

Se analiza la influencia de los indicadores MTBF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad, indicador fundamental para medir la eficiencia operativa de los activos.



Impacto de la gestión del MTBF y MTTR en el índice de disponibilidad de camiones mineros Caterpillar 785-793

Impact of MTBF and MTTR management on the availability index of Caterpillar 785-793 mining trucks

RESUMEN

La minería peruana constituye un pilar esencial del desarrollo económico del país, pues contribuye significativamente al empleo y a los ingresos estatales. Dentro de este sector, la gestión del mantenimiento de equipos pesados resulta crítica para garantizar la disponibilidad operativa, especialmente en camiones mineros Caterpillar 785-793. Este estudio analiza la influencia de los indicadores MTBF (tiempo medio entre fallas) y MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad, un KPI (Key Performance Indicator) fundamental para medir la eficiencia operativa de los activos.

Se destaca que un mantenimiento eficaz maximiza la disponibilidad y minimiza los costos operativos, respaldado por la medición precisa del desempeño mediante métricas y puntos de referencia establecidos.

La metodología aplicada incluye la simulación de distintos escenarios de MTBF (40 a 80 horas) y MTTR (3 a 12 horas), con el fin de evaluar su impacto en el índice de disponibilidad, cuyo valor de referencia varía entre el 88 % para flotas más usadas y el 92 % para flotas nuevas.

Los resultados evidencian que la disponibilidad es directamente proporcional al MTBF e inversamente proporcional al MTTR. El incremento del MTBF eleva el índice de disponibilidad, mientras que un aumento del MTTR lo reduce. Esta relación matemática permite a las áreas de mantenimiento orientar sus estrategias hacia la reducción de fallas y de tiempos de reparación, optimizando recursos y mejorando la productividad de la flota.

Se concluye que una adecuada gestión de MTBF y MTTR resulta vital para incrementar la disponibilidad, lo que incide directamente en la rentabilidad y competitividad de las operaciones mineras. Implementar estrategias orientadas a mejorar ambos indicadores

es fundamental para alcanzar una gestión del mantenimiento eficiente y alineada con los objetivos de productividad y sostenibilidad del sector.

ABSTRACT

Peruvian mining constitutes an essential pillar of the country's economic development, contributing significantly to employment and state revenues. Within this sector, maintenance management of heavy equipment is critical to ensure operational availability, particularly for Caterpillar 785-793 mining trucks. This study analyses the influence of MTBF (Mean Time Between Failures) and MTTR (Mean Time To Repair) indicators on the availability index, a fundamental KPI (Key Performance Indicator) for measuring the operational efficiency of assets.

Effective maintenance is shown to maximise availability and minimise operational costs, supported by accurate performance measurement through established metrics and benchmarks.

The methodology applied involved simulating different MTBF (40 to 80 hours) and MTTR (3 to 12 hours) scenarios to assess their impact on the availability index, whose benchmark target ranges from 88% for aging fleets to 92% for new fleets.

The results show that availability is directly proportional to MTBF and inversely proportional to MTTR. Increasing the MTBF raises the availability rate, while increasing the MTTR decreases it. This mathematical relationship allows maintenance departments to focus their strategies on reducing failures and repair times, optimising resources and improving fleet productivity.

It is concluded that proper management of MTBF and MTTR is vital for increasing availability, which has a direct impact on the profitability and competitiveness of mining operations. Implementing



Palabras Claves

Índice de disponibilidad, MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio para reparar), camiones mineros y minería peruana.

Key words

Availability index; MTBF (Mean Time Between Failures); MTTR (Mean Time To Repair); mining trucks; Peruvian mining.

strategies to improve both indicators is key to achieving efficient maintenance management aligned with the sector's productivity and sustainability objectives.

INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Energía y Minas [7] señala en su boletín informativo anual que la minería peruana continúa siendo un pilar clave para el desarrollo del país, al contribuir de manera significativa a la economía estatal y regional. Además de impulsar el crecimiento económico, fomenta la creación de empleo formal, con 244 073 nuevos puestos de trabajo generados a partir de una inversión de USD 3 343 millones. Asimismo, se encuentran en marcha 75 nuevos proyectos de exploración que reciben una inversión de USD 644 millones hasta septiembre de 2024.

