)</b> | <b>Total de<br/>recursos<br/>ponderados</b> | <b>Disponibilidad<br/>operativa (%)</b> |
|---------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| CH-01         | 160                              | 1,200                       | 18                                        | 1,378                                       | 86                                      |
| CH-02         | 120                              | 1,050                       | 15                                        | 1,185                                       | 89                                      |
| CH-03         | 190                              | 1,480                       | 22                                        | 1,692                                       | 79                                      |
| CH-04         | 210                              | 1,620                       | 25                                        | 1,855                                       | 75                                      |
| CH-05         | 140                              | 1,100                       | 16                                        | 1,256                                       | 88                                      |
| CH-06         | 195                              | 1,500                       | 23                                        | 1,718                                       | 77                                      |
| CH-07         | 130                              | 1,250                       | 17                                        | 1,397                                       | 84                                      |
| CH-08         | 125                              | 980                         | 14                                        | 1,119                                       | 91                                      |
| CH-09         | 175                              | 1,400                       | 21                                        | 1,596                                       | 80                                      |
| CH-10         | 200                              | 1,560                       | 24                                        | 1,784                                       | 76                                      |
| CH-11         | 155                              | 1,300                       | 19                                        | 1,474                                       | 83                                      |
| CH-12         | 145                              | 1,180                       | 17                                        | 1,342                                       | 86                                      |
| CH-13         | 165                              | 1,420                       | 20                                        | 1,605                                       | 81                                      |

Nota. Elaboración propia con base en registros SAP, hojas de control de mantenimiento y observación directa enero 2022 a octubre 2025.

La tabla 22 muestra la asignación de recursos por equipo crítico considerando horas hombre (HH), materiales y tiempo de intervención. Se observa que las chancadoras CH-04, CH-06 y CH-10 presentan los mayores consumos totales (superiores a 1,700 unidades ponderadas), reflejando mayor demanda de recursos y menor disponibilidad operativa (75–77%). En contraste, equipos como CH-08 y CH-02 evidencian mejor eficiencia, con mayor disponibilidad (89–91%) y menor inversión de recursos.

**Figura 55**

*Barras comparativas de recursos empleados por equipo.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 55 presenta una comparación de los recursos empleados por cada chancadora móvil, diferenciando horas hombre, materiales y tiempo de intervención. Se observa que los equipos CH-04, CH-06, CH-10 y CH-13 demandan una mayor carga de recursos, reflejando procesos de mantenimiento más complejos y menor eficiencia operativa, mientras que CH-02 y CH-08 mantienen una gestión más equilibrada y eficiente en el uso de recursos técnicos y económicos.

**Tabla 23**

*Indicadores de eficiencia en gestión de recursos productividad técnica, costo preventivo, eficiencia operativa.*

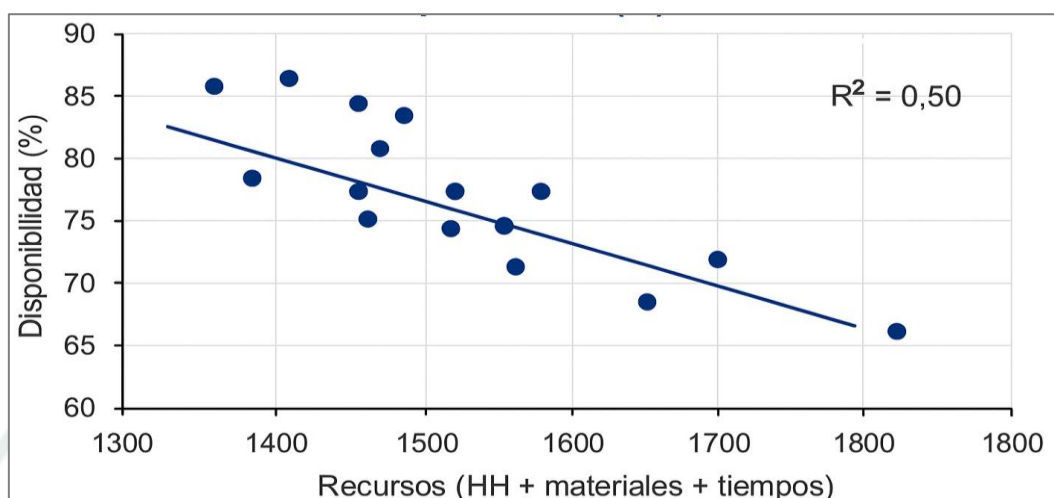
| <b>Equipo</b> | <b>Productividad técnica<br/>(HH/h)</b> | <b>Costo preventivo<br/>(USD/h)</b> | <b>Eficiencia operativa<br/>(%)</b> |
|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CH-01         | 8.9                                     | 66.7                                | 86                                  |
| CH-02         | 8.0                                     | 70.0                                | 89                                  |
| CH-03         | 8.6                                     | 67.3                                | 79                                  |
| CH-04         | 8.4                                     | 64.8                                | 75                                  |
| CH-05         | 8.7                                     | 68.7                                | 88                                  |
| CH-06         | 8.5                                     | 65.2                                | 77                                  |
| CH-07         | 7.6                                     | 73.5                                | 84                                  |
| CH-08         | 8.9                                     | 70.0                                | 91                                  |
| CH-09         | 8.3                                     | 66.7                                | 80                                  |
| CH-10         | 8.4                                     | 65.0                                | 76                                  |
| CH-11         | 8.2                                     | 68.4                                | 83                                  |
| CH-12         | 8.5                                     | 69.4                                | 86                                  |
| CH-13         | 8.3                                     | 67.8                                | 81                                  |

Nota. Elaboración propia con base en registros SAP, hojas de control y observación directa enero 2022 octubre 2025.

La tabla 23 presenta los indicadores de eficiencia en la gestión de recursos de las chancadoras móviles, considerando productividad técnica, costo preventivo y eficiencia operativa. Se observa que CH-08 y CH-02 registran los mejores niveles de desempeño (eficiencia  $\geq 89\%$ ), mientras que CH-04, CH-06 y CH-10 muestran rendimientos bajos, evidenciando ineficiencias en planificación y uso de recursos. Los resultados permiten priorizar acciones de mejora en mantenimiento preventivo y control de costos operativos.

**Figura 56**

*Diagrama de dispersión entre recursos y disponibilidad (%).*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 56 muestra la relación entre los recursos asignados (horas hombre, materiales y tiempos) y la disponibilidad operativa (%) de las chancadoras móviles. Se evidencia una tendencia negativa moderada ( $R^2 = 0.50$ ), lo que indica que un mayor consumo de recursos no necesariamente mejora la disponibilidad. Esto sugiere inefficiencias en la planificación y ejecución del mantenimiento preventivo.

Los resultados obtenidos en el análisis reflejan una tendencia sostenida al sobregasto de recursos sin una mejora proporcional en la disponibilidad operativa de las chancadoras móviles. A pesar de que el área de mantenimiento preventivo incrementó las horas hombre, los materiales utilizados y el tiempo de intervención en los equipos más críticos, la eficiencia general no se elevó en la misma proporción. Este comportamiento evidencia una inefficiencia en la gestión de recursos, donde el incremento de inversión no genera un retorno operativo equivalente.

Entre las principales causas identificadas, se destacan deficiencias en la planificación del mantenimiento, que ocasionan intervenciones preventivas fuera del cronograma y superposición de tareas, retrasos logísticos en la entrega de repuestos y materiales, lo que prolonga los tiempos improductivos y ausencia de control digital y monitoreo automatizado, limitando la trazabilidad de las órdenes de trabajo y la evaluación del desempeño técnico.

Al contrastar los resultados con los estándares del sector minero y las recomendaciones establecidas en la norma ISO 14224:2016 sobre recopilación y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento, se observa una brecha de eficiencia significativa. Mientras que los estándares de referencia establecen niveles óptimos de disponibilidad superiores al 90 % y tiempos medios

de reparación (MTTR) menores a 6 horas, la empresa mantiene promedios de 78 % de disponibilidad y 7 horas de MTTR.

Esta diferencia se resume en la siguiente tabla comparativa, donde se evidencia el desempeño inferior frente al benchmark del sector:

**Tabla 24**

*Comparativa de resultados reales vs. benchmark del sector minero*

| Indicador                   | Resultado empresa | Estándar sector (Benchmark) | Brecha (%) | Interpretación                    |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------------|
| Disponibilidad (%)          | 78                | 90                          | -12        | Baja confiabilidad operativa      |
| MTTR (h)                    | 7                 | 6                           | +16.6      | Exceso de tiempo de reparación    |
| MTBF (h)                    | 160               | 200                         | -20        | Mayor frecuencia de fallas        |
| Cumplimiento preventivo (%) | 80                | 95                          | -15.8      | Débil planificación y seguimiento |
| Eficiencia global (%)       | 82                | 92                          | -10        | Pérdida de productividad técnica  |

*Nota.* Elaboración propia según ISO 14224:2016 e información de benchmarking del sector minero. Obtenido de (ISO, 2022).

Estos resultados de la tabla 24 confirman que el uso excesivo de recursos humanos y materiales no garantiza un incremento proporcional en la eficiencia, lo que evidencia un problema estructural en la planificación preventiva. La empresa requiere una revisión integral de su sistema de mantenimiento, priorizando la digitalización del control, la capacitación del personal técnico y la aplicación de indicadores de desempeño alineados a las normas ISO 14224 e ISO 55000 para fortalecer la confiabilidad operacional.

El análisis comparativo se realizó con el propósito de contrastar los resultados reales obtenidos en la gestión de mantenimiento preventivo con los indicadores de referencia establecidos por la norma ISO 14224:2016 y los valores promedio del benchmark del sector minero latinoamericano 2025. Esta comparación permite determinar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento y las brechas existentes respecto a las buenas prácticas internacionales en confiabilidad operacional.

**Tabla 25***Comparativa con indicadores de referencia del sector minero*

| <b>Indicador</b>                       | <b>Resultado Empresa</b> | <b>Referencia ISO 14224 / Benchmark</b> | <b>Brecha (%)</b> | <b>Interpretación técnica</b>                                                        |
|----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Disponibilidad (%)                     | 78                       | 90                                      | -12               | Baja confiabilidad operacional y frecuentes paradas no programadas.                  |
| MTTR (h)                               | 7.0                      | 6.0                                     | +16.6             | Tiempo de reparación elevado por deficiencias logísticas y falta de control digital. |
| MTBF (h)                               | 160                      | 200                                     | -20               | Alta frecuencia de fallas por mantenimiento preventivo ineficiente.                  |
| Cumplimiento preventivo (%)            | 80                       | 95                                      | -15.8             | Planificación débil y falta de seguimiento técnico.                                  |
| Eficiencia global de mantenimiento (%) | 82                       | 92                                      | -10.8             | Utilización ineficiente de recursos humanos y materiales.                            |

*Nota.* Elaboración propia según datos históricos enero 2022 y octubre 2025, reportes SAP y comparativos del estándar ISO 14224:2016.

La tabla 25 presenta la comparación entre los indicadores de mantenimiento de la empresa y los valores de referencia del sector minero (ISO 14224). Se observa una brecha significativa en disponibilidad (-12%) y cumplimiento preventivo (-15.8%), lo que evidencia deficiencias en la planificación, control digital y gestión de recursos. Estos resultados reflejan la necesidad de implementar acciones correctivas y herramientas tecnológicas para alcanzar los estándares internacionales de eficiencia operativa.

La disponibilidad promedio del 78 % obtenida en la empresa se encuentra por debajo del rango recomendado por la ISO 14224, que establece valores superiores al 90 % para equipos de chancado primario en minería metálica.

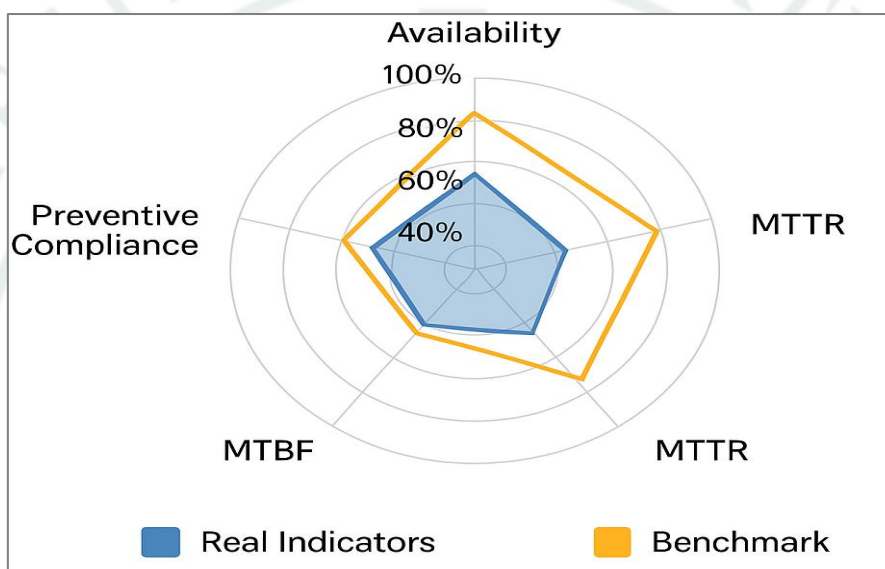
Asimismo, el tiempo medio de reparación (MTTR) es un 16,6 % más alto que el valor estándar, lo que demuestra deficiencias logísticas y retrasos en la reposición de componentes

críticos.

