

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MINAS

Capítulo 8: Técnicas de Mantenimiento Predictivo

Carlos Sierra Fernández

Ingeniero de minas

Profesor Ayudante Doctor

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

Emilio Andrea Calvo

Ingeniero industrial

Profesor Asociado

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

ÍNDICE

Capítulo 8: Técnicas de Mantenimiento Predictivo.....	1
Capítulo 8: Técnicas de mantenimiento predictivo	3
8. Mantenimiento predictivo: técnicas de aplicación.....	4
8.1 Análisis de vibraciones	10
8.2 Análisis de lubricantes.....	16
8.3 Análisis por ultrasonidos.....	22
8.4 Termografía.....	23
8.5 Análisis eléctrico.....	27
Referencias.....	28
Bibliografía.....	29

CAPÍTULO 8: TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

“A lack of realism in the vision today costs credibility tomorrow”.

--John C. Maxwell

Emilio Andrea Calvo

Carlos Sierra Fernández

8. MANTENIMIENTO PREDICTIVO: TÉCNICAS DE APLICACIÓN

El mundo globalizado ha modificado la industria con grandes e innovadores diseños ingenieriles que fuerzan la interacción entre disciplinas ingenieriles. Este hecho ha propiciado que en el contexto actual se hable de dos tipos de mantenimiento: preventivo y predictivo.

El concepto de **mantenimiento preventivo** se fundamenta en la premisa siguiente: *El daño por una rotura imprevista en determinados equipos o instalaciones de una fábrica, es muy superior al problema causado por un paro programado durante un tiempo y a intervalos conocidos*¹. El mantenimiento preventivo utiliza, por tanto, con limitación las modernas técnicas para la monitorización de equipos y prácticamente no muestra interés en estimar los fallos futuros de los mismos.

El **mantenimiento predictivo**, por el contrario, pretende calcular y adelantarse al fallo con el auxilio de herramientas adecuadas de medición, control, estimación, evaluación o de los modelos matemáticos adecuados de previsión. Este sistema intenta que la pieza a punto de fallar pueda reemplazarse con anterioridad al fallo, con lo que los tiempos muertos o de parada se hagan menores, la vida útil del equipo se alargue y el coste medio del mantenimiento se minimice. La realización de mantenimiento predictivo no es barata, exige conocimientos técnicos de cierta complejidad, depende de la importancia del equipo dentro del proceso y de los daños que una avería imprevista puede ocasionar.

Por control o monitorización, se entendía en sus inicios, la medición de una variable física que fuera representativa de la condición de la máquina, y su comparación con

¹ Un ejemplo de comprensión cercano, es la rotura de la correa de distribución de un motor. La correa es el elemento que acciona, a través del eje de balancines y los empujadores, los desplazamientos de las válvulas en relación a las necesidades del cilindro para generar compresión o descarga. Mientas que su reparación programada puede llevar una o dos horas y un coste limitado (p.e. de 200€), la rotura en funcionamiento puede llevar a la rotura de algunas válvulas, además de exigir rectificar guías y puede ser que algún cilindro. Aún peor, si se mantiene el funcionamiento algunas vueltas de motor, por la inercia del sistema, la avería puede obligar al replazo de parte o la totalidad del mismo. El coste en este caso de rotura supone más de 10 veces el de la avería por sustitución simple, incrementando además el tiempo de parada de forma importante.

valores que indicaban si la máquina estaba en buen estado. Con la automatización actual de estas técnicas, se ha extendido la acepción al control, adquisición de información, procesamiento y almacenamiento de los datos operacionales.

El mantenimiento predictivo pretende establecer una relación entre la variable seleccionada y la vida del componente². Esto es posible mediante toma de lecturas, realizadas a intervalos periódicos hasta que el componente causa avería. Esta manera de proceder supone la medición de los parámetros que guarden relación con el ciclo de vida del equipo o componente. Ejemplos de dichos parámetros o de variables medibles pueden ser:

- Vibraciones de los cojinetes.
- Temperatura de las conexiones eléctricas.
- Resistencia de los aislamientos en bobinas de motores.
- Desgaste de ejes o rodillos.
- Modificación de la composición externa de un elemento (oxidación, corrosión, rugosidad).
- Aumento desproporcionado del consumo, en carga o funcionamiento normal, como indicio de anomalías internas.
- En general, variables, aspectos o situaciones que pueden dar origen a previsiones de fallo.

La figura 8.1 muestra la curva típica obtenida al representar la variable de velocidad de vibración en función del tiempo. Como sugiere la misma, deberán reemplazarse los cojinetes cuando la vibración supere un valor previo establecido (ej.: 30 mm/s) a partir del cual el fallo es muy probable.

Los fabricantes de instrumentos de medida y de software de control para el mantenimiento predictivo pueden aportar recomendaciones y rangos de valores para reemplazar los componentes de la mayoría de los equipos de acuerdo a estas mediciones. Esta información de catálogo o de fabricante no sustituye el análisis histórico que aporta lo específico de la industria: ubicación (en zonas muy cálidas se calientan los motores, en zonas muy frías no trabajan bien algunos lubricantes, etc.), personal que lo maneja, ciclos

² Con la denominación “vida del componente” bajo el concepto de mantenimiento predictivo, nos referimos tanto a su final como elemento útil de producción, como a la aparición de una avería imprevista y no deseada que evidentemente causa un daño mucho mayor que una parada programada.

por programación del trabajo, número de arranque y paradas (bombas de gran presión, turbinas...), que notablemente pueden modificar los valores recomendados.