De acuerdo con las cifras mencionadas sobre la inversión minera, el Ministerio de Energía y Minas [7] indica que el 26 % de dicha inversión se ha destinado al equipamiento y las maquinarias para el movimiento de tierras y el tratamiento de minerales. En este contexto, resulta crucial que la maquinaria se mantenga siempre operativa. Para ello, es necesario medir y gestionar indicadores de rendimiento y mantenimiento que permitan establecer métricas útiles para la toma de decisiones informadas, con el fin de garantizar la correcta ejecución de los proyectos para los cuales las maquinarias y equipos han sido destinados. Caterpillar [3] señala que la gestión del mantenimiento abarca un amplio espectro, siendo una de sus principales funciones asegurar que el sistema operativo productivo esté disponible en todo momento y cumpla con su propósito. El índice de disponibilidad del sistema depende de dos factores clave: el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio de reparación), los cuales constituyen indicadores de desempeño fundamentales para la toma de decisiones. En minería, al igual que en otras industrias, el mantenimiento se considera un proceso de valor agregado, dado que contribuye a la reducción de costos y a la mejora de los ingresos a largo plazo, protegiendo así la inversión realizada por las empresas del sector [4].

El objetivo principal de este artículo es analizar cómo la gestión de los indicadores de rendimiento, específicamente el MTBF (*Mean Time Between Failures*) y el MTTR (*Mean Time to Repair*), influye en la disponibilidad mecánica de los camiones mineros Caterpillar de las series 785 y 793 y, en consecuencia, en la eficiencia de los proyectos mineros. A través de este análisis, se busca ofrecer a los profesionales del sector una comprensión más profunda sobre la importancia de gestionar estos indicadores de manera eficaz, con el propósito de optimizar el mantenimiento de los equipos y reducir los tiempos de inactividad. Este artículo brinda herramientas y enfoques prácticos que permitirán a los lectores tomar decisiones informadas para maximizar la rentabilidad de las inversiones en maquinaria, contribuyendo así a mejorar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo.

FUNDAMENTOS

En la investigación de Baldeón-Pacheco *et al.* [2], se analiza la relación entre el mantenimiento preventivo de los camiones mineros Komatsu 980 E5 y su disponibilidad mecánica, con especial énfasis en el estudio de los indicadores MTTR (tiempo medio de

reparación) y MTBF (tiempo medio entre fallas), fundamentales en la gestión del mantenimiento. El objetivo de este estudio es determinar cómo las variaciones en estos indicadores clave de rendimiento pueden afectar directamente la disponibilidad de los camiones. Los resultados indican que un aumento del 20 % en el MTBF y del 5,7 % en el MTTR incrementa el índice de disponibilidad en un 3,3 %. El autor concluye que tanto el MTBF como el MTTR son factores determinantes que influyen directamente en la disponibilidad de la maquinaria. En este sentido, se destaca que un aumento del MTTR refleja tiempos de reparación más prolongados, mientras que una disminución del MTBF evidencia que la maquinaria experimenta fallas más frecuentes. De este modo, puede afirmarse que ambos indicadores tienen un impacto directo en el índice de disponibilidad.

Por otro lado, Ordoñez *et al.* [9] señalan en su investigación que, al aplicar estrategias de mantenimiento como el RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad), resulta fundamental establecer metodologías que incluyan tácticas preventivas y correctivas, las cuales contribuyen a mejorar los indicadores MTBF y MTTR y, en consecuencia, a incidir directamente en la disponibilidad de los activos. El autor subraya que el MTBF y el MTTR son indicadores clave de confiabilidad y mantenibilidad, respectivamente. El primero mide el tiempo que una maquinaria puede operar antes de presentar una falla, mientras que el segundo refleja el tiempo requerido para realizar los trabajos de mantenimiento en el equipo. Por tanto, la gestión de estos parámetros es crucial para asegurar la disponibilidad del activo. Esta investigación analiza la disponibilidad de una flota de camiones Freightliner CL 120 durante un período de dos años, considerando la variación de la disponibilidad antes y después de la implementación del RCM. Los resultados muestran que el MTBF aumentó en 18,02 horas, mientras que el MTTR se redujo en 1,38 horas, lo que generó un incremento del 12 % en la disponibilidad. En conclusión, se establece que las estrategias de mantenimiento que inciden directamente en el MTBF y el MTTR repercuten de manera significativa sobre el índice de disponibilidad.

Shaker *et al.* [12] mencionan que el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) son dos indicadores clave de desempeño directamente relacionados con la disponibilidad de un sistema o proceso. Al desglosar estos conceptos, Alshaari y Nor [1] definen el MTBF como una métrica crucial para supervisar la tasa de fallas de los activos, ya que representa el tiempo promedio entre fallas de un sistema, excluyendo el tiempo dedicado a las reparaciones. Por su parte, el MTTR se define como el tiempo promedio requerido para diagnosticar y reparar un equipo averiado, devolviéndolo a sus condiciones normales de operación. Este indicador es esencial para evaluar la mantenibilidad de equipos y piezas reparables. Finalmente, Wang *et al.* [15] sostienen que la disponibilidad es la probabilidad de que un sistema o proceso esté operativo cuando sea necesario, y se puede expresar como un porcentaje del tiempo total.