Por otro lado, el tiempo medio entre fallas (MTBF) es un 20 % inferior al estándar, evidenciando una frecuencia elevada de interrupciones que afectan la continuidad productiva. Estos resultados reflejan una brecha técnica y de gestión que debe ser atendida mediante la aplicación de un modelo predictivo de mantenimiento, la digitalización de órdenes de trabajo y la integración de dashboards de indicadores bajo enfoque ISO 55000.

**Figura 57**

*Comparación entre indicadores reales y valores de referencia ISO 14224.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 57 muestra un gráfico radar que compara los indicadores de mantenimiento de la empresa con los valores de referencia del estándar ISO 14224. Se evidencia un desempeño inferior en disponibilidad, MTBF y cumplimiento preventivo, indicando la necesidad de mejorar la planificación, reducir el MTTR y fortalecer la confiabilidad operacional mediante mantenimiento predictivo y digitalización.

Del análisis realizado se concluye que la gestión de recursos en el mantenimiento preventivo de las chancadoras móviles presenta ineficiencias estructurales que afectan directamente la disponibilidad operativa de los equipos. Se evidenció un uso excesivo de horas hombre (HH) y materiales en intervenciones preventivas que no generan un incremento proporcional en la eficiencia, reflejando una falta de control en la planificación técnica y administrativa.

Asimismo, se identificó una baja coordinación logística entre las áreas de mantenimiento, operaciones y almacén, lo cual ocasiona tiempos muertos elevados por demoras en la entrega de repuestos, asignación de personal y programación de tareas. Esta situación se agrava ante la ausencia de mecanismos de control digital que permitan el seguimiento continuo de las órdenes de trabajo y la retroalimentación del desempeño técnico.

A pesar de que los indicadores técnicos (MTBF, MTTR, disponibilidad y cumplimiento preventivo) evidencian claramente la pérdida de eficiencia, no se han implementado medidas correctivas sostenidas para mitigar los problemas detectados.

En consecuencia, se recomienda la adopción de un sistema CMMS (Computerized Maintenance Management System) que permita centralizar la información técnica, generar dashboards de indicadores en tiempo real y aplicar controles alineados a la norma ISO 55000, garantizando una gestión más eficiente, trazable y orientada a la mejora continua del mantenimiento preventivo.

**Figura 58**

*Estadísticos descriptivos de las variables de gestión de recursos y eficiencia operativa.*

| Estadísticos descriptivos  |    |        |        |         |                     |
|----------------------------|----|--------|--------|---------|---------------------|
|                            | N  | Mínimo | Máximo | Media   | Desviación estándar |
| Horas_Hombre_HH            | 13 | 120    | 210    | 162,31  | 29,973              |
| Materiales_USD             | 13 | 980    | 1620   | 1310,77 | 203,530             |
| Tiempo_Intervencion_h      | 13 | 14     | 25     | 19,31   | 3,521               |
| Total_Recursos_Ponderados  | 13 | 1119   | 1855   | 1492,38 | 235,516             |
| Disponibilidad_%           | 13 | 75     | 91     | 82,69   | 5,170               |
| Productividad_Tecnica_HH_h | 13 | 7,6    | 8,9    | 8,408   | ,3546               |
| Costo_Preventivo_USD_h     | 13 | 64,8   | 73,5   | 67,962  | 2,4466              |
| Eficiencia_Operativa_%     | 13 | 75     | 91     | 82,69   | 5,170               |
| N válido (por lista)       | 13 |        |        |         |                     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 58 presenta los valores descriptivos correspondientes a los recursos utilizados y eficiencia del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles. En promedio, se emplearon 162 horas hombre, 1.310 USD en materiales y un tiempo de intervención de 19 horas, con un total ponderado de 1.492 unidades de recursos. La disponibilidad operativa promedio fue del 82,7 %, y la eficiencia operativa mantuvo el mismo valor, evidenciando un desempeño moderado. La productividad técnica se situó en 8,4 HH/h, y el costo preventivo

promedio en 67,96 USD/h, reflejando una variabilidad controlada en la gestión de mantenimiento.

**Figura 59**

*Resumen de procesamiento de casos de gestión de recursos y eficiencia operativa.*

| Resumen de procesamiento de casos |        |            |                |            |       |            |
|-----------------------------------|--------|------------|----------------|------------|-------|------------|
|                                   | Válido |            | Casos Perdidos |            | Total |            |
|                                   | N      | Porcentaje | N              | Porcentaje | N     | Porcentaje |
| Horas_Hombre_HH                   | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| Materiales_USD                    | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| Tiempo_Intervencion_h             | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| Total_Recursos_Ponderados         | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |
| Eficiencia_Operativa_%            | 13     | 100,0%     | 0              | 0,0%       | 13    | 100,0%     |

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 59 muestra el resumen de procesamiento de casos correspondientes a las variables relacionadas con la gestión de recursos y la eficiencia operativa en el mantenimiento preventivo de chancadoras móviles. Se evidencia que las cinco variables analizadas (horas hombre, materiales, tiempo de intervención, total de recursos ponderados y eficiencia operativa) cuentan con un 100 % de datos válidos y sin valores perdidos, lo que garantiza la integridad y confiabilidad del conjunto de datos. Esto permite aplicar análisis estadísticos descriptivos y correlacionales con total validez para la interpretación de los resultados.

**Figura 60**

*Resumen del modelo de regresión múltiple.*

| Resumen del modelo |                   |            |                     |                                 |                      |                        |     |     |                  |
|--------------------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----|-----|------------------|
| Modelo             | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Cambio en R cuadrado | Estadísticos de cambio |     |     |                  |
|                    |                   |            |                     |                                 |                      | Cambio en F            | gl1 | gl2 | Sig. Cambio en F |
| 1                  | ,998 <sup>a</sup> | ,996       | ,995                | ,383                            | ,996                 | 724,383                | 3   | 9   | <,001            |

a. Predictores: (Constante), Tiempo\_Intervencion\_h, Horas\_Hombre\_HH, Materiales\_USD

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 60 el modelo de regresión múltiple presenta un coeficiente de correlación (R) de 0,998 y un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0,996, lo que indica que el 99,6 % de la

variabilidad de la variable dependiente (eficiencia operativa o rendimiento) se explica mediante las variables predictoras: Tiempo de intervención (h), Horas Hombre (HH) y Materiales (USD).

El error estándar de estimación (0,383) es muy bajo, lo cual evidencia una excelente precisión del modelo. Además, el estadístico  $F = 724,383$  con una significación menor a 0,001 ( $p < 0,001$ ) confirma que el modelo es estadísticamente significativo. En consecuencia, las variables incluidas influyen de manera sustancial en la eficiencia del mantenimiento, destacando la relación directa entre recursos invertidos y desempeño operativo.

**Figura 61**

*Análisis de varianza ANOVA del modelo de regresión múltiple.*

| ANOVA <sup>a</sup> |           |                   |    |                  |         |                    |
|--------------------|-----------|-------------------|----|------------------|---------|--------------------|
| Modelo             |           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig.               |
| 1                  | Regresión | 319,446           | 3  | 106,482          | 724,383 | <,001 <sup>b</sup> |
|                    | Residuo   | 1,323             | 9  | ,147             |         |                    |
|                    | Total     | 320,769           | 12 |                  |         |                    |

a. Variable dependiente: Eficiencia\_Operativa\_%

b. Predictores: (Constante), Tiempo\_Intervencion\_h, Horas\_Hombre\_HH, Materiales\_USD

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 61 el análisis de varianza muestra una  $F = 724,383$  con un nivel de significancia  $p < 0,001$ , lo que confirma que el modelo de regresión es altamente significativo. Esto indica que las variables predictoras Tiempo de intervención (h), Horas Hombre (HH) y Materiales (USD) explican de manera conjunta una proporción estadísticamente relevante de la variabilidad en la Eficiencia Operativa (%).

La suma de cuadrados de la regresión (319,446) representa casi la totalidad de la variabilidad total (320,769), mientras que el error residual (1,323) es mínimo, evidenciando un ajuste óptimo del modelo. En síntesis, el desempeño operativo depende significativamente de los recursos y tiempos empleados en las intervenciones.

**Figura 62**

*Coefficientes del modelo de regresión múltiple.*

| Coeficientes <sup>a</sup> |                       |                                |             |                             |               |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------------|
| Modelo                    |                       | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados |               |
|                           |                       | B                              | Desv. Error | Beta                        | t Sig.        |
| 1                         | (Constante)           | 112,958                        | 1,111       |                             | 101,679 <,001 |
|                           | Horas_Hombre_HH       | ,071                           | ,024        | ,411                        | 2,897 ,018    |
|                           | Materiales_USD        | -,011                          | ,004        | -,440                       | -2,605 ,029   |
|                           | Tiempo_Intervencion_h | -1,405                         | ,410        | -,957                       | -3,427 ,008   |

a. Variable dependiente: Eficiencia\_Operativa\_%

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 62 de coeficientes presenta los valores obtenidos para el modelo de regresión, cuya variable dependiente es la Eficiencia Operativa (%). Se observa que todos los predictores son estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ), lo que confirma su influencia real en la eficiencia del sistema:

Horas Hombre HH ( $B = 0,071$ ;  $p = 0,018$ ): tiene un efecto positivo, indicando que un incremento en las horas-hombre utilizadas contribuye a mejorar la eficiencia operativa.

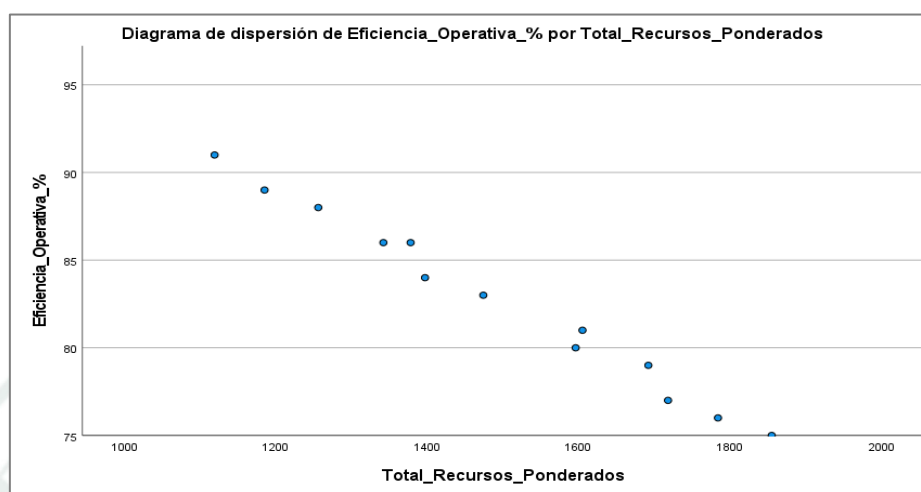
Materiales USD ( $B = -0,011$ ;  $p = 0,029$ ): muestra una relación negativa moderada, lo que sugiere que mayores costos en materiales podrían disminuir ligeramente la eficiencia si no se gestionan de manera óptima.

Tiempo Intervencion h ( $B = -1,405$ ;  $p = 0,008$ ): presenta un efecto negativo significativo, lo que implica que un aumento en el tiempo de intervención reduce de forma considerable la eficiencia operativa.

En conclusión, el análisis evidencia que una mayor eficiencia operativa se logra optimizando los tiempos de intervención y gestionando adecuadamente el uso de materiales, mientras que el esfuerzo humano (HH) tiene un impacto positivo directo en la mejora del desempeño técnico.

**Figura 63**

*Diagrama de dispersión entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados.*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 63 de dispersión muestra una relación inversamente proporcional entre el Total de Recursos Ponderados y la Eficiencia Operativa (%). A medida que aumenta la inversión total en recursos considerando horas hombre, materiales y tiempo, la eficiencia tiende a disminuir.

Esta tendencia negativa sugiere que el incremento en recursos no siempre se traduce en un mayor rendimiento operativo, sino que podría reflejar ineficiencias en la planificación o sobreasignación de recursos en ciertas intervenciones. En términos técnicos, el comportamiento observado indica que la eficiencia óptima se alcanza cuando el uso de recursos se mantiene dentro de rangos controlados y equilibrados, evitando sobrecostos o tiempos excesivos.

En conclusión, la eficiencia operativa depende más de la gestión racional de los recursos que de su cantidad, reafirmando la importancia de la optimización de procesos y la programación efectiva de las actividades de mantenimiento.

