La trampa del TBO

Por qué cambiar componentes por horas no siempre hace más segura una operación, y cuándo sí

En muchas faenas se repite que una operación segura exige un TBO para cada componente. Los datos dicen algo más incómodo: muchos componentes mineros sí envejecen, pero el TBO del fabricante es un promedio ajeno, las reparaciones nunca dejan el componente como nuevo y, en la mayoría de los casos, el intervalo responde al costo y no a la seguridad.

por Victor Barrientos Boccardo

Ingeniero civil mecánico · Fundador de INVICTUM SpA

En aviación, 11% de los componentes envejecía; en minería, cerca de la mitad

La trampa no está en tener TBO, sino en cómo se justifica.

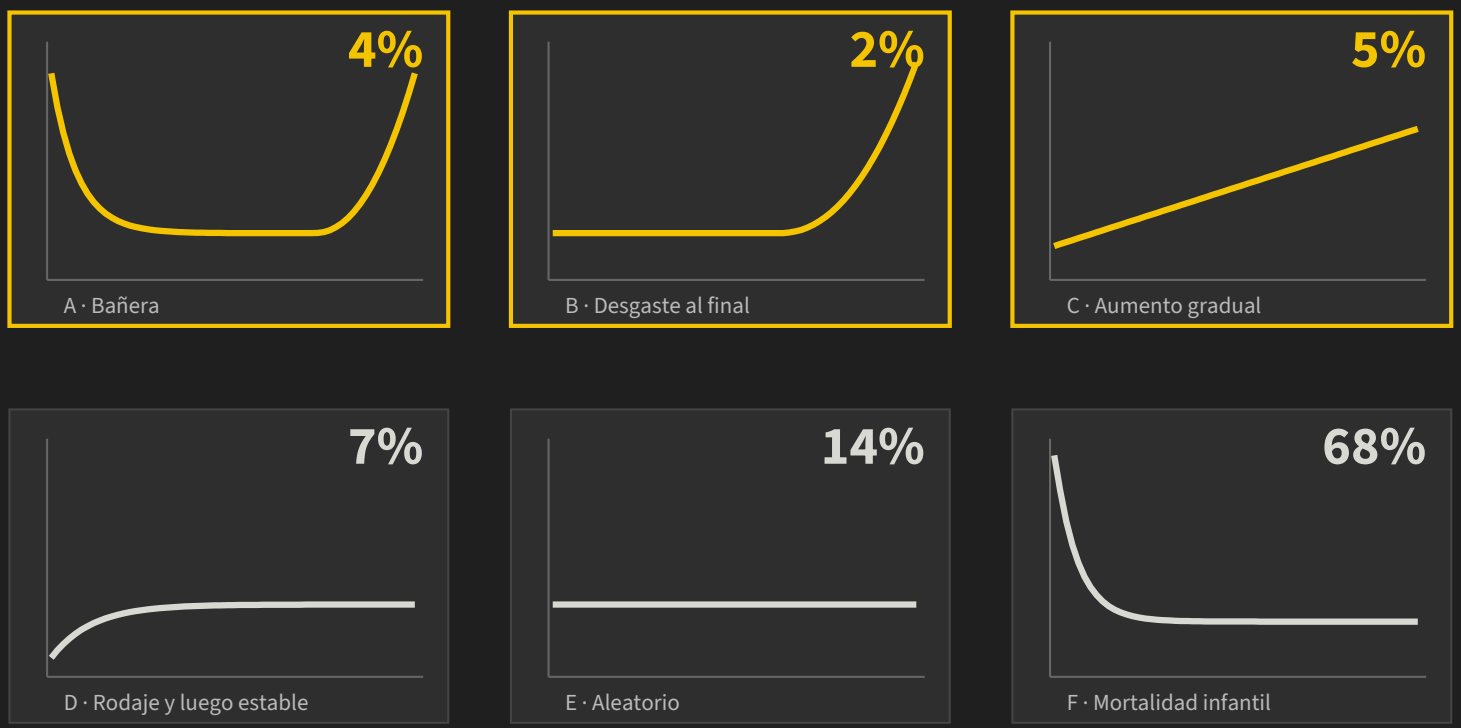


Ilustración: los seis patrones de falla, generada para este artículo

En amarillo, los patrones que envejecen: 11% en aviación (Nowlan y Heap, 1978)

LA IDEA EN SÍNTESIS

La creencia

Cambiar los componentes a las horas que indica el fabricante (TBO) hace más segura la operación.

La evidencia

En aviación, solo 11% de los componentes envejecía. En minería, cerca de la mitad muestra desgaste claro, pero su vida varía hasta nueve veces entre faenas y cae hasta 61% después de una reparación.

El riesgo

Un TBO copiado del fabricante y aplicado igual a nuevos y reparados no protege: deja que muchas fallas ocurran antes del cambio y, en componentes sin desgaste, puede aumentarlas.

La respuesta

Reservar el TBO de seguridad para los pocos componentes críticos que envejecen. Tratar el resto como decisión económica, calibrada con datos propios y distinta para nuevos y reparados.

Una rueda motorizada falla a 3.000 horas de su cambio programado. En la reunión del día siguiente, alguien propone lo que parece más responsable: bajar el TBO «por seguridad». Nadie se opone. Nadie pregunta qué modo de falla se quiere evitar, ni si la falla tenía algo que ver con la edad del componente. El nuevo intervalo queda en el plan, el costo anual sube, y la sensación de control también.