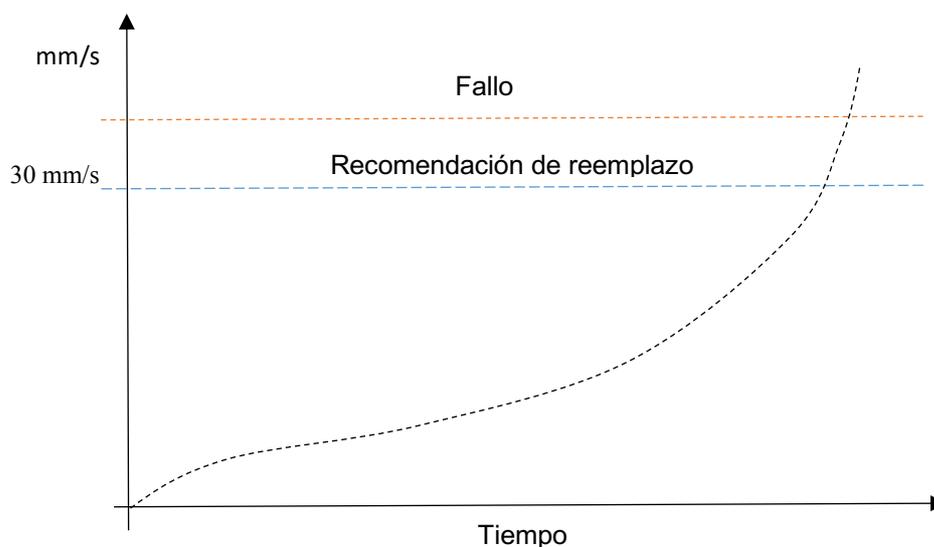


Figura 8.1 Nivel de vibración de un componente en función del tiempo como indicativo de su estado.

Teniendo en cuenta los objetivos que se pretende alcanzar con la monitorización, sobre la condición o trabajo de una máquina, hay que diferenciar entre:

- **Vigilancia:** El objetivo principal es inspeccionar y detectar cuándo existe una anomalía en el funcionamiento de una máquina. Debe distinguir entre condiciones normales e incorrectas, y en tal caso indicar su grado de severidad, o posible daño.
- **Protección:** Su objetivo base es evitar averías catastróficas: fallos que producen paradas o daños de alto coste y afectan en muchos casos a la seguridad. La instalación de sistemas de protección implica que cuando los valores de la variable de control salen fuera de los parámetros considerados seguros la máquina se pare automáticamente.
- **Diagnóstico y predicción:** Su objetivo es definir cuál es el problema específico en función de las variables controladas. Se pretende estimar el tiempo que podrá

funcionar la máquina en condiciones de dar un servicio correcto o probabilidad de tener una avería.

Para lograr la reducción de averías, resulta fundamental no solo contar con una estrategia de mantenimiento apropiada a la industria que conozca las características de diseño y de funcionamiento de sus equipos específicos; sino que además, es necesario tener personal formado para el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de averías.

Diagnosticados y solucionados los problemas, la vida de las máquinas y su producción aumentará y por tanto los costes relativos de mantenimiento disminuirán. Existen diversas técnicas que se aplican actualmente en el mantenimiento preventivo y predictivo entre las cuales exponemos en esta sección una selección de ellas por su utilización más generalizada (Tabla 8.1). Estas técnicas, requieren de una especialización que rebasa el contenido de este documento.

Tabla 8.1 Resumen de técnicas empleadas en el mantenimiento preventivo. Tomado de Kelly (1998).

Tipo	Método	(2)	Comentario	(1)
1. Visual	Ocular	L	Abarca una amplia gama, se inspeccionan superficies	1. s.e
	Sondas ópticas	FL	Puede ser utilizada para inspección interna de motores de aviación, turbinas de vapor, contenedores de productos químicos, tuberías y redes en general, etc.	2. e
	Sondas ópticas con televisión	FL		
	Robot con cámara	FL	Zonas poco accesibles, sin tener que desmontar, conductos de aire, atascos (manejo del equipo)	3. eg
2. Temperatura	Carbones y cintas térmicas	L	Principalmente temperatura de superficies para un margen de temperatura muy amplio	2. e
	Termómetros	L	Temperatura de superficie y de interior	2. e
	Termopares	L	Idem anterior	
	Medidor de infrarrojos	L	Se utilizan los infrarrojos para controlar la temperatura de la superficie del equipo, cubre un amplio margen pero con un área limitada	3. e.g
	Scanner de infrarrojos	L	Ídem anterior, pero con mayor cobertura de superficie. Proporciona gráficos y se calibra para medidas cuantitativas	3. e.g
3. Control de lubricación	Clavijas magnéticas, filtros	L	Análisis de residuos recogidos por las clavijas o filtros de sistemas lubricados por aceite. Detecta principalmente residuos de gran tamaño, de 10 a 100 micras.	3. e.g
	Ferrografía	L-FL	Instrumento para separar residuos de hierro según tamaño para permitir un examen al microscopio. También se pueden separar los residuos no ferrosos. Tiene opción de instrumento de lectura directa y con capacidad para analizar partículas de desecho comprendidas entre 3 y 100 micras	3. e.g
	Espectroscopia	L/FL	Análisis espectroscópico de muestras de aceite para determinar qué elementos se hallan presentes. Análisis de residuos pequeños, de 0 a 10 micras.	3. e.g

Tipo	Método	(2)	Comentario	(1)
4. Vibraciones	Cifra total	L	Facilita la cifra media de vibraciones procedentes de las máquinas alternativas o giratorias. Los problemas que puedan producirse en una frecuencia pueden quedar encubiertos por la cifra total de vibraciones	2.e
	Análisis de frecuencia	L	Registra y controla las vibraciones en una amplia gama de frecuencias (identificación). Puede detectar desequilibrios o problemas en los cojinetes de rodillos	4. m.e
	Control de impulsos de choque (SPM)	L	Utilizan señales de alta frecuencia para controlar los cojinetes de rodillos. Eficacia probada de los métodos SPM, que también puede utilizarse en la detección de fugas	2. e
5. Agrietamientos	Colorante, flujo magnético	L - FL	Detecta grietas en la superficie de rodamiento	2. e
	Resistencia eléctrica	L- FL	Detecta grietas de superficie y se puede utilizar para calcular la profundidad de la grieta	2. e
	Corrientes parásitas	L- FL	Detecta grietas próximas a la superficie, sirve para detectar imperfecciones y dureza, etc.	2. e
	Ultrasonidos	L- FL	Detecta grietas en cualquier parte de la pieza. Tiene sensibilidad direccional por lo que los análisis generales son prolongados. Se recomienda utilizar como apoyo de otras técnicas.	4.m.e
	Radiografía	L- FL	Detecta grietas en cualquier parte de la pieza. Sección y procedencia (acero). Se necesita acceder a ambos lados de la pieza. Emite radiación (precauciones)	4.m.e
6. Control de corrosión	Muestras con pérdida de peso	FL	Muestras pesadas cuando la planta está fuera de línea	1. s.e
	Medidor de corrosión	L	Elemento eléctrico, potenciómetro. Detecta pérdidas por corrosión de menos de 1 mm.	2. e
	Resistencia de polarización	L	Sólo detecta la corrosión. Sin especificar el alcance exacto de la misma	2. e