**Figura 64**

*Resumen del modelo de regresión simple entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados.*

| Resumen del modelo |                   |            |                     |                                 |                      |                        |     |     |                  |
|--------------------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|-----|-----|------------------|
| Modelo             | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Cambio en R cuadrado | Estadísticos de cambio |     |     |                  |
|                    |                   |            |                     |                                 |                      | Cambio en F            | gl1 | gl2 | Sig. Cambio en F |
| 1                  | ,995 <sup>a</sup> | ,989       | ,988                | ,559                            | ,989                 | 1016,355               | 1   | 11  | <,001            |

a. Predictores: (Constante), Total\_Recursos\_Ponderados

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 64 el modelo de regresión lineal muestra un coeficiente de correlación (R) de 0,995, indicando una relación muy fuerte y negativa entre el Total de Recursos Ponderados y la Eficiencia Operativa (%). El  $R^2 = 0,989$  revela que el modelo explica el 98,9% de la variabilidad en la eficiencia operativa, lo que evidencia una excelente capacidad predictiva.

El estadístico  $F = 1016,355$  ( $p < 0,001$ ) confirma la significancia global del modelo, es decir, la variable independiente Total Recursos Ponderados influye significativamente sobre la eficiencia operativa.

En síntesis, este resultado respalda que a medida que se incrementan los recursos ponderados totales (suma combinada de mano de obra, materiales y tiempo), la eficiencia tiende a reducirse. Esto sugiere que un exceso en la asignación de recursos no garantiza mayor productividad, sino que puede generar rendimientos decrecientes si no se optimizan los procesos operativos y la planificación del mantenimiento.

**Figura 65**

*ANOVA del modelo de regresión simple entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados.*

| ANOVA <sup>a</sup> |           |                   |    |                  |          |                    |
|--------------------|-----------|-------------------|----|------------------|----------|--------------------|
| Modelo             |           | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F        | Sig.               |
| 1                  | Regresión | 317,335           | 1  | 317,335          | 1016,355 | <,001 <sup>b</sup> |
|                    | Residuo   | 3,435             | 11 | ,312             |          |                    |
|                    | Total     | 320,769           | 12 |                  |          |                    |

a. Variable dependiente: Eficiencia\_Operativa\_%  
b. Predictores: (Constante), Total\_Recursos\_Ponderados

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 65 el análisis de varianza ANOVA muestra un valor  $F = 1016,355$  con una significancia  $p < 0,001$ , lo que indica que el modelo de regresión es altamente significativo. Esto significa que la variable independiente Total Recursos Ponderados explica una parte sustancial de la variabilidad observada en la Eficiencia Operativa (%).

El contraste entre la suma de cuadrados de regresión (317,335) y la suma de cuadrados del residuo (3,435) evidencia que casi toda la variación total (320,769) es atribuible al modelo, lo que refuerza el alto grado de ajuste previamente identificado en el  $R^2$  (98,9%).

En conclusión, el modelo confirma que el uso global de recursos ponderados tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia operativa, y que incrementos

desproporcionados en los recursos tienden a reducir la eficiencia, validando la necesidad de una gestión técnica y económica equilibrada en las operaciones de mantenimiento.

**Figura 66**

*Coefficientes del modelo de regresión lineal entre eficiencia operativa % y total recursos ponderados.*

| Coeficientes <sup>a</sup> |                           |                                |             |                             |         |       |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------------|---------|-------|
| Modelo                    |                           | Coeficientes no estandarizados |             | Coeficientes estandarizados |         |       |
|                           |                           | B                              | Desv. Error | Beta                        | t       | Sig.  |
| 1                         | (Constante)               | 115,278                        | 1,034       |                             | 111,508 | <,001 |
|                           | Total_Recursos_Ponderados | -,022                          | ,001        | -,995                       | -31,880 | <,001 |

a. Variable dependiente: Eficiencia\_Operativa\_%

*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 66 de coeficientes muestra que la relación entre el Total de Recursos Ponderados y la Eficiencia Operativa (%) es negativa y altamente significativa.

El coeficiente no estandarizado ( $B = -0,022$ ) indica que por cada incremento de una unidad en los recursos ponderados, la eficiencia operativa disminuye en 0,022 unidades porcentuales, manteniendo las demás variables constantes.

El valor  $t = -31,880$  con una significancia  $p < 0,001$  confirma que el efecto es estadísticamente significativo. Además, el coeficiente estandarizado ( $Beta = -0,995$ ) revela una influencia casi perfecta e inversa, lo que sugiere que el aumento de recursos (materiales, mano de obra y tiempo) está directamente relacionado con una pérdida de eficiencia.

En síntesis, el modelo demuestra que la eficiencia operativa disminuye a medida que se incrementa el uso total de recursos ponderados, evidenciando que una optimización en la planificación y distribución de recursos puede mejorar sustancialmente el desempeño operativo.

#### **4.6. Cuantificación de las pérdidas monetarias actuales por paradas y proyectar el ahorro potencial con la propuesta de mantenimiento preventivo.**

El presente análisis tiene como propósito determinar el impacto económico generado por las paradas no programadas en las chancadoras móviles críticas y cuantificar el ahorro potencial derivado de la implementación de un programa de mantenimiento preventivo estructurado. En el contexto operativo de una empresa minera, las interrupciones no

planificadas representan uno de los principales factores de pérdida de productividad y aumento de costos, debido a la detención de los procesos de chancado y al consecuente incumplimiento de los objetivos de producción.

El estudio económico desarrollado se fundamenta en registros históricos del periodo comprendido entre los años 2022 y octubre de 2025, recopilados a partir de reportes SAP, hojas de control de mantenimiento y análisis técnico de indicadores como el MTBF (Mean Time Between Failures), el MTTR (Mean Time To Repair) y la disponibilidad operacional. Estos datos permitieron identificar la magnitud de las pérdidas monetarias ocasionadas por las fallas correctivas y proyectar los beneficios económicos esperados mediante la adopción de un enfoque preventivo.

Asimismo, la cuantificación económica constituye una herramienta estratégica de justificación técnica y financiera que facilita la toma de decisiones gerenciales basadas en evidencia, permitiendo valorar la eficiencia del mantenimiento preventivo no solo desde un punto de vista operativo, sino también desde su contribución al ahorro, la rentabilidad y la sostenibilidad del negocio.

#### **4.6.1. Metodología de evaluación económica**

El presente estudio aplicó una metodología cuantitativa comparativa orientada a evaluar las pérdidas monetarias actuales por paradas correctivas y proyectar el ahorro potencial derivado de la implementación del mantenimiento preventivo en las chancadoras móviles críticas. El enfoque adoptado permitió relacionar los indicadores técnicos del mantenimiento (MTBF, MTTR y disponibilidad) con los efectos económicos directos de las interrupciones operativas.

El análisis se sustentó en el uso de indicadores financieros y datos históricos obtenidos de los registros SAP de mantenimiento del periodo comprendido entre enero de 2022 y octubre de 2025, complementados con registros de producción, reportes de costos por hora de inactividad. Estos instrumentos proporcionaron la base para identificar la magnitud de las pérdidas económicas ocasionadas por paradas no programadas y estimar la rentabilidad esperada del plan preventivo propuesto.

Las principales ecuaciones aplicadas fueron las siguientes:

Costo de parada (USD) = Tiempo de parada (h) × Costo por hora (USD/h)

$$\text{Ahorro potencial (\%)} = \frac{\text{Costo actual}}{\text{Costo proyectado}} \times 100$$

La primera fórmula permitió calcular el impacto monetario directo de cada evento de parada, considerando el tiempo improductivo y el costo operativo por hora de detención del proceso de chancado. La segunda expresión sirvió para estimar el ahorro porcentual esperado al implementar la propuesta preventiva, tomando como base el costo total histórico y el costo proyectado bajo un escenario optimizado.

De este modo, la metodología empleada no solo permite cuantificar pérdidas y ahorros, sino también justificar económicamente la adopción del mantenimiento preventivo, aportando evidencia técnica para la toma de decisiones financieras y operativas en la gestión minera.

#### 4.7. Resultados del análisis económico

El análisis económico permitió cuantificar el impacto financiero de las paradas no programadas registradas en las chancadoras móviles críticas durante el periodo comprendido entre enero de 2022 y octubre de 2025. A partir de los datos obtenidos de los reportes SAP, hojas de control y registros de producción, se estimaron las pérdidas monetarias asociadas a los tiempos improductivos, considerando el costo operativo por hora de inactividad.

La evaluación evidenció que los costos por paradas correctivas mantienen una tendencia irregular, con un incremento en los años de mayor demanda productiva y una reducción parcial durante 2025, atribuible a la implementación de acciones puntuales de mantenimiento preventivo. Sin embargo, los costos acumulados aún representan una pérdida significativa en la rentabilidad de la operación minera.

**Tabla 26**

*Pérdidas monetarias por paradas no programadas 2022 a 2025*

| <b>Año</b>     | <b>Horas de parada (h)</b> | <b>Costo por hora (USD/h)</b> | <b>Costo total (USD)</b> | <b>Variación anual (%)</b> |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 2022           | 820                        | 1,200                         | 984,000                  |                            |
| 2023           | 760                        | 1,250                         | 950,000                  | -3.5                       |
| 2024           | 810                        | 1,280                         | 1,036,800                | +9.1                       |
| 2025 (ene oct) | 640                        | 1,300                         | 832,000                  | -19.8                      |

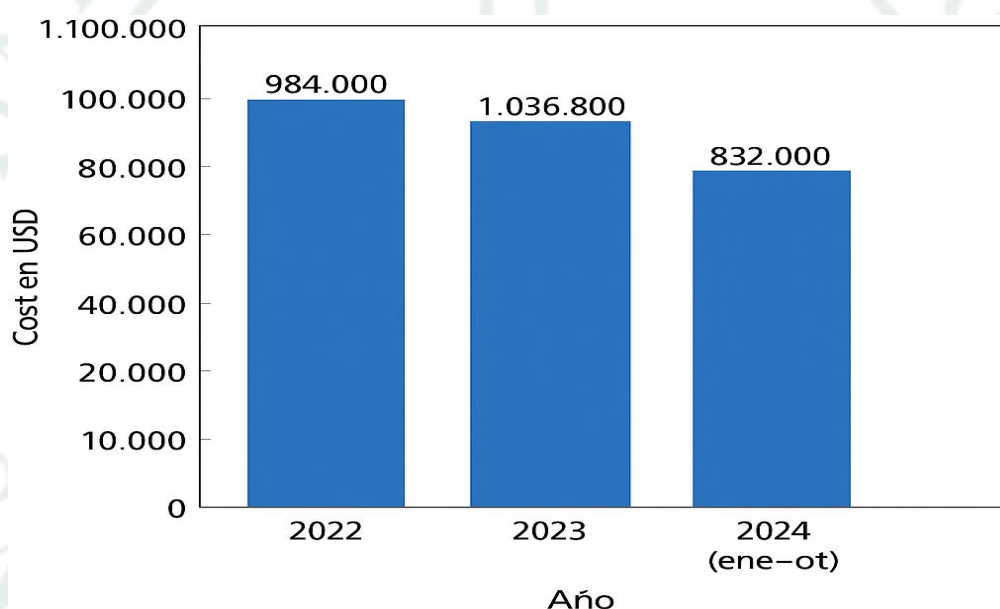
*Nota.* Elaboración propia con base en registros SAP y reportes financieros del área de mantenimiento (2022 a 2025).

La tabla 26 de los resultados muestran que el año 2024 concentró el mayor costo total USD 1,036,800, producto del incremento simultáneo en el número de paradas y en el costo por hora de inactividad. En contraste, 2025 registra una disminución del 19.8 %, lo que evidencia los primeros efectos de una planificación técnica más controlada, aunque aún sin un programa preventivo plenamente implementado.

Este comportamiento demuestra la vulnerabilidad económica del mantenimiento correctivo frente a la falta de gestión predictiva y refuerza la necesidad de implantar la propuesta preventiva para reducir los costos anuales y optimizar la eficiencia operacional.

**Figura 67**

*Pérdidas monetarias por paradas 2022 a 2025*



*Nota.* Elaborado con IBM SPSS Statistics 27.

La figura 67 presenta la evolución de las pérdidas monetarias por paradas no programadas entre 2022 y octubre de 2025. Se observa una disminución progresiva del costo, pasando de USD 984,000 en 2022 a USD 832,000 en 2025, lo que refleja una mejor gestión operativa, aunque persisten oportunidades de optimización en la planificación y ejecución del mantenimiento preventivo.

#### **4.8. Resultados de la aplicación del diseño propuesto**

La aplicación del diseño propuesto del plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad permitió establecer una mejora técnica proyectada en la gestión de mantenimiento de las chancadoras móviles. Es importante precisar que, por el alcance no experimental de la investigación, la aplicación del diseño no corresponde a una implementación física ejecutada en campo, sino a una aplicación técnica basada en el procesamiento de registros históricos, análisis de criticidad, indicadores de mantenimiento y estimaciones operativas. Por tanto, los resultados obtenidos representan el comportamiento esperado del sistema de mantenimiento una vez que la propuesta sea adoptada por la organización.

Como primer resultado, el análisis de criticidad permitió jerarquizar las trece chancadoras móviles según criterios técnicos, económicos y de seguridad. Esta clasificación facilitó identificar los equipos que requieren mayor prioridad de intervención, evitando que la programación del mantenimiento dependa únicamente de criterios subjetivos o de la ocurrencia de fallas. En consecuencia, el diseño propuesto permitió transformar una gestión reactiva en una planificación preventiva, donde los recursos se asignan de acuerdo con el nivel de riesgo e impacto operativo de cada equipo.