Mora [8] explica que la función principal del mantenimiento es maximizar la disponibilidad requerida para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones y minimizar el deterioro de los equipos, lo cual debe lograrse al menor costo posible y a largo plazo. Bajo esta premisa, D'Alessio [5] sostiene que uno de los objetivos del mantenimiento es mantener la disponibilidad de los sistemas y sus máquinas en apoyo del proceso productivo; una gestión deficiente del mantenimiento origina consecuencias operacionales costosas, como pérdidas económicas por paradas imprevistas en la producción.

Caterpillar [3] señala que el rendimiento máximo de cualquier equipo de minería depende principalmente de tres factores críticos: a) el diseño del equipo, b) la aplicación para la cual se utiliza y c) el mantenimiento que recibe durante su tiempo de servicio. De estos tres factores, el mantenimiento ofrece a la dirección la mejor oportunidad para influir y controlar el rendimiento del equipo. Para cuantificar dicho rendimiento, es necesario establecer ciertos criterios. Los siguientes son aplicables a la mayoría de las actividades, incluida la gestión de equipos de minería: a) no se puede gestionar lo que no se puede controlar, b) no se puede controlar lo que no se puede medir y c) no se debe medir sin un objetivo, pues sin un objetivo no se puede mejorar. La gestión sin métricas es, en realidad, una gestión basada en la intuición. Los puntos de referencia, resultado del proceso de evaluación comparativa, son estándares, mediciones, métricas o indicadores clave de rendimiento que cuantifican las mejores prácticas de una operación. En minería, los puntos de referencia pueden ser operativos, relacionados con la aplicación o vinculados al mantenimiento.

Punto de referencia (Benchmark): Juran *et al.* [6] lo definen como un proceso continuo de medición de productos, servicios y prácticas en comparación con los competidores más exigentes de la empresa o con compañías reconocidas como líderes del sector. Se trata de un estándar de desempeño de clase mundial en relación con un objetivo específico.

Indicador clave de rendimiento: también conocido como KPI (Key Performance Indicator), es una métrica de desempeño de nivel superior. El conjunto de KPI utilizados para describir el rendimiento de un proyecto determinado puede variar según el sitio, el producto, la aplicación o la perspectiva, ya sea del distribuidor o del cliente, de los departamentos de operaciones y mantenimiento, o del área de control de proyectos y contratos. Según Timjerdine [14], los indicadores clave de rendimiento (KPI) de mantenimiento, así como la medición del rendimiento del mantenimiento (MPM), ocupan un lugar destacado tanto entre los investigadores como entre los profesionales, debido a un cambio de paradigma que transformó la percepción del mantenimiento: de considerarlo un proceso costoso a reconocerlo como un proceso generador de valor agregado y de reducción de costos o mejora de ingresos a largo plazo para las empresas.

Tiempo medio entre fallas (MTBF): Patricio *et al.* [11] lo definen como una métrica que mide el tiempo promedio entre fallas de un equipo o sistema durante su operación. Cuanto mayor sea el MTBF, mejor será la confiabilidad del sistema. La fórmula propuesta para calcular el MTBF es la siguiente:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}}$$

Donde:

- Tiempo total de operación es el tiempo durante el cual el sistema o el equipo está funcionando sin fallas.
- Número de fallas es el número de fallos que ocurren durante el período de tiempo considerado.

Tiempo medio para reparación (MTTR): según Patricio *et al.* [11], es una métrica que mide el tiempo promedio necesario para reparar un equipo después de una falla. Cuanto menor sea el MTTR, más rápido se reparará el equipo y volverá a operar. Para Orosnjak [10], este indicador permite calcular la mantenibilidad de la maquinaria. La fórmula propuesta para calcular el MTTR es la siguiente:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de paradas}}{\text{Número de paradas}}$$

En donde:

- El tiempo total de paradas es el tiempo total durante el cual el sistema o el equipo estuvo fuera de funcionamiento debido a fallas.
- Número de paradas es el número de fallas que ocurren durante el período de tiempo considerado.

En la figura 1 se aprecia que, dentro del tiempo total de inactividad de un activo, el MTTR abarca un porcentaje considerable que puede gestionarse desde el personal técnico hasta los aspectos logísticos y de capacitación.

