

Un Tratado Exhaustivo sobre KPIs en Mantenimiento de Maquinaria para Movimiento de Tierras

Por Víctor Menacho

1. Introducción: El Paradigma de la Gestión de Activos en la Industria Pesada

En el teatro moderno de las operaciones industriales, específicamente dentro de los sectores de minería a cielo abierto y construcción de infraestructura civil de gran envergadura, la maquinaria para movimiento de tierras ha dejado de ser considerada meramente como una herramienta mecánica para ser redefinida como un activo de capital estratégico. La gestión de estos activos, que incluye flotas de camiones de acarreo de clase ultra (con capacidades superiores a las 300 toneladas), excavadoras hidráulicas masivas, palas de cable eléctricas, bulldozers de alta potencia y motoniveladoras de precisión, constituye el núcleo financiero y operativo de cualquier proyecto extractivo o de construcción. La viabilidad económica de una mina o de una obra civil no depende únicamente de la riqueza geológica del yacimiento o de la ingeniería del proyecto, sino de la **capacidad de estos activos** para operar de manera continua, eficiente y predecible bajo condiciones ambientales y operativas a menudo extremas.

Históricamente, el mantenimiento de maquinaria pesada se gestionaba bajo un paradigma reactivo, donde la intervención técnica se producía como respuesta directa a la falla funcional del equipo. Sin embargo, la escalada exponencial en los costos de capital (CAPEX) de los equipos modernos, junto con la presión para reducir los costos operativos (OPEX) por tonelada movida, ha forzado una transición hacia modelos de gestión de activos basados en confiabilidad. En este nuevo contexto, los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs, por sus siglas en inglés) no son simples métricas de reporte post-mortem, sino instrumentos de navegación crítica que permiten a los directores de mantenimiento, gerentes de planta y superintendentes de operaciones visualizar la salud técnica de la flota, predecir comportamientos futuros y alinear la ejecución del mantenimiento con los objetivos estratégicos del negocio.¹

Este informe técnico tiene como objetivo diseccionar la estructura, cálculo, interpretación e interrelación de los KPIs fundamentales y avanzados en el mantenimiento de maquinaria de movimiento de tierras. Se adoptará un enfoque riguroso basado en estándares internacionales, principalmente las directrices del *Global Mining Guidelines Group* (GMG) y la norma ISO 14224, para proporcionar un marco de referencia estandarizado que permita el *benchmarking* efectivo. A través de un análisis profundo, exploraremos no solo las fórmulas matemáticas, sino las dinámicas de causa y efecto que gobiernan estos indicadores: cómo la gestión del *backlog* influye en la confiabilidad futura, cómo las decisiones de inversión en mantenimiento preventivo impactan el valor de reemplazo de los activos (RAV), y cómo la integración de tecnologías predictivas está redefiniendo los límites de la disponibilidad mecánica.³

2. El Marco Temporal Estandarizado: La Base del Cálculo de Desempeño

Para que cualquier indicador de desempeño tenga validez y comparabilidad, es imperativo establecer primero una **taxonomía unificada del tiempo**. En la industria de maquinaria pesada, la ambigüedad en la definición de qué constituye "tiempo operativo" versus "tiempo de demora" ha sido históricamente una fuente de discrepancias significativas entre los reportes de operaciones y mantenimiento. Para resolver esto, la industria ha convergido hacia el Modelo de Uso del Tiempo (Time Usage Model) propuesto por el GMG, el cual proporciona una jerarquía clara y mutuamente excluyente de estados del equipo.

2.1 El Tiempo Calendario y su Descomposición

La base absoluta de todo cálculo de desempeño es el **Tiempo Calendario (Calendar Time - CT)**. Este representa el horizonte temporal total disponible durante un periodo de reporte específico, típicamente 24 horas al día, 365 días al año, lo que suma un total teórico de 8.760 horas anuales (u 8.784 en años bisiestos). Es crucial entender que el Tiempo Calendario es inalterable y sirve como el denominador final para las métricas de utilización de activos a nivel corporativo, reflejando el retorno sobre el capital invertido independientemente de las condiciones del mercado o las decisiones operativas.³

El Tiempo Calendario se bifurca inicialmente en dos categorías primarias que definen la intención de uso del activo: el **Tiempo Programado (Scheduled Time - ST)** y el **Tiempo No Programado (Unscheduled Time - UT)**.