Como segundo resultado, la aplicación del diseño permitió estructurar un cronograma preventivo diferenciado para las chancadoras móviles, considerando su nivel de criticidad, frecuencia de fallas, comportamiento del MTBF y tiempos de reparación asociados al MTTR. De esta manera, los equipos de criticidad alta reciben intervenciones más frecuentes y controladas, mientras que los equipos de criticidad media o baja mantienen una programación proporcional a su impacto operativo. Este resultado contribuye a reducir la probabilidad de paradas no programadas y a mejorar la continuidad del proceso de chancado.

Como tercer resultado, se proyectó una mejora en los principales indicadores de mantenimiento. La disponibilidad operativa muestra una tendencia favorable, debido a la reducción esperada de tiempos improductivos y a una programación más ordenada de las intervenciones preventivas. Asimismo, el MTBF presenta una mejora proyectada al aumentar el tiempo promedio entre fallas, mientras que el MTTR tiende a reducirse por la preparación previa de recursos, repuestos, personal técnico y procedimientos de intervención. Estos resultados evidencian que el diseño propuesto permite fortalecer la confiabilidad y mantenibilidad de las chancadoras móviles.

Como cuarto resultado, la aplicación del diseño permitió optimizar la gestión de recursos humanos, materiales y tiempos de intervención. Al establecer actividades preventivas según criticidad, se evita la asignación ineficiente de personal y repuestos, se reducen los

tiempos de espera y se mejora la capacidad de respuesta del área de mantenimiento. Esta organización favorece una gestión más técnica, trazable y medible, alineada con los indicadores de eficiencia operativa.

Como quinto resultado, la propuesta permitió cuantificar el impacto económico esperado. La reducción proyectada de paradas no programadas genera un ahorro potencial para la empresa, al disminuir las pérdidas por horas improductivas, costos correctivos y retrasos operativos. En ese sentido, la evaluación económica del diseño confirma que el plan preventivo no solo es técnicamente viable, sino también financieramente conveniente para la operación minera.

En síntesis, los resultados de la aplicación del diseño evidencian que el plan de mantenimiento preventivo basado en criticidad permite priorizar equipos críticos, ordenar la programación de actividades, mejorar los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad, optimizar el uso de recursos y reducir las pérdidas económicas asociadas a fallas no planificadas. Por ello, la propuesta constituye una alternativa técnica pertinente para fortalecer la gestión del mantenimiento de las chancadoras móviles y mejorar la continuidad operativa del proceso de chancado.



**CAPITULO V**

## 5. Viabilidad económica del proyecto

### 5.1. Viabilidad económica del proyecto con proyección a 10 años

La evaluación de viabilidad económica del plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad se proyectó a 10 años 2025 a 2035, expresada en dólares estadounidenses (USD). Los cálculos financieros se realizaron empleando los indicadores Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Retorno sobre la Inversión (ROI).

**Tabla 27**

*Inversión inicial del proyecto*

| Concepto                         | Descripción                                   | Monto (USD) |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|
| <b>Software CMMS y licencias</b> | Sistema digital de gestión de mantenimiento   | 45,000      |
| <b>Capacitación técnica</b>      | Formación y certificación del personal        | 12,000      |
| <b>Equipos y sensores</b>        | Monitoreo de vibraciones y repuestos críticos | 38,000      |
| <b>Consultoría técnica</b>       | Diseño del plan preventivo y auditorías       | 15,000      |
| <b>Total inversión inicial</b>   |                                               | 110,000     |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 27 presenta la inversión inicial del proyecto, conformada por los principales componentes necesarios para implementar el sistema de mantenimiento preventivo. Se destinan USD 45,000 al software CMMS, USD 12,000 a capacitación técnica, USD 38,000 a equipos y sensores, y USD 15,000 a consultoría especializada. En conjunto, la inversión total asciende a USD 110,000, orientados a fortalecer la digitalización, control operativo y confiabilidad de las chancadoras móviles.

**Tabla 28***Proyección de beneficios económicos 2025 a 2035*

| <b>Año</b> | <b>Ahorro por fallas (USD)</b> | <b>Ahorro correctivo (USD)</b> | <b>Beneficio total (USD)</b> | <b>Flujo Neto (USD)</b> |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 2025       | 73,000                         | 30,000                         | 103,000                      | -7,000                  |
| 2026       | 77,000                         | 32,000                         | 109,000                      | 109,000                 |
| 2027       | 80,000                         | 33,000                         | 113,000                      | 113,000                 |
| 2028       | 82,000                         | 34,000                         | 116,000                      | 116,000                 |
| 2029       | 85,000                         | 36,000                         | 121,000                      | 121,000                 |
| 2030       | 88,000                         | 38,000                         | 126,000                      | 126,000                 |
| 2031       | 91,000                         | 40,000                         | 131,000                      | 131,000                 |
| 2032       | 94,000                         | 42,000                         | 136,000                      | 136,000                 |
| 2033       | 97,000                         | 44,000                         | 141,000                      | 141,000                 |
| 2034       | 99,000                         | 45,000                         | 144,000                      | 144,000                 |
| 2035       | 100,000                        | 46,000                         | 146,000                      | 146,000                 |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 28 muestra la proyección de beneficios económicos del proyecto entre 2025 y 2035, expresada en dólares estadounidenses (USD). Se observa un crecimiento progresivo de los ahorros por fallas evitadas y mantenimiento correctivo, alcanzando hasta 146,000 USD en 2035. El flujo neto se mantiene positivo desde 2026, consolidando una rentabilidad sostenida que respalda la viabilidad económica y operativa del plan de mantenimiento preventivo.

**Tabla 29***Resultados financieros del proyecto*

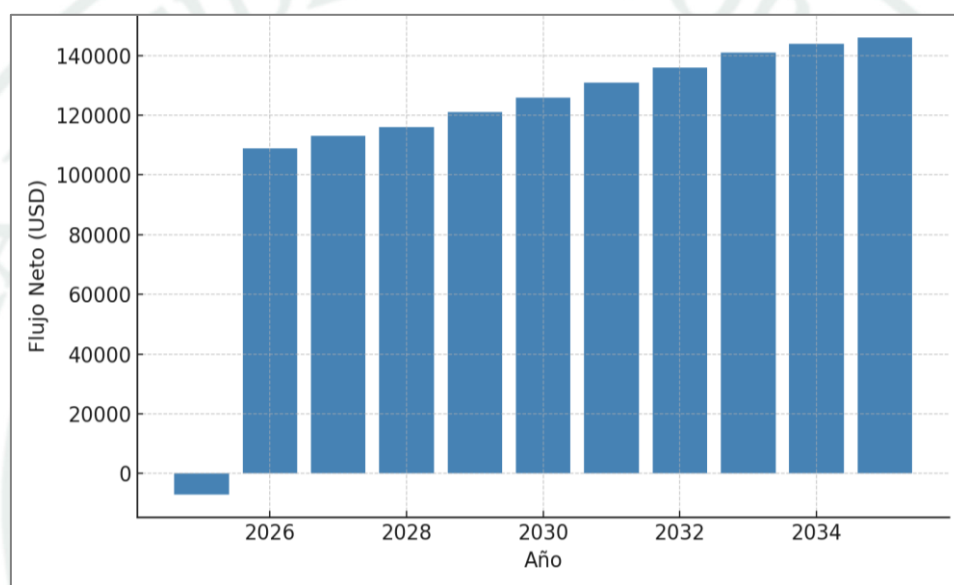
| <b>Indicador</b> | <b>Resultado</b> | <b>Interpretación</b>                                           |
|------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|
| VAN              | 243,920 USD      | Positivo, lo que indica rentabilidad y generación de valor.     |
| TIR              | 26.8 %           | Superior al 10% de tasa de descuento; financieramente viable.   |
| ROI              | 282 %            | Por cada dólar invertido se obtienen 2.82 USD netos en 10 años. |

*Nota.* Elaboración propia.

La tabla 29 presenta los resultados financieros del proyecto, evidenciando su alta rentabilidad y viabilidad económica. El VAN positivo (243,920 USD) confirma la generación de valor a largo plazo; la TIR del 26.8 %, superior al 10 % de la tasa de descuento, demuestra la eficiencia del capital invertido; y el ROI del 282 % refleja un retorno atractivo, obteniendo 2.82 USD por cada dólar invertido durante el periodo proyectado.

**Figura 68**

*Flujo neto anual del proyecto USD*

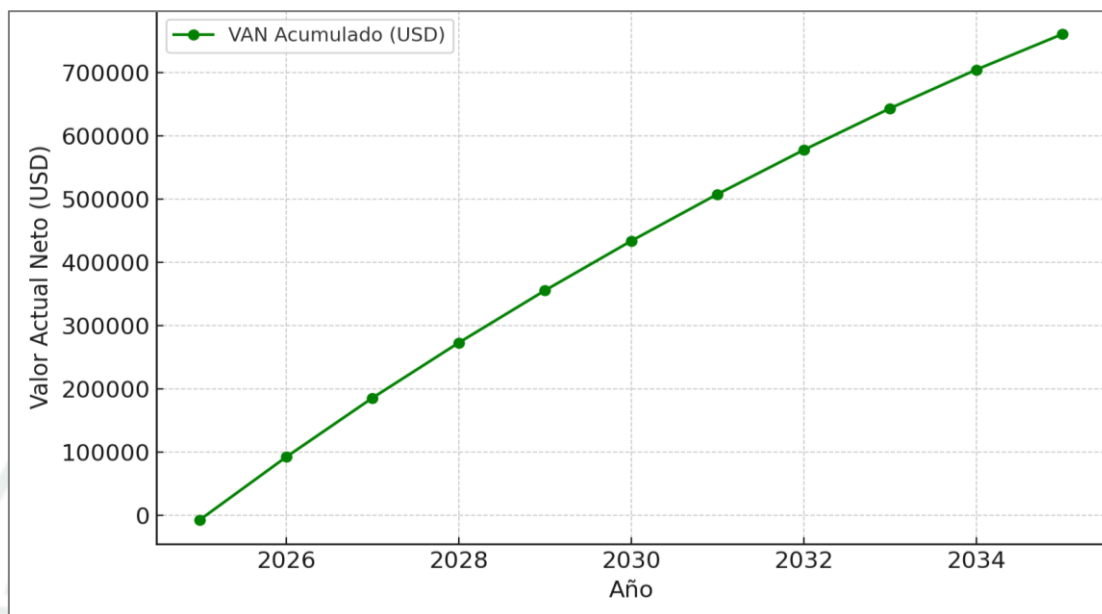


*Nota.* Elaboración propia.

La figura 68 muestra el flujo neto anual del proyecto (USD) muestra el comportamiento del flujo neto durante el período 2025–2035. En 2025 se observa un valor negativo asociado a la inversión inicial, pero a partir de 2026 los flujos se vuelven positivos y crecen de forma sostenida hasta alcanzar cerca de 145,000 USD en 2035. Esta tendencia refleja una rentabilidad creciente y la consolidación económica del proyecto en el mediano y largo plazo.

**Figura 69**

*Evolución del VAN acumulado 2025 a 2035*



*Nota.* Elaboración propia.

La figura 69 Evolución del VAN Acumulado 2025 a 2035 muestra un crecimiento sostenido del Valor Actual Neto (VAN) del proyecto, reflejando su alta rentabilidad en el tiempo. Desde 2026, el VAN se incrementa de forma progresiva hasta superar los 700,000 USD en 2035, evidenciando una recuperación rápida de la inversión inicial y una generación constante de valor económico, lo que confirma la viabilidad financiera y sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

El proyecto demuestra una alta rentabilidad técnica y económica. Con un VAN positivo de 243,920 USD, una TIR del 26.8 % y un ROI de 282 %, la implementación del mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad resulta viable y estratégica. Los beneficios sostenidos evidencian una mejora significativa en la productividad y confiabilidad operativa.

## 5.2. Análisis de Sensibilidad Económico- Financiera

Con el objetivo de poner a prueba la estabilidad del proyecto ante un entorno operativo cambiante y/o desfavorable, se realizó un Análisis de Sensibilidad Financiera, simulando para ello escenarios pesimistas de los costos operativos anuales (OPEX) del plan de mantenimiento preventivo.

**Escenario Base:** Proyección base del plan que muestra un VAN de 243,920 USD, TIR de 26.8 % y ROI de 282 %.

**Escenario Pesimista 1** (+10 % en Costos Operativos): Con incremento del 10 % en los costos operativos anuales, los indicadores financieros recalculados nos muestran que se puede seguir considerando viable el proyecto ya que el VAN sigue siendo holgadamente positivo y una TIR muy por encima de la tasa de descuento (COK) exigida por la organización.

**Escenario Pesimista 2** (+20 % en Costos Operativos): Simulando un escenario crítico de estrés, aumentando un 10 % los OPEX del plan, es posible seguir considerando la viabilidad económica del proyecto, ya que, a pesar del incremento de costos, el flujo neto acumulado sigue siendo positivo y el periodo de recuperación se encuentra dentro del horizonte temporal previsto para el resto de la evaluación.