La escena se repite en muchas faenas, y detrás de ella hay una idea tan extendida que pocos la cuestionan: cada componente tiene una vida, y cambiarlo antes de que se cumpla hace la operación más segura. Es una idea intuitiva, y en parte cierta: muchos componentes mineros sí envejecen. Pero la relación entre el calendario de cambios y la seguridad es mucho más estrecha de lo que se cree, y confundirla tiene costos, algunos de ellos de seguridad.

Este artículo explora cómo se relaciona, de verdad, el TBO (*time between overhauls*, el intervalo fijo entre reparaciones mayores) con la seguridad. Debo empezar con una precisión personal. En mi libro *Reemplazo de componentes: ¿cuándo es el momento?*, de 2023, escribí que el fabricante establece el TBO para garantizar la seguridad y prevenir accidentes. Los datos que reuní en ese mismo libro me obligan a precisarlo: el TBO protege la seguridad solo en un caso acotado, y en la mayoría de los demás responde al costo, a la logística o a la costumbre.

Cuadernos de mantenimiento y confiabilidad ·

N.º 1. La trampa del TBO (este número): cuándo intervenir por tiempo.

N.º 2. El monitoreo que no avisa: cuándo intervenir por condición.

N.º 3. La máquina sabe quién administra el contrato: qué se pierde cuando cambia la organización.

N.º 4. Dos gigantes, dos lógicas: por qué cada industria decide distinto.

N.º 5. Lo que la IA nunca hará en mantenimiento mina: quién responde por la decisión.

Caso aplicado: «Cómo bajar más de 30% el costo por hora de los neumáticos mineros».

De dónde viene la intuición, y quién la desmintió

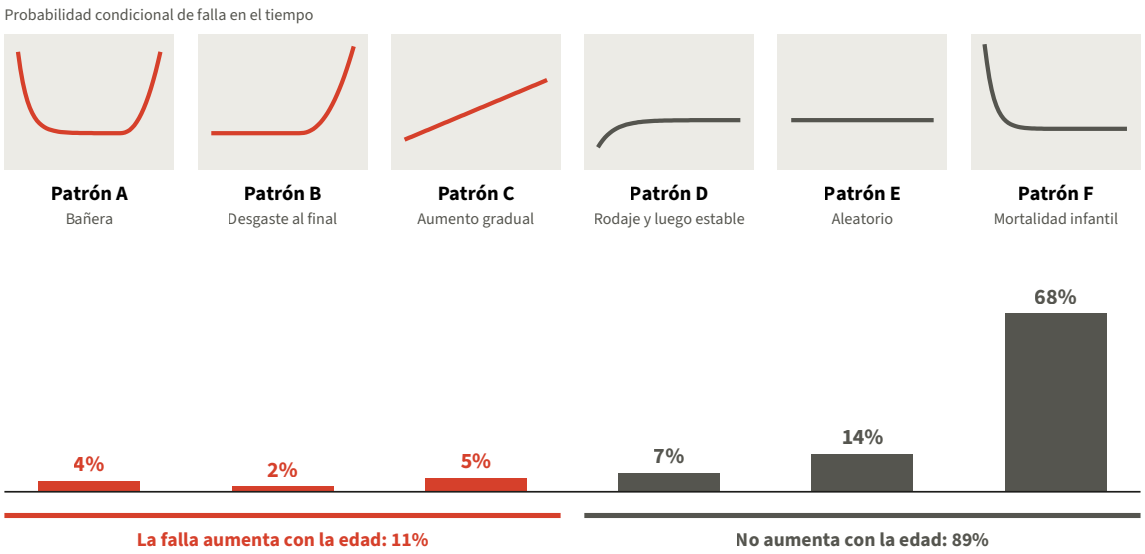
Hasta los años sesenta, la aviación comercial mantenía sus aviones con la lógica que hoy defienden muchos mantenedores: todo componente se desarma y repara cada cierto número de horas. Los estudios que la industria hizo entonces, formalizados en 1978 por Nowlan y Heap, de United Airlines, concluyeron que el overhaul programado tiene poco o ningún efecto sobre la confiabilidad de un componente complejo, salvo que tenga un modo de falla dominante relacionado con la edad. De ahí nació el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), cuya historia y diferencias con la minería desarrollé en «Dos gigantes, dos lógicas».

Los seis patrones de falla

El hallazgo central se resume en seis formas que puede tomar la probabilidad de falla de un componente a lo largo de su vida (vea el gráfico «Los seis patrones de falla»). En tres de ellas (A, B y C) la probabilidad de falla aumenta con la edad; en las otras tres (D, E y F), no. En los componentes que analizaron Nowlan y Heap, los tres primeros patrones sumaban apenas 11%. El patrón más frecuente, con 68%, era el F: una alta probabilidad de falla al comienzo, que luego cae y se mantiene estable.

Los seis patrones de falla

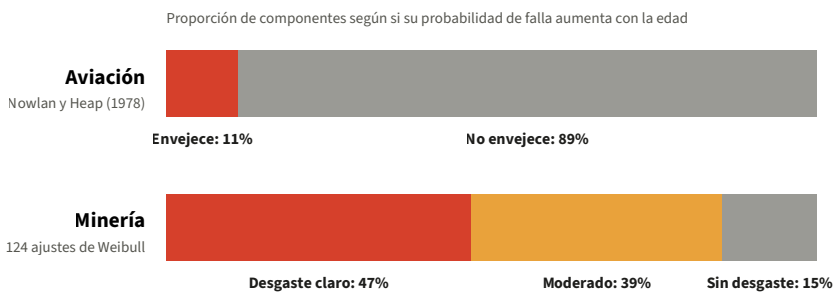
Distribución de los componentes de aviones de United Airlines según cómo cambia su probabilidad de falla con la edad.