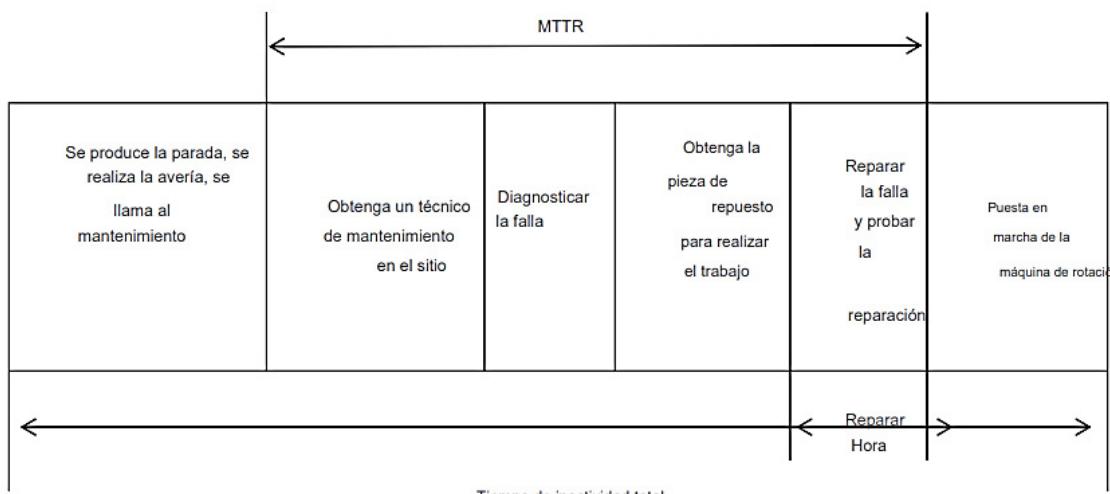


Figura 1. Tiempo de inactividad total de un activo

Fuente: [13].

Índice de disponibilidad: según Alshaari y Nor [1], es la probabilidad de que un componente o sistema se encuentre operando durante un determinado intervalo de tiempo. La disponibilidad puede definirse como la proporción del tiempo en que el equipo es capaz de cumplir su función. Para Mora [8], la disponibilidad inherente o intrínseca resulta especialmente útil cuando se busca controlar las actividades de mantenimiento no programadas. Sus parámetros son el MTBF (tiempo medio entre fallas) y el MTTR (tiempo medio para reparar), considerando únicamente los daños, fallas o pérdidas de funcionalidad por causas propias del equipo o externas a este.

La SMRP [13] señala que la disponibilidad inherente está en función del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio para reparar o reemplazar (MTTR), y se basa en la ecuación matemática $A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$. La fórmula para calcular la disponibilidad es la siguiente:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

En donde:

- «A» es la disponibilidad
- MTBF es el tiempo medio entre fallas
- MTTR es el tiempo medio de reparación

Los indicadores clave técnicos de nivel 2 corresponden a T6 disponibilidad = $MTBF / (MTBF + MTTR) \times 100$; y, de nivel 3, a E5 tiempo medio entre fallas (MTBF) = tiempo total de funcionamiento / número de fallas y tiempo medio de reparación (MTTR) = tiempo total hasta la recuperación / número de fallas.

En la figura 2 se observa la línea de tiempo de efectividad general de los equipos, donde, en la fila de disponibilidad (*availability*), se aprecia que el tiempo total disponible de un equipo puede dividirse en: a) horas de producción programadas, b) tiempo de espera y c) paradas programadas. En el caso de la primera división, correspondiente a las horas de producción programadas, se advierte que este lapso está compuesto por las horas de producción efectivas y las horas con paradas no programadas.