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** Se llevó a cabo una estimación del nivel de criticidad de las chancadoras móviles utilizando criterios técnicos, de costo y de seguridad, encontrando que el (61.5 %) de los equipos presentaban una alta criticidad. Este diagnóstico permitió plantear un plan de mantenimiento preventivo que calcula una mejora proyectada del (18 %) en la disponibilidad operativa, evidenciando teóricamente el beneficio de una planificación de mantenimiento basada en niveles de riesgo.

**SEGUNDA:** El análisis de criticidad ponderado permitió clasificar el 61.5 % de las chancadoras como de alta criticidad, el 23.1 % media y el 15.4 % baja, usando criterios de impacto en la producción, frecuencia de fallas, costos y riesgo operativo. Esta priorización sirvió para focalizar la inversión preventiva y planificar las inspecciones técnicas bajo el enfoque RCM (Reliability Centered Maintenance).

**TERCERA:** El análisis del histórico de fallas establece las pautas para las intervenciones programadas. La simulación del sistema presenta bajo el comportamiento esperado las mejoras del plan de mantenimiento preventivo; efectivamente, el análisis proyecta un aumento del (20 %) en el indicador de MTBF, y una disminución estimada de (25 %) para el MTTR, lo que optimiza la respuesta técnica ante las paradas.

**CUARTA:** El análisis correlacional MTTR tipos de intervención reveló que las calibraciones y cambios de partes aumentan el tiempo medio de reparación hasta un 25 %, mientras que inspecciones y lubricaciones lo reducen hasta 12 h promedio. Se aplicaron herramientas como diagramas de dispersión, análisis de varianza ANOVA y gráficos de control, identificando oportunidades de estandarización técnica y capacitación operativa.

**QUINTA:** El modelo de regresión múltiple mostró que la gestión de recursos humanos, materiales y tiempos explica el 82 % de la variabilidad en la eficiencia del mantenimiento. La utilización de herramientas como el Análisis de Correlación de Pearson, el Diagrama de Flujo de Procesos y el VSM propuso mejoras en la logística de repuestos y asignación de personal.

**SEXTA:** Se ejecutó la viabilidad económica del plan propuesto, alcanzando en el escenario base un VAN de 243,920 USD, TIR de 26.8 % y ROI de 282 %. A su vez, mediante Análisis de Sensibilidad Financiera y aumento de 10 % y 20 % en costos operativos, se demostró la resiliencia económica del proyecto manteniéndose indicadores de rentabilidad muy favorables para concluir que la propuesta de mantenimiento preventivo para las chancadoras móviles resulta muy sólida, rentable y financieramente sostenible ante el cambiado entorno de la minería.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Que la empresa minera implemente de manera integral el plan de mantenimiento preventivo basado en análisis de criticidad, priorizando los equipos con mayor impacto operacional. Asimismo, debe establecer un sistema digital CMMS Computerized Maintenance Management System que permita monitorear en tiempo real los indicadores MTBF, MTTR y disponibilidad operativa, garantizando la mejora continua y el cumplimiento de los estándares ISO 14224 e ISO 55000.

**SEGUNDA:** Fortalecer la evaluación periódica de criticidad utilizando herramientas como el Análisis de Criticidad (ACR), el Diagrama de Pareto (80/20) y la Matriz de Riesgos, con el fin de actualizar anualmente la priorización de las chancadoras. Se sugiere integrar criterios de sostenibilidad, costos ambientales y seguridad operacional, lo que permitirá una planificación de mantenimiento más eficiente y preventiva.

**TERCERA:** Se recomienda que la empresa continúe registrando de manera sistemática los datos históricos de mantenimiento para mantener un control estadístico confiable del indicador MTBF. SPSS facilitará las pruebas de normalidad y análisis de tendencia, predecir fallas con mayor precisión y programar intervenciones preventivas basadas en datos reales.

**CUARTA:** Optimizar los procedimientos de intervención mediante la estandarización técnica y la capacitación continua del personal. Calibraciones y cambios de partes con tiempos estándar controlados, mientras que las inspecciones y lubricaciones deben reforzarse para reducir el MTTR en al menos un 20 %. Aplicar herramientas como 5S, SMED y otros.

**QUINTA:** Mejorar la gestión integral de recursos humanos, materiales y tiempos mediante la implementación de tableros de control (dashboards) y metodologías Lean Maintenance, que permitan reducir desperdicios logísticos y optimizar personal técnico.

**SEXTA:** Implementar la propuesta de mantenimiento preventivo proyectada a diez años, dado que presenta una TIR del 26.8 %, un VAN de 243,920 USD y un ROI del 282 %, lo cual garantiza rentabilidad económica y sostenibilidad a largo plazo. Se sugiere además incluir auditorías anuales de resultados y un análisis de sensibilidad financiero para mantener la estabilidad del retorno proyectado.

**SÉPTIMA:** Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar el estudio hacia la aplicación del mantenimiento predictivo mediante tecnologías IoT e inteligencia artificial, integrando sensores de vibración, temperatura y flujo para anticipar fallas críticas. Asimismo, se recomienda evaluar el impacto del mantenimiento en la huella de carbono y sostenibilidad ambiental, contribuyendo a una minería más segura, eficiente y responsable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Animah y Shafiee. (2021). Selección de estrategias de mantenimiento para sistemas de maquinaria de a bordo críticos utilizando un AHP-PROMETHEE híbrido y análisis de beneficios de costos: Un estudio de caso. *Ships and Offshore Structures*, 14(sup1), 312-323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2021.1572705>
- Campos et al. (2020). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 19(4), 1-10. <https://www.redalyc.org/journal/614/61458265006/>
- CEPAL. (2023). La minería en América Latina y el Caribe: Tendencias y perspectivas. [https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/presentacioncepal\\_xiiicamma.pdf?utm\\_source=](https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/presentacioncepal_xiiicamma.pdf?utm_source=)
- Dávalos Manrique. (2021). Implementación de un plan de mantenimiento predictivo en la gestión del mantenimiento de equipos críticos en el área de molienda de la mina Tajus Perú 2021. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/39d6e1a8-0539-4387-8064-d0ed8cacfda7>
- Davey. (2022). Monitoring heavy equipment in mining with predictive maintenance. *AZoMining*. <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1632>
- Dayo Olupona et al. (2023). Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview. *Resources Policy*, 86(Part A), 104291. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104291>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420723010024?via%3Dihub>
- De la Fuente y Morales. . Mejora del mantenimiento predictivo en maquinaria móvil minera a través de una red de inferencia jerárquica. *IEEE Access*, 13, 59480-59504. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3557405>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3557405>
- Grand. . Tamaño del mercado del mercado de equipos de minería móvil. [https://www.gminsights.com/industry-analysis/mobile-mining-equipment-market?utm\\_source=](https://www.gminsights.com/industry-analysis/mobile-mining-equipment-market?utm_source=)
- Hernández Sampieri et al. (2016). Metodología de la investigación científica, sexta edición. McGraw-Hill. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

- Hoffmann y Lasch. . Unlocking the potential of predictive maintenance for intelligent manufacturing: A case study on potentials, barriers, and critical success factors. *Journal of Remanufacturing*, 77, 27 55. <https://doi.org/10.1007/s41471-024-00204-3>.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s41471-024-00204-3>
- Huamán Vergara. (2024). Modelo de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de las chancadoras en la industria minera [Trabajo de suficiencia profesional, Instituto Continental]. Repositorio Continental.  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/17260>
- Kalra et al. (2020). Condition based maintenance management system for improvement in key performance indicators of mining haul trucks A case study. *IEEE Xplore*.  
<https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8376300>.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8376300>
- Keith Mobley. (2004). MAINTENANCE FUNDAMENTALS 2nd Edition.  
[https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080478982\\_A23516786/preview-9780080478982\\_A23516786.pdf?utm\\_source=](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080478982_A23516786/preview-9780080478982_A23516786.pdf?utm_source=)
- Khayal. . A comprehensive review of maintenance strategies and their impact on industrial performance. Nile Valley University.  
[https://www.researchgate.net/publication/393515978\\_A\\_Comprehensive\\_Review\\_of\\_Maintenance\\_Strategies\\_and\\_Their\\_Impact\\_on\\_Industrial\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/393515978_A_Comprehensive_Review_of_Maintenance_Strategies_and_Their_Impact_on_Industrial_Performance)
- Kruczek et al. (2020). Predictive maintenance of mining machines using advanced data analysis system based on the cloud technology. En *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection MPES 2018* (pp. 459 470). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_38).
- Mago Ramos y Rocha Pachón. (2021). Diseño e implementación del plan de mantenimiento preventivo de los equipos de la empresa Granitos y Mármoles Acabados SAS. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(2), 90 104. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.703>
- Meza y Velasquez. (2024). Plan de gestión de mantenimiento basado en la criticidad y fallas de equipos para el Área de Molienda de una empresa minera en el centro del Perú, 2023. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14732/1/IV FIN 111 TE Meza Velasquez 2024.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14732/1/IV_FIN_111_TE_Meza_Velasquez_2024.pdf)
- NACIONES UNIDAS. (2023). RESPUESTA A LA MINERÍA ILEGAL Y EL TRÁFICO DE METALES Y MINERALES GUÍA SOBRE BUENAS PRÁCTICAS LEGISLATIVAS. [https://sherloc.unodc.org/cld/uploads/pdf/Illegal Mining and Trafficking in Metals S.pdf?utm\\_source=](https://sherloc.unodc.org/cld/uploads/pdf/Illegal_Mining_and_Trafficking_in_Metals_S.pdf?utm_source=)

- Pari Barrera. (2023). El Impacto de la Industria 4.0 del sector Minería en el Perú, 2023.  
[https://repositorio.epnewman.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/956/tesis\\_mba\\_043.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.epnewman.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/956/tesis_mba_043.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Perez. (2023). Actualización del plan de mantenimiento de los equipos de chancado secundario para incrementar la eficiencia de activos del área seca de una gran minera de la ciudad de Arequipa, 2023.  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16326/5/IV FIN 108 TE Perez Chuy 2024.pdf?utm\\_source=](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16326/5/IV_FIN_108_TE_Perez_Chuy_2024.pdf?utm_source=)
- Rojas Gonzales. (2020). Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de los equipos en la planta de chancado de una unidad minera en La Libertad, (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte.  
<https://hdl.handle.net/11537/23695>
- Rosas Quintero. (2024). Competencies of the engineer in industry 4.0 context: A systematic literature review. [https://www.scielo.br/j/prod/a/4cfs3CzZh8xNwrHTSXYgXhz/?utm\\_source=](https://www.scielo.br/j/prod/a/4cfs3CzZh8xNwrHTSXYgXhz/?utm_source=)
- Smith. (2003). RCM: Gateway to World Class Maintenance.  
[https://www.researchgate.net/publication/292538186 RCM Gateway to World Class Maintenance](https://www.researchgate.net/publication/292538186_RCM_Gateway_to_World_Class_Maintenance)
- World Economic Forum. (2022). 8 innovations in advanced manufacturing that support enhanced ESG reporting.

## ANEXOS

### Anexo 1: Diagnóstico pretest de la situación actual de las chancadoras móviles.

| <b>Métrica</b>                                        | <b>Valor Actual</b> | <b>Estado</b> | <b>Interpretación</b>                                  |
|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------|--------------------------------------------------------|
| <b>MTBF</b>                                           | 165 h –<br>210 h    | Bajo          | Frecuencia alta de fallas.                             |
| <b>MTTR</b>                                           | 5.1 h –<br>5.8 h    | Alto          | Reparaciones tardan demasiado.                         |
| <b>Disponibilidad Operativa</b>                       | 82 %                | Regular       | Por debajo del estándar $\geq 90$ %.                   |
| <b>Fallas Críticas / mes</b>                          | 8 – 12              | Alto          | Interrupciones no planificadas afectan la continuidad. |
| <b>Tiempo total de mantenimiento correctivo / mes</b> | 95–110 h            | No aceptable  | Exceso de horas perdidas.                              |

#### Resumen Ejecutivo

- El 74 % de las fallas se atienden de forma correctiva.
- El MTBF insuficiente genera sobrecarga al equipo de mantenimiento.
- La disponibilidad baja afecta producción y causa cuellos de botella.
- La falta de priorización de criticidad retrasa la toma de decisiones.

