ATMIRE

Title	Propuesta de mejora para el incremento de la disponibilidad y confiabilidad de equipos neumáticos implementando TPM Pilar Mantenimiento Autónomo y Mantenimiento Planificado en minería
Item Type	http://purl.org/coar/resource_type/c_7a1f
Authors	Choque Mallqui, Piero Daniel;Guerrero Jimenez, Marcelo Ignacio
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	https://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-27 22:02:30
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/690299

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Propuesta de mejora para el incremento de la disponibilidad y confiabilidad de equipos neumáticos implementando TPM Pilar Mantenimiento Autónomo y Mantenimiento Planificado en minería

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Industrial

AUTOR(ES)

Choque Mallqui, Piero Daniel	0009-0004-0168-4309
Guerrero Jiménez, Marcelo Ignacio	0000-0001-5953-999X

ASESOR(ES)

Torres Aponte, Tania	0009-0003-1162-7394

Lima, 21 de Junio de 2026

Dedicatoria

A Dios, quien ha sido nuestra inspiración constante. A nuestras queridas familias, por su confianza y respaldo incondicional. A los compañeros y amigos, por el apoyo compartido tanto en lo académico como en lo personal. A los profesores, por guiarnos a lo largo de este camino educativo.

Agradecimientos

A nuestros padres, por su apoyo incondicional a lo largo de nuestra vida universitaria, por ser nuestra mayor motivación para seguir adelante pese a los desafíos y por el inmenso amor que nos han ofrecido en esta etapa tan significativa de nuestras vidas.

A nuestros abuelos, hermanos y demás familiares, por su constante apoyo, cariño y paciencia a lo largo de esta etapa profesional.

A nuestra prestigiosa universidad, por brindarnos la oportunidad de ser parte de esta familia tan competente y por inculcarnos cada enseñanza de manera exclusiva.

Resumen

Esta investigación desarrolla un plan de mejora operativa para una empresa del sector minero peruano, enfocándose en la gestión del mantenimiento para máquinas neumáticas (compresoras y perforadoras de aire) que son activos críticos para la extracción de mineral. El diagnóstico evidenció una disponibilidad promedio de los equipos del 80%, generando una brecha técnica del 6% frente al sector nacional y del 10% respecto a estándares de clase mundial. Esta baja disponibilidad, motivada por paradas no programadas (48%) y una deficiente planificación (35%), acumuló pérdidas económicas equivalentes al 5.2% de la facturación anual.

Se diseñó una propuesta de ingeniería basada en la filosofía de Mantenimiento Productivo Total (TPM) bajo el ciclo de mejora continua PHVA. La solución integra estructuralmente el pilar de Mantenimiento Autónomo, capacitando a los operarios en rutinas básicas de limpieza, lubricación e inspección, junto al pilar de Mantenimiento Planificado para optimizar las frecuencias mediante check-list técnicos. Adicionalmente, se incorporó la estandarización de procesos para establecer procedimientos operativos formales y minimizar el error humano. La prueba piloto realizada obtuvo un incremento de la disponibilidad de la maquinaria neumática, alcanzando un 91.2 %. Asimismo, el indicador MTTR se redujo de 3.8 horas a 2.4 horas, mientras que el indicador MTBF se incrementó de 75.6 horas a 90 horas. Estas mejoras se atribuyen a la adopción de las metodologías de Mantenimiento Productivo Total (TPM) por parte del personal, respaldada por las capacitaciones y el cumplimiento del 95 % del programa de implementación.

Palabras clave: Operaciones mineras; Mantenimiento productivo total; Disponibilidad de los equipos; Mantenimiento autónomo; Estandarización de procesos.

Improvement proposal to increase the availability and reliability of pneumatic equipment by implementing TPM Autonomous Maintenance and Planned Maintenance pillars in mining

Abstract

This research develops an operational improvement plan for a Peruvian mining sector company, focusing on maintenance management for pneumatic machinery (air compressors and drills), which are critical assets for mineral extraction. The diagnosis evidenced an average equipment availability of 80%, generating a 6% technical gap compared to the national sector and a 10% gap regarding world-class standards. This low availability, driven by unscheduled downtimes (48%) and deficient planning (35%), accumulated economic losses equivalent to 5.2% of the company's annual revenue.

An engineering proposal based on the Total Productive Maintenance (TPM) philosophy was designed under the Plan-Do-Check-Act (PDCA) continuous improvement cycle. The solution structurally integrates the Autonomous Maintenance pillar, training operators in basic cleaning, lubrication, and inspection routines, alongside the Planned Maintenance pillar to optimize frequencies through technical checklists. Additionally, process standardization was incorporated to establish formal operational procedures and minimize human error. The pilot test resulted in an increase in the availability of the pneumatic machinery, reaching 91.2%. Likewise, the Mean Time to Repair (MTTR) decreased from 3.8 hours to 2.4 hours, while the Mean Time Between Failures (MTBF) increased from 75.6 hours to 90 hours. These improvements are attributed to the adoption of Total Productive Maintenance (TPM) methodologies by the personnel, supported by the training provided and 95% compliance with the implementation program.

Keywords: Mining Operations; Total Productive Maintenance; Equipment availability; Autonomous maintenance; Process standardization.

Trabajo_Final_Choque_Guerrero (1).docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	1%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1. repositorioacademico.upc.edu.pe
   Fuente de Internet
2. Submitted to Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
   Trabajo del estudiante
3. Submitted to Universidad Tecnologica del Peru
   Trabajo del estudiante
4. Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru
   Trabajo del estudiante
5. qdoc.tips
   Fuente de Internet

Excluir citas	Apagado	Exclude assignment template	Activo
Excluir bibliografía	Activo	Excluir coincidencias	< 20 words

Tabla de contenido

I. Capítulo 1 1

1.1. Antecedentes 1

1.1.1. Panorama Global 1

1.1.2. Análisis de Latinoamericano 1

1.1.3. Factores determinantes de la disponibilidad de maquinaria 2

1.1.4. Panorama Nacional 3

1.1.5. Problemática del sector 3

1.1.6. Diagnóstico y Justificación 4

1.2. Marco Teórico 4

1.2.1. T.P.M. (Total Productive Maintenance) 4

1.2.2. Mantenimiento Planificado 5

1.2.3. Mantenimiento Autónomo 5

1.2.4. Estandarización de Procesos 6

1.2.5. Disponibilidad 6

II. Capítulo 2 8

2.1. Descripción de la organización 8

2.2. Identificación del problema 10

2.2.1. Brecha técnica 11

2.2.2. Impacto Económico 12

2.3. Análisis de Causas 12

2.3.1. Motivo 1: Paradas por Mantenimiento no Programado 13

2.3.2. Motivo 2: Deficiente planificación del mantenimiento programado 16

2.3.3. Motivo 3: Baja Disponibilidad de Repuestos Críticos 19

2.4. Planteamiento de objetivos 20

2.4.1. Objetivo General 20

2.4.2. Objetivo Especifico 21

III. Capítulo 3 22

3.1. Vinculación de la causa con la solución 22

3.2. Diseño detallado de la solución 24

3.2.1. Fase: Planificar 25

3.2.2. Fase: Hacer 26
3.2.3. Fase: Verificar 28
3.2.4. Fase: Hacer 29
3.3. Diseño de Indicadores 29
3.4. Consideraciones para la implementación 30
3.4.1. Presupuesto de Solución 30
3.4.2. Cronograma de Solución 31
IV. Capítulo 4 32
4.1. Validación Funcional 32
4.1.1. Validación de la Implementación de solución 32
4.1.2. Análisis de resultados AS IS -TO BE 35
4.2. Evaluación del impacto económico 36
4.2.1. Evaluación de Impacto Económico Esperado 37
4.2.2. Evaluación de Impacto Económico Optimista 38
4.2.3. Evaluación de Impacto Económico Pesimista 39
4.3. Evaluación de impacto no económico 40
4.3.1. Impacto Operativo 40
4.3.2. Impacto en el Personal 41
4.3.3. Impacto en la Seguridad 41
4.3.4. Impacto Organizacional 41
4.3.5. Impacto Ambiental 41
V. Conclusiones y Recomendaciones 43
5.1. Conclusiones 43
5.2. Recomendaciones 43
VI. Referencias 45
VII. ANEXOS 47

Lista de Tablas

Tabla 1. KPIs de clase mundial 1
Tabla 2. Indicador de Disponibilidad en el año 2024 10
Tabla 3. Impacto económico 12
Tabla 4. Motivo 1: Paradas no programadas por mantenimiento 14
Tabla 5. Causa 1: Presión de aire no adecuada en la perforadora de aire 15
Tabla 6. Causa 2: Temperatura no óptima en perforadora de aire 15
Tabla 7. Causa 3: Índices altos de filtros con saturación en la compresora de aire 16
Tabla 8. Motivo 2: Deficiente planificación del mantenimiento programado 17
Tabla 9. Causa 4: Falta de capacitación técnica 17
Tabla 10. Causa 5: Deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora 18
Tabla 11. Causa 6: Falta de estandarización en la rutina de mantenimiento 19
Tabla 12. Causa 7: Falta de control de los repuestos críticos 20
Tabla 13. Vinculación de causas 23
Tabla 14. Indicadores del proyecto 30
Tabla 15. Presupuesto del proyecto 36
Tabla 16. Análisis de resultados 36
Tabla 17. Costos de implementación 37
Tabla 18. Impacto económico esperado 37
Tabla 19. Resultado de los indicadores financieros esperados 38
Tabla 20. Impacto económico optimista 38
Tabla 21. Resultados de los indicadores financieros optimistas 39
Tabla 22. Impacto económico pesimista 40

Lista de Figuras

Figura 1. Gráfico de participación del PBI minero según producto 3

Figura 2. Gráfico de Proceso de Mantenimiento As Is 9

Figura 3. Mapa de Procesos 10

Figura 4. Disponibilidad de máquinas neumáticas 11

Figura 5. Brecha técnica 12

Figura 6. Diagrama de árbol de problemas 13

Figura 7. Árbol de objetivos 21

Figura 8. Metodología PDCA 24

Figura 9. Fichas técnicas de máquinas neumáticas 25

Figura 10. Ficha de capacitación del personal 26

Figura 11. Ficha técnica de los pilares del TPM 27

Figura 12. Ficha de indicadores de desempeño 28

Figura 13. Cronograma del proyecto 31

Figura 14. Disponibilidad de las máquinas neumáticas en el año 2025 33

Figura 15. Indicador del MTTR de las máquinas neumáticas en el año 2025 34

Figura 16. Indicador del MTBF de las máquinas neumáticas en el año 2025 34

I. Capítulo 1

1.1. Antecedentes

1.1.1. Panorama Global

La industria minera enfrenta actualmente grandes desafíos operativos debido al constante aumento en la demanda de minerales estratégicos. Se estima que para 2050 la producción de minerales críticos podría multiplicarse hasta por cinco, lo que ejerce una presión significativa sobre la eficiencia y disponibilidad de los equipos. (Word Bank, 2023) En este escenario, la disponibilidad mecánica es clave, ya que las detenciones no planificadas pueden generar pérdidas de producción de entre un 5% y un 20% anual en operaciones donde la maquinaria es fundamental. (International Energy Agency, 2022) Mantener niveles cercanos al 90% de disponibilidad se considera un estándar global, pues implica que los equipos funcionan conforme a lo previsto y los periodos de inactividad, tanto programados como imprevistos, se mantienen al mínimo. (Bennett, 2026).

Tabla 1

KPIs de clase mundial

Componente	Puntuación de clase mundial	Qué significa
Disponibilidad	90%+	Los equipos funcionan según lo programado. Los tiempos de inactividad, tanto no planificados como planificados, están controlados y son mínimos.
Actuación	95%+	El equipo funciona a su velocidad de diseño o muy cerca de ella. Se detectan y corrigen las micro paradas y las pérdidas de velocidad.
Calidad	99,9%+	Casi todas las unidades producidas cumplen con las especificaciones en el primer intento. Los desperdicios, las repeticiones de trabajo y las pérdidas iniciales son prácticamente nulas.