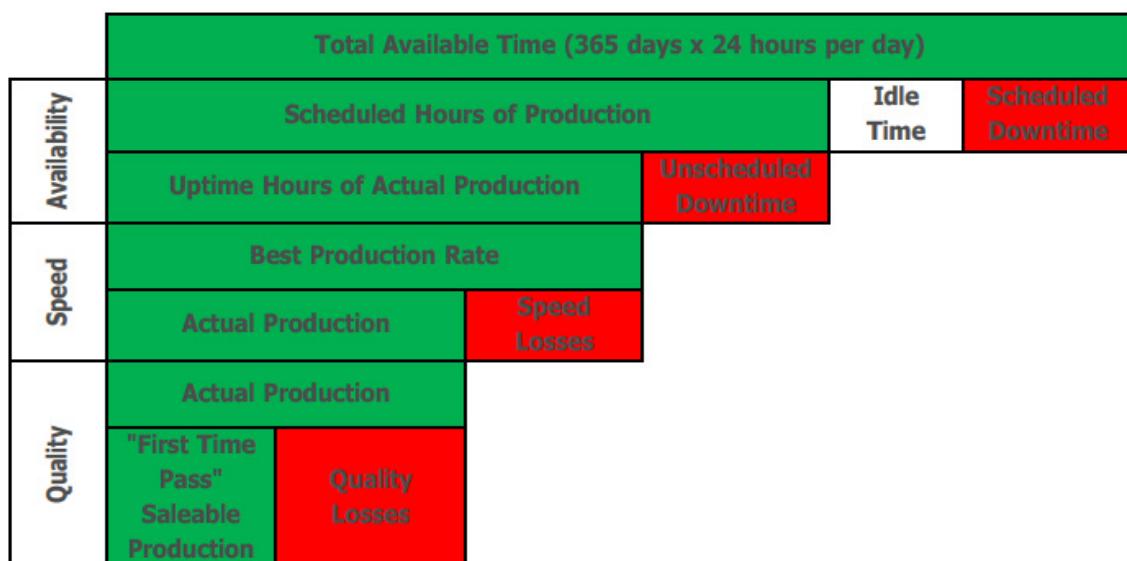


Figura 2. Cronología de la eficacia general del equipo

Fuente: [13].

METODOLOGÍA

En el presente estudio se han considerado los valores de desempeño típicos de los camiones mineros Caterpillar, modelos 785 a 793. Para las flotas nuevas, el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) se estima en 80 horas, lo que refleja el rendimiento óptimo de los camiones en sus primeras etapas de operación. En cambio, para las flotas maduras —aquellas que han completado su primer ciclo de reconstrucción de componentes críticos—, el MTBF se reduce aproximadamente a 60 horas debido al desgaste natural

de los componentes. El tiempo medio de reparación (MTTR) se sitúa en un rango de 3 a 6 horas, dependiendo de factores como la disponibilidad de repuestos y la capacitación del personal. En cuanto a la disponibilidad operativa, los estándares indican un valor del 92 % para flotas nuevas, mientras que para las flotas maduras la disponibilidad desciende al 88 %, lo que refleja las condiciones de operación y el mantenimiento requerido para cada tipo de flota.

En la figura 3, se muestran los límites inferiores y superiores sugeridos para el tiempo medio entre fallas (MTBF).



Figura 3. Límites inferiores y superiores del MTBF

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, se presentan los límites inferiores y superiores correspondientes al tiempo medio para la reparación (MTTR), que varía entre tres y seis horas, de acuerdo con el *benchmarking* de la marca.

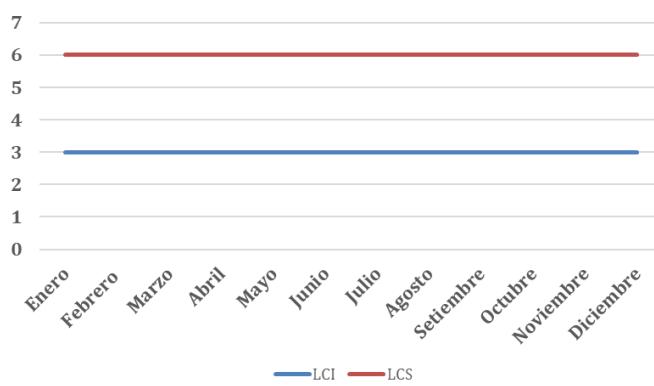


Figura 4. Límites superiores e inferiores del MTTR

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, se muestran los límites superiores e inferiores del índice de disponibilidad inherente considerados para los camiones CAT 785-793, de acuerdo con el *benchmark* de la marca.

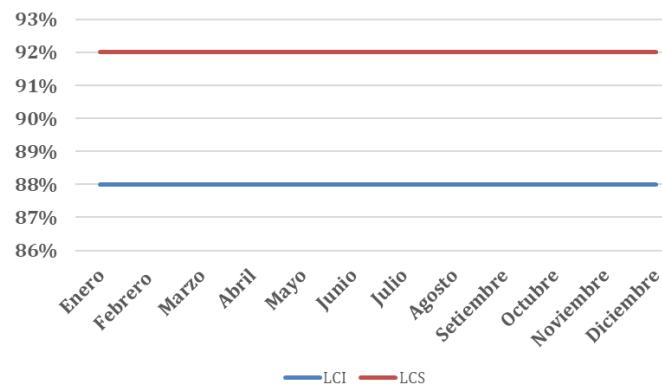


Figura 5. Límites superiores e inferiores de la disponibilidad

Fuente: Elaboración propia.