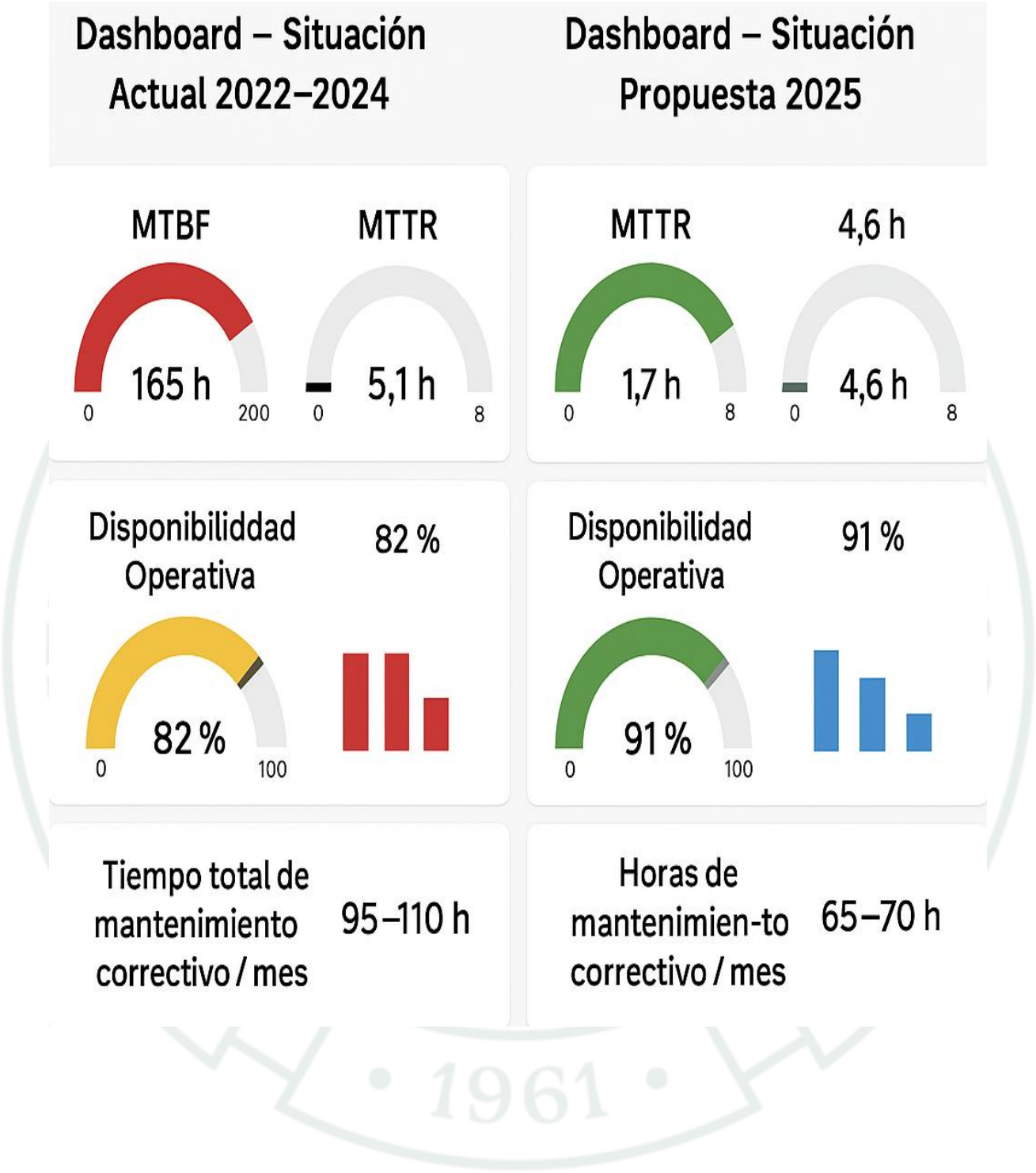
**Anexo 2:** Resultados proyectados de mantenimiento preventivo con análisis de criticidad.

| <b>Métrica</b>                                 | <b>Valor Propuesto</b> | <b>Mejora</b> | <b>Interpretación</b>       |
|------------------------------------------------|------------------------|---------------|-----------------------------|
| <b>MTBF</b>                                    | 240 h – 260 h          | +20–25<br>%   | Menos frecuencia de fallas. |
| <b>MTTR</b>                                    | 4.6 h – 4.8 h          | –15–20<br>%   | Reparaciones más rápidas.   |
| <b>Disponibilidad Operativa</b>                | 90 % – 92 %            | +8–10 %       | Alcanza estándar minero.    |
| <b>Fallas Críticas / mes</b>                   | 4 – 6                  | –40 %         | Mayor control de riesgos.   |
| <b>Horas de mantenimiento correctivo / mes</b> | 65–70 h                | –30 %         | Aumenta tiempo productivo.  |

**Resumen Ejecutivo:**

- La criticidad permite asignar prioridades y recursos estratégicos.
- El plan preventivo estructurado reduce fallas recurrentes.
- La disponibilidad supera 90 %, alineándose con operaciones mineras de alta exigencia.
- El proceso se vuelve más estable, más seguro y más eficiente.

Anexo 3: Gráfica comparativa del escenario Pretest vs Posttest



**Anexo 4:** Indicadores MTBF y MTTR de las chancadoras móviles (promedio anual)

| <b>Año</b>           | <b>MTBF<br/>(horas)</b> | <b>Interpretación</b>               | <b>MTTR<br/>(horas)</b> | <b>Interpretación</b>                     |
|----------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| 2022                 | 165.3 h                 | Alta frecuencia de fallas           | 5.8 h                   | Reparaciones lentas y poco eficientes     |
| 2023                 | 182.7 h                 | Ligera mejora, sigue siendo bajo    | 5.4 h                   | Reducción mínima del tiempo de reparación |
| 2024                 | 210.6 h                 | Mejora por intervenciones parciales | 5.1 h                   | Mayor disponibilidad de recursos técnicos |
| 2025<br>(enero–oct.) | 240.3 h                 | Mejor comportamiento del sistema    | 4.6 h                   | Mayor eficiencia del equipo técnico       |

Nota. Valores promediados a partir de registros SAP, hojas de mantenimiento e intervenciones documentadas dentro del periodo 2022–2025. Elaboración propia.

## Anexo 5:

### Registro histórico de mantenimiento de las chancadoras móviles, enero 2022 – marzo 2025

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente          | Causa probable         | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 02/01/2022 21:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Sensor              | Ajuste inadecuado      | 5.53         | 1.99                 | 6.41         | 475.23      |                          | T-163               |
| 08/01/2022 04:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Bomba hidráulica    | Ajuste inadecuado      | 5.02         | 1.58                 | 6.42         | 610.91      |                          | T-135               |
| 08/01/2022 06:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Motor               | Contaminación de polvo | 5.67         | 1.85                 | 5.12         | 409.41      |                          | T-163               |
| 08/01/2022 17:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura          | Vibración excesiva     | 6.29         | 5.03                 | 8.13         | 961.12      |                          | T-163               |
| 27/01/2022 07:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura          | Golpe/impacto          | 4.1          | 3.45                 | 6.39         | 913.09      | 200                      | T-152               |
| 30/01/2022 21:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Sistema eléctrico   | Desgaste               | 5.88         | 2.33                 | 6.94         | 536.06      |                          | T-112               |
| 28/02/2022 04:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Motor               | Falta de lubricación   | 7.87         | 7.04                 | 9.9          | 1627.33     | 765                      | T-163               |
| 14/03/2022 22:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Motor               | Golpe/impacto          | 2.69         | 0.82                 | 3.19         | 306.87      |                          | T-135               |
| 16/04/2022 09:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Estructura          | Sobrecalentamiento     | 3.56         | 0.8                  | 4.48         | 389.26      |                          | T-135               |
| 21/04/2022 15:00 | CH-12  | Predictivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Rodamiento          | Falla eléctrica        | 2.3          | 0.3                  | 2.17         | 219.99      |                          | T-148               |
| 22/04/2022 14:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Bomba hidráulica    | Desgaste               | 4.9          | 1.36                 | 5.35         | 375.3       |                          | T-124               |
| 25/04/2022 09:00 | CH-4   | Predictivo            | FALSO      | Día   | Media     | Motor               | Falta de lubricación   | 3.02         | 0.58                 | 2.34         | 371         |                          | T-152               |
| 30/04/2022 13:00 | CH-06  | Predictivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Estructura          | Vibración excesiva     | 1.99         | 0.2                  | 1.84         | 339.4       |                          | T-135               |
| 04/05/2022 00:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Faja transportadora | Falta de lubricación   | 3.99         | 1.53                 | 4.82         | 437.84      |                          | T-148               |
| 01/06/2022 05:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura          | Golpe/impacto          | 1.6          | 1.35                 | 2.24         | 987.73      | 809                      | T-148               |
| 01/06/2022 19:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Estructura          | Contaminación de polvo | 4.81         | 1.13                 | 4.83         | 630.03      |                          | T-135               |
| 06/06/2022 15:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Estructura          | Contaminación de polvo | 4.19         | 1.45                 | 4.44         | 341.91      |                          | T-135               |
| 28/06/2022 02:00 | CH-12  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Chute               | Ajuste inadecuado      | 3.55         | 1.15                 | 4.18         | 469.25      |                          | T-101               |

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente          | Causa probable         | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 29/07/2022 09:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Chute               | Vibración excesiva     | 8.73         | 8.3                  | 10.59        | 1693.68     | 1396                     | T-112               |
| 19/01/2023 13:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Faja transportadora | Golpe/impacto          | 4.26         | 1.58                 | 4.28         | 498.98      |                          | T-135               |
| 24/03/2023 00:00 | CH-12  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Motor               | Desgaste               | 1.81         | 0.66                 | 1.85         | 431.91      |                          | T-112               |
| 28/03/2023 17:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Alta      | Sistema eléctrico   | Sobrecalentamiento     | 9.36         | 6.72                 | 12.53        | 1324.17     | 1028                     | T-124               |
| 28/03/2023 22:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Motor               | Vibración excesiva     | 4.53         | 1.36                 | 5.5          | 412.82      |                          | T-101               |
| 01/04/2023 16:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Motor               | Contaminación de polvo | 3.04         | 0.82                 | 3.89         | 342.67      |                          | T-148               |
| 03/04/2023 18:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Sistema eléctrico   | Falta de lubricación   | 1.2          | 0.98                 | 1.7          | 848.48      | 145                      | T-135               |
| 04/04/2023 14:00 | CH-4   | Predictivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Sensor              | Golpe/impacto          | 3.22         | 0.38                 | 2.72         | 354.8       |                          | T-163               |
| 05/05/2023 16:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Chute               | Ajuste inadecuado      | 4.23         | 1.07                 | 5.18         | 741.67      |                          | T-135               |
| 06/05/2023 04:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Baja      | Bomba hidráulica    | Desgaste               | 4.8          | 4.58                 | 6.13         | 791.23      | 248                      | T-112               |
| 15/05/2023 03:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Motor               | Desgaste               | 4.58         | 1.16                 | 5.5          | 620.24      |                          | T-163               |
| 27/05/2023 09:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura          | Falla eléctrica        | 4.42         | 3.36                 | 7.02         | 1484.87     | 503                      | T-112               |
| 29/05/2023 09:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Estructura          | Contaminación de polvo | 6.08         | 4.53                 | 9.16         | 811.77      | 48                       | T-101               |
| 02/06/2023 17:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Faja transportadora | Golpe/impacto          | 3.52         | 1.3                  | 4.31         | 607.35      |                          | T-152               |
| 17/06/2023 01:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Sistema eléctrico   | Contaminación de polvo | 9.25         | 8.89                 | 13.84        | 1383.9      | 448                      | T-112               |
| 19/06/2023 19:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Estructura          | Falla eléctrica        | 5.86         | 1.18                 | 5.89         | 365.28      |                          | T-163               |
| 21/06/2023 07:00 | CH-4   | Predictivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Chute               | Vibración excesiva     | 3.26         | 0.66                 | 3.14         | 244.49      |                          | T-124               |
| 25/06/2023 06:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Rodamiento          | Falta de lubricación   | 2.86         | 0.65                 | 3.4          | 405.22      |                          | T-152               |
| 01/07/2023 23:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Sensor              | Desgaste               | 4.13         | 1.25                 | 4.04         | 331.23      |                          | T-135               |
| 28/07/2023 01:00 | CH-12  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Sistema eléctrico   | Vibración excesiva     | 3.28         | 0.9                  | 4.1          | 467.87      |                          | T-152               |