2.1.1 Tiempo No Programado (Unscheduled Time)

El Tiempo No Programado comprende aquellos periodos en los que el equipo, aunque técnicamente funcional o no, no es requerido para la operación debido a factores externos a la disponibilidad mecánica o a la eficiencia operativa. Esto incluye paradas planificadas por falta de demanda del mercado, huelgas laborales, condiciones climáticas extremas que hacen imposible la operación segura (como tormentas eléctricas en minería de alta montaña), o días festivos donde la faena se detiene por política corporativa. Desde una perspectiva de mantenimiento estricta, las horas acumuladas en esta categoría no deberían penalizar los KPIs de disponibilidad del equipo de mantenimiento, dado que la máquina no estaba "invitada" a trabajar. Sin embargo, el modelo GMG y las mejores prácticas sugieren que si se aprovecha un periodo de tiempo no programado (por ejemplo, una parada por lluvia) para realizar mantenimiento, este tiempo debe ser reclasificado cuidadosamente para no distorsionar la realidad de la disponibilidad técnica.³

2.1.2 Tiempo Programado (Scheduled Time)

El Tiempo Programado es el subconjunto del tiempo calendario en el que el activo es requerido para cumplir con los objetivos del plan de negocio. Es sobre este tiempo que se juzga la eficiencia tanto del equipo de mantenimiento como del equipo de operaciones. Matemáticamente, se define como:

$$ST = CT - UT$$

Dentro del Tiempo Programado, se produce la distinción más crítica para la gestión del mantenimiento: la separación entre el **Tiempo de Inactividad (Downtime)** y el **Tiempo Disponible (Available Time)**.

2.2 Anatomía del Tiempo de Inactividad (Downtime)

El Tiempo de Inactividad, en el contexto del modelo GMG e ISO 14224, abarca todos los eventos dentro del tiempo programado en los cuales el equipo no está en condiciones de realizar su función principal. Es fundamental desglosar este tiempo para identificar las causas raíz de la improductividad.

Categoría de Downtime	Descripción Detallada e Impacto en KPIs
Mantenimiento Planificado	Incluye todas las intervenciones programadas preventivas (PM), predictivas y proactivas. Aunque es tiempo "perdido" para producción, es una inversión necesaria para la confiabilidad futura. Un exceso aquí puede indicar intervalos de servicio demasiado cortos o ineficiencia en la ejecución (bajo <i>wrench time</i>).
Mantenimiento No Planificado	Corresponde a las fallas funcionales imprevistas y reparaciones de emergencia. Este es el tiempo más costoso y disruptivo. Afecta directamente al MTBF y es el objetivo principal de reducción.
Demoras de Mantenimiento	Tiempo en que el equipo está en manos de mantenimiento, pero no se está trabajando en él. Incluye esperas por repuestos (logística), espera por técnicos disponibles, o tiempos de traslado al taller.

El análisis de los datos sugiere que una gestión eficiente del *Downtime* no implica necesariamente reducir el tiempo total de mantenimiento a cero, sino transformar la composición de este tiempo: maximizar la proporción de mantenimiento planificado y minimizar las fallas imprevistas y las demoras logísticas.³

2.3 Tiempo Disponible y Operativo

El Tiempo Disponible (Available Time - AT) es el tiempo remanente cuando se resta el Downtime del Tiempo Programado. Representa el periodo en el que la máquina está técnicamente lista para producir.

$$AT = ST - \text{Downtime}$$

Sin embargo, estar disponible no significa estar produciendo. Aquí entra el concepto de **Tiempo de Espera u Ocio (Standby)**. El Standby incluye momentos en que la máquina está lista y operativa, pero no trabaja debido a ineficiencias operativas: un camión esperando en la cola de la pala, cambio de turno de operadores, reuniones de seguridad, o pausas para alimentación.

Finalmente, llegamos al núcleo productivo: el Tiempo Operativo (Operating Time - OT).

$$OT = AT - \text{Standby}$$

Es en este tiempo donde la maquinaria efectivamente mueve tierra, genera valor y consume la mayor parte de los recursos (combustible, desgaste de neumáticos).

3. Indicadores de Confiabilidad (Reliability): La Ciencia de la Falla

La confiabilidad es la probabilidad de que un activo desempeñe su función requerida sin fallas bajo condiciones dadas por un periodo de tiempo establecido. En el mantenimiento de maquinaria pesada, la confiabilidad se cuantifica principalmente a través del **Tiempo Medio Entre Fallas (Mean Time Between Failures - MTBF)**.