Nota. Bennet. (2026). What Is World Class OEE? Benchmarks and Standards. https://tractian.com/en/blog/world-class-oee

1.1.2. Análisis de Latinoamericano

En América Latina, el sector minero tiene dificultades particulares en cuanto a la gestión del mantenimiento. Su falta de digitalización y la tendencia a realizar solo

mantenimiento correctivo resultan en altos niveles de equipos fuera de servicio. La disponibilidad de maquinaria crítica a menudo está por debajo del 85% cuando el valor es mejor, a menudo más allá del 90% incluso para producir eficiencias. La gestión del mantenimiento sigue siendo uno de los aspectos importantes de la productividad minera. Esto incluye estrategias preventivas y mejoras en la gestión, que han resultado en una disminución de casi el 15% de paradas no programadas, cuando la mayoría de las fallas están relacionadas con el propio equipo. (Vera, 2024).

1.1.3. Factores determinantes de la disponibilidad de maquinaria

En la industria minera actual, la disponibilidad de la maquinaria neumática se ha convertido en un factor crítico de operatividad, dado que los esquemas de producción continuos dependen directamente de la confiabilidad de estos activos. La problemática del sector ha sido visualizada en la alta variabilidad del Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) y los prolongados Tiempos Medios Para Reparar (MTTR), variables que reflejan la disponibilidad operativa y generan cuantiosas pérdidas económicas por paradas no programadas.

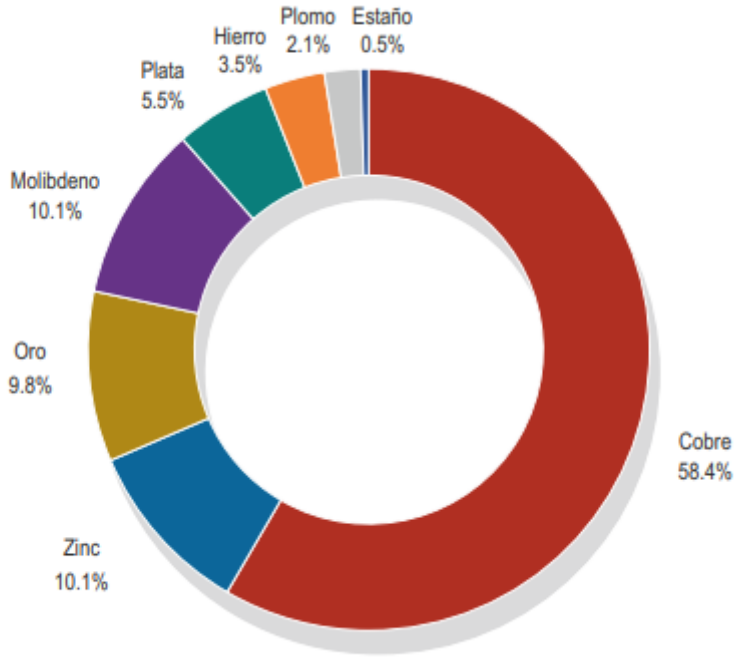
La tendencia actual de las empresas orienta hacia la reestructuración de las estrategias de mantenimiento mediante la adopción de metodologías de mejora continua como el Mantenimiento Productivo Total (TPM). Investigaciones recientes demuestran que la transición hacia estos pilares operativos permite mitigar las fallas drásticamente e incrementar la disponibilidad de activos críticos en rangos que oscilan entre el 10% y el 25% (Espíritu & Huaynate, 2022; Soto & Lira, 2023). De esta manera, la gestión de activos en minería deja de centrarse únicamente en reaccionar ante fallas y avanza hacia una cultura preventiva, fortalecida por procesos estandarizados

1.1.4. Panorama Nacional

La minería en Perú sigue siendo uno de los componentes clave de la economía de Perú: en 2025, la minería representa alrededor del 66% de sus exportaciones (MINEM, 2024). Además, por su parte, su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) se sitúa en torno al 9%, demostrando su importancia para el crecimiento nacional (Munive, 2025).

Figura 1

Gráfico de participación del PBI minero según producto



Nota. De "Anuario Minero 2024"; de MINEM, 2025. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/8155729/6827926-anuario-minero-2024-minem.pdf?v=1749053631

1.1.5. Problemática del sector

En el contexto del sector, la problemática operativa se manifiesta inicialmente a través de la disponibilidad limitada de los equipos, lo cual propicia la ocurrencia de fallas constantes. De acuerdo con Soto y Lira (2023) y Espíritu y Huaynate (2022), la carencia de políticas

preventivas y estándares operativos afecta los tiempos de inactividad de las máquinas. Esta situación, agravada por la ausencia de un control y monitoreo riguroso de las intervenciones, termina por afectar la eficiencia de los procesos y la productividad de la organización.

1.1.6. Diagnóstico y Justificación

Uno de los problemas operativos más críticos en el sector minero es la baja disponibilidad de sus equipos, una condición derivada de la aplicación de modelos de mantenimiento desactualizados, la baja incorporación tecnológica y la falta de madurez en la gestión de datos. El impacto de estas carencias no se limita a la pérdida de productividad, sino que afecta de manera directa la competitividad nacional con las empresas del sector, comprometiendo su sostenibilidad en un entorno de alta exigencia. (Dayo-Olupona et al., 2023)

1.2. Marco Teórico

En esta sección se expone el marco teórico que fundamenta la investigación, el cual ha sido desarrollado a partir de un análisis detallado de fuentes bibliográficas pertinentes y fiables acerca del tema en cuestión. Se discuten nociones fundamentales y trabajos previos vinculados a la problemática objeto de estudio.

1.2.1. T.P.M. (Total Productive Maintenance)

El TPM es la filosofía de gestión definitiva para optimizar el rendimiento del sistema, mediante la reducción metódica de pérdidas, defectos y condiciones de inestabilidad operativa. Su impacto no se limita al campo técnico del mantenimiento, ya que vemos que involucra a todos los niveles de la organización, desde los operadores directamente hasta la alta dirección, e incorpora prácticas (por ejemplo, mantenimiento planificado, mantenimiento autónomo y mantenimiento predictivo) bajo el paraguas de la mejora continua. También ha recibido ahora evidencias empíricas de mejoras significativas en el rendimiento de los sitios industriales, con

menos tiempo de inactividad y un uso más productivo de la capacidad instalada. Además, la combinación de TPM con otros sistemas de gestión más recientes fortalece la cultura organizacional y fomenta la colaboración interfuncional, ayudando a sentar las bases para la sostenibilidad de los resultados (Maui et al., 2025).

1.2.2. Mantenimiento Planificado

El mantenimiento planificado busca anticipar la falla de equipos que no está planificada e implementada mediante una serie de operaciones planificadas y ordenadas del equipo para que se pueda iniciar la prevención de fallas. Al tener que ser revisado periódicamente y ajustado o reemplazado según un cronograma, nos permite prever las partes que se deterioran, lo que lleva a menos tiempo de inactividad no programado, lo que a su vez estabiliza la fabricación. La literatura especializada demuestra que, si el mantenimiento planificado del equipo se desarrolla a partir de un examen exhaustivo de los datos operativos para desarrollar un sistema de mantenimiento duradero, la fiabilidad del equipo mejorará gradualmente y los costos relacionados con el control de crisis disminuirán. Intuitivamente, en la producción y comercialización de máquinas industriales, la programación de estas actividades puede aumentar la disponibilidad de las máquinas, aumentando la eficiencia en dichas máquinas con el tiempo (Bousdekis et al., 2022).

1.2.3. Mantenimiento Autónomo

El mantenimiento autónomo es un enfoque de servicio donde los operadores asumen la responsabilidad de realizar las tareas de mantenimiento o verificación básica de la maquinaria en la que suelen trabajar, típicamente la limpieza, verificación visual, lubricación, ajuste de partes accesibles, etc. Esta metodología se basa en la idea de que el operador que conoce cómo se comporta la maquinaria de una máquina en la operación diaria es el más informado y, por lo tanto, tiene la mejor ventaja para detectar anomalías en las primeras etapas del sistema antes

de que esos comportamientos causen colapsos más desafiantes o complicados. Se encontró a través de estudios contemporáneos que la integración del mantenimiento autónomo en la industria ayuda a optimizar la producción de máquinas al optimizar el proceso de producción y al mismo tiempo refuerza la propiedad y responsabilidad de los propietarios sobre los activos de los que son responsables. De manera similar, su aplicación está vinculada a la minimización de micro paradas y menores pérdidas que afectan favorablemente los indicadores de disponibilidad del equipo (Sgarbossa et al., 2022).

1.2.4. Estandarización de Procesos

Esta herramienta implica la introducción de procedimientos estrictos, documentación y procesos de aplicación sistemática para cada necesidad operativa o de mantenimiento práctica para garantizar que las intervenciones se lleven a cabo de manera sistemática, reproducible y de acuerdo con las mejores prácticas reconocidas. En el mantenimiento industrial, este proceso es fundamental para reducir la variación en los resultados, minimizar la posibilidad de errores humanos y asegurarse de que el conocimiento técnico esté bien definido y sea fácilmente transferible. Desde una perspectiva moderna, la estandarización es un elemento clave en la fortaleza y estabilidad de las mejoras operativas, ya que contribuye a la capacitación del personal en procesos para acelerar el tiempo de aprendizaje y promover el uso continuo de técnicas establecidas. Evidencias académicas recientes encuentran que hay mejoras medibles en el rendimiento del proceso y que la reducción de desviaciones relacionadas con el factor humano causada por su práctica sistemática es considerable (Santos et al., 2022).

1.2.5. Disponibilidad

La disponibilidad se refiere al período de tiempo en que un equipo está en operación, en relación con la cantidad de tiempo que debería estar disponible para lograr la producción. El rendimiento del sistema se basa en dos parámetros básicos: el tiempo medio entre fallas

(MTBF), que mide la fiabilidad del sistema, y el tiempo medio para reparar (MTTR), que mide la eficiencia para solucionar una falla. Desde un punto de vista técnico y de gestión, mejorar la disponibilidad no solo expande la capacidad productiva de una instalación, sino que también disminuye los costos operativos por interrupciones no planificadas. Estudios recientes han revelado que las empresas que adoptan un enfoque activo para controlar este indicador logran ganancias significativas tanto en productividad como en sostenibilidad (Jasiulewicz-Kaczmarek, 2022).

$$DISPONIBILIDAD = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

II. Capítulo 2

2.1. Descripción de la organización

La empresa donde se implementó la mejora pertenece al sector minero, específicamente al rubro de exploración y extracción de mineral metálico, cuyo objetivo principal es la obtención de los minerales que se encuentran dentro de las rocas que están altamente mineralizadas para su posterior procesamiento y comercialización.

Dentro de los principales procesos operativos en el sector minero, las etapas de exploración y extracción son fundamentales, ya que permiten identificar, evaluar y remover las rocas mineralizadas que posterior serán seleccionadas y clasificadas. Para el desarrollo de estas actividades, se emplea máquinas certificadas para puedan ser utilizadas en el sector, entre las cuales destacan las perforadoras de aire y la compresora de aire.