En el presente estudio se realizó una simulación utilizando diversos valores del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR), con el propósito de evaluar su impacto en el índice de disponibilidad de los camiones mineros Caterpillar 785-793. La tabla 1 presenta los resultados obtenidos a partir de distintos escenarios, en los cuales se consideraron valores de MTBF comprendidos entre 40 y 80 horas, y de MTTR entre 3 y 12 horas, lo que permite observar cómo las variaciones en ambos parámetros inciden directamente en la disponibilidad operativa de la flota. Para cada combinación de valores de MTBF y MTTR se muestra el índice de disponibilidad resultante, expresado en porcentaje, lo que facilita una comparación visual de los efectos de las diferentes configuraciones de mantenimiento sobre la eficiencia operativa de los camiones. Este enfoque permite identificar con claridad las condiciones óptimas para maximizar la disponibilidad de la flota, así como los puntos críticos en los que la interacción de ambos parámetros puede generar una disminución significativa de la eficiencia operativa.

Tabla 1

Desempeño de variables MTBF y MTTR

ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD (%)			MTTR (h)					
MTBF (h)	3	4	5	6	8	10	12	
40	93,02	90,91	88,89	86,96	83,33	80	76,92	
50	94,34	92,59	90,91	89,29	86,21	83,33	80,65	
60	95,24	93,75	92,31	90,91	88,24	85,71	83,33	
65	95,59	94,2	92,86	91,55	89,04	86,67	84,42	
70	95,89	94,59	93,33	92,11	89,74	87,5	85,37	
75	96,15	94,94	93,75	92,59	90,36	88,24	86,21	
80	96,39	95,24	94,12	93,02	90,91	88,89	86,96	

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación de datos, cuyo propósito es analizar el impacto del tiempo medio entre fallas (MTBF) y del tiempo medio de reparación (MTTR) sobre el índice de disponibilidad operativa de los equipos. Mediante la variación controlada de ambos parámetros dentro de rangos representativos, se busca identificar patrones y relaciones que permitan comprender cómo influyen en el desempeño general de la flota. Los resultados

se presentan en forma tabular y porcentual, lo que facilita su interpretación y posterior análisis.

La figura 4 muestra un gráfico de dispersión que ilustra la relación entre los parámetros MTBF, MTTR y su impacto en el índice de disponibilidad. Se observa que, a medida que el MTBF aumenta, la disponibilidad tiende a incrementarse de forma significativa, evidenciando una relación directamente proporcional. Por el contrario, para valores constantes de MTBF, un incremento del MTTR produce una disminución progresiva de la disponibilidad, lo que indica una relación inversamente proporcional entre ambas variables.

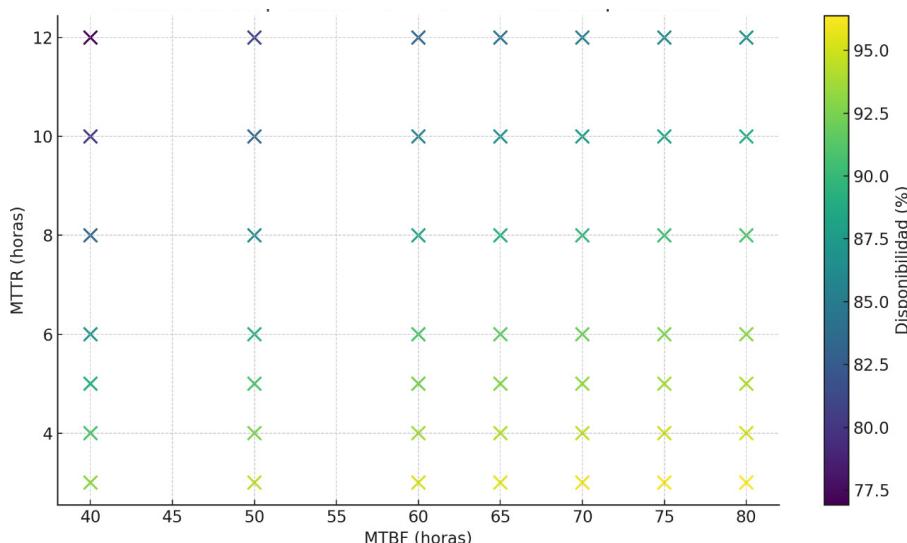


Figura 6. Impacto del MTBF y MTTR sobre la disponibilidad (gráfico de dispersión)

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5, correspondiente al mapa de calor, refuerza los hallazgos anteriores. Las zonas con mayor disponibilidad operativa (cerca al 92 % y representadas por colores cálidos) se alcanzan cuando se combinan valores elevados de MTBF (80 horas) con valores bajos de MTTR (3 horas). A medida que

el MTTR aumenta hacia 6 horas o el MTBF disminuye hasta 60 horas, la disponibilidad desciende a niveles cercanos al 88 %, lo que concuerda con los valores de referencia establecidos para las flotas consideradas «maduras».