3.1 MTBF: Profundizando en la Métrica

El MTBF es a menudo malinterpretado como la "vida útil" de una máquina antes de que se rompa definitivamente. En realidad, es una medida estadística de la frecuencia de eventos de parada no planificada.

$$MTBF = \text{Tiempo Total de Operación} / \text{Número de Eventos de Falla}$$

Para una flota de camiones mineros Caterpillar 793F o Komatsu 930E, el MTBF no es un número estático. Sigue el comportamiento descrito por la "Curva de la Bañera" (Bathtub Curve). Al inicio de la vida del activo (fase de "mortalidad infantil"), el MTBF puede ser bajo debido a defectos de fabricación o errores de ensamblaje. Luego, entra en una fase de vida útil estable con un MTBF alto y constante (fallas aleatorias). Finalmente, en la fase de desgaste, el MTBF cae drásticamente a medida que los componentes mayores alcanzan su fatiga estructural.⁶

Insight Analítico: Un error común en la industria es incluir las paradas por mantenimiento preventivo en el cálculo del número de fallas para el MTBF. Esto es incorrecto bajo las normas

ISO 14224. El MTBF debe medir la confiabilidad inherente y operativa, es decir, la resistencia del equipo a fallar inesperadamente. Incluir paradas programadas **contamina** la métrica, convirtiéndola en un indicador de frecuencia de servicio en lugar de un indicador de robustez técnica.⁸

El impacto de un bajo MTBF en operaciones de movimiento de tierras es devastador y multifacético. En un sistema de acarreo acoplado (camiones y palas), la falla aleatoria de un camión introduce variabilidad en el ciclo. Esto genera colas en los puntos de carga y descarga, y tiempos muertos en la chancadora primaria. Simulaciones de eventos discretos demuestran que una reducción del 10% en el MTBF de la flota de camiones puede resultar en una pérdida de producción del sistema superior al 15% debido a estos efectos de interferencia operativa.¹⁰

3.2 MTTF (Mean Time To Failure) para Componentes No Reparables

Mientras el MTBF se aplica a sistemas reparables (la máquina completa), el **Tiempo Medio Hasta la Falla (Mean Time To Failure - MTTF)** se utiliza para componentes desechables o no reparables, como filtros, fusibles, o dientes de cucharón (GETs).

MTTF = Total de Horas de Operación/Número Total de Unidades Falladas

El seguimiento riguroso del MTTF de componentes de desgaste permite transitar hacia una estrategia de mantenimiento preventivo basada en estadísticas, reemplazando el componente justo antes de su punto de falla probable, optimizando así el uso del activo y evitando daños colaterales.¹¹

4. Indicadores de Mantenibilidad (Maintainability): Eficiencia de Restauración

La mantenibilidad mide la facilidad y velocidad con la que un sistema puede ser restaurado a su estado operativo después de una falla. El indicador soberano en este dominio es el **Tiempo Medio Para Reparar (Mean Time To Repair - MTTR)**.

4.1 Desglosando el MTTR y el MTTRes

El MTTR clásico se calcula como:

MTTR = Tiempo Total de Inactividad por Reparación Activa/Número de Reparaciones

Sin embargo, esta definición simple puede ser engañosa. La norma ISO 14224 introduce el concepto de **Tiempo Medio de Restauración (Mean Time to Restoration - MTTRes)**, que ofrece una visión más holística. El MTTRes incluye no solo el tiempo de "llave en mano" (reparación mecánica activa), sino también:

- Tiempo de Diagnóstico:** El lapso entre la aparición del síntoma y la identificación de la causa raíz. Tecnologías de telemetría avanzadas en equipos modernos buscan reducir este tiempo a casi cero.
- Tiempo de Preparación:** Aislamiento de energías (Lock-out/Tag-out), limpieza del equipo

(lavado de barro en el tren de rodaje), y traslado al taller.

3. **Tiempo de Verificación:** Pruebas post-reparación para asegurar la calidad del trabajo antes de liberar el equipo a operaciones.

$$MTTRes = T_{diagnóstico} + T_{preparación} + T_{reparación_activa} + T_{prueba}$$

Ánalisis Comparativo de Fabricantes: En la batalla entre gigantes como **Caterpillar** y **Komatsu**, el MTTR es un campo de diferenciación clave. Los diseños de Komatsu a menudo enfatizan la modularidad en sistemas híbridos, lo que puede permitir intercambios rápidos de componentes completos ("Remove and Replace"), reduciendo el tiempo de reparación en sitio. Por otro lado, la ubicuidad de la red de soporte de Caterpillar y la estandarización de sus partes a través de diferentes modelos pueden reducir significativamente los tiempos de espera logística, un componente que, aunque técnicamente es "demora", a menudo se percibe como parte del tiempo de caída total desde la perspectiva de operaciones.⁷