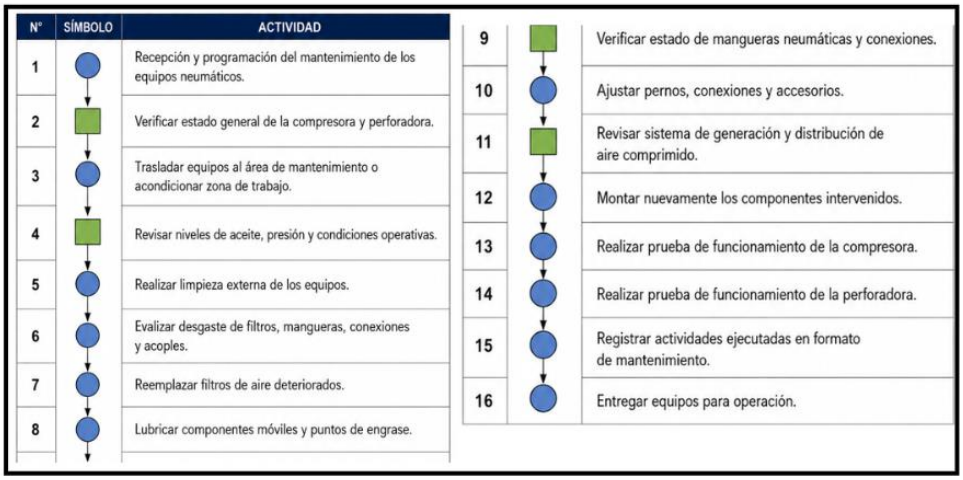
Las perforadoras de aire cumplen una función importante en el proceso de fragmentación de la roca mineral, ya que con su función permite la generación de orificios estratégicamente ubicados donde se colocan cargas explosivas para la posterior voladura. Este procedimiento permite hacer voladuras más precisas con esto facilita la ruptura de la roca mineral y reduce tiempos para poder seleccionar y clasificar solo las partes de la roca que esta netamente mineralizada. La compresora de aire se establece como una maquina indispensable y critica dentro de la operación, debido a que suministra la energía necesaria para el funcionamiento eficiente de las perforadoras.

El proceso de mantenimiento preventivo aplicado a los equipos neumáticos de la empresa se desarrollaba de manera empírica, basándose principalmente en la experiencia y conocimientos adquiridos por el personal con mayor tiempo de servicio. Si bien este enfoque permitía atender algunas necesidades operativas, no existía una metodología estandarizada ni procedimientos formalmente documentados que garantizaran la ejecución eficiente de las

actividades de mantenimiento. Como consecuencia, se identificaron diversas deficiencias en el proceso, tales como la ausencia de criterios técnicos definidos para las inspecciones, la falta de planificación de actividades preventivas y la omisión de tareas críticas para la conservación de los equipos. Estas limitaciones ocasionaban intervenciones poco efectivas, incrementando la frecuencia de fallas y reduciendo la confiabilidad de las máquinas neumáticas.

Figura 2

Gráfico de Proceso de Mantenimiento As Is



N°	SÍMBOLO	ACTIVIDAD
1		Recepción y programación del mantenimiento de los equipos neumáticos.
2		Verificar estado general de la compresora y perforadora.
3		Trasladar equipos al área de mantenimiento o acondicionar zona de trabajo.
4		Revisar niveles de aceite, presión y condiciones operativas.
5		Realizar limpieza externa de los equipos.
6		Evalizar desgaste de filtros, mangueras, conexiones y acoples.
7		Reemplazar filtros de aire deteriorados.
8		Lubricar componentes móviles y puntos de engrase.
9		Verificar estado de mangueras neumáticas y conexiones.
10		Ajustar pernos, conexiones y accesorios.
11		Revisar sistema de generación y distribución de aire comprimido.
12		Montar nuevamente los componentes intervenidos.
13		Realizar prueba de funcionamiento de la compresora.
14		Realizar prueba de funcionamiento de la perforadora.
15		Registrar actividades ejecutadas en formato de mantenimiento.
16		Entregar equipos para operación.

Nota. Adaptado con información de una empresa privada.

En ese sentido, la disponibilidad, confiabilidad y adecuado mantenimiento de la compresora de aire resultan factores críticos para asegurar la eficiencia del proceso productivo y minimizar riesgos operativos, lo que justifica la necesidad de implementar mejoras orientadas a optimizar su desempeño dentro del sistema minero.

Figura 3

Mapa de Procesos



Nota. Adaptado de una empresa privada

2.2. Identificación del problema

En el presente proyecto de investigación se analiza una empresa del sector minero, enfocándose en la gestión del mantenimiento de compresoras y perforadoras de aire, equipos críticos para la continuidad operativa. Por ello, resulta necesario medir y analizar la disponibilidad mediante la siguiente relación:

$$DISPONIBILIDAD = \frac{Horas\ Totales\ - Horas\ paradas\ \ mantenimiento}{Horas\ Totales} \times 100\%$$

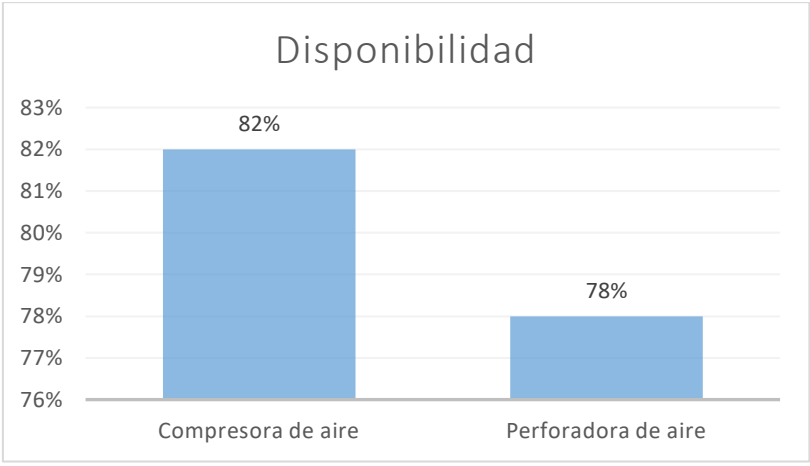
Tabla 2

Indicador de Disponibilidad en el año 2024

EQUIPO	Horas Totales	Horas Mant. No Programado	Horas Mant. Programado	Disponibilidad
Compresora de aire	3432	249.6	368.16	82%
Perforadora de aire	3432	322.4	432.64	78%
Total Promedio				80%

Figura 4

Disponibilidad de máquinas neumáticas



Nota. Adaptado de una empresa privada

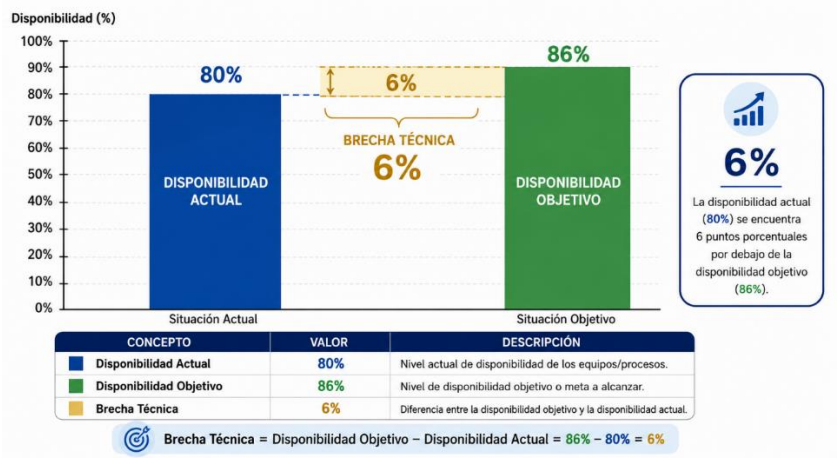
En base a los resultados de la tabla 4, se evidencia la disponibilidad de las máquinas para la compresora de aire un 82%, y la perforadora de aire con un 78%.

2.2.1. Brecha técnica

Como medida de trabajo, estableceremos un promedio entre ambos datos de disponibilidad maquinaría, teniendo un promedio de 80%. Según estudios en el sector minero. La empresa comparada con otra similar, del sector minero, tiene como medida un 86% de disponibilidad. (Junto, 2025) Siendo el caso, que la empresa tenga un 80% de disponibilidad en promedio, se tiene una brecha técnica de 6% para competir en el sector peruano.

Figura 5

Brecha técnica



Nota. La información fue adaptada de una empresa privada y del autor Junto (2025)

2.2.2. Impacto Económico

Tabla 3

Impacto económico

MOTIVOS	HORAS PARADAS	COSTO TOTAL
Incorrecta identificación de fallas	135	S/22,747.50
Incumplimiento del mantenimiento preventivo	110	S/18,535
Estándares no actualizados	90	S/15,165
Demoras en diagnóstico	140	S/23,590
Deficiente planificación de repuestos	50	S/8,425
Falta de compras de repuestos críticos	47	S/7,919.50
Total	**572**	**S/96,382**
Facturación de la empresa		S/1,854,000
% Perdida	**5.2%**	

Se evalúa para la tabla un Costo / Hora por las paradas de S/. 168.5

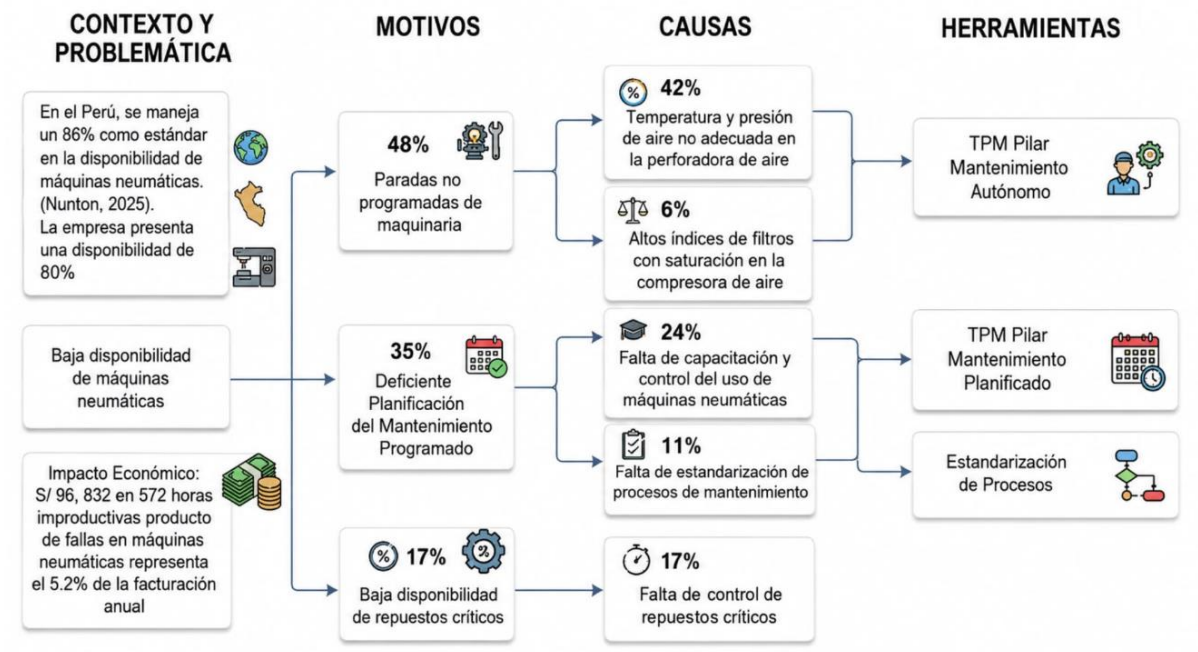
2.3. Análisis de Causas

En la empresa se analizó los principales motivos por los cuales había una baja disponibilidad de máquinas neumáticas, para esto se realizó un árbol de problemas donde se

puede evidenciar las causas raíces y además se planteó las herramientas con las cuales se dio una mejora para las máquinas y su funcionamiento.

Figura 6

Diagrama de árbol de problemas



Nota. Adaptado de una empresa privada

El árbol de problemas permitió identificar los puntos críticos que deben ser abordados para mejorar la disponibilidad de las máquinas. Del análisis realizado, se observa que el 48% de las incidencias corresponde a paradas por mantenimiento no programado, seguido de un 35% asociado a deficiencias en la planificación de los mantenimientos programados y, finalmente, un 17% relacionado con la indisponibilidad de repuestos críticos. Tal como se muestra en la Figura # y en el diagrama de Pareto, estos tres factores concentran el 100% de las incidencias analizadas, evidenciando su impacto directo en la disponibilidad de los equipos.

2.3.1. Motivo 1: Paradas por Mantenimiento no Programado

Se identificó que las paradas no programadas por mantenimiento constituyen uno de los principales factores que afectan la baja disponibilidad de máquinas neumáticas representando

el 48% de las incidencias. Este resultado fue validado mediante el análisis de los tiempos registrados por detenciones asociadas a mantenimientos correctivos.