Fuente: F. S. Nowlan y H. F. Heap, *Reliability-Centered Maintenance*, United Airlines, 1978. Las curvas son esquemáticas.

Aviación y minería

Proporción de componentes cuya probabilidad de falla aumenta con la edad, en aviación y en equipos mineros.



Fuentes: Nowlan y Heap (1978); 124 ajustes de Weibull de componentes mineros recopilados en Barrientos Boccardo (2023), clasificados por el autor según el parámetro de forma: $\beta \geq 2$, desgaste claro; entre 1,05 y 2, moderado; menor que 1,05, sin desgaste.

La minería, sin embargo, no es la aviación de los años sesenta. En mi libro reuní 124 ajustes de Weibull de componentes de equipos mineros, publicados en estudios de Chile, Perú, Colombia, Argenti-

na, Australia, Indonesia, Irán y Estados Unidos. El resultado matiza el hallazgo de Nowlan y Heap: 47% de esos componentes muestra un desgaste claro con la edad, 39% un desgaste débil o moderado, y solo 15% ninguno (vea el gráfico «Aviación y minería»). Motores, transmisiones y mandos finales, el corazón del tren de potencia, envejecen.

Estas cifras deben leerse con cautela: son estudios publicados, con datos de calidad variable, que a menudo mezclan remociones preventivas con fallas. Pero el mensaje es claro. En minería, muchos TBO tienen fundamento técnico. La trampa está en otra parte: en cómo se fijan, en a qué componentes se aplican y en cómo se justifican.

En lenguaje estadístico, la forma de la curva se resume en el parámetro β de la distribución de Weibull. Si β es menor que 1, las fallas se concentran al comienzo; si es cercano a 1, ocurren al azar; si es mayor que 1, aumentan con la edad. Un TBO solo puede reducir fallas en el último caso, y su beneficio es pequeño cuando β apenas supera 1.

Por qué un TBO mal aplicado puede empeorar la seguridad

Si un componente no se desgasta con la edad (la gran mayoría en aviación y cerca de uno de cada siete en minería), cambiarlo a horas fijas no reduce sus fallas. Pero el problema no termina ahí. Hay al menos cuatro mecanismos por los que un TBO mal aplicado puede aumentar el riesgo.

Reinicia la mortalidad infantil. En un componente con patrón F, que es el más frecuente, cada overhaul devuelve la pieza a su etapa de mayor riesgo. Un TBO convierte un riesgo bajo y estable en una sierra de picos repetidos (vea el gráfico «El efecto sierra»).

El efecto sierra

En un componente con mortalidad infantil (patrón F), el TBO multiplica los períodos de mayor riesgo.

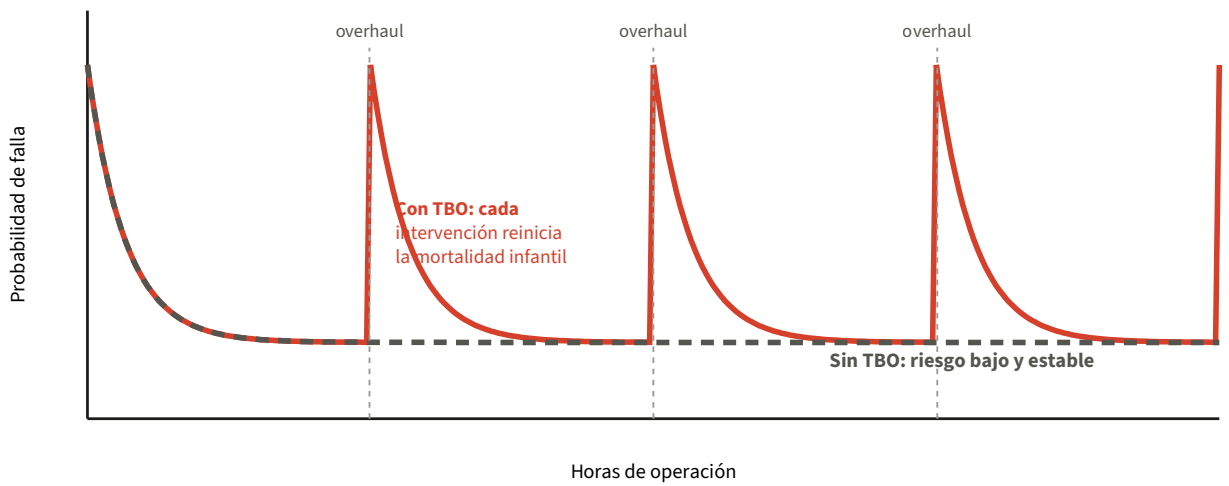


Gráfico conceptual elaborado por el autor a partir de la lógica de Nowlan y Heap (1978); no representa datos medidos.

Cada intervención es una oportunidad de error. Desarmar y volver a armar introduce fallas que no existían: un sello mal instalado, un torque fuera de rango, una conexión olvidada. James Reason y Alan Hobbs dedicaron un libro entero a los errores de mantenimiento, y su conclusión es incómoda: una parte relevante de las fallas que ocurren después de un mantenimiento fue causada por el propio mantenimiento. Dos accidentes lo ilustran. En Piper Alpha (1988), una válvula de seguridad retirada durante una mantención y un permiso de trabajo que no llegó al turno siguiente iniciaron el de-

sastre que mató a 167 personas. En el vuelo 610 de Lion Air (2018), el sensor de ángulo de ataque se había reemplazado el día anterior y quedó mal calibrado.

