

Indicadores para la gestión del mantenimiento de equipos pesados

Indicators for heavy equipment maintenance management

Manuel Zegarra¹

RESUMEN

La Gestión del Mantenimiento de Equipos pesados, incluye la Gestión de Ingeniería del Mantenimiento y la Gestión Administrativa del Mantenimiento. La primera tiene que ver con la solución técnica de los problemas presentados en las máquinas, implementación de las buenas prácticas para la solución de problemas mecánicos o atención de reparaciones, etc. La segunda se encarga de los procesos administrativos de recolección de datos, flujo de la información a fin de tener estos en el momento oportuno, planeamiento y programación, organización adecuada para atender las fallas en el menor tiempo posible, etc. La manera de saber si la gestión del mantenimiento es llevada adecuadamente es midiéndola y obteniendo valores que nos indiquen si los resultados se encuentran dentro de los parámetros esperados para la gestión. La elección de los KPI (Key Performance Indicators), va a depender del nivel en que se encuentren los procesos (transaccionales, supervisión, gerenciales). Este artículo trata de los indicadores gerenciales o de alto nivel, que nos permitirán conocer si la gestión del mantenimiento de los equipos mecánicos en una empresa constructora, minera, industrial, etc., está siendo llevada de manera adecuada.

Palabras clave: Gestión del Mantenimiento, KPIS, disponibilidad, confiabilidad

ABSTRACT

Maintenance Management of heavy equipment, includes Maintenance Engineering Management and Administrative Management of Maintenance. The first has to do with the technical solution of the problems in machines, implementation of best practices for solving mechanical problems or attention repairs, etc. The second is responsible for the administrative processes of data collection, information flow to take these at the right time, planning and scheduling, proper organization to address the flaws in the shortest possible time, etc. The way to know if the management of maintenance is properly carried is obtained by measuring values and to tell us if the results are within expected parameters for management. The choice of KPI (Key Performance Indicators), will depend on the level at which (transactional, monitoring, management) processes are. This article deals with the management or high-level indicators that will allow us to know if the management and maintenance of mechanical equipment in a construction company, mining, industrial, etc., is being carried properly.

Key Words: Maintenance Management, KPIs, Availability, Reliability

1. Trabajo actual: Jefe de Monitoreo y Planeamiento en la gerencia de Gestión de Equipos en la empresa Ferreyros, Doctor en Administración de la UAP, Maestro en Administración de la USMP, Ingeniero Mecánico de la PUCP, CIP 49526, Diplomado en Ingeniería Mecatrónica por la UR, especialista CAD-CAE por la PUCP, Black Belt Six Sigma por Caterpillar, asesor para empresas constructoras, docente a tiempo parcial del curso Gestión de Mantenimiento de Equipo Pesado en la PUCP. Correo electrónico: mzegarraventura@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El artículo pretende aclarar conceptos sobre los indicadores de gestión del mantenimiento, pues en la práctica no se usan los conceptos y definiciones adecuadamente. Por ello se presenta la explicación académica y el desarrollo matemático, a fin de entender sus bases teóricas y explicar su importancia.

Indicadores de gestión del mantenimiento:

Indicadores de alto nivel

Cada nivel dentro de una organización empresarial tiene diferentes indicadores para medir su gestión.



Figura N° 1. Pirámide Organizacional (Auto-ría: Universidad de Concepción, Chile,

<http://udec.cl/dti/node/108>)

Las gerencias no tienen tiempo de analizar los indicadores que se llevan en todas las etapas o niveles del mantenimiento, por lo que es necesario escoger los que les permitan observar si se están consiguiendo los resultados esperados.

Por ejemplo a nivel de manejo de taller, interesa controlar el rendimiento de mano de obra, porcentaje de horas de sobretiempo, porcentaje de horas no productivas, etc. En el nivel de supervisión interesa tener control del tiempo para atención de servicios, tiempo de demora en facturación, tiempo en atención de repuestos, etc.

Pero para la alta gerencia o para las personas que deben tomar decisiones estratégicas sobre los resultados obtenidos en determinado período, es necesario analizar pocos indicadores de cada una de las áreas de la empresa y que estos indicadores muestren claramente el resultado del manejo de dichas áreas.

Los indicadores más usados en las empresas de clase mundial para el control de la gestión del mantenimiento de equipos pesados son los siguientes:

- * Costos de Operación de equipos
- * MTBS (Mean Time Between Shutdowns) o TMEP (Tiempo Medio Entre Paradas)
- * MTTR (Mean Time To Repair) o Tmpr (Tiempo Medio Para Reparar)
- * MA (Mechanical Availability) o DM (Disponibilidad Mecánica)
- * MU (Machine Utilization) o UM (Utilización de Máquina)
- * MTBF (Mean Time Between Failures) o TMEF (Tiempo Medio Entre Fallas)
- * MTBFS (Mean Time Between Failures Shutdowns) o TMEPF (Tiempo Medio Entre Paradas por Fallas)
- * R (Reliability) o C (Confiability)
- * MR (Maintenance Ratio) o RM (Razón de Mantenimiento)
- * SA (Service Accuracy) o PS (Precisión de Servicio)
- * PRP (Porcentaje de Reparaciones Programadas)
- * Trends o Tendencias

Costos horarios

Los costos horarios están divididos en Costos Horarios de Posesión y Costos Horarios de Operación. Consideran costos directos.

Costos horarios de posesión

Los Costos de Posesión incluyen todos los costos incurridos en la compra de la máquina hasta que esta estuvo en los almacenes de la empresa.