Asimismo, se determinó que las principales causas de estas paradas están relacionadas con presión de aire no adecuada en la perforadora de aire, temperatura no optima en la perforadora de aire y los altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire.

Tabla 4

Motivo 1: Paradas no programadas por mantenimiento

Motivo	Causa Raíz	Tiempo de paradas por causas (horas)	Total (horas)
Paradas por Mantenimiento no Programado	Presión de aire no adecuada en la perforadora de aire	148.72	274.56
	Temperatura no optima en la perforadora de aire	91.52	
	Altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire	34.32	

2.3.1.1. Causa 1: Presión de aire no adecuada en la perforadora de aire

En el ámbito operativo minero, la perforadora de aire requiere trabajar con una presión adecuada, suministrada por una compresora correctamente calibrada, para asegurar su buen desempeño. Cuando la presión es menor a la establecida, se reduce la velocidad de perforación, aumenta el tiempo de ciclo y disminuye la capacidad de rotación del barreno, lo que genera un mayor esfuerzo mecánico y acelera el desgaste de los componentes internos. Por otro lado, un exceso de presión también afecta negativamente la operación, ya que produce vibraciones, inestabilidad en el manejo del equipo y posibles fallas en su estructura.

Tabla 5

Causa 1: Presión de aire no adecuada en la perforadora de aire

Motivo	Tiempo de paradas por causas (horas)
Paradas por Mantenimiento no Programado	274.56
Causa Raíz 1	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Presión de aire no adecuada en la perforadora	148.72

En consecuencia, se generan paradas no programadas por la inadecuada presión de aire que representa el 26%, esto quiere decir que 148.72 horas la perforadora de aire no se encuentra disponible para su uso ya que se encuentra en mantenimiento.

2.3.1.2.Causa 2: Temperatura no optima en la perforadora de aire

En la operación de una perforadora de aire, la temperatura es un factor crítico que influye directamente en su desempeño y vida útil. Las altas temperaturas suelen originarse por una lubricación inadecuada, el uso continuo del equipo sin pausas adecuadas y el suministro de aire parcialmente limpio desde la compresora. Esta condición se manifiesta en una disminución del rendimiento, posibles bloqueos del equipo y, en casos más críticos, paradas inesperadas por fallas internas.

Tabla 6

Causa 2: Temperatura no óptima en perforadora de aire

Motivo	Tiempo de paradas por causas (horas)
Paradas por Mantenimiento no Programado	274.56
Causa Raíz 2	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Temperatura no óptima en la perforadora	91.52

En consecuencia, se generan paradas no programadas por la temperatura no optima que representa el 16%, esto quiere decir que 91.52 horas la perforadora de aire no se encuentra disponible para su uso ya que se encuentra en mantenimiento.

2.3.1.3.Causa 3: Altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire

En los sistemas de aire comprimido utilizados en minería, los filtros de la compresora cumplen la función de retener polvo y contaminantes presentes en el ambiente. Sin embargo, debido a la alta concentración de partículas en estas operaciones, los filtros tienden a saturarse rápidamente cuando no se realiza un mantenimiento adecuado. La obstrucción de los filtros restringe el flujo de aire, reduciendo la capacidad del sistema para generar la presión requerida.

Tabla 7

Causa 3: Altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire

Motivo	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Paradas por Mantenimiento no Programado	274.56
Causa Raíz 3	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire	34.32

En consecuencia, se generan paradas no programadas por los altos índices de filtros con saturación representa el 6%, esto quiere decir que 34.32 horas la compresora de aire no se encuentra disponible para su uso ya que se encuentra en mantenimiento.

2.3.2. Motivo 2: Deficiente planificación del mantenimiento programado

Se identificó que la deficiente planificación del mantenimiento programado constituye uno de los principales factores que afectan la baja disponibilidad de máquinas neumáticas representando el 35% de las incidencias. Este resultado fue validado mediante el análisis de los tiempos registrados por detenciones asociadas a mantenimientos correctivos.

Asimismo, se determinó que las principales causas de estas paradas están relacionadas con falta de capacitación técnica, deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora y falta de estandarización de rutinas de mantenimiento.

Tabla 8

Motivo 2: Deficiente planificación del mantenimiento programado

Motivo	Causa Raíz	Tiempo de paradas por causas (horas)	Total (horas)
Deficiente Planificación del Mantenimiento Programado	Falta de capacitación técnica	97.24	200.2
	Deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora	40.04	
	Falta de estandarización de rutinas de mantenimiento	62.92	

2.3.2.1.Causa 4: Falta de capacitación técnica

En el contexto minero, donde existen condiciones exigentes como polvo, humedad y operación continua, el conocimiento del personal es clave para definir correctamente las actividades, frecuencias y criterios de intervención. Cuando no se cuenta con la capacitación adecuada se produce la omisión de tareas críticas. Esto quiere decir que existen mantenimientos tardíos en la compresora provocando sobrecalentamiento, así como caídas de presión y en un control deficiente de la operatividad en la perforadora, generando desgaste acelerado y fallas recurrentes.

Tabla 9

Causa 4: Falta de capacitación técnica

Motivo	Tiempo de paradas por causas (horas)
Deficiente Planificación del Mantenimiento Programado	200.2
Causa Raíz 1	**Tiempo de paradas por causas (horas)**

Falta de capacitación técnica	97.24

En consecuencia, existe una deficiente planificación del mantenimiento programado por la falta de capacitación técnica que representa el 17%, esto quiere decir que 97.24 horas la compresora de aire y la perforadora de aire no se encuentran disponibles para su uso.

2.3.2.2.Causa 5: Deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora

El deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora comprende una causa directa de una inadecuada planificación del mantenimiento programado, específicamente en la operatividad minera ya que estos espacios cuentan con alta presencia de polvo. La falta de seguimiento técnico del estado de los filtros como niveles de saturación, limpieza y reemplazo impide establecer intervalos de mantenimiento acordes a las condiciones reales de operación. En conjunto, esta deficiencia impacta negativamente en la disponibilidad de los equipos, incrementa los costos de mantenimiento correctivo y reduce la confiabilidad del proceso productivo minero.

Tabla 10

Causa 5: Deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora

Motivo	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Deficiente planificación del mantenimiento programado	200.2
Causa Raíz 2	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Deficiente control del sistema de filtración de aire en la compresora	40.04

En consecuencia, existe una deficiente planificación del mantenimiento programado por el deficiente control del sistema de filtración de aire que representa el 7%, esto quiere decir que 40.04 horas la compresora de aire no se encuentra disponible para su uso.

2.3.2.3.Causa 6: Falta de Estandarización de Rutinas de Mantenimiento

En el contexto minero, la falta de procedimientos establecidos tales como checklists e inspecciones definidas puede generar una alta variabilidad en la ejecución de las actividades, esto influye que el personal aplique una medida no estandarizada. En la práctica, esto ocasiona que al momento de realizar un proceso critico como la limpieza de filtros, el control de presión de aire, la lubricación y el ajuste de componentes se realicen de forma incompleta, inconsistente e incluso que no se lleguen a realizar. En otras palabras, esta deficiencia impacta tanto en la ejecución como en la planificación del mantenimiento, reduciendo la disponibilidad de los equipos, incrementando las paradas no programadas y afectando la eficiencia del proceso productivo de la empresa.

Tabla 11

Causa 6: Falta de estandarización en la rutina de mantenimiento

Motivo	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Deficiente planificación del mantenimiento programado	200.2
Causa Raíz 3	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Falta de estandarización de rutinas de mantenimiento	62.92

En consecuencia, existe una deficiente planificación del mantenimiento programado por la falta de estandarización de rutinas de mantenimiento que representa el 11%, esto quiere decir que 62.92 horas la compresora de aire y la perforadora de aire no se encuentran disponible para su uso.

2.3.3. Motivo 3: Baja Disponibilidad de Repuestos Críticos

La indisponibilidad de repuestos críticos es un factor determinante en la baja disponibilidad de las máquinas neumáticas, especialmente en equipos como la perforadora de

aire y la compresora de aire, los componentes como filtros, válvulas, mangueras, sellos y lubricadores tienen una vida útil limitada y requieren ser reemplazados oportunamente para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos, si esto no se cumple genera un incremento en los tiempos de parada, debido que se deberá comprar y trasladar las piezas con esto produce un retraso en la continuidad operativa. Además, esta situación refleja deficiencias en la planificación y control de inventarios, al no contar con una adecuada previsión de la demanda basada en el comportamiento real de los equipos. En conjunto, la falta de repuestos críticos incrementa la frecuencia y duración de las paradas no programadas, reduce la disponibilidad de las máquinas y afecta negativamente la eficiencia en la empresa.

Tabla 12

Causa 7: Falta de control de los repuestos críticos

Motivo	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Baja Disponibilidad de Repuestos Críticos	97.24
Causa Raíz 1	**Tiempo de paradas por causas (horas)**
Falta de control de repuestos críticos	97.24

En consecuencia, existe una indisponibilidad de repuestos críticos por la falta de control en el inventario de repuestos críticos que representa el 17%, esto quiere decir que 97.24 horas la compresora de aire y la perforadora de aire no se encuentran disponible para su uso.

2.4. Planteamiento de objetivos

2.4.1. Objetivo General

Incrementar la disponibilidad de máquinas neumáticas de una empresa en el sector minero mediante implementación de TPM mantenimiento autónomo y preventivo

2.4.2. Objetivo Especifico

-Disminuir las horas de paradas por mantenimiento no programado por presión de aire no adecuado y temperatura no optima en la perforadora de aire implementando TPM Pilar Mantenimiento Autónomo.

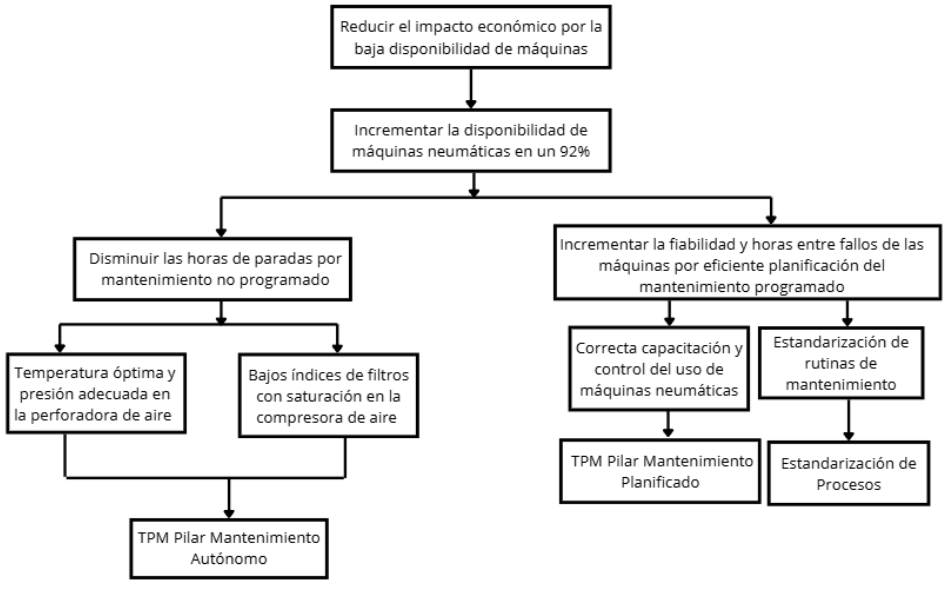
-Disminuir las horas de paradas por mantenimiento no programado por altos índices de filtros con saturación en la compresora de aire implementando TPM Pilar Mantenimiento Autónomo.

- Incrementar las horas de fiabilidad de las herramientas por correcta capacitación y control del uso de las máquinas neumáticas implementando TPM Pilar Mantenimiento Planificado.