	Orificios del indicador de impulso	L	Indica la cantidad actual de corrosión que se ha producido	2. e
<p>(1) Corresponde al grado de especialización necesitado: 1 Sin especialidad (s.e), 2 Especialista genérico (e), 3 Grado de especialización (g.e), 4 Muy especialista (m.e)</p> <p>(2) Trabajo en línea (L), la revisión o verificación se puede realizar sin afectar, normalmente, al funcionamiento del equipo; y fuera de línea (FL) necesita o exige extraer la pieza, elemento o componente para ser observado fuera de la línea de trabajo.</p>				

8.1 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El estudio técnico-científico de las vibraciones mecánicas está relacionado con el mantenimiento predictivo, pues suministran alertas al ser indicativo de fallos presentes o posibles en el medio plazo. Un ejemplo cotidiano son las vibraciones y ruidos en los vehículos. Éstas pueden ser indicativo de muchos fallos, pero comúnmente de ruedas desequilibradas, problemas en la articulación de la dirección o en la transmisión si las vibraciones se sienten al cambiar de marcha.

Las vibraciones se pueden clasificar en:

- **Vibraciones libres:** Producidas por un sistema que vibra a causa de una fuerza que ya no actúa sobre él.
- **Vibraciones forzadas:** Generadas por un sistema que vibra debido a acciones exteriores que se mantienen a lo largo del tiempo. Estas vibraciones suelen estar relacionadas con las máquinas rotativas o con otras que presenten movimientos alternos sujeto a alguna regla de periodicidad.

Las vibraciones pueden causar:

- Aumento de esfuerzos y tensiones.
- Deformaciones superiores al margen elástico (límite de recuperación).
- Fatiga en los materiales.
- Desgaste.
- Pérdida de energía y mayor consumo energético.

- Ruidos molestos (que generan malas condiciones de seguridad e higiene).

Fundamentos físicos

Una vibración es el movimiento periódico de las partículas de un medio elástico en direcciones opuestas partiendo de un punto de equilibrio, cuando el equilibrio ha sido perturbado. Las principales variables técnicas de una vibración y su característica o interpretación al objeto de analizar las causas del daño que pueden producir se dan a continuación.

Frecuencia: Mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de un suceso periódico. Se puede expresar en función del periodo como: $f=1/T$. Sus unidades son los hercios (Hz) o ciclos por segundo. El valor de la velocidad angular “ ω ” en las funciones senoidales está relacionado con la frecuencia mediante la expresión $\omega=2\cdot\pi\cdot f = 2\cdot\pi/T$.

La frecuencia de una vibración es de gran importancia pues diferentes problemas producen distintas frecuencias, con lo que existe una relación causa efecto que ayuda a identificar los mismos.

Desplazamiento: Es la distancia total que describe la parte que vibra de un extremo al otro (de pico a pico). Se expresa como: $X=X_0\cdot\text{sen}(\omega t)$; X_0 y se mide en mm o μm . El desplazamiento, de acuerdo con la ley de Hook, es proporcional a la fuerza que actúa y debe ser tenido en cuenta en relación a la frecuencia en estudio. Este parámetro causa fallos por flexión y enfatiza las frecuencias bajas (<35 Hz).

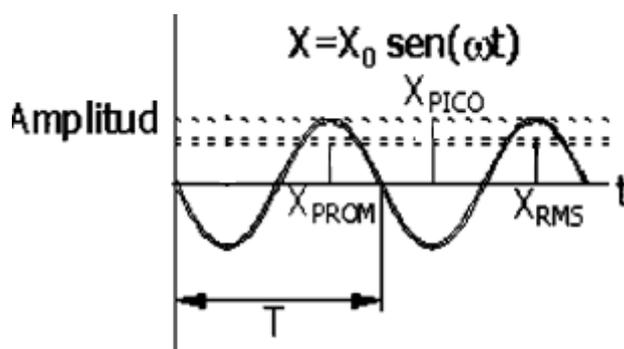


Figura 8.2 Principales parámetros de una onda sinusoidal.

Velocidad: Es una medida de la rapidez a la que un componente se mueve oscilatoriamente. Se expresa como: $V = dx/dt = \omega \cdot X_o \cdot \cos(\omega t)$ y sus unidades son los mm/s. La condición de derivada de la velocidad respecto al desplazamiento implica que éste se desplaza 90° respecto al mismo, así cuando el desplazamiento es nulo la velocidad es máxima y viceversa. Esta variable está relacionada con los fallos por fatiga.

Aceleración: Es la razón de cambio de velocidad respecto al tiempo. Se expresa como: $a = dv/dt = d^2x/dt^2 = \omega^2 \cdot X_o \cdot \sin(\omega t)$. Sus unidades son los mm/s² o en g-pico (g: aceleración de la gravedad). Está desfasada 90° respecto a la velocidad, es decir, donde la velocidad es cero, la aceleración es máxima. Se relaciona con las fuerzas donde el equipo tenderá a fallar por flexión o pandeo. Sus valores son más fiables para las altas frecuencias que para las bajas.

Algunos parámetros de importancia dentro de la representación sinusoidal son los que se indican a continuación:

Valor pico: Máxima amplitud alcanzada por la vibración. Variable: X_o .

Raíz media cuadrática (Inglés: Root Mean Square, RMS): Es una medida muy utilizada para determinar el comportamiento dinámico de un sistema. Deriva del cálculo de la desviación típica³ de una señal. Representa en electricidad alterna, el equivalente en potencia útil que daría una corriente continua, el cual es la mitad de la potencia máxima (calculada con V_{pico} y con I_{pico}). Su formulación, para un intervalo de tiempo T_o (periodo) corresponde a la expresión:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} X^2 \cdot dt}$$

Este valor para una onda senoidal toma el valor: $X_{RMS} = X_o / \text{raíz}(2) = 0,707 \cdot X_o$

Valor pico, $X_o = \text{raíz}(2) \cdot X_{RMS} = 1,414 \cdot X_{RMS}$

Este parámetro está muy relacionado con conceptos energéticos de la onda, representando la energía que es liberada por la oscilación como función de su amplitud.