* Costo de adquisición

* Intereses bancarios de préstamos

* Seguros

* Transportes

Los costos horarios de posesión se obtienen dividiendo el costo total entre las horas estimadas de vida del proyecto o de la máquina según sea el criterio a usar.

Estos costos son los que se deben recuperar mediante el trabajo.

Algunos propietarios de equipos consideran que a este costo se le debe deducir el valor de reventa de la máquina, pensando que esta será vendida al final de su vida útil.

La determinación del tiempo esperado de vida del equipo o proyecto es una decisión económica a tomar analizando cada caso en particular y dependerá tanto de la rapidez que el propietario desea de recuperación de su inversión como de las condiciones del mercado.

Costos horarios de operación

Los costos de operación incluyen todos los costos en que se incurre para que el equipo trabaje. Estos incluyen los siguientes elementos:

* Combustibles

* Lubricantes

* Filtros

* Repuestos

* Materiales

* Trabajos externos

* Mano de obra mecánico

* Operador

Normalmente el costo de filtros se separa de los repuestos, por un tema de control especial, de consumo horario y de abastecimiento.

Existe además un elemento a considerar que es la Reserva de Reparaciones. Esta considera costos de las reparaciones futuras que se harán en la máquina.

Si una máquina es nueva o relativamente nueva, es conveniente considerarlo en el costo de alquiler. Si una máquina no es nueva (por ejemplo si tiene más de 15,000 horas de uso), normalmente ya ha tenido todas las reparaciones programadas hechas (correctivos programados), así como otras reparaciones no programadas, por lo que en este caso el cómputo histórico de repuestos, mano de obra, trabajos externos, materiales, etc. ya considera esta reserva de reparaciones.

En el caso de máquinas de las cuales no se tiene experiencias previas, es bueno conseguir del distribuidor de la marca toda la información de repuestos, lubricantes, filtros, etc. a usar, así como su frecuencia de uso cambio y el costo de futuras reparaciones a realizar a fin de obtener valores que nos permitan una línea base de los costos de operación.

Los costos horarios de operación se calculan dividiendo los costos de operación entre las horas trabajadas (para el caso de costos reales incurridos a dicha fecha) o entre las horas estimadas en

las que se van a gastar los insumos considerados en el caso de cálculo futuro.

Uso de los costos directos como criterio para el reemplazo de equipos

Analizando el costo de los equipos es posible considerar algunos criterios de reemplazo a nivel de costo bruto o utilidad bruta.

* Costo Total Horario Mínimo

* Utilidad Horaria Máxima

* Utilidad Acumulada Máxima

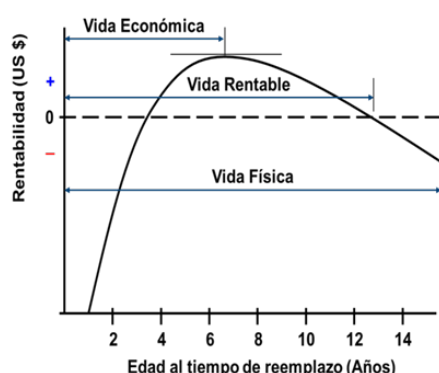


Gráfico N° 1. Vida útil de máquinas (Caterpillar)

Los datos de costos mensuales acumulados pueden ser representados con una curva cuadrática, cuya ecuación es posible aproximar usando la opción de regresión de Excel (mínimos cuadrados). Aprovechando esta característica se pueden trabajar los criterios antes mencionados.

Criterio del costo total horario mínimo

Los costos totales horarios van a ir disminuyendo conforme la máquina trabaja, básicamente porque el costo de posesión se va diluyendo con el aumento de las horas de trabajo, pero dado que la curva de costos de operación semeja a una curva cuadrática, va a existir un punto en el tiempo en el cual el costo total horario será mínimo, pasando este a ser mayor a partir de dicho punto.

El costo total horario mínimo se calcula con la historia de costos de la máquina y se consideran los costos de operación acumulados incurridos en la operación de la máquina. Con la opción de gráficos de puntos o gráfico de dispersión y del análisis de regresión para una polinómica de segundo orden, se obtiene la ecuación de la curva de los costos de operación acumulados con su respectivo valor de coeficiente de determinación (R^2).

La ecuación del costo total, se consigue sumando el costo de posesión a la ecuación del costo de operación.

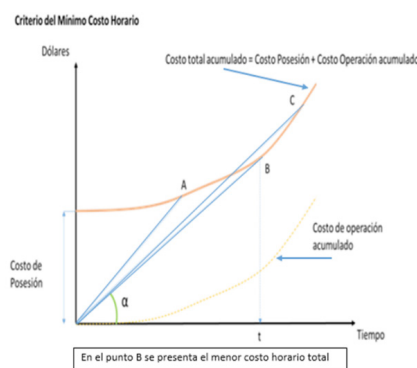


Gráfico N° 2. Costo total acumulado (autoría propia)

La tangente del ángulo α representa al costo total horario, por lo tanto para hallar el punto del costo horario total mínimo, hay que intersectar la ecuación de la recta que pasa por el origen y que tiene pendiente $m = \text{tang}(\alpha)$ con la ecuación que describe al costo total horario y que además cumpla con la condición de que sea tangente a la curva del costo total horario.