4.2 La Importancia del Wrench Time

Un sub-indicador vital para entender el MTTR es el **Wrench Time** (Tiempo de Llave). Estudios de eficiencia en minería revelan que, en muchos casos, los técnicos pasan solo entre el 30% y el 40% de su turno realmente reparando el equipo. El resto se pierde en traslados (especialmente en minas de tajo abierto extensas), búsqueda de repuestos en almacén, trámites de permisos de trabajo y esperas por disponibilidad de grúas o herramientas. Incrementar el Wrench Time mediante una mejor planificación logística (ej. llevar los repuestos a la máquina en lugar de traer la máquina al taller, uso de bahías satélite) tiene un impacto directo y poderoso en la reducción del MTTR general.¹⁴

5. Disponibilidad y Utilización: La Realidad Operativa

La interacción entre confiabilidad y mantenibilidad culmina en la métrica de Disponibilidad. Sin embargo, en el mundo del movimiento de tierras, existen múltiples **"sabores"** de disponibilidad que deben distinguirse con precisión quirúrgica.

5.1 Disponibilidad Física vs. Disponibilidad Mecánica

La **Disponibilidad Física** es el indicador más utilizado en los contratos de servicios y reportes gerenciales. Refleja el porcentaje del tiempo programado que el activo está en condiciones de operar.

$$A_{física} = \{ \{ ST - Tiempo\ Total\ de\ Parada\ (Mantenimiento\ +\ Fallas) \} / ST \} \times 100$$

Esta métrica engloba todo: mantenimiento preventivo, correctivo, demoras por repuestos, accidentes, etc. Es una medida de la "salud general" de la flota.

En contraste, la **Disponibilidad Mecánica** a menudo se calcula excluyendo ciertos tiempos que no

son atribuibles a la condición de la máquina, como demoras logísticas excesivas o daños por abuso operacional (accidentes).

$$A_{mecánica} = \{ \text{Horas Operativas} + \text{Standby} \} / \{ \text{Horas Operativas} + \text{Standby} + \text{Tiempo de Reparación Mecánica} \}$$

Esta distinción es vital. Un equipo de mantenimiento puede entregar una disponibilidad mecánica del 95% (las máquinas no fallan a menudo y se reparan rápido), pero si la cadena de suministro falla y los repuestos tardan semanas en llegar, la disponibilidad física caerá drásticamente. Es responsabilidad de la gerencia de activos monitorear la brecha entre ambas disponibilidades para identificar ineficiencias en la cadena de suministro o en la gestión de contratos.¹⁵

5.2 Utilización de Activos (Asset Utilization)

Tener una máquina disponible no genera valor si no se utiliza. La **Utilización** mide cuán intensamente se explota el activo respecto a su potencial total (Tiempo Calendario).

$$\text{Utilización} = \{ \text{Tiempo Operativo (OT)} \} / \{ \text{Tiempo Calendario (CT)} \} \times 100$$

Existe una tensión inherente entre Disponibilidad y Utilización. A medida que la utilización de una flota antigua aumenta (acercándose al 85-90% del tiempo calendario), el tiempo disponible para realizar mantenimiento preventivo se comprime. Esto crea una "espiral de la muerte" donde el mantenimiento se difiere para satisfacer la demanda de producción, lo que eventualmente lleva a una falla catastrófica que destruye tanto la disponibilidad como la utilización. El equilibrio óptimo, o "Sweet Spot", suele encontrarse con una utilización que permita ventanas de mantenimiento adecuadas sin sacrificar la producción.¹⁷

Benchmark de Industria: En minería de superficie de clase mundial, se busca típicamente una disponibilidad física superior al 90% para camiones y equipos de carga. Sin embargo, la utilización efectiva del activo (horas trabajadas sobre horas calendario) raramente supera el 75-80% debido a las ineficiencias operativas (cambios de turno, voladuras, clima).