³ La varianza de una función es una medida de su dispersión cuadrática en torno a la media de la función: $\sigma^2 = var = \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt = \overline{X^2} - \mu^2$. Si la componente estática de la señal es cero, $\mu=0$, entonces se tiene que solo es función de los valores cuadráticos de la señal y recibe el nombre de raíz media cuadrática.

Valor promedio: Es el valor medio de la señal en un intervalo de tiempo T_0 (periodo). Su expresión matemática es:

$$X_{\text{PROM}} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} X \cdot dt$$

Para una onda senoidal toma el valor cero en un ciclo por lo que se calcula para medio ciclo $X_{\text{PROM}} = 0,90 \cdot X_{\text{RMS}}$, con lo que: $X_{\text{RMS}} = 1,11 \cdot X_{\text{PROM}}$

Aplicaciones de la medición de vibraciones

El estudio de las vibraciones puede servir para detectar:

- **Estado general** de funcionamiento de máquinas en servicio.
- **Desequilibrios:** Descompensación de masas por desgaste irregular, material adherido del proceso, etc.
- **Desalineamientos:** Principalmente en máquinas rotativas cuando los apoyos (rodamientos o cojinetes) no están bien.
- **Defectos en rodamientos y/o cojinetes:** Son los elementos que soportan y permiten el giro a través del eje que apoya en ellos. Deben estar en condiciones correctas, la medida de su desgaste es a través del control de vibraciones en sus diferentes parámetros según el tipo de defecto a identificar.
- **Excentricidades:** Determinadas máquinas por su trabajo lo hacen de forma excéntrica, (p.e. cribas vibrantes en minería, amasadoras al desplazarse la carga, etc.). El funcionamiento como parte de su diseño es correcto, pero puede causar desgaste irregular y es lo que se debe controlar. Dicho de otro modo, las vibraciones forman parte de su trabajo, para eso están diseñadas, pero estas vibraciones deben estar en los límites previstos para no causar daños.
- **Defectos en correas, holguras:** En general todos aquellos elementos que facilitan el giro o pertenecen al mecanismo de giro pueden tener modificaciones a lo largo del tiempo y esto causa o puede causar vibraciones.
- **Defectos en engranajes:** El desgaste desigual al girar produce una descompensación de masas que se identifican con el estudio pertinente de vibraciones.
- **Cavitaciones:** Fenómeno propio de bombas y turbinas en el que se forma una capa de gas entre la turbina y el líquido. Perjudican el rendimiento del equipo, (p.e. no

den el caudal nominal) pero producen un efecto de destrucción del rodete que obliga a cambiarlo en periodos muy cortos si no se elimina la causa.

- **Fallos de lubricación:** La falta de lubricación hace que las piezas en movimiento tengan un rozamiento mucho mayor y se produzcan efectos de calor localizado que destruye, normalmente, la pieza más débil y daña igualmente la más fuerte. La lubricación, además de facilitar el desplazamiento por disminución muy notable de la energía de rozamiento, produce, normalmente, un efecto de refrigeración (p.e. el aceite de los coches que se refrigera en el cárter, elemento que facilita la transmisión de calor al aire y que puede estar diseñado con aletas para este fin.
- **Otros:** Como identificación de golpes en su primera etapa de aparición cuando fallan los límites del desplazamiento o se aflojan uniones, etc.

Dispositivos de medición

Los elementos encargados de capturar las variables de entrada que van a permitir el seguimiento de las máquinas son:

Sensores o sonda: Elemento en contacto físico con la magnitud a medir. Capta la magnitud física y se la suministra al transductor.

Transductor: Transforma la energía de vibración en energía eléctrica. Esta variable eléctrica es más fácilmente interpretable por el sistema.

Los transductores pueden ser de dos tipos: activos, si no necesitan alimentación eléctrica y pasivos, necesitan alimentación eléctrica. Ambos tipos se subclasifican además en función de la variable medida.

El tipo de transductor más empleado para la medición de vibraciones es el acelerómetro. De entre los que destaca el acelerómetro electrónico de efecto piezoeléctrico por compresión. Su funcionamiento se basa en la carga eléctrica generada al comprimir un retículo cristalino piezoeléctrico, la cual es proporcional a la fuerza aplicada.

Los acelerómetros electrónicos permiten medir la aceleración en las tres direcciones ortonormales del espacio. Es por ello de vital importancia la colocación correcta de los mismos. Estos dispositivos se instalan, normalmente, para medir en las tres direcciones del espacio, dos en un plano perpendicular al eje, horizontal (X) y vertical (Y), y uno en la

dirección del eje axial (Z). Algunas medidas y su interpretación depende de la posición del captador y la norma recomienda cómo y dónde posicionarlos.

En función de la posición y del tipo de máquina, Borda (1991), ofrece algunas recomendaciones, en la figura 8.3 siguiente se identifican los puntos de colocación de los transductores y en la tabla 8.2 se dan algunas recomendaciones para ubicación y variable medida.

- A, C y D: En zona próxima a la máquina, por ambos lados si es de cierto tamaño.
- B: Conexión entre máquinas, acoplamiento.

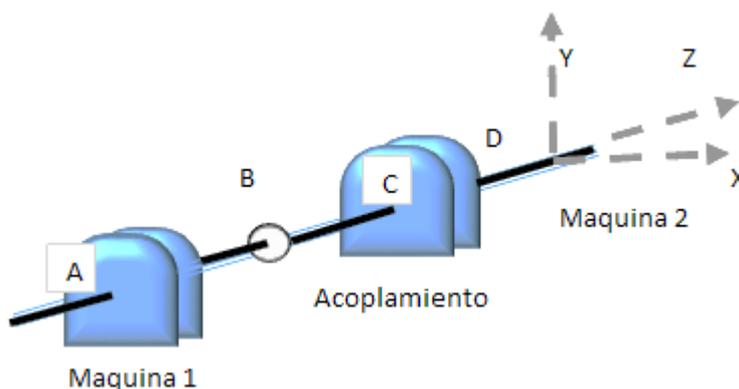


Figura 8.3 Principales puntos para la ubicación de transductores.

