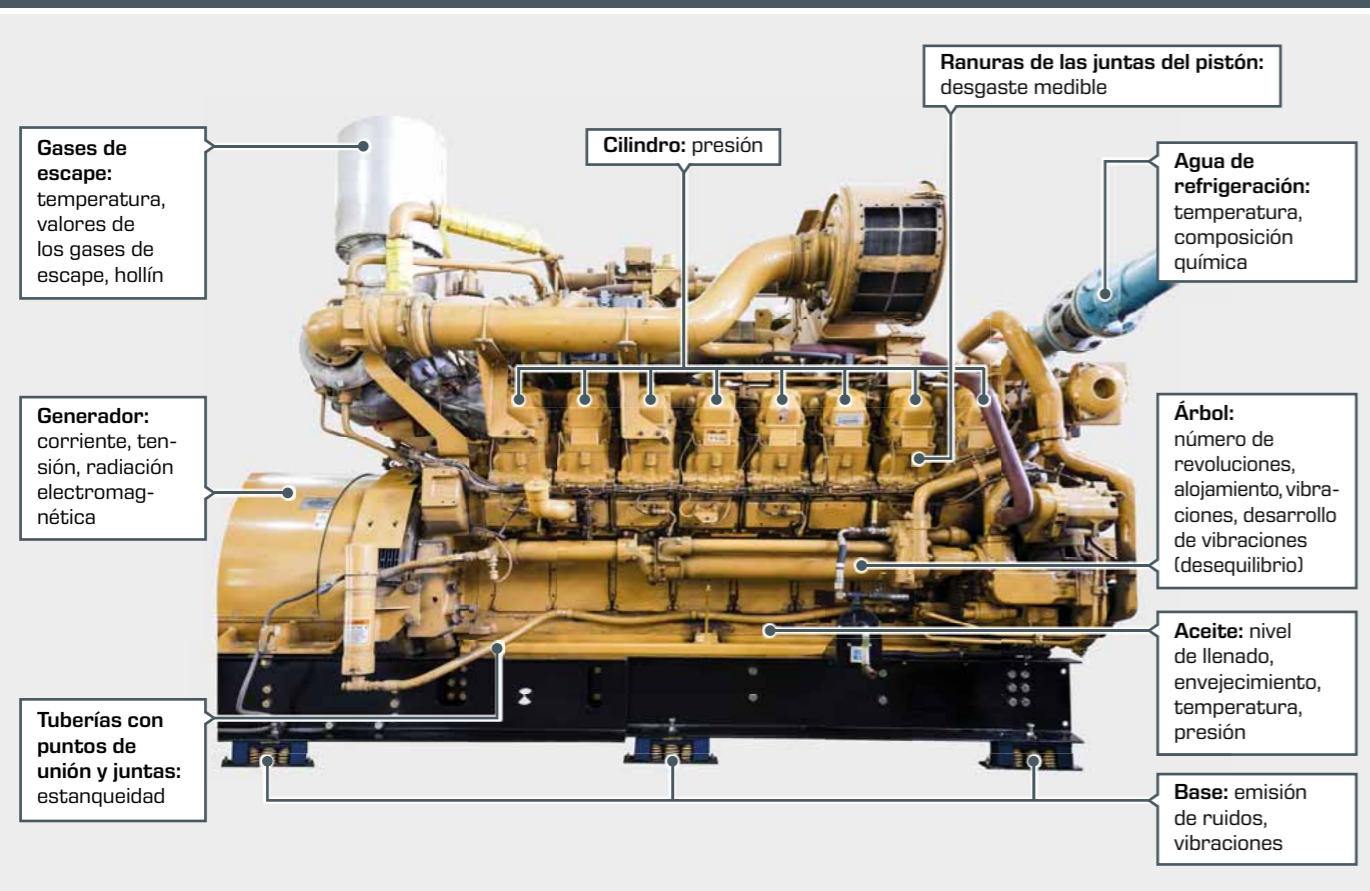


## Diagnóstico de máquinas

El objetivo del diagnóstico de máquinas, también denominado control del estado de las máquinas o, en inglés, CMS – Condition Monitoring System, es ejecutar un mantenimiento o reparación orientado a las necesidades y, con ello, minimizar los periodos de reparación o paralización de una máquina. Es necesario detectar

los daños en el momento en que se produzcan. Esto aumenta la eficacia general del equipo (OEE – Overall Equipment Effectiveness), una medida que indica el valor añadido de una instalación, y contribuye a optimizar la estructura de costes.