Matemáticamente se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Recta de la tangente de costo horario} \dots\dots y &= mt \\ \text{Costo de Operación} \dots\dots C_{op} &= f(t) \\ \text{Costo de Posesión} \dots\dots C_{pos} & \\ \text{Costo Total} \dots\dots CT(t) &= C_{pos} + C_{op} = C_{pos} + f(t) \\ \text{Interseccion de recta y Costo Total} \dots\dots mt &= C_{pos} + f(t) \end{aligned}$$

Despejando la expresión de la pendiente y derivándola e igualándola a cero, podemos obtener el valor del mínimo de la función.

$$m = \frac{C_{pos}}{t} + f(t)/t$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_{pos}}{t^2} + \frac{d\left[\frac{f(t)}{t}\right]}{dt}$$

minima pendiente = mínimo costo horario $\rightarrow \frac{dm}{dt} = 0$

$$\frac{d\left[\frac{f(t)}{t}\right]}{dt} = C_{pos}/t^2$$

Otra forma de analizar los costos de operación es haciendo directamente un gráfico de costos horarios. El momento de costo horario total mínimo será el mismo que en el caso anterior.

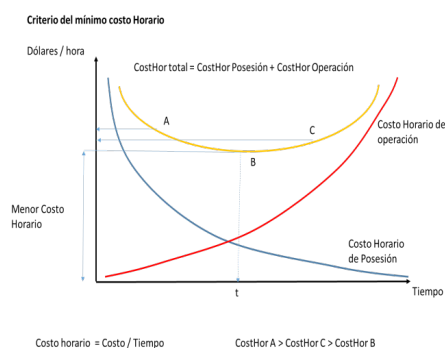


Gráfico N° 3. Costo total acumulado (autoría propia)

Desarrollando las expresiones matemáticas, se tiene:

$$C_{op} \text{ horario} = \frac{f(t)}{t} = g(t)$$

$$C_{pos} \text{ horario} = C_{pos}/t$$

$$CT(t) \text{ horario} = C_{pos}/t + g(t)$$

$$\frac{d[CostHorTo]}{dt} = -\frac{C_{pos}}{t^2} + \frac{d[g(t)]}{dt}$$

mínimo costo horario $\rightarrow \frac{d[CostHorTot]}{dt} = 0$

$$\frac{d[g(t)]}{dt} = C_{pos}/t^2$$

pero $C_{op} \text{ horario} = g(t) = f(t)/t$

$$\frac{d\left[\frac{f(t)}{t}\right]}{dt} = C_{pos}/t^2$$

Criterio de la utilidad máxima acumulada

El criterio de la utilidad máxima acumulada considera la ecuación de la función de ventas.

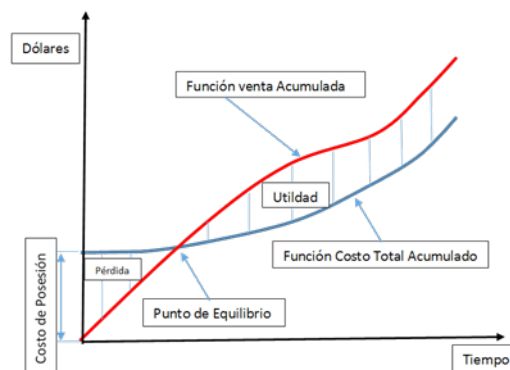


Gráfico N° 4. Utilidad acumulada (autoría propia)

El desarrollo matemático es como sigue:

Utilidad máxima

$$Venda = V(t)$$

$$C_{op} = f(t)$$

$$C_{pos}$$

$$CT(t) = C_{pos} + f(t)$$

$$Utilidad = V(t) - C_{pos} - f(t)$$

$$\frac{d Util}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} - 0 - \frac{d[f(t)]}{dt}$$

Utilidad acumulada máxima $\rightarrow \frac{d Util}{dt} = 0$

$$\frac{d[f(t)]}{dt} = \frac{dV(t)}{dt}$$

Dado que los precios de venta horaria siempre se mantienen fijos durante un determinado lapso, el análisis puede hacerse por tramos.

Si el valor de venta horaria no varía en el tiempo, se tendrá la ecuación de una recta, con lo que la expresión anterior queda simplificada.

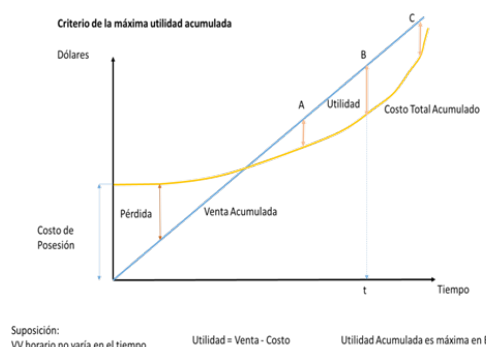


Gráfico N° 5. Utilidad Acumulada para Venta horaria constante (autoría propia)

Las expresiones matemáticas quedan de la siguiente manera:

Caso especial
 Función de venta es una recta
 A=Valor alquiler horario

$$\text{Venta} = A * t$$

$$\text{Cop} = f(t)$$

$$\text{Cpos}$$

$$\text{CT}(t) = \text{Cpos} + f(t)$$

$$\text{Utilidad} = A * t - \text{Cpos} - f(t)$$

Utilidad acumulada máxima $\rightarrow \frac{d \text{Util}}{dt} = 0$

$$A - 0 - \frac{d[f(t)]}{dt} = 0$$

$$\frac{d[f(t)]}{dt} = A$$

Criterio de la utilidad horaria máxima

Este criterio considera el momento en que se presenta la utilidad horaria máxima, la que se consigue dividiendo la función utilidad acumulada entre el tiempo.