Consume la atención que necesitan los componentes realmente críticos. Las horas de taller, de planificación y de supervisión son limitadas. Cada overhaul innecesario es tiempo que no se dedica a inspeccionar frenos, dirección o estructura.

Produce una falsa sensación de seguridad. Un componente «dentro de su TBO» parece seguro, y esa percepción reduce la vigilancia sobre su condición real. El calendario reemplaza a la observación.

> «Un TBO no protege un componente que no envejece. Solo lo devuelve, una y otra vez, a su momento de mayor riesgo.»

Dónde el TBO sí se une con la seguridad

Nada de esto significa que el TBO no tenga lugar. Lo tiene, y muy importante, cuando se cumplen tres condiciones a la vez, las mismas que exige la lógica RCM: la probabilidad de falla aumenta claramente a partir de cierta edad; casi todas las unidades llegan a esa edad sin fallar; y la intervención devuelve al componente su resistencia original. Si además la falla puede herir a alguien, el TBO deja de ser una opción económica y se vuelve un límite obligatorio.

La tercera condición es la que menos se cumple en minería. En los mandos finales de camiones Caterpillar 777D que estudié en 2011, un componente nuevo tenía una vida media de 18.454 horas y un desgaste muy definido ($\beta = 6{,}84$). Reparado, su vida media cayó a 7.201 horas (−61%) y su desgaste se volvió mucho menos predecible ($\beta = 1{,}73$). En motores de camiones de 290 toneladas, los datos de Reveco que recopilé en el libro muestran que β cae de 6,26 en el primer ciclo a 3,30 en el segundo, con una vida media 20% menor (vea el gráfico «Nuevo no es igual a reparado»).

Un componente reparado no solo dura menos: se vuelve menos predecible, y el TBO pierde sentido justo cuando la falla deja de seguir al calendario. Brown y Proschan explicaron por qué una reparación perfecta es casi imposible: se evalúa mal el estado del componente, se reparan las partes equivocadas o solo algunas, o se dañan piezas vecinas en el proceso. La consecuencia práctica es directa: debería existir, al menos, un TBO para componentes nuevos y otro, más corto, para reparados.

La aviación usa exactamente esa lógica. Los discos de las turbinas, por ejemplo, tienen una vida máxima en ciclos y se retiran al cumplirla aunque luzcan perfectos, porque su falla es catastrófica y su desgaste por fatiga es predecible. Pero son la excepción, no la regla: el resto del avión se mantiene principalmente por condición.

Donde el TBO sí salva vidas

Discos de turbina. Tienen una vida máxima en ciclos porque su ruptura es catastrófica. El accidente del vuelo 232 de United en Sioux City (1989), en que murieron 111 personas, se originó en una grieta por fatiga que creció desde un defecto del material de un disco del ventilador, y llevó a reforzar la inspección de estos discos.

Estructuras sometidas a fatiga. Los accidentes del De Havilland Comet en 1954 revelaron la fatiga del metal en fuselajes presurizados y dieron origen a los ensayos de fatiga y a los límites de vida estructural modernos.

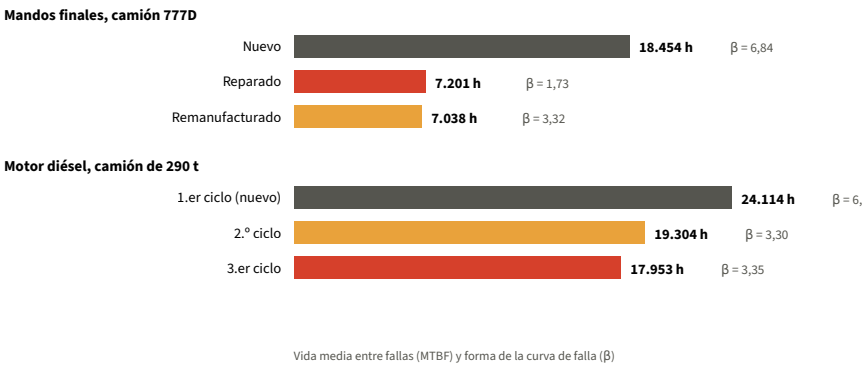
Lo común: falla catastrófica, desgaste predecible y difícil de detectar a tiempo.

La relación entre TBO y seguridad, entonces, depende de dos preguntas: qué arriesga la falla y si la falla aumenta con la edad (vea el gráfico «Cuándo el TBO protege»). Solo en una de las cuatro combinaciones el TBO es la respuesta de seguridad. Para cada componente, la decisión se reduce a tres preguntas (vea el gráfico «Árbol de decisión del TBO»).

Para los TBO económicos existe un método: el modelo de costo por unidad de tiempo de Jardine y Tsang, que busca el intervalo que minimiza el costo total. En el caso del motor de 290 toneladas que desarrollé en el libro, el costo mínimo se alcanzaba con un reemplazo a las 20.000 horas, pero la disponibilidad máxima estaba entre 14.000 y 19.000. Y según cuánto costara y cuánto demorara una detención imprevista, el intervalo óptimo iba de 31.000 a 20.000 horas. El TBO correcto depende del objetivo y de la economía de cada faena: es una decisión de gestión, no una propiedad del componente.