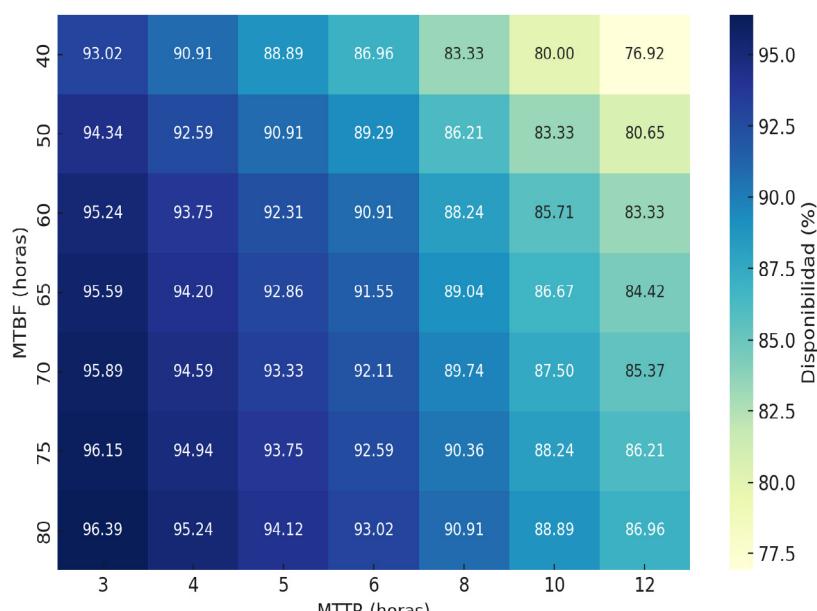


Figura 7. Impacto del MTBF y MTTR sobre la disponibilidad (mapa de calor)

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la simulación demuestra con claridad la influencia crítica del MTBF (tiempo medio entre fallas) y del MTTR (tiempo medio de reparación) sobre el índice de disponibilidad de los camiones mineros Caterpillar 785-793. Estos resultados son coherentes con las mejores prácticas de gestión del mantenimiento, como se observa en la figura 2 y en el mapa de calor, que refuerzan la importancia de optimizar ambos parámetros. Incrementar el MTBF implica aplicar estrategias orientadas a reducir las fallas, como el mantenimiento predictivo, el análisis de causas raíz (RCA) y la mejora de la calidad de los componentes. Por su parte, reducir el MTTR requiere optimizar la logística de repuestos, fortalecer la capacitación continua del personal técnico, perfeccionar los procedimientos de reparación y minimizar los tiempos muertos operativos. En conjunto, estos enfoques contribuyen a la mejora continua de la disponibilidad operativa, en consonancia con los estándares de referencia establecidos para flotas de camiones nuevos y «maduras».

CONCLUSIONES

Sobre la base del análisis del MTBF, MTTR e índice de disponibilidad se concluyen los siguientes puntos:

- La disponibilidad mejora significativamente con mayores valores de MTBF. A medida que el tiempo medio entre fallas (MTBF) aumenta, la disponibilidad también lo hace, incluso cuando el MTTR permanece constante. Esto resalta la importancia de implementar estrategias orientadas a mejorar la confiabilidad del sistema.
- El MTTR tiene un impacto inversamente proporcional en la disponibilidad. Para un mismo valor de MTBF, al incrementarse el MTTR, la disponibilidad disminuye de forma considerable. Esto demuestra que reducir los tiempos de reparación es tan relevante como aumentar el MTBF.
- Existe una zona óptima de operación. Las combinaciones de MTBF altos (≥ 70) y MTTR bajos (≤ 5) presentan disponibilidades superiores al 93 %, lo que representa un rango operativo deseable para equipos críticos en sectores como la minería o la producción continua.
- La gestión integrada del mantenimiento debe priorizar ambas métricas. Centrarse únicamente en aumentar el MTBF o reducir el MTTR no es suficiente; los mejores resultados se alcanzan cuando ambas variables se gestionan de manera simultánea mediante estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y capacitación técnica.