Utilidad Horaria máxima

$$\text{Venta} = V(t)$$

$$\text{Cop} = f(t)$$

$$\text{Cpos}$$

$$\text{CT}(t) = \text{Cpos} + f(t)$$

$$\text{Utilidad} = V(t) - \text{Cpos} - f(t)$$

$$\text{UtilidadHoraria} = V(t)/t - \text{Cpos}/t - f(t)/t$$

Para hallar la máxima utilidad horaria, se deriva la función y se iguala a cero.

$$\frac{d \text{UtilHor}}{dt} = \frac{d[\frac{V(t)}{t}]}{dt} - \frac{d[\frac{\text{Cpos}}{t}]}{dt} - \frac{d[f(t)/t]}{dt}$$

Utilidad máxima $\rightarrow \frac{d \text{Util}}{dt} = 0$

$$\frac{d[f(t)/t]}{dt} = \frac{d[\frac{V(t)}{t}]}{dt} + \frac{\text{Cpos}}{t^2}$$

Despejando la variable t, se hallará el momento de la máxima utilidad horaria.

En el caso particular en que la función de venta tenga un valor horario constante, la expresión anterior se simplifica de la siguiente manera:

Utilidad Horaria máxima
 Caso venta es una línea recta
 A = valor venta de la hora de alquiler

$$\text{Venta} = V(t) = A * t$$

$$\text{Cop} = f(t)$$

$$\text{Cpos}$$

$$\text{CT}(t) = \text{Cpos} + f(t)$$

$$\text{Utilidad} = V(t) - \text{Cpos} - f(t) = A * t - \text{Cpos} - f(t)$$

$$\text{UtilidadHoraria} = A * t/t - \text{Cpos}/t - f(t)/t$$

$$\text{UtilidadHoraria} = A - \text{Cpos}/t - f(t)/t$$

$$\frac{d \text{UtilHor}}{dt} = 0 + \text{Cpos}/t^2 - \frac{d[f(t)/t]}{dt}$$

Utilidad máxima $\rightarrow \frac{d \text{Util}}{dt} = 0$

$$\frac{d[f(t)/t]}{dt} = \frac{\text{Cpos}}{t^2}$$

La Utilidad Horaria Máxima se da en el momento del Costo Horario Mínimo

Analizando cómo varían en el tiempo los coeficientes de la función de costos de operación se puede obtener la tendencia de extensión o no del momento de reemplazo o reparación del equipo. Al igual que con el criterio anterior, dado que los precios de venta horaria siempre se mantienen fijos durante un determinado lapso, el análisis puede hacerse por tramos.

MTBS: Mean Time Between Shutdowns (Tiempo Medio Entre Paradas)

Este es un indicador que muestra el tiempo promedio que la máquina trabaja antes de parar por algún motivo mecánico. Proporciona información sobre la adecuada gestión del mantenimiento ya que una adecuada gestión del planeamiento proporcionará un adecuado MTBS.

El MTBS para un período determinado se calcula dividiendo el número de horas trabajadas en dicho período entre el número de paradas por motivos mecánicos que tuvo la máquina en el mismo período.

$$\text{MTBS} = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Número de paradas}}$$

Las horas trabajadas son las horas de horómetro (SMU o Service Meter Unit) y el número de paradas no considera las paradas operativas.

Un alto MTBS es indicativo de que la máquina tiene una baja frecuencia de fallas y que está más tiempo produciendo que en el taller.

Las buenas prácticas en labores mineras, recomiendan que este indicador oscile entre 60 y 80 horas por parada en promedio. Los valores metas de este indicador dependerán del tipo de máquina y de aplicación al que está sometida la máquina

MTTR: Mean Time To Repair (Tiempo Medio Para Reparar)

Este indicador muestra el tiempo promedio que demoran las reparaciones o intervenciones a la máquina por motivos mecánicos. Es el tiempo que la máquina se encuentra bajo el estado de reparación (inoperativa para el trabajo). Proporciona información sobre la adecuada gestión del planeamiento y del taller, incluyendo al área logística y otras áreas de la empresa involucradas con la atención de los recursos necesarios para la ejecución de los servicios.

El MTTR para un determinado período se calcula dividiendo las horas totales usadas en reparaciones en determinado período entre el número de paradas que la máquina tuvo por motivos mecánicos en dicho período. De igual manera no se consideran las paradas operativas.

$$MTTR = \frac{\text{Horas en reparaciones}}{\text{Número de paradas}}$$

Dado que cuando se interviene la máquina el reloj no corre, las horas consideradas son las horas solares (de reloj). No confundir con horas – hombre, ni con horas máquina (SMU).

Un alto valor de MTTR indica que se invierten muchas horas en reparar la máquina debido a alguna deficiencia en la gestión.

Un bajo valor de MTTR indica que no se están realizando las labores de mantenimiento como debieran hacerse.

Las buenas prácticas de mantenimiento recomiendan que el valor promedio del indicador MTTR se encuentre entre 3 y 6 horas.

MA: Mechanical Availability (Disponibilidad Mecánica)

La disponibilidad mecánica está definida como la relación entre las horas trabajadas y las horas usadas en reparación.

Para un período determinado, es calculado dividiendo el número de horas trabajadas entre la suma de horas trabajadas y las horas usadas en las paradas mecánicas.

$$MA = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Hrs. trabajadas} + \text{Hrs. en reparación}}$$

Este indicador por sí solo no es un buen referente para medir una gestión de mantenimiento, porque nada nos dice sobre lo que ocurrió en el intervalo de medición.