- Incrementar las horas entre fallos de las herramientas por correcta estandarización de rutinas de mantenimiento implementando TPM Pilar Mantenimiento Planificado y Estandarización de Procesos.

Figura 7

Árbol de objetivos



III. Capítulo 3

3.1. Vinculación de la causa con la solución

En la tabla 13, se establece la relación de la problemática con los motivos, y causas raíz, así como las herramientas de ingeniería industrial.

La relación entre las causas de las paradas no programadas, la deficiente planificación del mantenimiento y la falta de estandarización de procesos se ha abordado mediante la aplicación de tres herramientas clave: mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado y estandarización de procesos. La estrategia de mantenimiento autónomo, como lo muestra Sgarbossa et al. (2022), capacita a los operarios para realizar inspecciones básicas, lo que mejora el MTBF en un 29.6%. Por su parte, el mantenimiento planificado, basado en la experiencia de García Joaquín (2023), incrementa la productividad en un 25.99% gracias a planes sistemáticos. Finalmente, la estandarización de procesos, según Santos et al. (2022), facilita rutinas uniformes, elevando la disponibilidad de maquinaria y reduciendo defectos. En conjunto, estas herramientas constituyen un esquema robusto que mejora la disponibilidad y confiabilidad de las operaciones, adaptándose a las necesidades del sector plástico.

Tabla 13

Vinculación de causas

Motivos	Causas	Herramientas	Resumen	Autor	Resultado
Paradas por mantenimiento no programadas	Presión no adecuada en la perforadora de aire	Mantenimiento Autónomo	La implementación del mantenimiento autónomo inicia con la capacitación de operarios para ejecutar inspecciones básicas, limpieza, lubricación y verificación visual de equipos. Posteriormente, se establecen rutinas periódicas de monitoreo para detectar anomalías tempranas y reducir micro paradas operativas.	Título: Autonomous Maintenance as a TPM Strategy for Improving Equipment Availability in Manufacturing Systems Autor: Sgarbossa et al. (2022)	La implementación del mantenimiento autónomo incrementó el MTBF de 87.42 h a 113.27 h (+29.6%), redujo el MTTR de 1.15 h a 0.87 h (-24.3%) y aumentó la confiabilidad del equipo de 76% a 81%, mejorando la disponibilidad operativa de maquinaria crítica.
	Temperatura no óptima en la perforadora de aire				
	Alto índice de filtros con saturación en la compresora de aire				
Deficiente planificación del programa de mantenimiento	Falta de capacitación técnica	Mantenimiento Planificado	El mantenimiento planificado se implementa mediante la programación sistemática de inspecciones, ajustes y reemplazos planificados según datos operativos del equipo. Esto permite anticipar fallas, mejorar la confiabilidad y reducir tiempos de parada no programados.	Título: Mejoras en las actividades de mantenimiento planificado para incrementar la productividad en el área de producción de masterbatch en una empresa del sector plástico en Ate, 2022 Autor: Ricardo Benito García Joaquín. (2023)	La implementación de mejoras en el mantenimiento planificado permitió incrementar la productividad promedio de 47.43% a 73.42% (+25.99%), mediante la ejecución de un nuevo plan planificado, personal técnico capacitado y procedimientos estandarizados de mantenimiento en una empresa del sector plástico en Lima.
	Deficiente control de filtración en el sistema de aire de la compresora				
	Falta estandarización de rutinas de mantenimiento	Estandarización de Procesos	La estandarización de procesos se desarrolla mediante la definición de procedimientos operativos, documentación técnica y rutinas estructuradas de mantenimiento. Su implementación busca uniformizar actividades, reducir errores humanos y facilitar la transferencia del conocimiento técnico.	Título: Process Standardization for Sustainable Maintenance Performance Improvement Autor: Santos et al. (2022)	La estandarización de procesos junto con prácticas TPM permitió incrementar la disponibilidad de maquinaria de soplado hasta 80.72%, mejorar el cumplimiento de pedidos en 74.59% y reducir productos defectuosos en 42%

3.2. Diseño detallado de la solución

En este punto se desarrolla el modelo de solución implementado en la empresa, el cual se sustenta en la metodología PDCA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar), con el propósito de asegurar una correcta ejecución y mejora continua de las medidas propuestas. Esta metodología permitió estructurar de manera ordenada cada fase de la implementación, facilitando el seguimiento y control de los resultados obtenidos. Asimismo, es importante destacar que las principales herramientas empleadas en el desarrollo de la solución corresponden a los pilares del Mantenimiento Productivo Total (TPM), específicamente el mantenimiento autónomo y el mantenimiento planificado, los cuales nos ayudan a mejorar la disponibilidad y confiabilidad de las máquinas de aire. De igual manera, se incorporó la estandarización de procesos como herramienta principal, con la finalidad de poder tener un proceso definido para el mantenimiento de las máquinas y reducir la variabilidad operativa.

Figura 8

Metodología PDCA



Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

3.2.1. Fase: Planificar

En esta etapa se llevó a cabo el diagnóstico de la situación actual (AS-IS), identificándose como problemática principal la baja disponibilidad de los equipos neumático, la cual estaba relacionada principalmente a deficiencias en el mantenimiento, ausencia de rutinas estandarizadas y una inadecuada gestión de inspecciones. En función de estos hallazgos, se diseñó un plan de acción estructurado, el cual incluyó la implementación del pilar de mantenimiento autónomo del TPM, asignando a los operadores responsabilidades básicas como limpieza, inspección y lubricación.

Figura 9

Fichas técnicas de máquinas neumáticas



Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Asimismo, se desarrolló un plan de mantenimiento planificado programado, definiendo frecuencias de intervención en relación de las horas que las maquinas tienen que estar aptas para el correcto funcionamiento. De igual manera, se elaboraron procedimientos estandarizados para la operación, inspección y mantenimiento de la perforadora de aire y la compresora. Finalmente, se establecieron indicadores de desempeño, tales como la

disponibilidad mecánica, frecuencia de fallas y tiempos de parada, con el objetivo de medir y controlar la efectividad de las acciones propuestas.

3.2.2. Fase: Hacer

En esta fase se ejecutaron las acciones definidas en la etapa de planificación. Se inició con la capacitación del personal operativo en los principios del TPM, teniendo en cuenta la importancia del mantenimiento autónomo como herramienta principal para mejorar la disponibilidad de los equipos. Esta capacitación permitió reforzar los conocimientos del personal y con esto concientizar con una mayor participación de los cuidados de las máquinas dentro de la empresa.

Figura 10

Ficha de capacitación del personal



FICHA DE CAPACITACIÓN DEL PERSONAL

Objetivo: Desarrollar competencias en TPM y mantenimiento autónomo.

Temas tratados:

- Conceptos básicos de TPM
- Mantenimiento autónomo
- Mantenimiento preventivo
- Limpieza, inspección y lubricación
- Seguridad en el mantenimiento

Fecha de capacitación: _____

Instructor: _____

Participantes:

N°	NOMBRE	CARGO	FIRMA
1			
2			
3			
4			
5			

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Adicionalmente, se implementaron rutinas de mantenimiento autónomo, incluyendo actividades como la limpieza periódica de los componentes, inspección visual continua de las

mangueras, válvulas y filtros, así como la verificación de niveles de aceite y condiciones generales del equipo. Estas actividades fueron implementadas dentro de las operaciones semanales que tienen los trabajadores.

Posteriormente, se llevó a cabo un programa de mantenimiento planificado, estableciendo frecuencias de intervención basadas en criterios técnicos y elaborando checklists específicos para cada equipo. Además, se diseñaron e implementaron formatos y procedimientos estandarizados que permitieron ordenar las actividades operativas y de mantenimiento, reduciendo la variabilidad en la ejecución de las tareas y mejorando el control de las intervenciones realizadas.

Figura 11

Ficha técnica de los pilares del TPM



FICHA DE MANTENIMIENTO AUTÓNOMO (TPM – PILAR MA)

Objetivo: Involucrar al operador en el cuidado diario de los equipos.
Responsable: Operador de equipo
Frecuencia: Diaria
Equipo: Perforadora de aire / Compresora de aire

N°	ACTIVIDAD	PUNTOS DE CONTROL	OK	NOK
1	Limpieza	Limpiar polvo y suciedad del equipo.	✓	
2	Inspección visual	Revisar fugas, mangueras, válvulas, uniones.	✓	
3	Verificación de niveles	Revisar nivel de aceite y lubricación.	✓	
4	Verificación de filtros	Revisar filtros de aire y limpieza.	✓	
5	Prueba de funcionamiento	Encender equipo y verificar operación normal.	✓	

Observaciones: _____

Fecha: _____ **Firma:** _____

FICHA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO (TPM – PILAR MP)

Objetivo: Prevenir fallas y asegurar la confiabilidad de los equipos.
Responsable: Mecánico de mantenimiento
Frecuencia: Según plan (semanal/mensual/trimestral)
Equipo: Perforadora de aire / Compresora de aire

N°	ACTIVIDAD	FRECUENCIA	RESPONSABLE
1	Cambio de aceite (compresora)	Mensual	Mecánico
2	Limpieza / cambio de filtros de aire	Mensual	Mecánico
3	Revisión de mangueras y válvulas	Semanal	Mecánico
4	Lubricación de piezas móviles	Semanal	Mecánico
5	Revisión de pistón y distribuidor de aire	Mensual	Mecánico
6	Revisión de tirantes y bocina con bronce	Trimestral	Mecánico

Observaciones: _____

Fecha: _____ **Firma:** _____

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

3.2.3. Fase: Verificar

En esta etapa se realizó la evaluación de los resultados obtenidos tras la implementación de las mejoras. Para ello, se efectuó el seguimiento continuo de los indicadores definidos, comparando los valores registrados antes y después de la aplicación del plan de mejora. Se analizaron variables críticas como la reducción en la frecuencia de fallas, la disminución de los tiempos de inactividad y el incremento en la disponibilidad de los equipos. Asimismo, se llevaron a cabo inspecciones en campo con el fin de verificar el cumplimiento de las rutinas de mantenimiento autónomo y planificado, así como la correcta aplicación de los procedimientos estandarizados. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la confiabilidad de los equipos, así como una mayor participación y concientización del personal operativo en las actividades de mantenimiento, lo que contribuyó a una mejor manipulación de las máquinas dentro de la empresa.

Figura 12

Ficha de indicadores de desempeño



Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

3.2.4. Fase: Hacer

En esta última fase se establecieron acciones dirigidas orientadas a garantizar la sostenibilidad de las mejoras implementadas. Para esto, se procedió a estandarizar las buenas prácticas identificadas durante la ejecución del proyecto, incorporándolas como parte de los procedimientos de la organización. Cabe resaltar que se promovió la mejora continua del sistema de mantenimiento mediante la actualización periódica de los planes planificados, la retroalimentación constante del personal operativo y la incorporación progresiva de nuevas herramientas del TPM en función de las necesidades detectadas en la operación. De esta manera, se logró consolidar un sistema de gestión de mantenimiento más estructurado, eficiente y orientado a resultados, cuyo objetivo principal es maximizar la disponibilidad de los equipos neumáticos, reducir las paradas no programadas y asegurar la continuidad del proceso productivo en el entorno minero.

3.3. Diseño de Indicadores

Como parte del desarrollo de indicadores, se ha realizado tablas de seguimiento a cada indicador a evaluar en las herramientas solucionadas. En este caso, se realizó tablas para los indicadores: Disponibilidad, cumplimiento de ordenes de mantenimiento, MTBF y MTTR de máquinas neumáticas.

Tabla 14

Indicadores de Proyecto

INDICADORES	FÓRMULA
DISPONIBILIDAD	$\frac{Tiempo\ Total\ Operación}{TIempo\ Total\ Disponible}$
MTBF	$\frac{Tiempo\ Operativo}{N°\ Fallas}$
MTTR	$\frac{Tiempo\ Inoperativo\ por\ parada}{N°\ Fallas}$

Cumplimiento de Plan de Mantenimiento Planificado Programado	$\frac{MTTO\ Prev.Ejecutado}{MTTO\ Prev.Programado}$

Estas tablas se encuentran en los anexos 1, anexo 2, anexo 3, y anexo 4.