6. Eficiencia General de los Equipos (OEE) Adaptada al Movimiento de Tierras

El OEE (*Overall Equipment Effectiveness* o *Eficacia general del equipo*) es un estándar de oro en manufactura que ha sido adaptado para la minería con matices críticos. Mientras que en una fábrica es fácil identificar una "pieza defectuosa", en el movimiento de tierras la "calidad" es más abstracta.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad}$$

6.1 Factor de Disponibilidad (A)

Este factor se alinea directamente con la Disponibilidad Operativa descrita anteriormente:

$$A = \text{Tiempo Operativo Real} / \text{Tiempo Programado para Producir}$$

Las pérdidas aquí son las paradas por fallas y los mantenimientos que invaden el tiempo programado.¹⁹

6.2 Factor de Rendimiento (P): Velocidad y Ciclo

El rendimiento mide si la máquina está trabajando a su velocidad de diseño. En el contexto de camiones y excavadoras:

$$P = \text{Producción Real (Ton/h)}/\text{Capacidad Teórica (Ton/h)}$$

O alternativamente:

$$P = \text{Ciclo Ideal} \times \text{Total Ciclos}/\text{Tiempo Operativo}$$

Las pérdidas de rendimiento son insidiosas. Un camión que sube una rampa al 80% de su velocidad nominal debido a un problema en el sistema de inyección o a una vía en mal estado está sufriendo una pérdida de rendimiento que no aparece en los reportes de disponibilidad. Del mismo modo, una excavadora que opera con ciclos lentos debido a una mala fragmentación de la roca (voladura deficiente) afectará este indicador.²¹

6.3 Factor de Calidad (Q): El Desafío de la Minería

Aquí reside la mayor adaptación conceptual. En movimiento de tierras, la "calidad" se refiere a la efectividad del movimiento de material.

- 1. Factor de Llenado del Cucharón (Bucket Fill Factor):** Si una pala con capacidad de 50 toneladas carga consistentemente solo 40 toneladas debido a la inexperiencia del operador o al diseño del cucharón, esto es una pérdida de calidad del 20%. El equipo está gastando combustible y horas de motor para mover aire.
- 2. Control de Ley y Dilución (Grade Control):** Este es el aspecto más crítico en minería metálica. Si un camión transporta 300 toneladas de material estéril (desecho) a la planta de procesamiento porque fue mal clasificado por geología o cargado erróneamente, el OEE es efectivamente cero para ese viaje, aunque la máquina haya funcionado perfectamente. La **dilución** (mezcla de estéril con mineral) reduce la ley de cabeza que entra a planta, destruyendo valor económico.
- 3. Cumplimiento de Payload:** Camiones sobrecargados (pérdida de vida útil de neumáticos y

chasis) o subcargados (pérdida de productividad) representan desviaciones de calidad.²³

Insight de Tercer Orden: La gestión precisa del OEE en minería requiere la integración de datos de múltiples silos: despacho (FMS), mantenimiento (CMMS) y geología. Un bajo OEE por factor de calidad (alta dilución) puede ser un indicador de problemas en los sistemas de posicionamiento GPS de alta precisión de las palas, lo que vincula directamente el mantenimiento de sistemas electrónicos con la calidad del producto final.²⁶

7. Indicadores Financieros y Gestión de Costos del Ciclo de Vida

La gestión técnica de la flota debe traducirse finalmente al lenguaje financiero de la organización. El mantenimiento no es un centro de costos aislado, sino un gestor de riesgos financieros.

7.1 Costo de Mantenimiento por Hora y Costo por Tonelada

La métrica más inmediata es el costo horario operativo.

$$\text{Costo/Hora} = \{\text{Mano de Obra} + \text{Repuestos} + \text{Fluidos} + \text{Servicios Externos}\} / \text{Horas Operativas}$$

Los benchmarks varían drásticamente. Un camión minero de 400 toneladas puede tener un costo horario de mantenimiento y neumáticos que supera los \$500-\$700 USD.

En el análisis Caterpillar vs. Komatsu, se observa una dinámica interesante de Total Cost of Ownership (TCO). Los equipos Caterpillar suelen tener un costo de adquisición inicial más alto, pero su valor de reventa y la durabilidad de componentes estructurales (bastidores) a menudo permiten reconstrucciones múltiples (Second Life), amortizando el costo de capital sobre más horas y reduciendo el costo por hora a largo plazo. Komatsu, con innovaciones como los camiones autónomos y sistemas híbridos, puede ofrecer ventajas significativas en consumo de combustible (que es el mayor costo operativo), compensando potenciales diferencias en costos de repuestos.²⁷

7.2 Costo de Mantenimiento como % del Valor de Reemplazo (RAV)

El indicador financiero de referencia a nivel corporativo es el costo anual de mantenimiento dividido por el Valor de Reemplazo del Activo (RAV - Replacement Asset Value).

$$\%RAV = \{\text{Costo Mantenimiento Anual} / \text{Valor de Reemplazo a Nuevo}\} \times 100$$

- **Benchmark de Excelencia:** 2% - 3%. Las operaciones de clase mundial mantienen sus plantas y flotas móviles gastando solo el 2-3% del valor del activo anualmente.
 - **Promedio de la Industria:** 4% - 9%.
 - Zona Crítica: >10-12%. Si se gasta más del 12% del valor de la máquina cada año en mantenerla, financieramente es más sensato reemplazarla.⁴
- Es vital interpretar el %RAV con cautela. Un %RAV muy bajo (<1.5%) puede parecer excelente, pero a menudo es un síntoma de mantenimiento diferido. La empresa está

"ahorrando" dinero hoy al no realizar mantenimientos necesarios, lo que inflará el costo futuro y degradará el activo prematuramente.