¿Qué caracteriza el estado de una máquina? Existen determinadas variables asociadas al estado de un equipo; en este caso, emplearemos un generador diésel a modo de ejemplo:



### El diagnóstico de máquinas sirve para

- analizar los puntos críticos de la instalación con objeto de optimizar los procesos o detectar la aparición de posibles fallos de forma temprana
- realizar un mantenimiento orientado al estado del equipo; como, por ejemplo, sustituir los neumáticos de un vehículo cuando no se alcanza la profundidad mínima del dibujo de la banda de rodadura
- evitar o minimizar la producción de desechos con ayuda de un mantenimiento planificado; por ejemplo, realizar el cambio de aceite en intervalos fijos o después de un determinado número de kilómetros en los vehículos

### El diagnóstico de máquinas contribuye a

- aumentar la vida útil de las instalaciones y las máquinas y su óptimo aprovechamiento
- mejora de la seguridad del servicio
- aumento de la disponibilidad de las instalaciones
- optimización de los procesos de servicio
- reducción de averías
- ahorro de costes

### El diagnóstico de máquinas se lleva a cabo durante

la paralización de la máquina por medio de:

- desmontaje e inspección visual
- medición del desgaste
- comprobación de grietas (radiografía, ultrasonido, flujo magnético, medición de la frecuencia natural)

el funcionamiento de la máquina por medio de:

- medición de las variables de estado; por ejemplo, medición de la vibración
- medición de ruidos
- desplazamiento del árbol
- análisis del lubricante

### Significado de las vibraciones en el diagnóstico de máquinas

El estado mecánico de una máquina o de las piezas de una máquina se puede evaluar analizando el tipo y la magnitud de las vibraciones que genera. En este sentido, las vibraciones se registran y se evalúan con ayuda de sensores y equipos de

medición. La correcta interpretación de las señales de medición requiere de un conocimiento adecuado de los mecanismos de acción, así como de cierta experiencia.

#### Causas de las vibraciones

##### 1. Fuerzas giratorias o periódicas producidas por

- prensado o estampado
- compresiones, fallos de alineación

##### 2. Fuerzas de inercia por masas en rotación u oscilantes

- pistones que se mueven de un lado a otro
- desequilibrios por rotación

##### 3. Impactos

- holgura en los puntos de contacto y, por tanto, superficies de contacto cambiantes cuando la transmisión de fuerza se produce de forma continua
- pérdida de contacto cuando la transmisión de fuerza se produce con arrastre de fuerza
- aplastamiento de imperfecciones en la superficie

##### 4. Fuerzas gaseosas

- elongación en la construcción debido a fuerzas gaseosas dinámicas y excitación de las vibraciones longitudinales y de flexión
- elongación irregular y excitación de las vibraciones torsionales

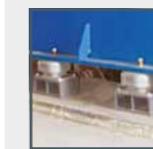
##### 5. Fuerzas de flujo

- las turbulencias con fluctuaciones de presión en forma de ondas acústicas (estrépitos, ruidos, silbidos) excitan las superficies: lo contrario es la emisión de ruidos
- fuerzas de flujo periódicas en álabes móviles

##### 6. Fuerzas electromagnéticas

- campos magnéticos dinámicos o cambios cíclicos de la geometría (superficies polares)
- similitud con la excitación por fluctuaciones de presión (zumbidos del transformador, vibraciones del estator en motores)

#### Ejemplos prácticos



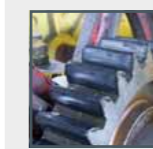
Alojamiento elástico, con amortiguación de vibraciones, de la máquina, con objeto de evitar/minimizar la propagación de las vibraciones.



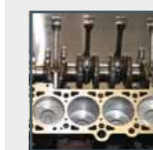
Es necesario calibrar los neumáticos para evitar desequilibrios.



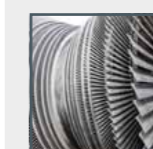
Los cojinetes pretensados permiten un guiado del árbol preciso, aumentan la rigidez y minimizan el juego del cojinete.



Es necesario que la lubricación sea adecuada, para minimizar los daños en las ruedas dentadas, por ejemplo, en los engranajes, y para evitar que se formen imperfecciones en la superficie



En la caja del cigüeñal, se producen fuerzas gaseosas dinámicas y excitación de las vibraciones longitudinales y de flexión. Las cajas del cigüeñal reforzadas y los tornillos de expansión previenen las vibraciones y el agotamiento del material.



En el diseño de los rodetes de, por ejemplo, soplantes y compresores, se debe prestar atención a la posible aparición de vibraciones mediante la correcta selección del número y la forma de los álabes móviles.