Nuevo no es igual a reparado

Vida media y forma de la curva de falla de componentes nuevos y reparados en camiones mineros.



Fuentes: mandos finales del 777D, Barrientos (2011); motor diésel de camión de 290 t, Reveco (2022); ambos recopilados en Barrientos Boccardo (2023).

Cuándo el TBO protege

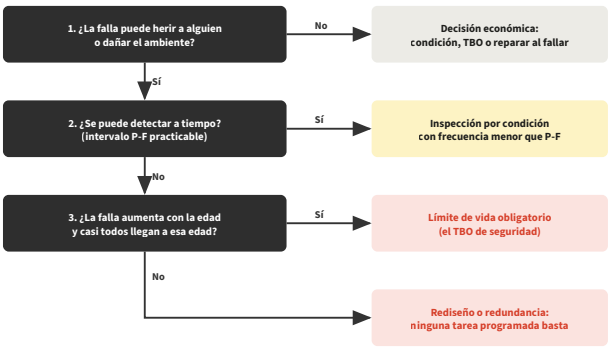
El TBO es una herramienta de seguridad en un solo cuadrante.



Elaboración del autor a partir de la lógica de decisión de Nowlan y Heap (1978) y la norma SAE JA1011.

Árbol de decisión del TBO

Tres preguntas para decidir si un componente necesita un TBO de seguridad, una inspección por condición o un rediseño.



Elaboración del autor a partir de la lógica de decisión de Nowlan y Heap (1978) y la norma SAE JA1011. Una versión interactiva acompaña la edición digital de este artículo.

Aplicado a un camión de extracción, el resultado es un mapa en que pocos componentes justifican un límite de vida por seguridad, y muchos justifican otra cosa (vea la tabla «Del TBO a la lógica de falla en un CAEX»). Un caso merece atención especial: el sistema contra incendios. Su falla no se ve hasta que se necesita, y por eso ni el TBO ni la inspección visual bastan. Requiere pruebas periódicas de funcionamiento, que la lógica RCM llama búsqueda de fallas ocultas. Lo mismo vale para los acumuladores de freno y dirección: algunas tablas de fabricantes les asignan un TBO (30.000 horas en una tabla publicada para el Komatsu 930E), pero un acumulador que pierde su precarga entre cambios no avisa. El cambio programado ayuda; la prueba periódica es la que protege.

Cuando la seguridad sí exige un TBO: el riesgo de incendio

En un camión de extracción, el riesgo de incendio es el caso minero más claro de TBO de seguridad. Una falla catastrófica del motor o del turbo, o un flexible de combustible que se corta cerca de un punto caliente, puede iniciar un fuego con el operador a bordo. Y las mangueras envejecen con el calor sin que su deterioro interno se vea desde afuera.

En una operación con camiones arrendados con mantenimiento, la minera distinguió tres cosas. Tener motores de respaldo en bodega es un control de continuidad, no de prevención: acorta la detención, pero no evita la falla en faena. La vida del motor se mide mejor en combustible consumido que en horas, porque refleja la carga real de trabajo. Y superar el umbral no obliga a cambiar de inmediato: activa una evaluación documentada de condición (aceite, blow-by, presiones) y un cambio con fecha comprometida.

Dejó, además, una salida: si quien mantiene los equipos no fija un TBO, debe demostrar con una evaluación de riesgos y una memoria de confiabilidad que otra estrategia controla la falla, y asumir formalmente la responsabilidad.

Del TBO a la lógica de falla en un CAEX

Enfoque sugerido para componentes típicos de un camión de extracción.

Componente del CAEX	Si falla, ¿qué arriesga?	Enfoque que sugiere la lógica RCM
Frenos de servicio y estacionamiento	Vidas	Inspección por condición frecuente (desgaste, presiones) y pruebas funcionales; límites de desgaste obligatorios
Dirección y acumuladores	Vidas	Pruebas funcionales y de precarga; reemplazo por límite solo donde el desgaste por edad esté comprobado
Chasis y tolva	Vidas y costo	Ensayos no destructivos para detectar grietas, con intervalos ajustados al historial
Neumáticos	Vidas y costo	Por condición: presión, temperatura, cortes y banda de rodado
Sistema contra incendios	Vidas (función oculta)	Pruebas periódicas de funcionamiento: solo así se sabe si funcionará
Motor diésel	Producción y costo	Por condición (aceite, presiones, blow-by); overhaul cuando la condición o la economía lo indiquen
Rueda motorizada o transmisión	Producción y costo	Por condición (aceite, vibración, temperatura); TBO solo si conviene a la logística

Elaboración del autor. Ilustrativo: cada faena debe validar el enfoque con su propio historial de fallas y las recomendaciones del fabricante.

La alternativa a un TBO no es dejar el componente a su suerte, sino vigilar su condición. La mayoría de las fallas avisan antes de ocurrir: aparece una vibración, cambia el análisis de aceite, crece una grieta. El tiempo entre el momento en que la falla se vuelve detectable (P) y el momento en que ocurre (F) se llama intervalo P-F. Si se inspecciona con una frecuencia menor que ese intervalo, la falla se detecta a tiempo, sin importar la edad del componente (vea el gráfico «La curva P-F»).