8. Gestión del Trabajo: La Disciplina de la Planificación

La eficiencia de los KPIs técnicos y financieros depende de la calidad de la gestión del trabajo diario.

8.1 El Backlog: Termómetro de la Gestión

El Backlog (trabajo pendiente) mide la acumulación de tareas de mantenimiento identificadas, pero no completadas. No se mide en número de tareas, sino en semanas de trabajo.

Backlog = Horas hombre pendientes por ejecutar / Horas hombre disponibles por semana

- **Rango Saludable (2-4 semanas):** Indica que hay suficiente trabajo planificado para mantener al equipo ocupado y productivo, pero las reparaciones se atienden en un tiempo razonable.
- **Backlog Bajo (< 2 semanas):** Puede indicar exceso de personal o, más preocupante, falta de inspecciones rigurosas (no se están encontrando los problemas).
- **Backlog Alto (> 6 semanas):** El departamento ha perdido el control. Se opera en modo reactivo, apagando incendios, mientras las fallas latentes se acumulan hasta volverse catastróficas. En minería, un backlog alto correlaciona directamente con una caída futura en la disponibilidad mecánica.³⁰

8.2 Cumplimiento del Programa y Estrategias Proactivas

El Cumplimiento de la Programación (Schedule Compliance) mide qué porcentaje del trabajo planificado para la semana se ejecutó realmente. Un valor bajo (<80%) indica que las emergencias (trabajo reactivo) están rompiendo la planificación constantemente.

Esto nos lleva a la relación Preventivo vs. Correctivo. El estándar de clase mundial es la regla 80/20: el 80% de las horas hombre deben dedicarse a actividades proactivas (PM, PdM) y solo el 20% a correcciones de emergencia.

La "Regla 6 a 1" sugiere que, por cada 6 tareas de mantenimiento preventivo realizadas, se debe generar aproximadamente una orden de trabajo correctiva derivada de los hallazgos de esa inspección. Si no se generan correctivos a partir de los preventivos, las inspecciones son "pencil-whipping" (rellenar el formulario sin mirar) o los intervalos son demasiado cortos.³³

9. Tecnologías Emergentes y Mantenimiento Predictivo (PdM)

La industria está transitando de intervalos fijos a mantenimiento basado en condición (CBM).

El uso de sensores IoT, análisis de aceite en tiempo real y termografía permite monitorear el Intervalo P-F (el tiempo entre la detección de una falla potencial "P" y la falla funcional "F").

El ROI del mantenimiento predictivo en minería es sustancial. Casos de estudio muestran

reducciones de costos del 15-25% al evitar daños consecuenciales (ej. cambiar un rodamiento de \$500 antes de que destruya una transmisión de \$50,000). Sistemas como VHMS de Komatsu y Product Link de Caterpillar son centrales en esta estrategia, proporcionando los datos crudos para calcular la salud del activo en tiempo real.³⁵

10. Análisis Específico por Tipo de Activo

10.1 Camiones de Acarreo y Neumáticos

Para los camiones, la gestión de neumáticos es un KPI crítico propio. El costo de neumáticos puede igualar al costo de mantenimiento del motor. Se monitorea el TKPH (Toneladas-Kilómetro Por Hora) para asegurar que no se exceda la capacidad térmica del neumático.

10.2 Equipos Auxiliares: El Soporte Vital

Dozers y Motoniveladoras son a menudo ignorados, pero su disponibilidad es crítica.

- **Motoniveladoras:** Su desempeño impacta directamente en la vida de los neumáticos y suspensiones de los camiones de acarreo. Vías en mal estado (por baja disponibilidad de graders) aumentan el costo global de la flota.
- **Bulldozers:** El uso de métricas como "volumen empujado por hora" mediante GPS permite evaluar su eficiencia más allá de las horas de motor.³⁸

11. Conclusiones y Recomendaciones Estratégicas

La gestión del mantenimiento de maquinaria para movimiento de tierras es un ecosistema complejo donde los indicadores técnicos, financieros y operativos están profundamente entrelazados.