Pero, si dividimos el numerador y el denominador entre el número de paradas por motivos mecánicos (incluye las paradas programadas y las no programadas) que tuvo la máquina en el período de cálculo, tendremos lo siguiente (ver artículo Zegarra, M. Gestión moderna del mantenimiento de equipos pesados 774-2619-1-PB, Ciencia y Desarrollo):

$$MA = \frac{MTBS}{MTBS + MTTR}$$

Es conveniente analizar la disponibilidad mecánica conjuntamente con los indicadores MTBS y MTTR.

El valor recomendable de este indicador es alrededor del 90%.

Falla y avería

El tiempo medio entre fallas y el tiempo medio entre paradas por fallas muchas veces se confunden al momento de usar los indicadores para la confiabilidad. Sin embargo si las definiciones se tienen claras no habrá problemas en entender los resultados a fin de tomar acciones estratégicas.



Figura N° 2. Evolución de las fallas (ABB)

La falla es el fin de la capacidad de un ítem para desempeñar la función requerida (MSc. Ing. Victor Manríquez, CMRP, Norma ISO 14224:2006). La falla de un componente o equipo se presenta cuando dicho componente o equipo sale de especificaciones. Las especificaciones son los límites de los parámetros de trabajo del equipo o componente. El tiempo que un componente trabaja una vez comenzada la falla, se encuentra en condición de averiado. Avería es el estado de un ítem caracterizado por la incapacidad de desempeñar la función requerida, excluyendo tal incapacidad durante el PM u otras acciones planeadas o debido a falta de recursos externos (MSc. Ing. Victor Manríquez, CMRP, Norma ISO 14224:2006)

Como se observa en el gráfico, desde que se produce la falla hasta que el componente o equipo pierde un nivel importante de rendimiento, va a transcurrir algún tiempo. El gráfico es claro para entender que la falla puede existir aunque el equipo siga trabajando.

MTBF: Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)

El indicador MTBF por definición es Tiempo Medio Entre Fallas (Mean Time Between Failures), por lo tanto es el tiempo medio o promedio que la máquina trabaja sin presentar alguna falla.

Este indicador se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Nº de Fallas presentadas}}$$

El indicador MTBF dependerá de varias áreas de la empresa, pues las fallas presentadas pueden haber sido causadas por mala operación, malas reparaciones efectuadas, repuestos defectuosos, fallas del producto original, etc., por lo tanto es necesario realizar mayor análisis para establecer la causa raíz de la falla.

MTBFS: Mean Time Between Failures Shutdowns (Tiempo Medio Entre Paradas Por Fallas)

En las operaciones de construcción y minería es más importante para el área de producción medir el tiempo que la máquina está operativa (no necesariamente al 100% de capacidad), por lo que es más usado el concepto del tiempo medio entre paradas por fallas, que el tiempo medio entre fallas.

El tiempo medio que la máquina trabaja entre paradas por fallas debe ser entendido de manera diferente y por esta razón es conveniente definir el indicador MTBFS (Mean Time between Failures Shutdowns) o Tiempo Medio entre Paradas por Fallas, diferenciándolo del indicador MTBF.

$$MTBFS = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Nº Paradas por Fallas}}$$

Un alto valor de MTBFS indica que la labor de planeamiento y programación (incluyendo la adecuada gestión del monitoreo de condiciones) es llevada adecuadamente y por el contrario, un bajo valor indicará que las fallas no son detectadas a tiempo y la máquina debe parar de manera imprevista.

MU: Machine Utilization (Utilización De Máquina)

Es un indicador que mide el porcentaje de utilización de máquina con respecto al tiempo programado o de disponibilidad para el trabajo de la máquina.

Proporciona información sobre el buen uso del tiempo de los activos de la empresa. Un alto valor

de este indicador muestra que la máquina está siendo utilizada todo el tiempo disponible en labores de producción.

Un valor bajo de la utilización de máquina indica que existe un mal planeamiento del uso de los equipos en obra.

R: Reliability (Confiabilidad)

En mantenimiento de equipos, se entiende la confiabilidad como la probabilidad de no falla del mismo o de alguno de sus componentes en un determinado tiempo.

La distribución estadística más usada para calcular la confiabilidad es la distribución de Weibull, ya que esta se adapta a las diferentes formas de distribución de densidad de falla que se puedan presentar.

- Función de densidad acumulativa (CDF)

Parámetro de localización o posición → $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\theta}\right)^\beta\right]$, $x \geq x_0$

Parámetro de forma → β

Parámetro de escala o vida característica → θ

Confiabilidad → $1 - F(x)$
- Función de densidad de probabilidad (PDF)

$f(x) = \frac{\beta(x-x_0)^{\beta-1}}{\theta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\theta}\right)^\beta\right]$, $x \geq x_0$

Tasa de falla → $f(x)$

El parámetro de posición se usa solo cuándo la vida útil de un producto comienza en algún número diseñado de horas de operación tales como los datos relacionados con la fatiga (6 Sigma, DMAIC (3.15 ed.). USA: Caterpillar). El parámetro de escala indica la posición del valor de 36.8% de confiabilidad o 63.2% de probabilidad de falla acumulada.