Nota metodológica

Los seis patrones provienen de Nowlan y Heap (1978). Los 124 ajustes de Weibull mineros son los registros únicos del Anexo A de Barrientos Boccardo (2023), que contiene 125 (uno duplicado); su clasificación y el ajuste de los alternadores del 994F ($\beta \approx 1{,}1$, por máxima verosimilitud) son cálculos del autor. El estudio de Pascual y coautores no identifica públicamente el componente del 930E-3. El recuadro sobre el riesgo de incendio describe un caso real, anonimizado. La escena inicial, «El efecto sierra», «La curva P-F» y «Cuándo el TBO protege» son ilustrativos.

Señales de que su TBO protege al auditor y no al operador

Nadie puede decir qué modo de falla previene cada intervalo.

El TBO se copió del fabricante o de otra faena, sin contrastarlo con el historial propio.

El intervalo se acorta después de cada falla grave, sin análisis de causa raíz.

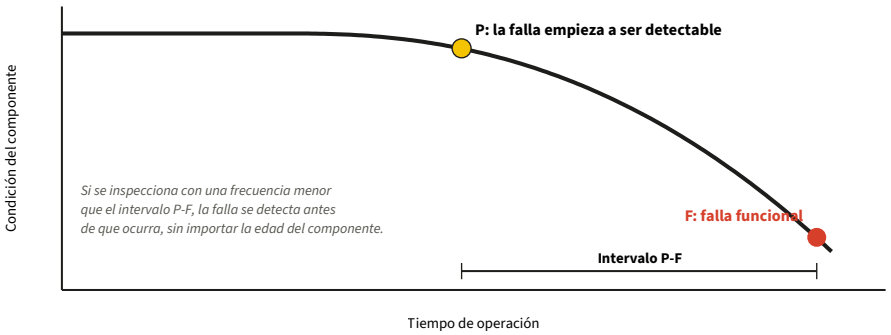
Las fallas en las primeras horas después de un overhaul no se registran por separado.

Se mide el cumplimiento del programa, no las fallas que el programa evitó.

Los componentes llegan al TBO en buen estado y se cambian igual, sin inspección.

La curva P-F

La mayoría de las fallas avisa antes de ocurrir. Lo que importa es inspeccionar dentro de ese aviso.



Esquema conceptual basado en Moubray (1997).

El TBO del fabricante: un promedio que no es su faena

El TBO que recomienda el fabricante tiene un origen que conviene recordar: resume la experiencia de muchas operaciones, en condiciones muy distintas. Un mismo motor trabaja a nivel del mar y a más de 4.000 metros, con pistas cuidadas o con pendientes fuertes, con cargas al límite o holgadas, con operadores y talleres de calidad muy diferente. El número que llega al manual es una referencia: en el mejor caso, un promedio de esas operaciones.

Usar un promedio como límite tiene un problema aritmético. Si la vida de un componente sigue una distribución de Weibull con desgaste moderado ($\beta = 2$), cerca del 54% de las unidades falla antes de alcanzar la vida promedio. Incluso con un desgaste pronunciado ($\beta = 3{,}5$), la proporción ronda el 50%. Un TBO fijado en el promedio no evita las fallas: deja que alrededor de la mitad ocurra antes del cambio. Sam Savage llamó a este error la falacia del promedio: los planes construidos sobre condiciones promedio fallan, en promedio.

Los datos mineros confirman esa dispersión. Pascual, Muñoz y Sánchez estudiaron en 2013 un componente de alto valor del camión Komatsu 930E-3: frente a una sugerencia del fabricante de 52.000 horas, el intervalo adecuado bajaba a 42.000 horas trabajando subiendo cargado (−19%) y a 26.000 horas sobre los 4.000 metros de altura (−50%). Y en los estudios que recopilé, la vida característica del motor diésel va de 4.666 a 43.042 horas según el equipo y la operación, y su forma (β) va de 0,65, sin desgaste, a 4,97, con desgaste marcado (vea el gráfico «Un componente, muchas faenas»). Con esa dispersión, un único TBO de manual llega tarde en una faena y temprano en otra.

Cinco preguntas para el fabricante sobre su TBO

¿Qué representa el número? ¿Un promedio, un mínimo o un valor conservador? ¿Cuánta dispersión tiene?

¿De dónde vienen los datos? ¿De qué operaciones, y en qué condiciones de altura, carga y pistas?

¿Qué modo de falla limita la vida? Sin esa respuesta, el TBO no se puede evaluar.

¿Hay una señal que avise? ¿Qué variable de condición anticipa ese modo de falla, y con cuánta anticipación?

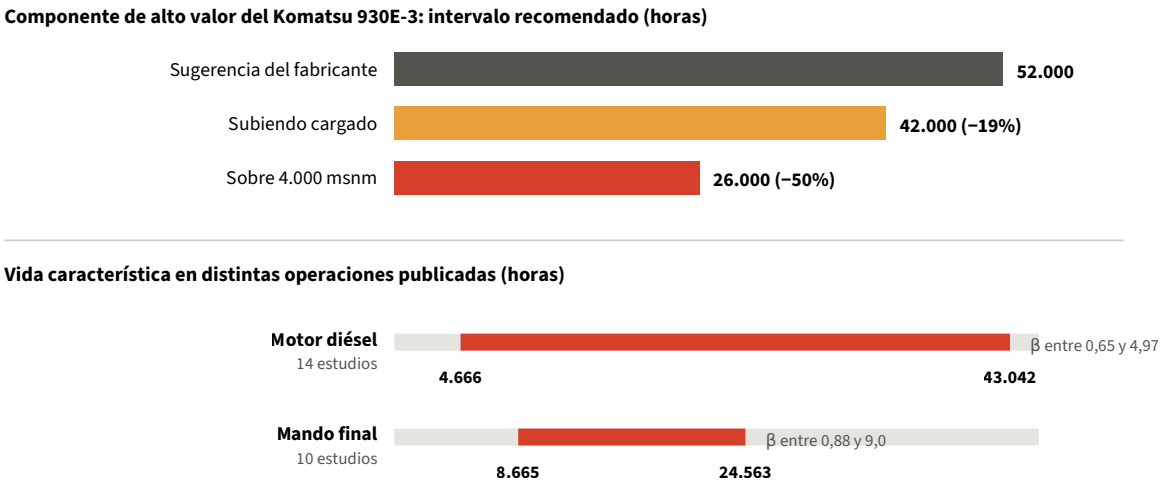
¿Cómo se ajusta a mi faena? ¿Qué cambia si la operación es más severa o más benigna que el promedio?