1. **Integración de Datos:** La excelencia requiere romper los silos entre operaciones y mantenimiento, utilizando el modelo GMG para hablar un lenguaje común.
2. **Enfoque en Confiabilidad:** Elevar el MTBF es más rentable que reducir el MTTR. Evitar la falla es superior a repararla rápido.
3. **Gestión del Backlog:** Mantener el backlog controlado es la mejor defensa contra el caos reactivo.
4. **Calidad sobre Cantidad:** En minería, el OEE debe priorizar la calidad (ley y dilución) tanto como la disponibilidad mecánica.

La implementación rigurosa de estos KPIs transforma al departamento de mantenimiento de un "taller de reparaciones" a un socio estratégico indispensable para la rentabilidad del negocio.

Fuentes citadas

1. "INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO DE EQUIPO PESADO PARA CONTROL DE RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD" - CORE, acceso: noviembre 21, 2025, <https://core.ac.uk/download/pdf/529653294.pdf>
2. Desafíos y Soluciones en el Mantenimiento de Equipos de Minería - ALS Global, acceso:

noviembre 21, 2025, <https://www.alsglobal.com/en/news-and-publications/2022/06/lines-and-solutions-in-the-maintenance-of-mining-equipment>

3. A STANDARDIZED TIME CLASSIFICATION FRAMEWORK FOR MOBILE EQUIPMENT IN SURFACE MINING:, acceso: noviembre 21, 2025, https://gmggroup.org/wp-content/uploads/2024/07/20200713_Time_Classification_Framework-GMG-DAU-v01-r01-1.pdf
4. Benchmarking using Replacement Asset Value - Accendo Reliability, acceso: noviembre 21, 2025, <https://accendoreliability.com/benchmarking-using-replacement-asset-value/>
5. A novel integrated key performance indicator for evaluating open-pit mine haulage systems: application of GMG standards - ResearchGate, acceso: noviembre 21, 2025, https://www.researchgate.net/publication/393090310_A_novel_integrated_key_performance_indicator_for_evaluating_open-pit_mine_haulage_systems_application_of_GMG_standards
6. MTTF vs MTBF vs MTTR: Explicación de las principales métricas de fallos - eMaint, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.emaint.com/es/mtbf-mttr-mantenimiento-kpis/>
7. Cost Effective Maintenance by Caterpillar | PDF | Reliability Engineering - Scribd, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.scribd.com/document/558989871/Cost-Effective-Maintenance-By-Caterpillar>
8. Incident Management - MTBF, MTTR, MTTA, and MTTF - Atlassian, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.atlassian.com/incident-management/kpis/common-metrics>
9. Lagging Indicators For Asset Management: MTBF/MTTF (Mean Time Between/To Failure), Part 2 | THE RAM REVIEW, acceso: noviembre 21, 2025, <https://theramreview.com/lagging-indicators-for-asset-management-mtbf-mttf-meantime-between-to-failure-part-2/>
10. View of STATISTICAL ANALYSIS OF CATERPILLAR 793D HAUL TRUCK ENGINE DATA AND THROUGH-LIFE DIAGNOSTIC INFORMATION USING THE PROPORTIONAL HAZARDS MODEL, acceso: noviembre 21, 2025, https://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/492/pdf_6
11. MTBF vs MTTF vs MTTR: Comprender las métricas de incidencias en... - Tulip Co, acceso: noviembre 21, 2025, <https://tulip.co/es/blog/mtbf-mttf-mttr-incident-metrics/>
12. ¿Qué es el MTBF y cómo calcularlo? (MTBF vs MTTR) - Infraspeak Blog, acceso: noviembre 21, 2025, <https://blog.infraspeak.com/es/que-es-mtbf/>
13. Komatsu vs cat excavators: which one is better for your sites? - MechLink, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.mechandlink.com/en/news-article/Komatsu-vs-cat-excavators-which-one-is-better-for-your-sites>
14. Figuring hourly equipment cost for billing purposes : r/estimators - Reddit, acceso: noviembre 21, 2025, https://www.reddit.com/r/estimators/comments/1dfz33e/figuring_hourly_equipment_cost_for_billing/
15. Los 5 indicadores clave en el departamento de mantenimiento - Fracttal, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.fracttal.com/es/guias-mantenimiento/indicadores-de-mantenimiento>
16. New Method to Study the Effectiveness of Mining Equipment: A Case Study of Surface Drilling Rigs - MDPI, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2076->