El parámetro de forma describe la forma aproximada de la distribución (ver gráfico N° 9)

Para una distribución de Weibull de tres parámetros, en función del tiempo t, se tiene el siguiente desarrollo:

$$R(t - t_0) = 1 - F(t - t_0) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta}$$

$$1 - F(t - t_0) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta}$$

$$1/(1 - F(t - t_0)) = e^{\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^\beta}$$

$$\ln\left[\frac{1}{1 - F(t - t_0)}\right] = \left(\frac{t - t_0}{\theta}\right)^\beta$$

$$-\ln[1 - F(t - t_0)] = \left(\frac{t - t_0}{\theta}\right)^\beta$$

$$\ln[-\ln[1 - F(t - t_0)]] = \beta \ln\left(\frac{t - t_0}{\theta}\right)$$

$$\ln[-\ln[1 - F(t - t_0)]] = \beta \ln(t - t_0) - \beta \ln(\theta)$$

La última expresión semeja a la ecuación de una recta:

$$y = mt + b$$

De esta manera es posible representar la ecuación de la confiabilidad como una recta en un papel con escala Ln para el eje de las abscisas y escala Ln-Ln para el eje de las ordenadas.

Weibull Plot with Parameters

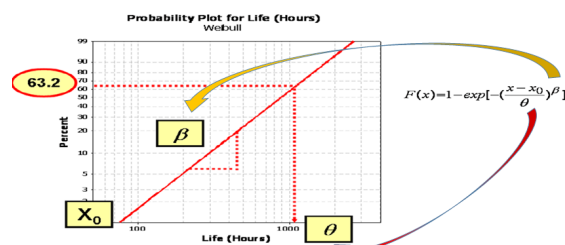


Gráfico N° 6. Papel Weibull y parámetros (Caterpillar)

La ecuación de la recta es hallada por regresión (normalmente usando el método de los mínimos cuadrados), con los puntos de los eventos.

Si la recta tiene un alto coeficiente de Pearson (R) o Coeficiente de Determinación (R²), se puede concluir que la ecuación de la recta describe de forma muy certera el comportamiento de los eventos.

Para una distribución de dos parámetros (haciendo t₀=0), la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$\ln[-\ln[1 - F(t)]] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\theta)$$

Estableciendo equivalencias entre la ecuación logarítmica y la ecuación de la recta, tenemos lo siguiente:

$$m = \beta$$

$$b = -\beta \ln(\theta)$$

Por lo que una vez encontrado β (de observación directa), podemos hallar θ de la siguiente manera:

$$\theta = \ln^{-1}\left(\frac{-b}{\beta}\right)$$

Teniendo los valores de los parámetros, es posible volver a las fórmulas iniciales y definir las ecuaciones de la densidad de falla y de probabilidad de falla acumulada y de construir las respectivas curvas.

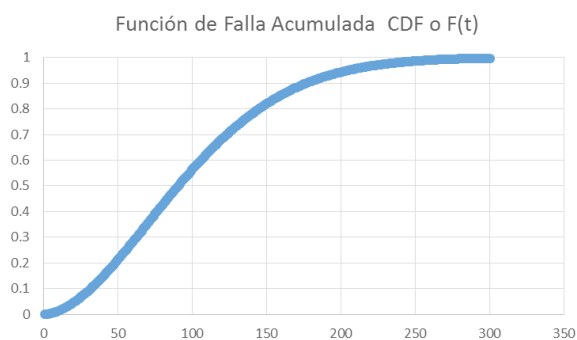


Gráfico N° 7. Cumulative Density Function (autoría propia)

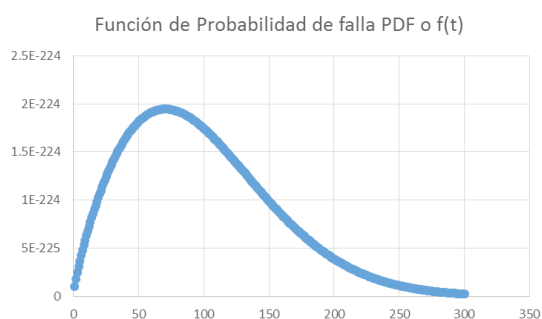


Gráfico N° 8. Probability Density Function (autoría propia)

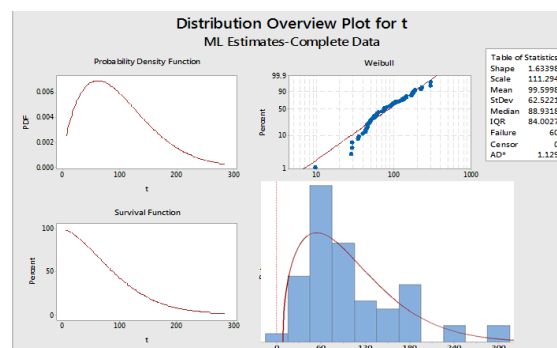


Gráfico N° 9. Presentación en Minitab (autoría propia)

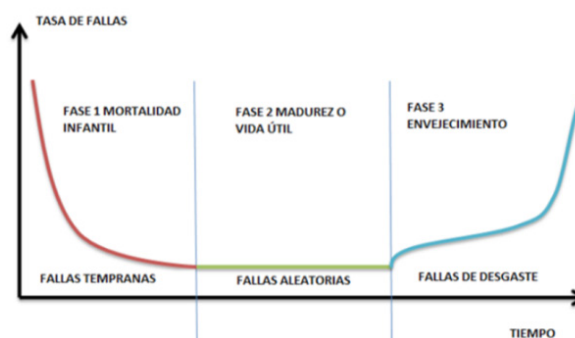
Las curvas obtenidas tienen las siguientes similitudes con las curvas de probabilidad estadísticas, según el valor del parámetro de forma β .