Tabla 8.2 Tipos de transductores y ubicación para las principales tipologías de máquinas. Tomado de Borda (1991).

Máquina	Transductor	Ubicación / Observaciones
Turbina de vapor, bombas, Compresores grandes con cojinetes hidrodinámicos	Desplazamiento	Radial horizontal y vertical en A, B, C, D Axial redundante en A y D
Turbinas de gas y bombas de tamaño medio	Desplazamiento. Velocidad	Radial horizontal y vertical en A y B Radial horizontal o vertical en A y B
Motor/Ventilador, ambos con cojinetes	Desplazamiento o velocidad	Un radial en cada cojinete. Un desplazamiento axial hidrodinámico para detectar el desgaste de empuje.
Motor / Bomba o compresor	Velocidad o	Un radial en cada cojinete. Un

Máquina	Transductor	Ubicación / Observaciones
con cojinetes de bolas	aceleración	axial, normalmente en el motor, para detectar el desgaste de empuje
Caja de velocidades con cojinetes de bolas	Aceleración	Transductores montados lo más cerca posible de cada cojinete
Ejes de la caja de velocidades con cojinetes hidrodinámicos	Desplazamiento	Radial horizontal y vertical en cada cojinete. Axiales para detectar el desgaste de empuje.

8.2 ANÁLISIS DE LUBRICANTES

Los lubricantes son sustancias que interpuestas entre dos superficies (de las cuales al menos una se encuentra en movimiento) disminuyen el desgaste, la fricción y con ello las pérdidas energéticas. Se trata de líquidos altamente tecnológicos que no solo han de lubricar, sino de soportar los incrementos de temperatura generados por la fricción.

Los análisis de lubricantes se realizan dependiendo de la necesidad y se suelen clasificar en:

- **Análisis iniciales:** Los efectuados para seleccionar el tipo de aceites a emplear o cambiar uno ya en uso.
- **Análisis rutinarios:** Los efectuados respecto a un esquema predeterminado: número de ciclos, distancia, tiempo, para determinar el estado de las propiedades del aceite, o la contaminación del mismo.
- **Análisis de emergencia:** Realizados para detectar anomalías en el equipo o en el lubricante. Éstas se pueden presentar por motivos como: contaminación con agua⁴; presencia de partículas sólidas, por ejemplo de polvo, el cual es indicativo de

⁴ Un ejemplo característico es el fallo de la junta de culata en motores de explosión (motores de cilindros) que permite el paso del líquido refrigerante (agua más aditivos) al aceite de lubricación del motor.

sellado defectuoso⁵; degradación rápida del aceite debido, normalmente, a una selección inadecuada de producto.

Aplicaciones

Mediante técnicas de control y análisis de lubricantes se logran objetivos como:

- Controlar el desgaste de las máquinas y sus componentes.
- Aumento de la vida útil de la máquina.
- Aumento de la disponibilidad de la maquinaria
- Reducción de los costes operativos.
- Mejor aprovechamiento del lubricante utilizado y disminución de efluentes. En este caso debe tenerse presente que el lubricante es un elemento de reposición periódica, normalmente costoso, que se debe vigilar y de manera especial en equipos de funcionamiento preferente. Además, el reciclaje de los residuos de aceite tiene un coste consecuencia del riguroso control normativo para su eliminación.

Parámetros a medir en el control de un lubricante:

En cada muestra se pueden analizar varios factores que afectan al equipo y que dan indicios del posible problema o avería:

Partículas de desgaste: Durante el desgaste el lubricante arrastra partículas de los elementos en movimiento que suelen ser retenidas en los filtros. Se suele encontrar la presencia de Fe y de sus aleaciones, pero también de ciertos metales que solo se encuentran en partes específicas de la máquina. Por ejemplo, la presencia de Va puede provenir del fuel-oil, la de Pb en las transmisiones y engranajes de los cojinetes, y la de Al suele estar asociada al desgaste de los pistones o de los cojinetes de empuje.

Contaminantes externos al circuito de lubricación: Presencia de polvo (Si), agua (con presencia de Na), combustibles, hollín (carbonilla, S en motores) y otros compuestos del proceso que pasan al aceite.

⁵ Característico de las primeras horas de funcionamiento de los motores de explosión, y que debe disminuir con el tiempo de uso.

Degradación del lubricante: Indican la alteración, normalmente por oxidación del propio lubricante y ofrecen pautas para su sustitución, bien por uno nuevo de reposición, bien por otro de superiores características para soportar el proceso.

Existen diversas técnicas para la verificación y medida de lo anteriormente comentado, entre las que podemos citar:

- **Test de Karl Fisher:** Es una valoración colorimétrica por medio de la cual se determina la presencia de agua en pequeñas cantidades en el lubricante. Se trata de una técnica muy importante pues el agua enseguida degrada el lubricante además de promover la corrosión de los elementos metálicos. La presencia de agua, por tanto, es indicativo de grietas, mal sellado, condensaciones, etc.
- **Análisis ICP:** Es un tipo de espectrometría frecuentemente empleada para la determinación de elementos traza, elementos en cantidades muy pequeñas.
- **Microscopio electrónico de barrido:** Funciona con electrones en lugar de fotones. Se retira el aceite, se filtra y se analiza una pequeña muestra de las partículas secas. Este tipo de ensayos ofrece información no solo de la composición de las partículas (análisis EDX del microscopio), sino también sobre la morfología y distribución de tamaños de las mismas. En general cuanto mayor sea el tamaño de las partículas presentes peor será la condición de funcionamiento del aceite incluso aunque éstas estén en escasa concentración.
- **Determinación del pH:** El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Mide la concentración o actividad de los iones hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. Los aceites, con la presencia de oxígeno y de altas temperaturas rancidifican (los triglicéridos se convierten en ácidos grasos y glicerol). En esta descomposición se pierden parte de sus propiedades y disminuye el pH.
- **Ensayo del número de acidez:** Son los mg de hidróxido de potasio precisos para neutralizar un gramo de aceite. En realidad este tipo de análisis lo que está efectuando es una medida indirecta de los constituyentes orgánicos ácidos presentes en el aceite.