3417/14/5/2185

17. Asset Utilization: How To Calculate It, Key Metrics, and More - Amper Technologies, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.amper.co/post/asset-utilization-how-to-calculate-it-key-metrics-and-more>
18. Asset Utilization: How to Boost & Calculate - eMaint, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.emaint.com/blog-what-is-asset-utilization/>
19. Calculating Overall Equipment Effectiveness (OEE) - DuraLabel Resources, acceso: noviembre 21, 2025, <https://resources.duralabel.com/articles/calculating-overall-equipment-effectiveness-oee>
20. How to Calculate OEE: Formulas and Examples - Output Industries, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.output.industries/insights/how-to-calculate-oee>
21. OEE Calculation: Definitions, Formulas, and Examples, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.oee.com/calculating-oee/>
22. Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE - Acta Montanistica Slovaca, acceso: noviembre 21, 2025, <https://actamont.tuke.sk/pdf/2010/n2/1elevli.pdf>
23. Market Share, and Growth Analysis By Product (Loaders, Excavators, Crushing, Pulverizing & Screen Equipment, Drills & Breakers, Dumper, Shovels, Motor Graders, Others), By Application (Metal Mining, Non-M, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.marketresearch.com/OG-Analysis-v3922/Surface-Mining-Equipment-Outlook-Share-42884017/>
24. Grade Control and Dilution Management Analysis | Umbrex, acceso: noviembre 21, 2025, <https://umbrex.com/resources/industry-analyses/how-to-analyze-a-metals-mining-company/grade-control-and-dilution-management-analysis/>
25. Unlocking Efficiency: Ore Dilution and Quality Control in Open-Pit Mines - Groundhog Apps, acceso: noviembre 21, 2025, <https://groundhogapps.com/ore-dilution-and-quality-control/>
26. Maximising Value Through Operating Grade Control in Underground Mines - Discovery Alert, acceso: noviembre 21, 2025, <https://discoveryalert.com.au/grade-control-underground-mining-2025-systems-dilution/>
27. Which Brand Offers Better Value For Money: Komatsu Vs Caterpillar?, acceso: noviembre 21, 2025, <https://hixenmachine.com/offers-value-for-money-komatsu-vs-caterpillar/>
28. Cat vs Komatsu Excavator : r/heavyequipment - Reddit, acceso: noviembre 21, 2025, https://www.reddit.com/r/heavyequipment/comments/12cqfjr/cat_vs_komatsu_excavator/
29. What is Replacement Asset Value (RAV)? | Maintenance Metrics - Limble CMMS, acceso: noviembre 21, 2025, <https://limblecmms.com/learn/metrics/replacement-asset-value/>
30. Heavy Equipment Maintenance KPIs for Contractors & Fleet Managers - HVI App, acceso: noviembre 21, 2025, <https://heavyvehicleinspection.com/blog/post/heavy-equipment-maintenance-kpis-contractors-fleet-managers>
31. How Backlog Gets Out of Hand & Strategies for Managing and Reducing It, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.edms-consultants.com/maintenance-backlog/>
32. Current Practices for Preventive Maintenance and Expectations for Predictive Maintenance in East-Canadian Mines - MDPI, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2673-6489/3/1/2>
33. Corrective Maintenance vs. Preventive Maintenance - Worktrek CMMS, acceso:

- noviembre 21, 2025, <https://worktrek.com/blog/corrective-vs-preventive-maintenance/>
34. Analyzing the Relationship of Preventive Maintenance to Corrective Maintenance, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.lce.com/resources/analyzing-the-relationship-of-preventive-maintenance-to-corrective-maintenance/>
35. Better together: AVEVA™ Predictive Analytics and the AVEVA™ PI System™ maximize mining plant ROI, acceso: noviembre 21, 2025, https://www.aveva.com/content/dam/aveva/documents/white-papers/WhitePaper_AVEVA_PredictiveAnalyticsforMiningandMetals_22-10.pdf
36. Predictive maintenance market: 5 highlights for 2024 and beyond - IoT Analytics, acceso: noviembre 21, 2025, <https://iot-analytics.com/predictive-maintenance-market/>
37. Prediction at scale: How industry can get more value out of maintenance | McKinsey, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/prediction-at-scale-how-industry-can-get-more-value-out-of-maintenance>
38. Dozer push — the machine KPI your mine forgot about, acceso: noviembre 21, 2025, <https://www.wencomine.com/post/dozer-push-the-machine-kpi-your-mine-forgot-about>