Distribución Weibull

- Tiene la capacidad de satisfacer diferentes distribuciones, por ejemplo, Normal, normal logarítmica y otras
 - $\beta = 1$ igual a la distribución exponencial
 - $\beta = 2$ igual a la distribución Rayleigh
 - $\beta = 2.5$ se aproxima a la distribución normal logarítmica
 - $\beta = 3.6$ se aproxima a la distribución normal
 - $\beta = 5$ se aproxima a la distribución normal máxima

La tasa de fallas $\lambda(t)$, nos indica la tendencia de la ocurrencia de fallas que proporciona información sobre si ésta se encuentra en etapa de disminución, se mantiene constante o se encuentra en etapa de aumento.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta \beta} t^{(\beta-1)}$$



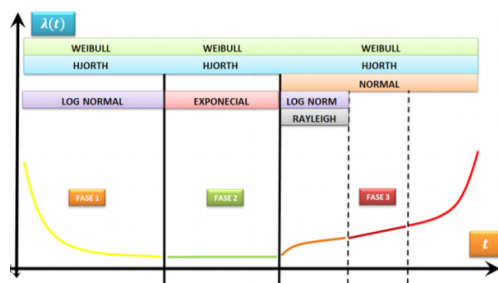


Gráfico N° 10. Tasa de fallas autoría:
Amaya Cataño, Jorge (<https://repository.eafit.edu.co>)

Dado que el análisis usando la distribución Weibull se usa para cualquier tipo de eventos, es posible usarlo para determinar la probabilidad de ocurrencia de Fallas o Paradas por Fallas, o para el análisis de cualquier otro evento. En otras palabras, también podemos obtener información sobre la confiabilidad de la gestión de planeamiento y programación.

MR: Maintenance Ratio (Razón De Mantenimiento)

Se define como la relación de las horas-hombre usadas en el mantenimiento de las máquinas en relación a las horas de trabajo de estas.

$$MR = \frac{\text{Horas - Hombre}}{\text{Horas trabajadas máquina}}$$

Este indicador debe estar entre 0.2 y 0.3 considerando solo personal técnico y para personal administrativo se considera 0.15 a 0.2.

El MR muestra el adecuado uso de las horas – hombre en los servicios de una máquina.

Un alto valor puede ser debido por ejemplo a una mala gestión de la mano de obra y del mantenimiento o que la máquina falla con mucha frecuencia por causas como una mala operación.

SA: Service Accuracy (Precisión Del Servicio)

Se define como el porcentaje de servicios que se hicieron dentro de un intervalo esperado de cumplimiento, respecto del total de servicios rea-

lizados. Solo considera mantenimientos planeados o programados.

$$SA = \frac{SHP - SHE}{SSI}$$

SHP: Service Hours Programmed (horas programadas para el servicio)

SHE: Service Hours Executed (horas que tuvo la máquinas cuando se realizó el servicio)

SSI: Service Scheduled Interval (intervalo de mantenimiento en horas)

Esta relación debe ser menor al +/- 0.1 o +/- 10% y además el 95% de los eventos debe ocurrir dentro de este rango.

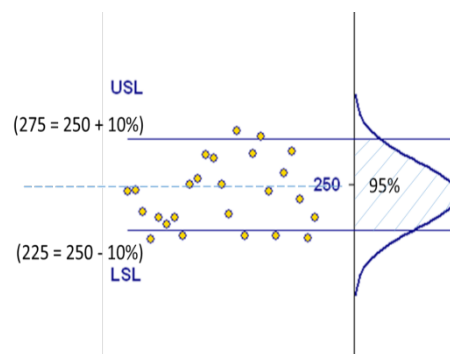


Gráfico N° 11. intervalo de mantenimiento de 250 horas (autoría propia)

Porcentaje de reparaciones programadas

El porcentaje de reparaciones programadas se calcula dividiendo la cantidad de reparaciones programadas entre la cantidad de reparaciones efectuadas en la máquina (programadas y no programadas).

Las reparaciones programadas son las que están en el plan de servicios a efectuar. Las reparaciones no programadas son las que no estuvieron en el plan inicial de servicios.

$$\%RP = \frac{\text{Núm. de Rep. program.}}{\text{Núm. Total de reparaciones}}$$

Un buen planeamiento y programación así como un buen monitoreo de condiciones harán que este indicador sea alto.

Es recomendable mantener este indicador sobre el 80%.

Tendencias

Todos los indicadores manejados, deben ser analizados comparándolos también con los obtenidos en períodos anteriores verificando la tendencia de los mismos.

En algunos casos, para el análisis de indicadores de dos períodos diferentes, es conveniente realizar la prueba de hipótesis a fin de poder determinar si son estadísticamente diferentes o no.