- **Ensayo de viscosidad:** Como pruebas de rutina se analiza la viscosidad. Un aceite parafínico⁶ es menos viscoso que uno nafténico⁷ tal como se ha indicado anteriormente.
- **Ferrografías:** Este método (si es el de lectura directa) consiste en hacer discurrir un fino choro de muestra del aceite sobre una lámina imantada con una acanaladura. El efecto de los imanes, produce la separación de las partículas gruesas y finas, y también la orientación de las mismas. Las partículas más pequeñas son débilmente atraídas por la fuerza magnética y se van depositando a lo largo de la longitud del tubo (figura 8.4). De este modo, el tubo A–B acumula los finos en la zona de salida B, y los gruesos junto a la entrada A. Además, a lo largo del mismo varía también la forma y el color de las partículas. Con los datos obtenidos y por comparación con muestras patrón o con los resultados de otras muestras se sabe, se determina el grado de, la degradación del aceite.

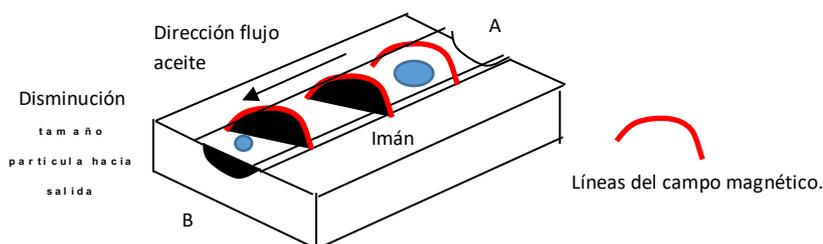


Figura 8.4 Esquema de una ferrografía de lectura directa.

Se regula, normalmente, para que dé dos muestras: $< 15 \mu\text{m}$, D_f (diámetro de finos o “normal rubbing”) y $> 15 \mu\text{m}$, D_g (diámetro de gruesos o “abnormal wear”). Con ellas se calcula la relación. D_g/D_f que se compara en sucesivas medidas. Es un método rápido y de coste controlado que exige disponer de laboratorio y personal formado en su manejo.

⁶ Los aceites de tipo parafínicos tuene una molécula tipo C_nH_{2n+2} y su obtención principal es como derivado del petróleo. El más sencillo es el metano CH_4 .

⁷ Los aceites nafténicos tienen una formulación del tipo C_nH_{2n} y contienen estructuras cíclicas, de anillos, saturadas. Como en el caso de los parafínicos su producción principal es como un derivado de la destilación del petróleo.

Cuando el efecto es por deslizamiento tipo rodadura, se produce menos cantidad de residuos que cuando es por deslizamiento y frotación (tipo abrasivo). Los resultados de un proceso de seguimiento de equipos publicado por Dalley (1990) se resumen en la tabla 8.3.

Tabla 8.3 Estabilidad de los elementos de transmisión en función del tamaño, forma y aspectos de las partículas presentes en el aceite. Tomado de Dalley (1990).

Aceite: Descripción de la partícula y tamaño principal (ferrografía)	Descripción de la superficie de las partículas (microscopio)	Conclusiones: Estabilidad de la pieza/ Riesgo
Libre de partículas, limpio; o partículas menores de 8 micras	Varía entre pulido y áspero. Una superficie del engranaje puede estar pulida y la otra algo afectada	Riesgo muy bajo, próximo a cero
Partículas libres de metal en tamaño menor de 15 micras	Superficie estable, lisa, o pequeñas muescas dependiendo del número de partículas en el aceite	Riesgo bajo
Partículas libres hasta 150 micras	Marcas roturadas con evidencias de flujo plástico comienzo de daño	Riesgo con aumento probable
Partículas de óxido en grupos o individuales mayores de 150 micras	Muecas con evidencias de óxido en la superficie	Riego alto
Óxido negro en partículas y en grupos de partículas mayores de 150 micras	Muecas con evidencias de óxido en las superficies	Riesgo alto
Partículas libres de metal mayores de 1 mm	Muecas severas, flujo plástico severo y manchas evidentes	Riesgo de catástrofe (fractura inminente) en las piezas

8.3 ANÁLISIS POR ULTRASONIDOS

Es un procedimiento no destructivo de tipo mecánico que analiza y estudia las ondas de sonido de alta frecuencia (20-100 KHz) inaudibles para el ser humano (ultrasonidos). La técnica presenta dos variantes.

Por un lado la que se dedica al estudio de la propagación (rebotes, reflexiones, y en general los fenómenos asociados a las ondas) y que permite, por medio de procedimientos similares a los empleados en la geofísica detectar discontinuidades de material generando en su variante más actual la generación imágenes. La técnica guarda ciertas similitudes con el análisis de infrarrojos y es muy utilizada en el control de calidad de las soldaduras (escorias, oquedades, etc.) y también en el de las piezas de acero fundido (oquedades, gases internos, escorias atrapadas, etc.).

La segunda variante es la que se encarga de la detección de los ultrasonidos que son generados por las anomalías en el funcionamiento de los equipos: fugas de fluidos, pérdidas de vacío, arcos eléctricos, desgaste de rodamientos. Esta técnica es complementaria a la de estudio de vibraciones, pero con la ventaja de aportar información cuando las máquinas rotan, giran, a bajas velocidades.

Aplicaciones. Los ultrasonidos permiten detectar:

- Fricciones en las máquinas rotativas.
- Fugas de fluidos (gas, vapor, aceites o líquidos en general) en tuberías, válvulas, purgadores, etc.
- Pérdidas de vacío.
- Arcos eléctricos ocultos de poca intensidad así como efectos corona.
- Falta o exceso de lubricación. A medida que disminuye la capa de lubricante la intensidad de sonido aumenta (la ausencia de lubricación puede suponer un aumento del hasta 8 dB).
- Problemas de cavitación. Estos se dan en las bombas de impulsión de fluidos, p.e. bombas de agua, pero el efecto es mayor (se produce más fácilmente) a medida que la densidad del fluido disminuye. Degradan los rodets.