También conviene mirar los incentivos, sin sospecha pero con claridad. El fabricante vende los componentes de recambio y, muchas veces, el servicio para cambiarlos. Eso no significa que sus intervalos estén inflados, pero sí que la faena necesita sus propios datos para validarlos. En los contratos de arriendo con mantenimiento, los incentivos se cruzan todavía más: al dueño del camión, que lo mantiene, le conviene estirar la vida de los componentes, mientras la minera que lo opera carga con

las consecuencias de una falla. Ahí el TBO deja de ser solo una decisión técnica y pasa a ser también un instrumento contractual para definir quién responde.

Un componente, muchas faenas

El intervalo adecuado y la vida de un mismo componente cambian con las condiciones de cada operación.



Fuentes: Pascual, Muñoz y Sánchez (2013); ajustes de Weibull de motores diésel y mandos finales recopilados en Barrientos Boccardo (2023).

La aviación resolvió este problema con lo que Nowlan y Heap llamaron exploración de edad: el programa inicial parte con intervalos prudentes y, a medida que se inspeccionan las unidades retiradas, los intervalos se alargan o se acortan según lo que muestran los datos. El TBO inicial es una hipótesis, no una verdad.

El caso de los alternadores

En los cargadores Caterpillar 994F de una faena del norte chico, los alternadores se reemplazaron siempre a la falla durante nueve años: 25 cambios, con una vida promedio de 8.112 horas.

¿Qué habría pasado con un TBO de 12.000 horas? Diecisiete de las 25 fallas (68%) habrían ocurrido igual, antes del cambio, con una vida promedio de apenas 4.463 horas.

Ajustando una curva de Weibull a esos datos, β resulta cercano a 1,1: la falla es prácticamente aleatoria. Un TBO no habría evitado casi nada; solo habría retirado alternadores sanos. Lo mismo vale para la seguridad: en un componente eléctrico que falla al azar, la protección no viene del calendario, sino de inspeccionar cables y terminales, la termografía, las protecciones eléctricas y la supresión de incendios.

Por qué la trampa es tan difícil de ver

¿Por qué tantos profesionales siguen asociando TBO con seguridad? La respuesta está menos en la ingeniería que en cómo decidimos.

La ilusión de control. Ellen Langer mostró que las personas sobreestiman su influencia sobre resultados que en buena parte dependen del azar. Un calendario de cambios da la sensación de dominar un fenómeno que, para muchos componentes, es en

buena parte aleatorio, y que aun en los que envejecen varía mucho de una faena a otra.

El sesgo de omisión. Ilana Ritov y Jonathan Baron documentaron que juzgamos peor un daño causado por no actuar que uno causado por actuar. Si un componente falla sin haberse cambiado, alguien «no hizo algo»; si falla después de un overhaul, se hizo lo que correspondía. El TBO protege a quien decide, aunque no proteja al equipo.

El sesgo retrospectivo. Baruch Fischhoff mostró que, una vez conocido un resultado, lo creemos más predecible de lo que era. Después de una falla «era obvio» que había que cambiar antes, y el TBO se acorta por una lección que los datos no respaldan.

La aversión a la pérdida. Kahneman y Tversky documentaron que las pérdidas pesan más que las ganancias equivalentes. Perder un componente por falla duele más que perder la vida remanente de uno retirado sano, aunque esto último cueste más.

La rendición de cuentas. Philip Tetlock mostró que, cuando hay que justificar decisiones ante otros, se tiende a elegir la opción más fácil de defender. Desarrollé estos sesgos en el mantenimiento en *El cerebro del mantenedor* (2020).

Lo auditable gana a lo efectivo. Un TBO cumplido se demuestra con una planilla. Una inspección por condición bien hecha exige criterio, datos y explicaciones. En una auditoría, lo primero luce mejor.

Cómo salir de la trampa

Ponga nombre a cada TBO. Para cada intervalo, escriba qué modo de falla previene y qué consecuencia evita. Si no se puede escribir, el TBO no es de seguridad.

Separe los TBO de seguridad de los económicos. Los primeros son límites obligatorios y se respetan sin excepción. Los segundos son decisiones de costo, logística y presupuesto, y se revisan cuando cambian los datos.

Trate el TBO del fabricante como punto de partida. Úselo en el primer ciclo y ajústelo con los datos de su faena: inspeccione los componentes retirados, segmente por condición de operación y alargue o acorte el intervalo según lo que encuentre.

Mida la vida en la unidad que refleja el desgaste. Las horas son cómodas, pero no distinguen un motor que sube cargado a gran altura de uno que trabaja en plano. El combustible consumido, las toneladas movidas o los ciclos de carga reflejan mejor la severidad de cada faena; la aviación, por ejemplo, mide la fatiga estructural en ciclos.