3.4. Consideraciones para la implementación

Se consideran como restricciones técnicas la aplicación de una técnica de gestión de activos de mantenimiento orientada al monitoreo y control del desempeño del motor, así como el diseño de un plan de gestión para la adquisición de repuestos y refrigerantes críticos necesarios para asegurar la continuidad del proceso.

3.4.1. Presupuesto de Solución

Tabla 15

Presupuesto del proyecto

HERRAMIENTAS	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO TOTAL
MANTENIMIENTO AUTONOMO	Capacitación sobre el funcionamiento del motor de la compresora	8	$ 2,000
	Aceite lubricante Vistony SAE 30	50	$ 500
	Capacitación técnicos	4	$ 480
	EPP	12	$ 360
	Capacitación sobre el cambio de filtros industriales	8	$ 640
	Capacitación del personal	8	$ 1,200
	Contratar especialistas en mantenimiento autónomo	4	$ 1,400
	Laptop	5	$ 2,500
	Artículos de Limpieza	30	$ 120
MANTENIMIENTO PLANIFICADO	Capacitación sobre el funcionamiento correcto de la perforadora de aire	8	$ 2,400
	Kit de mantenimiento	30	$ 270
	Mangueras neumáticas industriales	50	$ 400
	Kit de sellos de perforadora	36	$ 360
	Capacitación sobre el mantenimiento planificado	8	$ 1,600

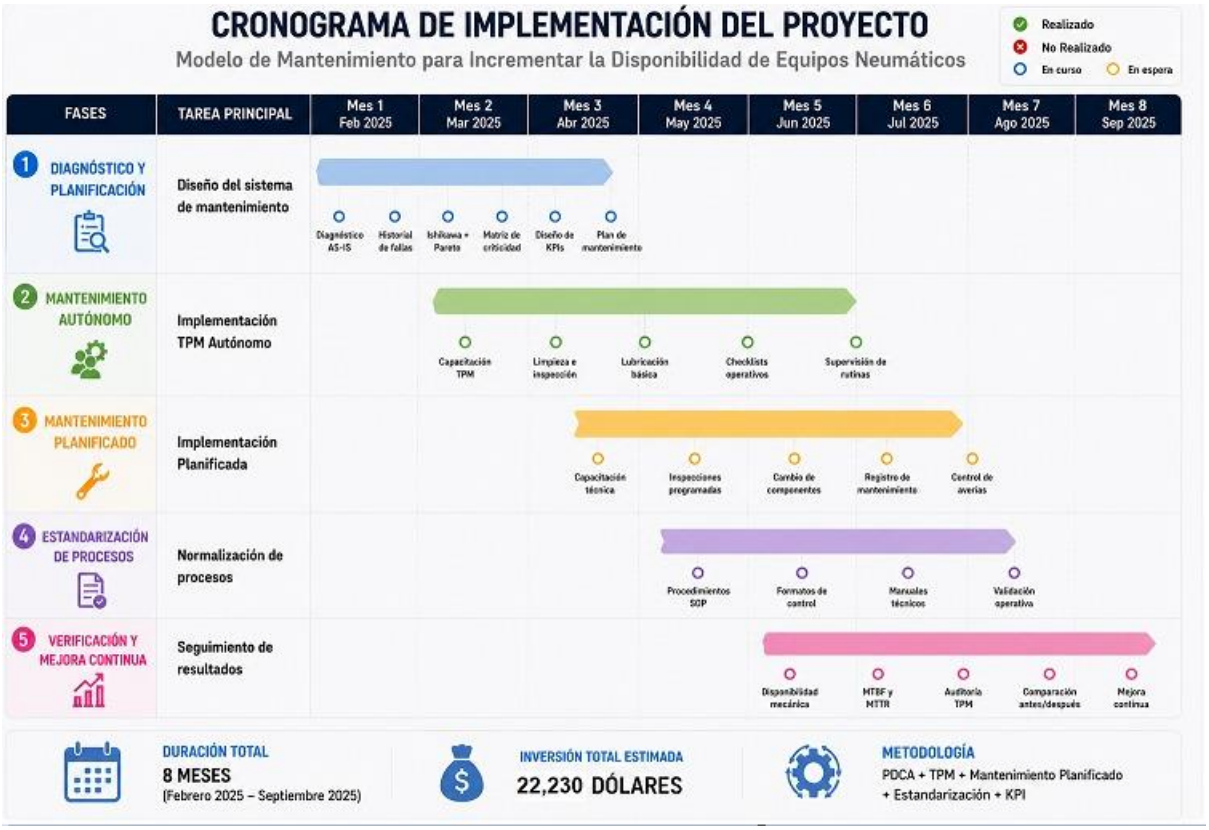
ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS	Alquiler del área de mantenimiento	12	$	4,800
	Auditoria de Cumplimiento de Mantenimiento	2	$	2,000
	Formatos y Procedimiento de procesos de mantenimiento	4	$	1,200
TOTAL			$	22,230

3.4.2. Cronograma de Solución

La figura muestra un cronograma en actividades, sub tareas, costo y tiempo del modelo propuesto, el cual

Figura 13

Cronograma del proyecto



Nota. Adaptado de la información de una empresa privada

IV. Capítulo 4

4.1. Validación Funcional

Como parte del proceso de validación, se desarrolló un proyecto piloto para evaluar los resultados esperados. Esta prueba permitió evaluar y monitorear el impacto de la mejora estimada. Se realizó el proyecto de validación desde el 1 de febrero hasta el 30 de setiembre.

Este método de implementación permitirá a los colaboradores entender mejor la metodología de la solución, además de recopilar datos con el fin de optimizar los procesos y reducir los riesgos durante su despliegue progresivo en fases.

4.1.1. Validación de la Implementación de solución

Posteriormente de la implementación de los pilares seleccionados del Mantenimiento Productivo Total (TPM), se efectuó un seguimiento mensual de los principales indicadores de desempeño, con la finalidad de evaluar el impacto de las mejoras aplicadas en los equipos neumáticos. Los indicadores analizados fueron la disponibilidad, el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF).

Para la evaluación de los resultados se consideró un período inicial de dos meses destinado a la adaptación del personal a las nuevas actividades y responsabilidades establecidas dentro de la propuesta de mejora. Durante esta etapa también se desarrollaron programas de capacitación y entrenamiento orientados a fortalecer las competencias técnicas del personal y asegurar la correcta aplicación de los procedimientos de mantenimiento implementados.

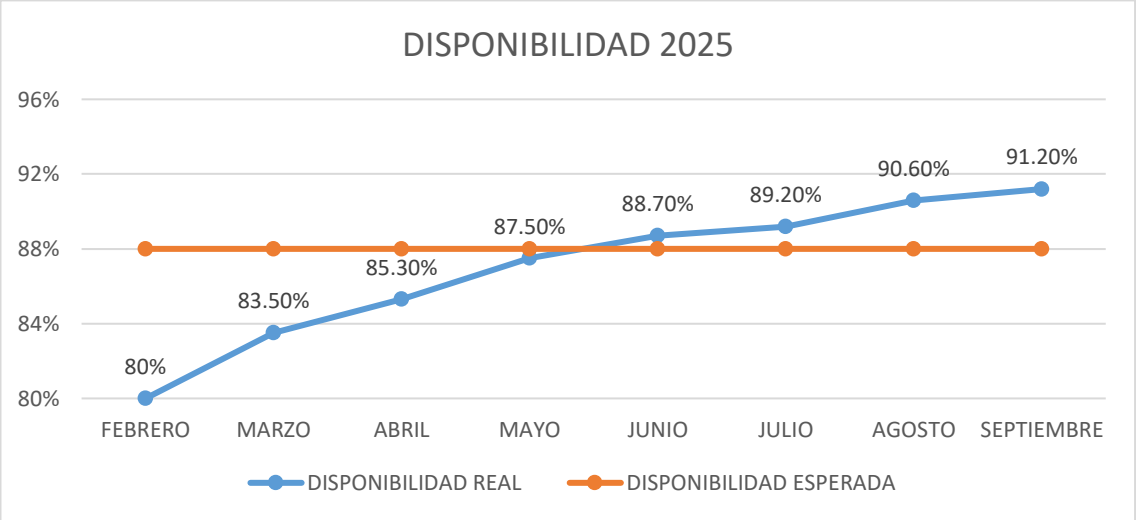
Como referencia para la validación de la propuesta, se establecieron metas esperadas para cada indicador. En el caso de la disponibilidad, se estimó un valor objetivo de 88% siendo este el escenario más optimista para la implementación de la mejora; mientras que para los indicadores MTTR y MTBF se establecieron valores de 3 horas y 80 horas respectivamente

según los valores promedios de los meses anteriores del 2025 y considerando el valor promedio del año 2024

A continuación, se presenta la evolución del indicador principal de la investigación, correspondiente a la disponibilidad de las máquinas neumáticas. Los resultados obtenidos evidencian una mejora progresiva a lo largo del período de evaluación, reflejando el efecto positivo de las acciones implementadas durante el plan piloto. Asimismo, se observa una tendencia creciente en la disponibilidad de la compresora de aire y la perforadora de aire, lo que demuestra una mayor confiabilidad operativa y una reducción de las interrupciones asociadas a fallas y actividades de mantenimiento no programadas.

Figura 14

Disponibilidad de las máquinas neumáticas en el año 2025

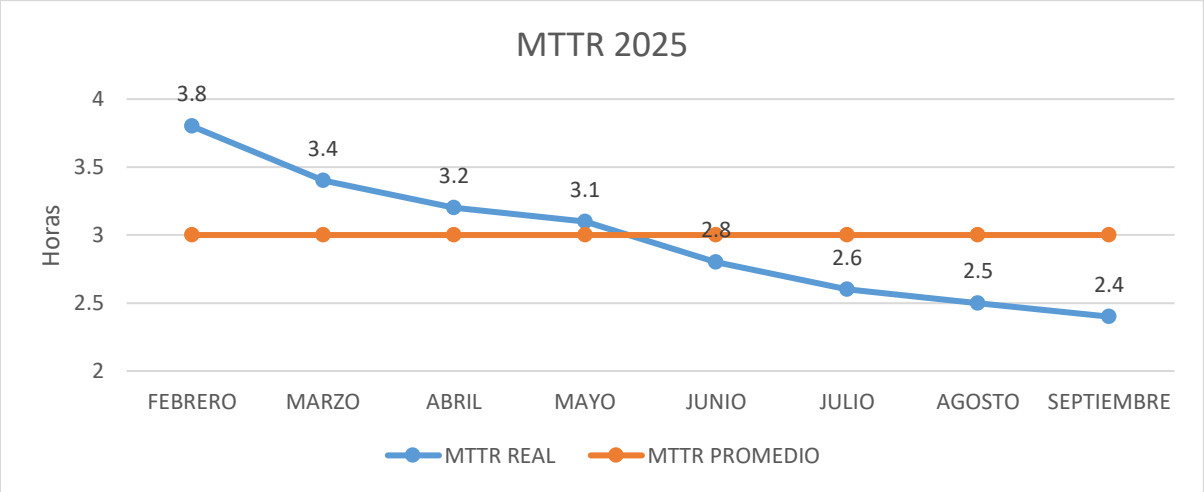


Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Respecto al indicador MTTR (Tiempo Medio de Reparación), se estimó un tiempo promedio de reparación de 3 horas. De acuerdo con los resultados obtenidos durante el período de evaluación, se observa una reducción progresiva de este indicador.