REFERENCIAS

- [1] Alshaari, A., & Nor, M. (2021). Reliability analysis on water pumps in water supply system in johor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1874(1) doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012021>
- [2] Baldeon-Pacheco, A., De la Cruz-Escobar, N., Velasquez-Costa, J., & Vilchez-Baca, H. (2024). Análisis del mantenimiento preventivo en los camiones mineros 980 E-5 y su relación con la disponibilidad mecánica. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1258>
- [3] Caterpillar Inc. (2005). *Performance metrics for mobile mining equipment*.
- [4] Chompu-inwai, R., Diaotrakun, R. y Thaiupathump, T. (2013), Key indicators for maintenance performance measurement: The aircraft galley and associated equipment manufacturer case study. En *2013 10th International Conference on Service Systems and Service Management* (pp. 844-849).
- [5] D'Alessio Ipinza, F. (2004). *Administración y dirección de la producción: Enfoque estratégico y de calidad* (2.^a ed.). Pearson Educación.
- [6] Juran, J., Godfrey, A., Hoogstoel, R., & Schilling, E. (1999). *Juran's quality handbook* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- [7] Ministerio de Energía y Minas. (2024). *Cartera de proyectos de exploración minera 2024*. <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/5417728-cartera-de-proyectos-de-exploracion-minera-2024>
- [8] Mora Gutiérrez, L. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.
- [9] Ordoñez Gamarra, R., Rodríguez, S., & Yupanqui, E. (2024). *Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los tractocamiones CL120 Freightliner en la empresa J&J Transportes y Soluciones Integrales S.A.C.* Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.577>
- [10] Orošnjak, M., Beker, I., Brklja, N., & Vrhovac, V. (2024) Predictors of Successful Maintenance Practices in Companies Using Fluid Power Systems: A Model-Agnostic Interpretation. *Appl. Sci.*, 14(5921). <https://doi.org/10.3390/app14135921>
- [11] Patrício, L., Varela, L., & Silveira, Z. (2025). Proposal for a Sustainable Model for Integrating Robotic Process Automation and Machine Learning in Failure Prediction and Operational Efficiency in Predictive Maintenance. *Appl. Sci.* 15(854). <https://doi.org/10.3390/app15020854>
- [12] Shaker, F., Shahin, A., & Jahanyan, S. (2024). Simulating the corrective actions affecting system availability: a system dynamics approach. *Journal of Modelling in Management*, 19(6), pp. 1827-1848. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2023-0136>
- [13] Society for Maintenance and Reliability Professionals. (2020). *SMRP best practices: Metrics and guidelines* (6.^a ed.). <https://smrp.org/Learning-Resources/SMRP-Library/Best-Practices-Metrics-Guidelines>
- [14] Timjerdine, M. (2023). Performance measurement in aircraft maintenance – literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(74). <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2021-0080>

- [15]** Wang, W. H., Bai, N., Wang, L., Liu, G. K., Qian, G., & Yang, X. (2023). Application of the reliability-centered maintenance techniques for dynamic equipment in the petrochemical ammonia-related systems. En *E3S Web of Conferences* (Vol. 385, p. 04014). EDP Sciences. DOI: <https://10.1051/e3sconf/202338504014>

ACERCA DE LOS AUTORES

Efraín Freddy Cirineo Loyola

Magíster en Gestión Estratégica de Empresas, cuenta con diplomados en Gerencia de Mantenimiento y Dirección Productiva del Mantenimiento. Asimismo, es un profesional certificado en mantenimiento y confiabilidad e Ingeniero Mecánico. Docente del Departamento de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada en Tecsup.

Antes de unirse a Tecsup, trabajó por más de 15 años en diversas empresas, en los sectores minería, construcción, planta concentradora y educación; desarrollando sólidos conocimientos en gestión de activos físicos, ingeniería de mantenimiento, confiabilidad y productividad de equipo pesado.

 ecirineo@tecsup.edu.pe

Fernando Jorge Chahud Olivera

Bachiller en Ingeniería Industrial de la Universidad San Ignacio de Loyola, con maestría en Ciencias Empresariales y Gestión de Proyectos y especialista en Gestión y Mantenimiento de maquinaria pesada egresado de Tecsup. Más de diez años de experiencia en sectores de minería, construcción, generación y agroindustria. Especialización en lubricación, análisis de aceites, hidráulica, motores diésel, tren de fuerza y gestión de garantías.

 fchahud@tecsup.edu.pe

Recibido: 04-05-25

Revisado: 19-09-25

Aceptado: 03-10-25



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.