- Dientes defectuosos en los engranajes. A medida que los dientes se desgastan no conservan las superficies con el diseño adecuado y en los sucesivos giros se generan modificaciones en el sonido emitido, llegando a producir auténticos golpeteos si la degradación es severa.
- Condiciones anómalas y de conservación de cojinetes (condición que se conserva incluso cuando estos rotan a baja velocidad). Toda máquina que gira u oscila lo hace sobre cojinetes o rodamientos que son las piezas que soportan la carga y los rozamientos. Son por ello los primeros elementos que se degradan y producen oscilaciones, vibraciones, ruidos, calentamientos, degradación del aceite, etc., que pueden ser monitorizadas. La monitorización de cojinetes tal vez sea una de las aplicaciones más claras de esta técnica, pues se anticipa a otros procedimientos como el análisis de temperatura o la vibración.

Ventajas. Entre las ventajas de disponer de esta técnica se puede citar que:

- Permiten la detección temprana de los problemas.
- Las señales de ultrasonidos son localizadas, lo que ayuda a los operarios a encontrar la fuente de los mismos.
- Las señales obtenidas pueden procesarse en un ordenador y acoplarse a analizadores de vibraciones, lo que facilita la interpretación de la información.
- Se pueden emplear en ambientes con ruido.
- Son simples, rápidos y precisos.
- Su manejo, usualmente, no necesita intervenir ni afectar al equipo.

8.4 TERMOGRAFÍA

La termografía es el procedimiento que permite determinar temperaturas de un objeto a distancia, en tiempo real y sin contacto, a partir de la energía infrarroja radiante emitida, transmitida y reflejada por el mismo. En realidad se trata de un proceso similar al que emplea el ojo humano para ver la luz visible. Esta técnica es de aplicación al mantenimiento pues un gran número de comportamientos anómalos de maquinaria tanto eléctricos como mecánicos suelen traer asociado un incremento de temperatura.

Para el análisis termográfico se pueden utilizar dos tipos de equipos: los “spot radiometers”, que determina la temperatura en un punto; y los equipos de “imágenes de infrarrojos” que capturan una gran densidad de puntos constituyendo áreas. Los últimos se son los que más se emplean en la actualidad, presentando su uso más cotidiano en las certificaciones energéticas de equipos y edificios.

Estos equipos se ponen a la venta bien vienen para usos específicos (calibrados para determinar la temperatura en componentes eléctricos, de calefacción o paramentos de edificios, etc.) o bien más generalista. En este último caso se deben escoger los parámetros de medida según las superficies (coeficiente de emisión) a las que se desea determinar la temperatura para que la medida sea representativa y con el menor error posible.

Fundamentos físicos

El principio de funcionamiento se basa en que todo objeto emite radiación en distinta cantidad y longitud de onda, dependiendo entre otras cosas, de su emisividad (número adimensional que indica la capacidad de un cuerpo para emitir radiación comparándolo con el cuerpo negro) y de la temperatura. La radiación se transmite luego por la atmósfera hasta que llega al captador, en donde la energía es focalizada por medio de prismas y espejos hacia el detector.

La ley de Stefan-Boltzmann relaciona la energía radiada, con la temperatura de un cuerpo, su superficie y características particulares. Su expresión matemática es:

$$Q_{emitido} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4$$

Donde:

- $Q_{emitido}$: flujo de calor.
- ϵ : emisividad (función del tipo de material).
- σ : constante de Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- A_s : área superficial del cuerpo (m^2).
- T_s : temperatura superficial del objeto ($^{\circ}\text{K}$) ($T_s = t_s + 273,16$).

Con lo que puede deducirse que cuanto más caliente se encuentre un cuerpo mayor será la energía infrarroja que emite. La temperatura es la variable fundamental, desde un punto de vista energético al encontrarse esta variable elevada a la cuarta potencia.

La emisividad superficial adquiere importancia cuando se pretenden diferenciar cambios dentro de una misma superficie. Una aplicación muy clara es la determinación de humedades. Ésta se fundamenta en el hecho de que, por ejemplo, en un paramento con zonas húmedas y secas existen diferencias en la misma.

Ejemplo 8.1 Se determina la temperatura de un cuerpo considerando, para calibrar el equipo de medida, que la emisividad correspondiente a la superficie del cuerpo es de valor $e_1=0,1$. Se mide con esta calibración y la temperatura resultante es de 150 °C.

Si la emisividad es realmente de valor $e_2=0,2$, determinar la temperatura en su superficie y cuantificar el error que se comete.

Solución:

El cuerpo emite una energía fija y es independiente del sistema con el que se mida, luego se tiene la relación siguiente:

$$Q_1=Q_2 \rightarrow e_1 \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_1^4 = e_2 \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_2^4$$

Por unidad de área $A_s=1$ y para σ constante, se tiene la relación

$$e_1 \cdot T_1^4 = e_2 \cdot T_2^4.$$

t_2 (°C) = $(e_1/e_2)^{(1/4)} \cdot T_1 - 273$; para $t_1 = 150$ °C $\rightarrow t_2 = 83$ °C. El error cometido en la medida por estimación incorrecta de la emisividad es de 67°C.

Si la relación es inversa, de $e_1=0,2$ a $e_2=0,1$, para $t_1=150$ °C se obtiene $t_2 = 230$ °C; luego se identifica la importancia de calibrar adecuadamente los equipos de medida⁸.

Aplicaciones

Como ejemplos de aplicaciones se puede citar las siguientes:

Componentes eléctricos y electrónicos: Mayor o menor calentamiento por efecto Joule debido a anomalías en un circuito.

- Instalaciones eléctricas en general y líneas eléctricas de alta y baja tensión.

⁸ Estas diferencias son importantes y como ejemplo, adquieren importancia cuando se mide la temperatura de fabricación de un acero ya que las variaciones con márgenes de 50°C o 70 °C en la fundición (temperatura aproximada de 1400 °C), son determinantes para su calidad.

- Subestaciones.
- Generadores.
- Cuadros, bornes, empalmes, fusibles, interruptores.
- Motores eléctricos, generadores, bobinados, etc.
- Tarjetas de circuitos integrados.