Figura *15*

Indicador del MTTR de las máquinas neumáticas en el año 2025

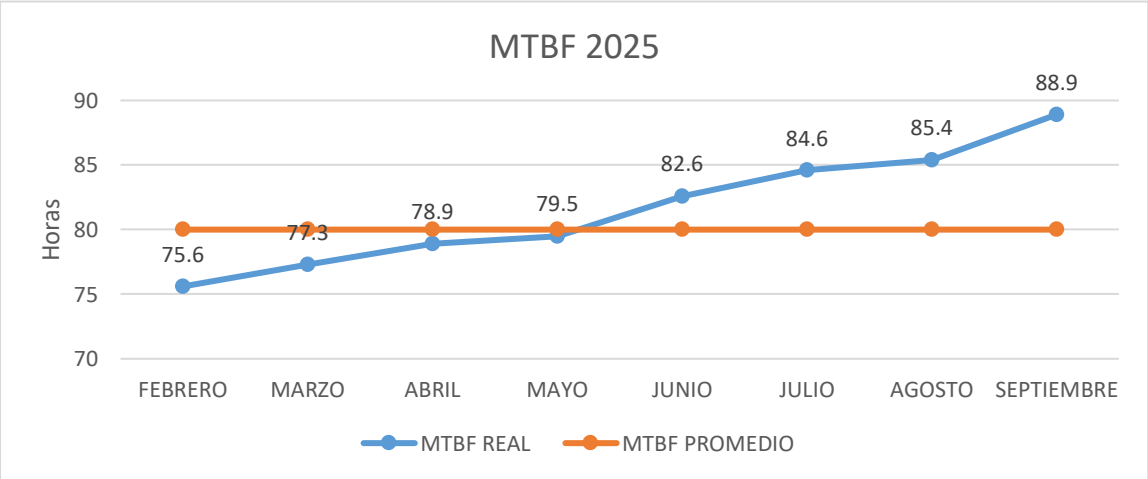


Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Respecto al indicador MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas), se estimó el tiempo promedio entre fallas de 80 horas. El aumento de este indicador es favorable, ya que refleja una menor frecuencia de fallas durante la operación de los equipos, contribuyendo directamente a mejorar su confiabilidad y disponibilidad.

Figura *16*

Indicador del MTBF de las máquinas neumáticas en el año 2025



Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

4.1.2. Análisis de resultados AS IS -TO BE

Después de analizar la tendencia de los indicadores durante el período de evaluación, se procedió a comparar los resultados promedio obtenidos entre febrero y septiembre del 2025 con los valores registrados antes de la implementación de la propuesta de mejora.

De acuerdo con los resultados mostrados, la disponibilidad de las máquinas neumáticas presentó un incremento de 3.2% del promedio requerido con respecto a un escenario optimista este siendo del 88%, además resaltar que se obtuvo un incremento del 11.2% con respecto al promedio de la disponibilidad antes de la implementación, permitiendo alcanzar los niveles requeridos por la empresa y los valores de referencia establecidos en la investigación. Este resultado evidencia una mejora en la continuidad operativa de la compresora de aire y la perforadora neumática, reduciendo las interrupciones asociadas a fallas y actividades de mantenimiento no programadas.

Por otro lado, el indicador MTTR (Tiempo Medio de Reparación) registró una reducción del 0.6 horas con respecto a las 3 horas que promediaba la empresa antes de la implementación y una reducción 1.4 horas con respecto a las 3.8 horas con los que se empezó la implementación, lo que demuestra una mayor eficiencia en la ejecución de las actividades de mantenimiento y una disminución en los tiempos necesarios para restablecer la operatividad de los equipos. Asimismo, el indicador MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) experimentó un incremento de 8.9 horas con respecto al promedio de 80 horas reflejado en la empresa antes de la implementación de la mejora y un incremento de 13.3 horas con respecto al valor inicial de 75.6 horas con las que se empezó la propuesta de mejora reflejando una menor frecuencia de fallas y una mejora significativa en la confiabilidad de los equipos neumáticos.

En conjunto, estos resultados demuestran que la implementación de los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado contribuyó de manera positiva al

desempeño de los equipos, permitiendo incrementar su disponibilidad, mejorar la confiabilidad operativa y optimizar la gestión del mantenimiento dentro de la empresa.

Tabla 16

Análisis de resultados

Indicadores	As Is	To Be	Resultado del Piloto	Variación
Disponibilidad de máquinas neumáticas	80%	88%	91.20%	+ 3.2 %
MTTR Tiempo Medio De Reparación	3.8 horas	< 3 horas	2.4 horas	- 0.6
MTBF Tiempo Medio Entre Fallos	75.6 horas	80 horas	88.9 horas	+ 8.9
Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo	80%	86%	95%	+ 9 %

4.2. Evaluación del impacto económico

Se considerarán 3 escenarios: esperado, optimista, y pesimista para la evaluación del impacto económico a través de un flujo de caja. Para validar y revisar la viabilidad del proyecto, se trabajarán indicadores financieros como VAN (Valor actual Neto) y TIR (Tasa de Interés de Retorno)

Para la evaluación económica se consideró los siguientes puntos:

- La inversión del proyecto es de $ 22 230, el cual se detalla en la tabla 14, el costo de implementación por herramienta.

Tabla 17

Costos de implementación

Herramientas	Costo de Implementación
Mantenimiento Autónomo	$ 6580
Mantenimiento Planificado	$ 7650
Estandarización de Procesos	$ 8000

- El periodo de evaluación es de 5 años
- COK=11.5% ≈ 12%

4.2.1. Evaluación de Impacto Económico Esperado

De acuerdo con los datos presentados, al alcanzar la meta proyectada de 88.50% de disponibilidad en los equipos críticos de la operación minera, se estima un beneficio por ahorro de la problemática de $24,516.00 anuales, constante desde el Año 1 hasta el Año 5. Este flujo positivo permite absorber los costos operativos de mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado y estandarización de procesos, generando una utilidad neta anual de $11,665.00 que sustenta la recuperación de la inversión inicial de $22,230.00 realizada en el Año 0.

Tabla 18

Impacto económico esperado

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Beneficio por ahorro de la problemática	$0	$24,516	$24,516	$24,516	$24,516	$24,516
Operación de Mantenimiento Autónomo	-$6,580	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740
Operación de Mantenimiento Planificado	-$7,650	-$750	-$750	-$750	-$750	-$750
Operación de Estandarización de Procesos	-$8,000	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800
Utilidades antes de impuesto		$14,226	$14,226	$14,226	$14,226	$14,226
Impuesto a la Renta		-$2,561	-$2,561	-$2,561	-$2,561	-$2,561
Utilidad Neta		$11,665	$11,665	$11,665	$11,665	$11,665
Inversión Inicial	-$22,230					
Pago efectivo Neto	-$22,230	$11,665	$11,665	$11,665	$11,665	$11,665

Tabla 19

Resultado de los indicadores financieros esperados

INDICADORES FINANCIEROS	
VAN	$19,820
TIR	44%

Periodo Recuperación	1.91 años

El VAN del proyecto es de $19,820, el cual es mayor a cero, por lo que se comprueba que el proyecto implementado es rentable. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es de 44 %, la cual supera al Costo de Oportunidad de Capital (COK) de 12 %, concluyéndose que el proyecto es económicamente viable. Finalmente, el periodo de recuperación de la inversión es de 1.91 años.

4.2.2. Evaluación de Impacto Económico Optimista

Tabla 20

Impacto económico optimista

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Beneficio por ahorro de la problemática	$0	$25,702	$25,702	$25,702	$25,702	$25,702
Operación de Mantenimiento Autónomo	-$6,580	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740
Operación de Mantenimiento Planificado	-$7,650	-$750	-$750	-$750	-$750	-$750
Operación de Estandarización de Procesos	-$8,000	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800
Utilidades antes de impuesto		$15,412	$15,412	$15,412	$15,412	$15,412
Impuesto a la Renta		-$2,774	-$2,774	-$2,774	-$2,774	-$2,774
Utilidad Neta		$12,638	$12,638	$12,638	$12,638	$12,638
Inversión Inicial	-$22,230					
Pago efectivo Neto	-$22,230	$12,638	$12,638	$12,638	$12,638	$12,638

Tabla 21

Resultados de los indicadores financieros optimistas

INDICADORES FINANCIEROS	
VAN	$23,327
TIR	49%

Periodo Recuperación	1.76 años

El VAN del proyecto es de $23,327.16, el cual es mayor a cero, por lo que se comprueba que el proyecto implementado es rentable. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es de 49.15 %, la cual supera al Costo de Oportunidad de Capital (COK) de 12 %, concluyéndose que el proyecto es económicamente viable. Finalmente, el periodo de recuperación de la inversión es de 1.76 años.

4.2.3. Evaluación de Impacto Económico Pesimista

Con base en los datos estructurados en el Flujo de Caja Neto, al consolidar la estrategia de TPM enfocada en la mitigación de fallas mecánicas imprevistas en la unidad minera de Trujillo, se determina un beneficio por ahorro de la problemática de $16,432.00 anuales, constante desde el Año 1 hasta el Año 5. Este flujo de ingresos permite absorber en su totalidad los costos operativos fijos anuales del proyecto (mantenimiento autónomo, planificado y estandarización de procesos), los cuales suman $10,290.00. Como resultado, se registra una utilidad antes de impuestos de $6,142.00 y una utilidad neta estable de $5,036.00 por periodo, asegurando la liquidez operativa necesaria para dar sostenibilidad a la propuesta técnica.

Tabla 22

Impacto económico pesimista

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Beneficio por ahorro de la problemática	$0	$16,432	$16,432	$16,432	$16,432	$16,432
Operación de Mantenimiento Autónomo	-$6,580	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740	-$2,740
Operación de Mantenimiento Planificado	-$7,650	-$750	-$750	-$750	-$750	-$750
Operación de Estandarización de Procesos	-$8,000	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800	-$6,800
Utilidades antes de impuesto		$6,142	$6,142	$6,142	$6,142	$6,142
Impuesto a la Renta		-$1,106	-$1,106	-$1,106	-$1,106	-$1,106
Utilidad Neta		$5,036	$5,036	$5,036	$5,036	$5,036

Inversión Inicial	-$22,230					
Pago efectivo Neto	-$22,230	$5,036	$5,036	$5,036	$5,036	$5,036

Tabla 23

Resultado de los indicadores financieros pesimistas

INDICADORES FINANCIEROS	
VAN	-4076.54
TIR	4.3%
Periodo Recuperación	4.41 AÑOS

La evaluación económica de la propuesta, calculada utilizando los flujos netos anuales de $5,036.00 frente a una inversión inicial de $22,230.00 en el Año 0, arroja un Valor Actual Neto (VAN) de -$4,076.54 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 4.30%. Asimismo, el análisis determina un Periodo de Recuperación de Capital de 4.41 años.

4.3. Evaluación de impacto no económico

La implementación de los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado generó beneficios que trascienden los aspectos económicos, contribuyendo significativamente a la mejora de la gestión de mantenimiento, el desempeño operativo de los equipos y el fortalecimiento de las capacidades del personal involucrado en las operaciones.

4.3.1. Impacto Operativo

La aplicación de la propuesta permitió incrementar la disponibilidad y confiabilidad de la compresora de aire y la perforadora neumática, al reducir la ocurrencia de fallas y las paradas no programadas. Asimismo, la estandarización de las actividades de inspección, limpieza, lubricación y control de componentes facilitó una mejor planificación de las intervenciones de mantenimiento, permitiendo un mayor control sobre el estado de los equipos y una respuesta más oportuna ante posibles anomalías.

4.3.2. Impacto en el Personal

La implementación de los pilares TPM fomentó una participación más activa del personal en el cuidado y conservación de los equipos. A través de las capacitaciones y entrenamientos realizados, los operadores y técnicos fortalecieron sus conocimientos sobre mantenimiento preventivo, identificación de fallas y buenas prácticas operativas. Esto contribuyó al desarrollo de una cultura orientada a la prevención, la responsabilidad compartida y la mejora continua dentro de la organización.

4.3.3. Impacto en la Seguridad

Las actividades de mantenimiento autónomo y planificado permitieron detectar oportunamente condiciones inseguras y posibles fallas mecánicas que podrían afectar la integridad de los trabajadores o generar incidentes durante la operación de los equipos. Como resultado, se fortalecieron las condiciones de trabajo y se redujo la probabilidad de eventos asociados a fallas inesperadas, contribuyendo a un entorno laboral más seguro.