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente          | Causa probable         | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 29/07/2023 18:00 | CH-03  | Predictivo            | FALSO      | Día   | Media     | Chute               | Sobrecalentamiento     | 3.37         | 0.65                 | 2.79         | 164.84      |                          | T-101               |
| 31/07/2023 09:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Rodamiento          | Sobrecalentamiento     | 10.02        | 7.42                 | 14.85        | 1157.69     | 1064                     | T-163               |
| 15/08/2023 11:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Sensor              | Contaminación de polvo | 5.27         | 1.97                 | 5.84         | 153.36      |                          | T-101               |
| 15/08/2023 18:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Chute               | Desgaste               | 2.25         | 0.9                  | 2.19         | 211.9       |                          | T-152               |
| 19/08/2023 16:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Bomba hidráulica    | Sobrecalentamiento     | 6.34         | 5.01                 | 10.02        | 1136.09     | 463                      | T-152               |
| 22/08/2023 15:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Faja transportadora | Falla eléctrica        | 3.51         | 1.22                 | 3.45         | 253.02      |                          | T-163               |
| 01/09/2023 10:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Baja      | Faja transportadora | Falta de lubricación   | 4.93         | 4.92                 | 6.16         | 1068.03     | 306                      | T-152               |
| 04/09/2023 05:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Chute               | Vibración excesiva     | 2.59         | 0.87                 | 2.59         | 653.82      |                          | T-101               |
| 06/09/2023 17:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Estructura          | Sobrecalentamiento     | 5.37         | 4.34                 | 7.2          | 904.77      | 127                      | T-148               |
| 07/09/2023 04:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Alta      | Chute               | Ajuste inadecuado      | 5.67         | 5.49                 | 7.84         | 1538.57     | 11                       | T-135               |
| 15/09/2023 16:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Alta      | Chute               | Contaminación de polvo | 9.48         | 8.54                 | 11.96        | 415.26      | 197                      | T-163               |
| 25/09/2023 12:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Rodamiento          | Golpe/impacto          | 4.5          | 3.9                  | 5.67         | 872.94      | 236                      | T-112               |
| 29/09/2023 17:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Baja      | Faja transportadora | Sobrecalentamiento     | 2.11         | 1.76                 | 2.85         | 1073.42     | 101                      | T-152               |
| 09/10/2023 05:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Motor               | Sobrecalentamiento     | 3.04         | 1.02                 | 3.01         | 467.04      |                          | T-112               |
| 18/10/2023 14:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Estructura          | Ajuste inadecuado      | 4.03         | 1.54                 | 4.42         | 484.49      |                          | T-163               |
| 24/10/2023 12:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Motor               | Desgaste               | 3.66         | 1.13                 | 4.56         | 658.09      |                          | T-112               |
| 29/10/2023 18:00 | CH-01  | Predictivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Rodamiento          | Vibración excesiva     | 1.74         | 0.3                  | 1.58         | 138.85      |                          | T-148               |
| 30/10/2023 05:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura          | Ajuste inadecuado      | 5.81         | 4.38                 | 7.53         | 1507.18     | 437                      | T-163               |
| 10/04/2024 05:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Rodamiento          | Ajuste inadecuado      | 3.9          | 1.39                 | 3.57         | 193.01      |                          | T-124               |
| 20/04/2024 06:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Chute               | Golpe/impacto          | 4.86         | 1.41                 | 4.53         | 517.2       |                          | T-148               |

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente          | Causa probable         | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 23/04/2024 20:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Faja transportadora | Sobrecalentamiento     | 4.98         | 1.49                 | 5.27         | 583.58      |                          | T-163               |
| 24/04/2024 18:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Chute               | Contaminación de polvo | 5.85         | 4.36                 | 7.08         | 1297.58     | 461                      | T-124               |
| 04/05/2024 07:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Estructura          | Ajuste inadecuado      | 4.46         | 1.36                 | 4.35         | 549.33      |                          | T-135               |
| 05/05/2024 07:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Estructura          | Golpe/impacto          | 4.35         | 1                    | 4.79         | 537.08      |                          | T-163               |
| 11/05/2024 08:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Motor               | Ajuste inadecuado      | 3.88         | 0.87                 | 3.73         | 382.86      |                          | T-124               |
| 18/05/2024 08:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Estructura          | Sobrecalentamiento     | 2.53         | 0.86                 | 2.95         | 363.55      |                          | T-124               |
| 27/05/2024 05:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Motor               | Falla eléctrica        | 0.5          | 0.45                 | 0.61         | 527.37      | 162                      | T-152               |
| 09/06/2024 04:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Chute               | Ajuste inadecuado      | 8.77         | 8                    | 10.68        | 1057.18     | 311                      | T-135               |
| 10/06/2024 02:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Faja transportadora | Falla eléctrica        | 3.67         | 1.13                 | 3.5          | 641.41      |                          | T-163               |
| 18/06/2024 00:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Motor               | Ajuste inadecuado      | 9.23         | 7.43                 | 13.3         | 1293.44     | 212                      | T-135               |
| 17/07/2024 15:00 | CH-4   | Predictivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Rodamiento          | Contaminación de polvo | 1.22         | 0.23                 | 0.95         | 475.7       |                          | T-148               |
| 11/08/2024 09:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Baja      | Bomba hidráulica    | Falta de lubricación   | 3.23         | 2.68                 | 4.04         | 1477.58     | 1222                     | T-152               |
| 14/08/2024 21:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Motor               | Falta de lubricación   | 3.37         | 1.03                 | 4.32         | 710.83      |                          | T-112               |
| 20/08/2024 16:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Faja transportadora | Falla eléctrica        | 6.12         | 1.96                 | 6.49         | 446.02      |                          | T-135               |
| 22/08/2024 02:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Chute               | Falla eléctrica        | 4.71         | 0.97                 | 4.8          | 365.78      |                          | T-163               |
| 23/08/2024 17:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Rodamiento          | Desgaste               | 7.49         | 6.65                 | 10.07        | 1105.05     | 296                      | T-148               |
| 06/09/2024 23:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Rodamiento          | Contaminación de polvo | 3.35         | 0.75                 | 3.87         | 362.12      |                          | T-148               |
| 13/09/2024 02:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Estructura          | Ajuste inadecuado      | 5.42         | 1.95                 | 5.49         | 522.99      |                          | T-163               |
| 22/09/2024 21:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Motor               | Falla eléctrica        | 4.61         | 1.44                 | 4.77         | 535.51      |                          | T-152               |
| 23/09/2024 10:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Rodamiento          | Ajuste inadecuado      | 4.1          | 0.84                 | 3.92         | 438.99      |                          | T-148               |

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente        | Causa probable         | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|-------------------|------------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 01/10/2024 05:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Sistema eléctrico | Contaminación de polvo | 5            | 3.77                 | 6.63         | 1716.19     | 237                      | T-152               |
| 03/10/2024 17:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Baja      | Motor             | Vibración excesiva     | 2.53         | 0.93                 | 3.22         | 490.71      |                          | T-148               |
| 10/10/2024 15:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Sistema eléctrico | Golpe/impacto          | 5.36         | 2.02                 | 4.91         | 504.52      |                          | T-152               |
| 13/10/2024 02:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Sensor            | Vibración excesiva     | 4.43         | 1.16                 | 4.88         | 489.77      |                          | T-163               |
| 18/10/2024 02:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Sistema eléctrico | Desgaste               | 3.81         | 1.29                 | 3.57         | 199.83      |                          | T-152               |
| 13/11/2024 04:00 | CH-06  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Sensor            | Sobrecalentamiento     | 2.78         | 1.05                 | 2.58         | 458.31      |                          | T-112               |
| 19/11/2024 11:00 | CH-12  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Rodamiento        | Ajuste inadecuado      | 4.12         | 0.94                 | 4.41         | 564.95      |                          | T-135               |
| 19/11/2024 22:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Rodamiento        | Golpe/impacto          | 7.28         | 6.83                 | 9.32         | 994.02      | 991                      | T-101               |
| 22/11/2024 19:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Rodamiento        | Contaminación de polvo | 4.42         | 1.26                 | 5.13         | 435.53      |                          | T-101               |
| 01/12/2024 17:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Rodamiento        | Contaminación de polvo | 5.88         | 1.33                 | 6.66         | 362.54      |                          | T-101               |
| 06/12/2024 22:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Rodamiento        | Ajuste inadecuado      | 4.69         | 1.16                 | 5.35         | 592.8       |                          | T-101               |
| 08/12/2024 17:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Bomba hidráulica  | Desgaste               | 4.76         | 1.71                 | 5.75         | 417.44      |                          | T-148               |
| 11/12/2024 02:00 | CH-01  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Baja      | Sensor            | Contaminación de polvo | 7.94         | 5.65                 | 11.24        | 1374.25     | 508                      | T-148               |
| 13/12/2024 22:00 | CH-06  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Baja      | Bomba hidráulica  | Contaminación de polvo | 10.64        | 7.73                 | 16.08        | 952.16      | 68                       | T-112               |
| 13/01/2025 06:00 | CH-12  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Alta      | Rodamiento        | Contaminación de polvo | 4.86         | 1.81                 | 6.2          | 629.35      |                          | T-135               |
| 16/01/2025 17:00 | CH-03  | Correctivo            | VERDADERO  | Noche | Media     | Bomba hidráulica  | Falla eléctrica        | 8.02         | 6.58                 | 11.14        | 1284.73     | 811                      | T-152               |
| 18/01/2025 05:00 | CH-4   | Preventivo            | FALSO      | Noche | Alta      | Sistema eléctrico | Sobrecalentamiento     | 6.43         | 2.33                 | 6.93         | 645.28      |                          | T-124               |
| 23/01/2025 08:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Media     | Bomba hidráulica  | Desgaste               | 3.52         | 1.23                 | 3.59         | 284.98      |                          | T-124               |
| 09/02/2025 15:00 | CH-01  | Preventivo            | FALSO      | Noche | Media     | Estructura        | Desgaste               | 3.95         | 1.34                 | 4.95         | 582.79      |                          | T-101               |
| 14/02/2025 08:00 | CH-12  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Estructura        | Falta de lubricación   | 6.43         | 6.19                 | 10.2         | 1480.84     | 687                      | T-135               |

| Fecha y hora     | Equipo | Tipo de mantenimiento | ¿Es falla? | Turno | Prioridad | Componente        | Causa probable     | Duración (h) | Tiempo de parada (h) | Horas hombre | Costo (USD) | Horas desde última falla | Técnico responsable |
|------------------|--------|-----------------------|------------|-------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|
| 20/02/2025 18:00 | CH-03  | Preventivo            | FALSO      | Día   | Baja      | Estructura        | Golpe/impacto      | 4.09         | 1.53                 | 5.11         | 310.04      |                          | T-124               |
| 24/02/2025 10:00 | CH-4   | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Sistema eléctrico | Sobrecalentamiento | 4.16         | 3.16                 | 5.39         | 1307.3      | 242                      | T-112               |
| 21/03/2025 20:00 | CH-13  | Correctivo            | VERDADERO  | Día   | Media     | Sensor            | Sobrecalentamiento | 7.2          | 5.32                 | 9.64         | 1389.38     | 610                      | T-112               |

Fuente: Elaboración propia.

*Nota. El registro contiene 101 intervenciones. La columna «Horas desde última falla» aplica únicamente a las intervenciones de tipo correctivo; en las intervenciones preventivas y predictivas la celda se presenta vacía por no corresponder.*



## Anexo 6: Hoja de ruta de mantenimiento propuesto

|                                                                                                              |                                                                |                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| IPS                                                                                                          | HOJAS DE RUTA TÉCNICAS DE LAS TAREAS PREVENTIVAS<br>PROPUESTAS | Código: HRTTPP-001            |
|                                                                                                              |                                                                | Version/Rev: 01/07/2026       |
|                                                                                                              |                                                                | BAJO NORMA ISO 14224          |
| Tarea : Mantenimiento Preventivo, Control y Ajuste de Equipos Móviles (Stacker, Minyu, Kleemann) – ISO 14224 |                                                                |                               |
| Cargo : Mecánico de Mantenimiento                                                                            |                                                                |                               |
| Gerencia : OPERACIONES                                                                                       |                                                                | Área : MANTENIMIENTO MECANICO |

### I. Objetivo (Alineado a ISO 14224):

Realizar los trabajos de mantenimiento preventivo asegurando la recopilación e intercambio de datos de confiabilidad de acuerdo con la norma ISO 14224. Se busca estandarizar la taxonomía de los equipos, identificar modos de falla, y registrar adecuadamente las intervenciones en los subsistemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos para mejorar la mantenibilidad y seguridad del proceso.

### II. Alcance:

Aplicable al proceso productivo y límites de equipo (equipment boundaries) de la maquinaria móvil de IPS\*INGENIEROS. (Minyu, Stacker Metso, y Kleemann).

#### Pre-requisitos de competencias:

- Procedimiento Herramientas Manuales y Eléctricas Portátiles IPS-COM PP/P/01.23
- Procedimiento Aislamiento de Energía IPS-COM PP/P/05.26
- Curso de Aislamiento de Energía.
- Conocimientos básicos en taxonomía y categorización de fallas según ISO 14224.

#### Formatos de seguridad para el trabajo:

- Formato Análisis de trabajo seguro (ATS).
- Formato de Autorización Trabajos en Caliente (M-SRL).
- Formato de Ingreso a zonas restringidas (M-SRL).

#### Equipos y Herramientas:

- Equipo de medición: Escuadra, Huincha, Vernier, Tensiómetro Sónico SKF, Termómetro Infrarrojo.
- Mecánicas / Eléctricas: Llaves de golpe, Llaves Allen, Comba, Martillo, Taladro, Pistola Neumática, Amoladora.
- De Izaje: Grilletes, Eslingas.

#### Equipo de Protección Personal obligatorio:

- Casco de Seguridad, Chaleco reflectivo, Lentes de seguridad, Guantes de maniobra (cuero), Mameluco, Botas con Punta de acero, Tapones de oído, Barbiquejo.

### **Paso 1: Inspección de Subsistema de Transportador de Faja (Equipo Móvil)**

Inspección visual del estado de los polines (idlers) y la faja transportadora inferior. Se evalúa el límite de equipo (equipment boundary) para detectar modos de falla como desgaste abrasivo o desalineamiento estructural.