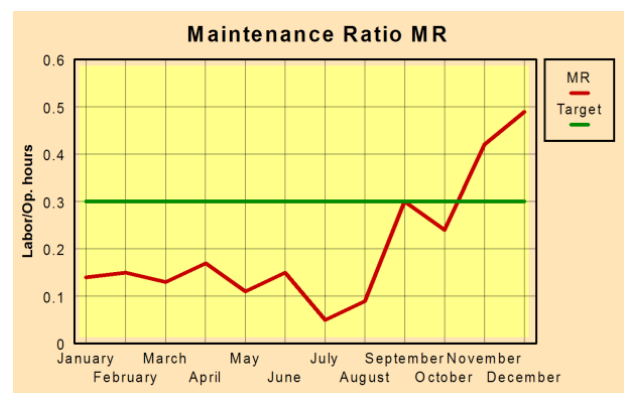
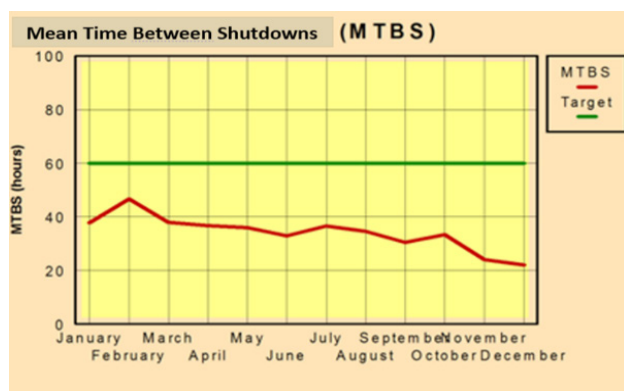


Gráfico N° 12. Ejemplo de presentación de tendencias de MTBS y MTTR (autoría propia)

Indicadores como el MTBS, MTBF, MTBFS, DM, R, MU, SA, es conveniente que tengan tendencia

ascendente, y en otros como el MTTR. MR no necesariamente, dependiendo de los límites de especificación tomados para ellos.

Es importante no solo analizar la tendencia de las medias de los indicadores sino también su desviación estándar y el sesgo que tengan y para ello conviene hacer uso de la estadística y obtener los valores de capacidad de proceso, media, desviación estándar y sesgo de los datos analizados.

CONCLUSIONES

Los indicadores servirán para que el responsable del mantenimiento sepa si existe algún problema en la gestión. La organización que se tenga para la gestión del mantenimiento servirá para que se pueda reaccionar rápida y eficientemente, así como para tener los datos e información de manera oportuna. Si los datos e información no se obtienen de manera oportuna y adecuada, no sirven para tomar decisiones de mejora antes de que los problemas sean mayores.

Para solucionar los problemas que se presenten, el responsable del mantenimiento debe ir al campo, observar, verificar, analizar, hallar la causa raíz del problema y tomar acciones adecuadas. Luego de ello controlará que sus indicaciones se llevan a cabo y volverá a obtener nuevos valores de los indicadores para analizar los resultados de sus medidas.

Al realizar un análisis de la gestión de mantenimiento es necesario relacionar los indicadores y observar la relación entre ellos

Los valores de los indicadores, deberán ser establecidos de acuerdo a la realidad de cada operación y empresa. Los valores indicados en este artículo pueden servir de ayuda, referencial. Lo importante es que se tenga el hábito del uso de las buenas prácticas del mantenimiento y de la mejora continua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Caterpillar. (2005). **Performance metrics for mobile mining equipment** (1 ed.). USA: Caterpillar

Caterpillar. (2006). **6 Sigma**, DMAIC (3.15 ed.). USA: Caterpillar

Equipment Maintenance Council. (2000, Mayo). **Equipment Management Just Got Easier**. Atlanta, Georgia, USA.

Flores, A. (1998). **El mantenimiento de equipo para la minería**. USA: Caterpillar Americas.

Hinderaker, P. (1998, Mayo). **Accounting for Equipment Managers**. Clear Water, Florida, USA: EMC Council

Weibull, W. A. *Statistical Distribution Function of Wide Applicability*, ASME Journal of Applied Mechanics, September 1951, http://www.barringer1.com/wa_files/Weibull-ASME-Paper-1951.pdf

Abernethy, B. Weibull. **Analysis Handbook, Pratt and Whitney Aircraft Government Product Division**, West Palm Beach - Florida, 1933, 228 p.

Zegarra, M. *La Administración como herramienta de Gestión para optimizar el Mantenimiento Mecánico en la empresa TyT SAC Contratistas Generales*, año 2007, Tesis de Maestría, USMP, Lima- Perú.

Zegarra, M. *La aplicación de métodos administrativos para la mejora continua de la gestión de empresas constructoras medianas en Lima Metropolitana*, año 2014, Tesis de Doctorado, UAP, Lima-Perú.

Marquina, J. Il sagiatore. *Un libro poco recordado*, Portal revistas científicas y arbitradas de la UNAM, **Revista Ciencias**, artículo N° 41, Enero- Marzo 1996, <http://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/issue/view/933/showToc>

Zegarra, M. *Seis Sigma para la mejora en el mantenimiento de equipos pesados en empresas constructoras medianas*, Revista arbitrada de la UAP **Ciencia y Desarrollo**, Volumen 17 Número 2, Julio-Diciembre 2014, pg. 19.

Zegarra, M. *Gestión moderna del mantenimiento de equipos pesados*, Revista arbitrada de la UAP **Ciencia y Desarrollo**, Volumen 18 Número 1, Enero Junio 2015, pg. 57

Khadem, R. **Administración en Una Página**, Editorial Norma S.A., Bogotá Colombia, 1988, 140 p.

Amaya, J. *Estudio del comportamiento real de la fase III de la curva de la bañera a través de la aproximación de una*

distribución de la vida útil de bombillos de frenado automotriz, año 2014, Tesis de maestría, Universidad EAFIT, Medellín-Colombia.

Manríquez, V. *Índices de clase mundial en mantenimiento*, año 2015. Conferencia dictada en Puerto Moín, Limón, Costa Rica. <http://es.slideshare.net/vmanriquez62/indices-de-clase-mundial-en-mantenimiento>