4.3.4. Impacto Organizacional

La propuesta promovió una mejor coordinación entre las áreas de operación y mantenimiento, estableciendo procedimientos definidos y responsabilidades claras para la ejecución de las actividades programadas. Asimismo, la generación de registros e indicadores de desempeño permitió disponer de información confiable para el seguimiento de los equipos y la toma de decisiones relacionadas con la gestión del mantenimiento.

4.3.5. Impacto Ambiental

El fortalecimiento de las actividades de mantenimiento preventivo favoreció una operación más eficiente de los equipos neumáticos, contribuyendo a la reducción de fugas de aire comprimido y al uso adecuado de lubricantes e insumos. Del mismo modo, la identificación temprana de anomalías permitió prevenir situaciones que pudieran generar impactos ambientales negativos derivados del funcionamiento deficiente de los equipos.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la implementación de los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado no solo contribuyó a mejorar los indicadores de mantenimiento, sino que también fortaleció la seguridad operativa, el desempeño del personal, la gestión organizacional y las prácticas de sostenibilidad dentro de la empresa.

V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El indicador de disponibilidad aumentó de 80% a 91.20%, representando una mejora de 11.20 puntos porcentuales respecto a la situación inicial y superando la meta establecida de 88%.
- El indicador MTTR (Tiempo Medio de Reparación) disminuyó de 3.8 horas a 2.4 horas, evidenciando una mejora en la capacidad de respuesta y recuperación ante fallas.
- El indicador MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) se incrementó de 75.6 horas a 88.9 horas, demostrando una reducción en la frecuencia de fallas y una mejora significativa en la confiabilidad operativa de los equipos.
- El impacto económico de la implementación de la mejora es rentable, obteniendo un VAN de $19,820, un TIR de 44% superando al COK de 12% y finalmente teniendo un periodo de recuperación de inversión de 1.91 años.
- Los resultados obtenidos validan la efectividad de los pilares TPM implementados, demostrando que la gestión preventiva y la participación de los operadores contribuyen directamente a mejorar el desempeño de los activos críticos.

5.2. Recomendaciones

- Mantener de forma permanente las actividades de mantenimiento autónomo implementadas, asegurando que los operadores continúen ejecutando las rutinas de inspección, limpieza y lubricación establecidas.
- Actualizar periódicamente los planes de mantenimiento preventivo considerando el historial de fallas, horas de operación y condiciones reales de trabajo de las máquinas neumáticas.

- Continuar desarrollando programas de capacitación técnica para operadores y personal de mantenimiento, con el fin de fortalecer las competencias necesarias para la detección temprana de anomalías.
- Implementar herramientas digitales para el seguimiento de órdenes de trabajo, control de indicadores y gestión de mantenimiento, permitiendo una toma de decisiones basada en datos.
- Fortalecer la gestión de inventarios mediante la definición de stocks mínimos y puntos de reposición para los repuestos críticos de compresoras y perforadoras.
- Realizar auditorías periódicas de cumplimiento de los procedimientos estandarizados para asegurar la sostenibilidad de las mejoras alcanzadas.

VI. Referencias

Bennett, L. (2026). World-class OEE: What it is and how to achieve it. Tractian. https://tractian.com/en/blog/world-class-oee

Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2022). A proactive maintenance framework integrating IoT and data analytics for industrial equipment reliability. Computers in Industry, 135, 103553. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103553.

Dayo-Olupona, O., Genc, B., Celik, T., & Bada, S. (2023). Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview. Resources Policy, 86, 104291. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104291

Espíritu Sáenz, J. L., & Huaynate Ricaldi, M. A. (2022). Implementación de mantenimiento planificado para mejorar la disponibilidad de equipos en el sector minero [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/671831/Espiritu_SJ.pdf

International Energy Agency. (2022). The role of critical minerals in clean energy transitions. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

Jasiulewicz-Kaczmarek, M. (2022). Sustainable maintenance management—A conceptual framework and empirical insights. Sustainability, 14(3), 1574. https://doi.org/10.3390/su14031574.

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2024). Anuario Minero 2024. https://www.minem.gob.pe

Mouhib, A., El Barkany, A., & El Biyaali, A. (2025). Implementation of Total Productive Maintenance (TPM) for enhancing industrial performance: A systematic review. Journal of Manufacturing Systems, 74, 102–118. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.11.005.

Munive R, M. (2025). Minería peruana impulsa el 9% del PBI en 2024. Minart. https://minart.pe/2025/06/03/mineria-peruana-impulsa-el-9-del-pbi-en-2024

Santos, G., Murmura, F., & Bravi, L. (2022). Standardization and operational performance: The role of process management in industrial environments. International Journal of Quality & Reliability Management, 39(6), 1452–1470. https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2021-0105.

Sgarbossa, F., Peron, M., & Fragapane, G. (2022). Autonomous maintenance in smart manufacturing systems: Impacts on performance and operator involvement. Procedia Manufacturing, 55, 92–99. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2022.04.012.

Singh, J., Singh, H., & Sharma, R. (2023). Overall Equipment Effectiveness (OEE) as a performance measurement tool in manufacturing industries: A review and analysis. Journal of Manufacturing Technology Management, 34(2), 389–408. https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2021-0302.

Soto Rosales, A. F., & Lira Aquino, A. M. (2023). Propuesta de mejora del mantenimiento para incrementar la disponibilidad de equipos en una operación minera [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/682714/Lira_AA.pdf

Vera, M. (2024). El rol de las tecnologías emergentes en el mantenimiento minero. Reporte Minero. https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2024/10/el-rol-de-las-tecnologias-emergentes-en-el-mantenimiento-minero

World Bank. (2023). Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition. https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action

VII. ANEXOS

Anexo 1

Ficha técnica de disponibilidad

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA INDICADORES DE DISPONIBILIDAD	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**Disponibilidad Maquinaria**		
PROCESO:	**Gestión de mantenimiento de equipos neumáticos mineros**		
OBJETIVO:	**Incrementar la confiabilidad operativa de los equipos neumáticos mediante la reducción de fallas no programadas**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	**Tiempo total de operación / Tiempo total disponible**	**NUMERADOR:**	Tiempo Total de Operaciones
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**Porcentaje (%)**	**DENOMINADOR:**	Tiempo Toal disponible
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Diaria**	**META:**	86%
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Creciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Sistema de Monitoreo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		
CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**	
80%	**85%**	**90%**	
FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**		

CONTROL DE CAMBIOS				
VERSION	**FECHA**	**DESCRPCIÓN DEL CAMBIO**	**REVISÓ:**	**APROBÓ:**

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Anexo 2

Ficha técnica del cumplimiento del mantenimiento preventivo

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA CUMPLIMIENTO DE MTTO PREVENTIVO	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**Cumplimiento del Programa de Mantenimiento Preventivo**		
PROCESO:	**Gestión de mantenimiento preventivo de equipos neumáticos mineros**		
OBJETIVO:	**Verificar el grado de cumplimiento de las actividades de mantenimiento preventivo programadas para asegurar la continuidad operativa y reducir fallas imprevistas en los equipos neumáticos**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	**(MTTO prev. ejecutados / MTTO prev. programados) × 100**	**NUMERADOR:**	Mtto ejecutados
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**Porcentaje (%)**	**DENOMINADOR:**	Mtto totales
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Semanal**	**META:**	86%
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Creciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Ordenes de Trabajo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		
CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**	
90%	**95%**	**100%**	
FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**		

CONTROL DE CAMBIOS				
VERSION	**FECHA**	**DESCRPCIÓN DEL CAMBIO**	**REVISÓ:**	**APROBÓ:**

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada.

Anexo 3

Ficha técnica del indicador MTBF en la compresora de aire

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA INDICADORES DE MTBF COMPRESORA DE AIRE	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**MTBF – Tiempo Medio Entre Fallas de Equipos Neumáticos**		
PROCESO:	**Operación de Compresora de aire**		
OBJETIVO:	**Aumentar la disponibilidad de las máquinas para asegurar una operación continua.**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	**(Tiempo Operativo / N° de fallas)**	**NUMERADOR:**	Tiempo Operativo
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**horas (h)**	**DENOMINADOR:**	Número de Fallas
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Diaria**	**META:**	300
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Creciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Sistema de Monitoreo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		
CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**	
190	**220**	**300**	
FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**		

CONTROL DE CAMBIOS				
VERSION	**FECHA**	**DESCRPCIÓN DEL CAMBIO**	**REVISÓ:**	**APROBÓ:**

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada

Anexo 4

Ficha técnica del indicador MTBF en la perforadora de aire

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA INDICADORES DE MTBF PERFORADORA DE AIRE	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**MTBF – Tiempo Medio Entre Fallas de Equipos Neumáticos**		
PROCESO:	**Operación de Perforadora de aire**		
OBJETIVO:	**Aumentar la disponibilidad de las máquinas para asegurar una operación continua.**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	**(Tiempo Operativo / N° de fallas)**	**NUMERADOR:**	Tiempo Operativo
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**horas**	**DENOMINADOR:**	Número de Fallas
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Diaria**	**META:**	300
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Creciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Sistema de Monitoreo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		
CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**	
250	**300**	**380**	
FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**		

CONTROL DE CAMBIOS				
VERSION	**FECHA**	**DESCRPCIÓN DEL CAMBIO**	**REVISÓ:**	**APROBÓ:**

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada

Anexo 5

Ficha técnica del indicador MTTR en la perforadora de aire

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA INDICADORES DE MTTR PERORADORA DE AIRE	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**MTTR – Tiempo Medio de Reparación**		
PROCESO:	**Operación de Perforadora de aire**		
OBJETIVO:	**Aumentar la disponibilidad de las máquinas para asegurar una operación continua.**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	(Tiempo Inoperativo / N° de fallas)	**NUMERADOR:**	Tiempo Inoperativo
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**horas**	**DENOMINADOR:**	Número de Fallas
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Diaria**	**META:**	< 3
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Decreciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Sistema de Monitoreo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		

CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**
3.8	**3.2**	**< 3**

FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**

CONTROL DE CAMBIOS

VERSION	FECHA	DESCRPCIÓN DEL CAMBIO	REVISÓ:	APROBÓ:

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada

Anexo 6

Ficha técnica del indicador MTTR en la compresora de aire

	PLANTILLA FICHA TÉCNICA INDICADORES DE MTTR COMPRESORA DE AIRE	**CÓDIGO:**	ES-SIG-RG-45
		VERSIÓN:	1
		FECHA DE APROBACIÓN	15/01/2025
		PÁGINA	1 de 1

NOMBRE DEL INDICADOR:	**MTTR – Tiempo Medio de Reparación**		
PROCESO:	**Operación de Compresora de aire**		
OBJETIVO:	**Aumentar la disponibilidad de las máquinas para asegurar una operación continua.**		
FORMULA PARA EL CÁLCULO:	(Tiempo Inoperativo / N° de fallas)	**NUMERADOR:**	Tiempo Inoperativo
UNIDAD DE MEDICIÓN:	**horas**	**DENOMINADOR:**	Número de Fallas
FRECUENCIA DE MEDICIÓN DEL INDICADOR:	**Diaria**	**META:**	< 3
TENDENCIA ESPERADA: *(Creciente o Decreciente)*	**Decreciente**	**FRECUENCIA DE ANÁLISIS DEL INDICADOR:**	Mensual
FECHA DE CREACIÓN: (DD/MM/AAA)	**15/01/2025**		
FUENTES DE INFORMACIÓN:	**Sistema de Monitoreo**		
RESPONSABLE DE LA MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL INDICADOR:	**Supervisor de Mantenimiento**		

CRÍTICO	**ACEPTABLE**	**SATISFACTORIO**
3.8	**3.2**	**< 3**

FECHA ÚLTIMA MODIFICACION: (DD/MM/AAA)	**20/05/2026**

CONTROL DE CAMBIOS				
VERSION	**FECHA**	**DESCRPCIÓN DEL CAMBIO**	**REVISÓ:**	**APROBÓ:**

Nota. Adaptado de la información de una empresa privada