Separe el TBO de nuevos y de reparados. Un componente reparado dura menos y es menos predecible. Asignarle el mismo intervalo que a uno nuevo es suponer una reparación perfecta que no existe.

Calcule los TBO económicos, no los copie. Use el modelo de costo por unidad de tiempo con sus costos de detención, y defina si el objetivo es costo o disponibilidad: el intervalo óptimo cambia.

Use sus propios datos. Analice las remociones con Weibull; con pocas fallas, el método WeiBayes que describe Abernethy permite estimar desde muestras pequeñas. Para eso necesita códigos de falla limpios y consistentes; la norma ISO 14224 es una buena guía para ordenarlos.

Mida la mortalidad infantil. Lleve un indicador de fallas en las primeras horas después de cada overhaul. Si es alto, el problema no es el intervalo: es la intervención.

Cuando un TBO sea de planificación, dígalo. Programar cambios para ordenar el taller, las compras o el presupuesto es legítimo. El problema es justificarlo con la seguridad.

Esta evidencia tiene un límite que conviene reconocer: falta un estudio que compare, faena por faena, el TBO del fabricante, el intervalo realmente aplicado, las fallas ocurridas antes del cambio y los costos. Es la siguiente pregunta que esta línea de trabajo debe responder.

El TBO no es el enemigo. Es una herramienta poderosa cuando se aplica donde corresponde: a componentes que envejecen y cuya falla puede herir a alguien. La trampa está en extenderlo a todo en nombre de la seguridad, cuando para la mayoría de los componentes es una decisión de costo que debe calibrarse con los datos de cada faena.

La próxima vez que alguien proponga bajar un TBO «por seguridad», la pregunta correcta no es cuántas horas, sino qué falla, cómo avisa y si envejece. Ahí empieza la seguridad. ■

Victor Barrientos Boccardo *es ingeniero civil mecánico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con más de veinte años en mantenimiento y confiabilidad de equipos mineros en empresas mineras en Chile. Es fundador de INVICTUM SpA, consultora en confiabilidad y mantenimiento minero, y autor de seis libros sobre mantenimiento de equipos mineros, cognición del mantenedor, sesgos cognitivos y estrategia de reemplazo de flotas.*

Referencias. Abernethy, R. B. (2006), *The New Weibull Handbook*, 5.ª ed. · Barrientos, V. (2011), «Estrategia de cambio de mandos finales en camiones de 100 toneladas», 8.º Encuentro Internacional de Mantenedores de Equipos Mina, Mantemin. · Barrientos Boccardo, V. (2023), *Reemplazo de componentes: ¿cuándo es el momento?*, Invictum SpA. · Barrientos, V. (2020), *El cerebro del mantenedor: cómo los sesgos cognitivos afectan sus decisiones en mantenimiento*, Amazon. · Brown, M. y Proschan, F. (1982), *Imperfect Maintenance*, City University of New York y Florida State University. · Cullen, W. D. (1990), *The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster*, HMSO. · Fischhoff, B. (1975), «Hindsight ≠ Foresight: The Effect of Outcome Knowledge on Judgment under Uncertainty», *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 1(3). · ISO (2016), *ISO 14224: Reliability and Maintenance Data*. · Jardine, A. K. S. y Tsang, A. H. C. (2013), *Maintenance, Replacement, and Reliability*, 2.ª ed., CRC Press. · Jiang, N. (2010), *Simulation Model on the Maintenance of Mining Equipment*, Universidad de Toronto. · Kahneman, D. y Tversky, A. (1979), «Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk», *Econometrica* 47(2). · KNKT (2019), *Final Aircraft Accident Investigation Report: PT. Lion Mentari Airlines, Boeing 737-8 (MAX), PK-LQP*, Comité Nacional de Seguridad del Transporte de Indonesia. · Langer, E. J. (1975), «The Illusion of Control», *Journal of Personality and Social Psychology* 32(2). · Moubray, J. (1997), *Reliability-Centred Maintenance*, 2.ª ed., Industrial Press. · Nowlan, F. S. y Heap, H. F. (1978), *Reliability-Centered Maintenance*, United Airlines y Departamento de Defensa de EE.UU. · Pascual, R., Muñoz, M. y Sánchez, F. (2013), «Efecto de factores de riesgo local en la vida de los componentes», *Journal de Investigaciones de Pregrado* 3, Pontificia Universidad Católica de Chile. · Reason, J. y Hobbs, A. (2003), *Managing Maintenance Error: A Practical Guide*, Ashgate. · Reveco (2022), datos de motores diésel de camiones de 290 t, recopilados en Barrientos Boccardo (2023). · NTSB (1990), *Aircraft Accident Report: United Airlines Flight 232*, NTSB/AAR-90/06. · Ritov, I. y Baron, J. (1990), «Reluctance to Vaccinate: Omission Bias and Ambiguity», *Journal of Behavioral Decision Making* 3(4). · Savage, S. L. (2009), *The Flaw of Averages: Why We Underestimate Risk in the Face of Uncertainty*, Wiley. · SAE International (2009), *JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. · Tetlock, P. E. (1985), «Accountability: The Neglected Social Context of Judgment and Choice», *Research in Organizational Behavior* 7. · Weibull, W. (1951), «A Statistical Distribution Function of Wide Applicability», *Journal of Applied Mechanics* 18.