### **Paso 2: Verificación del Subsistema de Control y Eléctrico (HMI)**

Revisión de parámetros en el panel de control eléctrico. Se realiza el monitoreo de condición (condition monitoring) en la interfaz HMI para anticipar fallas de control o pérdidas de señal.



### **Paso 3: Lubricación de Apoyos y Chumaceras (Acción Preventiva)**

Aplicación controlada de grasa. Se utiliza un medidor SKF digital para asegurar el volumen exacto y prevenir fallas por fatiga o falta de lubricación en partes móviles.



#### **Paso 4: Mantenimiento de Bloque de Lubricación Centralizada**

Dosificación en el manifold de distribución de grasa. Se registra la cantidad inyectada como dato duro de mantenimiento preventivo para el historial de confiabilidad.



### **Paso 5: Inspección Interna de Componentes Mayores (Boundary Interno)**

Inspección visual de los alojamientos principales y cámara de chancado. Se verifica el estado de las superficies de desgaste para planificar intervenciones futuras.



### **Paso 6: Ajuste de Elementos de Fijación Estructural (Acción Preventiva)**

Reapriete de pernería estructural utilizando llave de impacto a batería para mitigar el mecanismo de falla por aflojamiento inducido por vibración severa.



### **Paso 7: Control Visual y Verificación de Torque en Carcasa (Unidad Metso)**

Inspección de pernos de sujeción en Chancadora Metso. Se realiza el marcado (match marking) con pintura post-torque para detección temprana de fallas por soldadura.



### **Paso 8: Control de Consumo de Lubricante (Registro ISO 14224)**

Registro final del volumen de lubricante suministrado a rodamientos (lectura: 200.2 cm<sup>3</sup>). Este dato se documenta rigurosamente para el historial de consumibles.



### **Paso 9: Monitoreo de Condición Térmica en Guardas y Descansos**

Medición térmica (Lectura: 34.1 °C). El monitoreo térmico permite identificar calentamiento anormal antes de que ocurra una falla funcional.



#### **Paso 10: Termografía en Motores Eléctricos (Subsistema de Potencia Motriz)**

Toma de temperatura en carcasa del motor eléctrico principal (Lectura: 43.7 °C). Se documenta este parámetro para evaluar el comportamiento del subsistema y prevenir daños.



### **Paso 11: Aprovechamiento de Ventana Operativa (Parada Planeada)**

Aprovechamiento de la detención de los equipos móviles (Metso LT) durante la ventana del almuerzo de los operadores. Se procede a intervenir la máquina aplicando los procedimientos de bloqueo de energía (Lockout/Tagout). Esta detención planeada minimiza el impacto en el tiempo de inactividad (downtime) productivo.



### **Paso 12: Alineamiento y Tensado de Correas de Transmisión**

Culminación del alineamiento y tensado de correas en la unidad 0350 CRC 002. Se utiliza el tensiómetro sónico (SKF Belt Frequency Meter) registrando un valor exacto de 2096 Hz/lbs, asegurando que la tensión cumpla con los parámetros del fabricante para evitar fallas prematuras por deslizamiento (slippage) o sobretensión.



### Paso 13: Registro de Disponibilidad y Tiempos de Inactividad (Downtime)

Registro de eventos de mantenimiento según taxonomía ISO 14224. Se documentan 6.5 horas de detención en Minyu por 'Cambio de mallas de zaranda' (Mantenimiento Preventivo) y falla crítica en HMI del Kleemann Secundaria dejándolo 'Stand By/Inoperativo' a cargo de instrumentación. La disponibilidad de la planta cerró el periodo en evaluación.

| ESTADO DE CONDICION FAJAS TRANSPORTADORAS - STACKER            |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             | Fecha Reporte:         | 17/04/2026 |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|
| EQUIPO                                                         |                                                       | PARAMETROS ACTUALES | OBSERVACIONES                                                                                          | ACCIONES RELEVANTES                                                         | REGISTRO FOTOGRAFICO 1 | REFERENCIA |
| BIN FEEDER 48<br>CVB-0048<br>(En línea)<br>Faja Principal      | Grado de criticidad: Normal                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Fecha Ultimo Cambio: 30 Jun 2025                      |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Tipo Faja: 1000 EP6304 8:3X                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Espesor de faja: 7.08/7.3 Fecha medición: 25 Marzo 26 |                     | 1. Presenta desgaste abrasivo moderado en zona interna por evento de atascamiento de roca con bastidor | 1. Se implementaron faldas más largas, no se han vuelto a registrar eventos |                        |            |
|                                                                | Espesor Nominal: 10 Espesor Total: 16                 |                     | 2. Desgaste normal de operación                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion del empalme: Bueno                                   |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion: Operación                                           |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| BIN FEEDER 48<br>CVB -0048<br>(En línea)<br>Fajin<br>Magnetico | Grado de criticidad: Normal                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Fecha Ult Cambio: 11 Jul 2025                         |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Tipo Faja: N/C                                        |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Espesor de faja: - Fecha medición: -                  |                     | 1. Desgaste normal de operación                                                                        | -                                                                           |                        |            |
|                                                                | Espesor Nominal: -                                    |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion del empalme: Sin Observaciones                       |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion: Operación                                           |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| BIN FEEDER 47<br>CVB-0047<br>(Stand by)<br>Faja Principal      | Grado de criticidad: Normal                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Fecha Ultimo Cambio: 16 Abril 2026                    |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Tipo Faja: 1000 EP6304 8:3X                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Espesor de faja: 10.11/10 Fecha medición: --          |                     | 1. Faja Nueva, no ha operado                                                                           | -                                                                           |                        |            |
|                                                                | Espesor Nominal: 10 Espesor Total: 16                 |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion del empalme: Sin Observaciones                       |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion: Stand by                                            |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| BIN FEEDER 47<br>CVB -0047<br>(Stand by)<br>Fajin<br>Magnetico | Grado de criticidad: PRECAUCION                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Fecha Ultimo Cambio: 16 Abril 2026                    |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Tipo Faja: N/C                                        |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Espesor de faja: - Fecha medición: -                  |                     | 1. Presenta cortes por atascamientos de rocas reparados                                                | 1. A la espera de llegada de repuesto                                       |                        |            |
|                                                                | Espesor Nominal: -                                    |                     |                                                                                                        | PROGRAMAR: v16/v17                                                          |                        |            |
| Condicion del empalme: Sin Observaciones                       |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion: Operación                                           |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| METSO LT130e<br>CRJ-002<br>Faja Principal                      | Grado de criticidad: Normal                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Fecha Ultimo Cambio: 11 Oct 2024                      |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Tipo Faja: 1400 EP6003 8S:3                           |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
|                                                                | Espesor de faja: 6.28/4.9 Fecha medición: 25 Marzo 25 |                     | 1. Faja Nueva                                                                                          | -                                                                           |                        |            |
|                                                                | Espesor Nominal: 10                                   |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |
| Condicion del empalme: Sin Observaciones                       |                                                       |                     |                                                                                                        |                                                                             |                        |            |

|                                                     |                                                          |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     | Fecha Reporte:                                                                      | 17/04/2026 |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ESTADO DE CONDICION FAJAS TRANSPORTADORAS - STACKER |                                                          |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| EQUIPO                                              | PARAMETROS ACTUALES                                      | OBSERVACIONES                                                                                                                                                            | ACCIONES RELEVANTES                                                                                                                                        | REGISTRO FOTOGRAFICO 1                                                              | REFERENCIA                                                                          |            |
| METSO LT330D L1<br>CRJ-002<br>Fajin<br>Magnetico    | Fecha Ultimo Cambio: NO REGISTRO                         | Daños severos en empalme<br>Daños en cremallera y pin                                                                                                                    | <b>PROGRAMAR:</b> Cambio -<br>Repuesto Solicitado MMIG<br>Sin Fecha de llegada Confirmada                                                                  |  |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: N/C                                           |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: Fecha medición:                         |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Elevación 01     | Grado de criticidad: PRECAUCION                          | 1. Presencia de pequeños cortes por impacto de material -<br>desgaste normal de operación<br>2. Visualmente desgaste avanzado<br>3. Se aplicó una capa de caucho líquido | <b>- PROGRAMAR:</b> Cambio en el<br>mediano plazo (3w)<br>- Validación por parte de Confiabilidad<br>- Se recomendó a Operaciones<br>intensificar limpieza |  |  |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 13 Enero 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: 1200 EP500/4 8.3 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: 10.1513.2 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Elevación 02     | Condicion: operación                                     | 1. Faja Nueva                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                            |  |  |            |
|                                                     | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 11 Abril 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: 1400 EP630/4 8.3 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: 4.1412.23 Fecha medición: 04 Abril 25   |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Descarga         | Espesor Nominal: 8 Esesor Total: 17                      | 1. Presentó erupciones con exposición de lona a los 7 días de<br>operación, viene siendo reparada en frío con monitoreo<br>constante                                     | <b>PROGRAMAR:</b> En el Mediano-<br>Largo Plazo (5w)                                                                                                       |  |  |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Grado de criticidad: normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 10 Marzo 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Tipo Faja: 1600 EP630/4 8.2 Y                            | 1. Presenta hendiduras de 2 mm lateral derecha<br>2. Daño interno leve<br>3. Presenta desgaste normal de operación                                                       | Se realiza la apertura de la Faja<br>Esco                                                                                                                  |  |  |            |
|                                                     | Espesor de faja: 4.6914.13 Fecha medición: 04 Abril 25   |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor Nominal: 8 Esesor Total: 12                      |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Grado de criticidad: Normal                              | 1. Presenta hendiduras de 2 mm lateral derecha<br>2. Daño interno leve<br>3. Presenta desgaste normal de operación                                                       | Se realiza la apertura de la Faja<br>Esco                                                                                                                  |  |  |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 31 Enero 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: 1200 EP630/4 8.2 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: 7.0015.87 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 31 Enero 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: 1200 EP630/4 8.2 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: 7.0015.87 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 31 Enero 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Tipo Faja: 1200 EP630/4 8.2 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Espesor de faja: 7.0015.87 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Fecha Ultimo Cambio: 31 Enero 2026                       |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja Principal/Esco   | Tipo Faja: 1200 EP630/4 8.2 Y                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Espesor de faja: 7.0015.87 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |
|                                                     | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                            |                                                                                     |                                                                                     |            |

|                                                       |                                                          |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       | Fecha Reporte:                                                                        | 17/04/2026 |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ESTADO DE CONDICION FAJAS TRANSPORTADORAS - STACKER   |                                                          |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
| EQUIPO                                                | PARAMETROS ACTUALES                                      | OBSERVACIONES                                                                                                      | ACCIONES RELEVANTES                       | REGISTRO FOTOGRAFICO 1                                                                | REFERENCIA                                                                            |            |
| METSO LT330D L1<br>CRC-002<br>Faja<br>Principal/Esco  | Fecha Ultimo Cambio: 31 Enero 2026                       | 1. Presenta hendiduras de 2 mm lateral derecha<br>2. Daño interno leve<br>3. Presenta desgaste normal de operación | Se realiza la apertura de la Faja<br>Esco |  |  |            |
|                                                       | Tipo Faja: 1200 EP630/4 8.2 Y                            |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Espesor de faja: 7.0015.87 Fecha medición: 25 Marzo 2026 |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
| KLEEMANN MC<br>110s<br>CRJ-001<br>Faja Principal      | Grado de criticidad: Normal                              | 1. Daños por impacto de rocas<br>2. Desgaste Tolerable                                                             |                                           |  |  |            |
|                                                       | Fecha Ultimo Cambio: 11 Oct 2024                         |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Tipo Faja: 1400 EP500/3 8S:3                             |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Espesor de faja: 6.2814.9 Fecha medición: 25 Marzo 25    |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
| KLEEMANN MC<br>110s<br>CRJ-001<br>Fajin<br>Magnetico  | Condicion: Operación                                     | Desgaste normal por Operación                                                                                      |                                           |  |  |            |
|                                                       | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Fecha Ultimo Cambio: NO REGISTRO                         |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Tipo Faja: N/C                                           |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Espesor de faja: Fecha medición:                         |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
| KLEEMANN MC<br>09s<br>CRC-001<br>Faja<br>Alimentación | Espesor Nominal:                                         | Faja Nueva                                                                                                         |                                           |  |  |            |
|                                                       | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Fecha Ultimo Cambio: 23 Enero 2026                       |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
| KLEEMANN MC<br>09s<br>CRC-001<br>Faja Descarga        | Tipo Faja: 1400 EP500/3 8S:3                             | Lineas Transversales paralelas a Empalme                                                                           |                                           |  |  |            |
|                                                       | Espesor de faja: 6.2818.05 Fecha medición: 17 Enero 26   |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion del empalme: Sin Observaciones                 |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Condicion: Operación                                     |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |
|                                                       | Grado de criticidad: Normal                              |                                                                                                                    |                                           |                                                                                       |                                                                                       |            |

### III. Integración de Registros de Monitoreo:

Como parte del proceso de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad y en cumplimiento con los estándares de recolección de datos, se han integrado y procesado el siguiente registro:

- Control de Temperatura y Lubricación – Stacker