Elementos mecánicos:

- Reductores.
- Frenos.
- Acoplamientos.
- Rodamientos.
- Embragues.
- Motores.

Instalaciones de frío y calor:

- Hornos, calderas e intercambiadores de calor.
- Instalaciones de climatización.
- Refrigeración de motores.

Instalaciones a presión:

- Pérdidas de gas, agua y vapor.

Edificios:

- Detección de humedades
- Detección de fisuras y oquedades

Ventajas

Las principales ventajas del mantenimiento preventivo mediante técnicas de termografía son:

- Permite análisis sin modificar el funcionamiento de los procesos productivos.
- Facilidad de uso y baja peligrosidad para el operario (no hay necesidad de contacto con el equipo).
- Localización, muy precisa, de puntos deficientes en una línea de proceso.

- Estudia cuerpos en movimiento.
- Barre amplias zonas del proceso.
- Llega a lugares inaccesibles.
- Es una técnica interesante para verificar los resultados después de una reparación importante (necesario cuando hay que mantener criterios de temperatura máxima por seguridad).
- Permite el control de calidad de las reparaciones efectuadas.
- Ahorro energético.

8.5 ANÁLISIS ELÉCTRICO

El análisis eléctrico se puede emplear en aquellos equipos susceptibles de presentar averías de origen electro-mecánico y cuyo sistema de funcionamiento base es de tipo eléctrico. Se fundamenta en el control de los parámetros de la señal eléctrica (tensión, intensidad, resistencia, capacitancia, etc.) que alimenta a un equipo.

Por medio de este procedimiento se pueden emitir juicios de valor acerca de:

Estado de los circuitos sobre todo en lo referido a la calidad del **aislamiento eléctrico** (afecta a la seguridad de las instalaciones).

Consumos eléctricos (variaciones en el tiempo para trabajo similar). Un análisis de interés es el que suele efectuarse por comparación con los consumos en vacío. Hecha la puesta en marcha para una instalación o equipo, y terminado el periodo inicial de pruebas o fallos de juventud, se miden los consumos y algunas variables de interés, éstas quedan reflejadas en su expediente y son una referencia para control posterior. Cualquier variación de estos parámetros puede ser debida a una anomalía y, normalmente, interesa estudiar la causa.

Se trata de un parámetro de alto valor sobre todo cuando los fallos corresponden a un acumulado de defectos que aumentan las resistencias a vencer por el equipo. Por ejemplo, en minería es importante controlar el consumo de las cintas de transporte de mineral en vacío pues su aumento es indicativo del deterioro de los elementos de apoyo de la banda

(rodillos) o de la acumulación de materiales adheridos que aumentan el peso muerto (falta de limpieza)⁹.

Piénsese por ejemplo, para una cinta de transporte en minería, de 200 m. Lo normal es que ésta se deslice sobre rodillos ubicados cada 2 ó 3 metros (100 ud) que rodarán a su vez en base a cojinetes, normalmente estancos. El deterioro de estos últimos aumenta rápidamente la resistencia a la rodadura (téngase presente además su elevado número), hecho perfectamente detectable con la comparativa del consumo en vacío.

Estado de motores (estator, del rotor, entre-hierro, etc.) mediante medidas de continuidad, impedancias, etc. El análisis de la corriente de un motor eléctrico permite un control de calidad, como herramienta de tendencia o como emisor de un diagnóstico inmediato del estado del mismo, por comparación con sus valores nominales o de funcionamiento, según la carga, más habitual. Es de uso práctico todo tipo de motores: de jaula de ardilla, síncronos, rotor bobinado, de corriente continua, etc., e incluso en alternadores y variadores de frecuencia.

REFERENCIAS

Borda, J. (1990). Técnicas de mantenimiento avanzado. Ediciones Deusto, Bilbao.

Dalley, R. J. (1991). An overview of ferrography and its use in maintenance. In Predictive Maintenance Seminar.

González, Francisco Javier. Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. Madrid: Fundacion Confemetal, 2003. ISBN: 8496169030.

Kelly, A. Gestión del mantenimiento industrial. Madrid: Fundación Repsol, 1998. ISBN: 8492350601.

Rey, F. (1996). Hacia la excelencia en mantenimiento. Editorial TGP Hoshin, SL Madrid, España.

Rey, F. (2001). Manual del mantenimiento integral en la empresa. FC Editorial.

⁹ Las cintas de transporte en minería pueden tener longitudes muy importantes. Mina de carbón de Puentes de García Rodríguez: 40.000 m; Mina de carbón Pozo María Luisa (Langreo, Asturias): 2600 m; mina de fosfatos de Fos-Bucraa (Sahara): 100.000 m. En consecuencia las potencias y los consumos en motores de arrastre son muy elevados, del orden de algunos cientos o miles de kW.

Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier.

BIBLIOGRAFÍA

Borda, J. (1990). Técnicas de mantenimiento avanzado. Ediciones Deusto, Bilbao.

Dhillon, B.S. Engineering maintenance. A modern approach. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN: 1587161427.

González, Francisco Javier. Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado. Madrid: Fundacion Confemetal, 2003. ISBN: 8496169030.

Hashemian, H. M., & Bean, W. C. (2011). State-of-the-art predictive maintenance techniques. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 60(10), 3480-3492.

Kelly, A. Gestión del mantenimiento industrial. Madrid: Fundación Repsol, 1998. ISBN: 8492350601.

Labaien, E., & Carrasco, G. (2009). Mantenimiento predictivo: Curso sobre mantenimiento predictivo y sus distintas técnicas de aplicación. PREDICTOVE Ingenieros SL, Guipúzcoa.

Lu, B., Durocher, D. B., & Stemper, P. (2009). Predictive maintenance techniques. IEEE Industry Applications Magazine, 15(6).

Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann.

Monchy, F. (1990). Teoría y práctica del mantenimiento industrial. Masson.

Rey, F. (1996). Hacia la excelencia en mantenimiento. Editorial TGP Hoshin, SL Madrid, España.

Rey, F. (2001). Manual del mantenimiento integral en la empresa. FC Editorial.

Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier.

Smith, D. J. (2017). Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers.
Butterworth-Heinemann.