Motor asíncrono: si la brecha de aire es asimétrica, las fuerzas magnéticas circundantes excitan las vibraciones de rotación y flexión. Variando la brecha de aire entre el estator y el rotor, se pueden modificar las vibraciones mecánicas generadas.

## Diagnóstico de máquinas

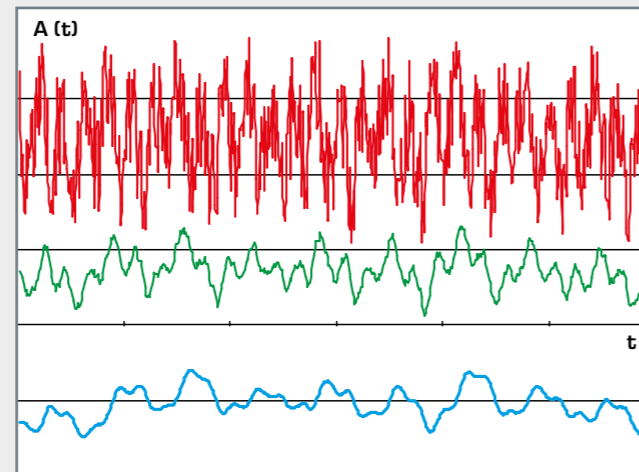
### Procedimientos para el diagnóstico de máquinas

En el diagnóstico de máquinas, **las fuerzas internas y las energías** de la máquina son de especial relevancia. Estas magnitudes no se pueden medir directamente, pero sí sus efectos, es decir, las **vibraciones**. La medición y el análisis de las vibraciones permiten obtener una imagen de estas fuerzas. Gracias a la medición de las vibraciones, se obtiene información acerca de la estructura de las fuerzas, de las causas que las originan, así como de su evolución en el tiempo. Las señales de medición suelen ser espectros de frecuencia que se forman por la super-

posición de diferentes vibraciones con diversas frecuencias. Algunas de estas vibraciones se consideran parte del correcto funcionamiento de la máquina, sin embargo, otras vienen dadas o reforzadas por averías. La interpretación de las señales de medición permite evaluar el estado de la máquina e identificar posibles averías del equipo.

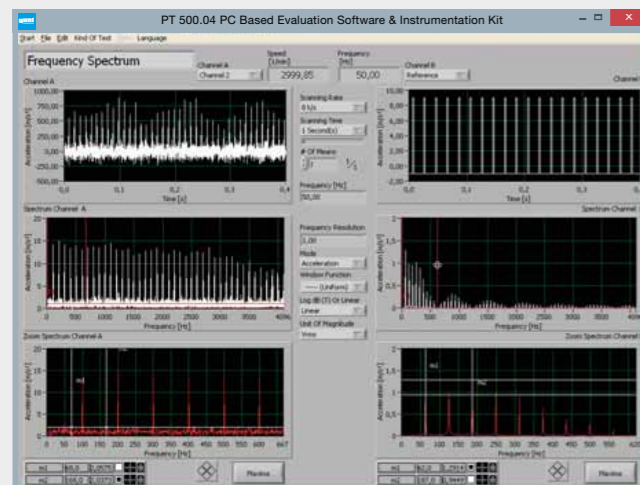
En el diagnóstico de máquinas, se diferencia entre el **control de parámetros** y el **análisis de frecuencias**.

En el **control de parámetros**, se compara la amplitud de la señal de vibración medida con los valores límite correspondientes. El control de parámetros se puede realizar de forma continua y automática. Es fácil de implementar y su aplicación no requiere de conocimientos profundos. Un valor característico que se aplica habitualmente es el valor efectivo de la velocidad de la vibración en el rango de frecuencia de entre 10 y 1000 hercios. Este valor característico es de aplicación en la norma DIN ISO 10816-3 relevante para la ingeniería de accionamientos. En unidades estándar sencillas, basta con emplear el control de parámetros para el diagnóstico. Sin embargo, en unidades más complejas la fiabilidad de este procedimiento es insuficiente.



Señales de vibración típicas en el intervalo de tiempo

— Aceleración  
— Velocidad  
— Desplazamiento



La aplicación del **análisis en el rango de frecuencia** es más compleja, pero más eficaz. Este análisis permite identificar la naturaleza de un daño. De esta forma, las medidas de reparación se pueden aplicar de manera precisa. La ejecución de un análisis de frecuencias requiere de un amplio conocimiento de los mecanismos de acción y de un nivel de experiencia suficiente para interpretar los resultados. Por norma general, el análisis de frecuencias se aplica como procedimiento complementario al control de parámetros.

#### Contenidos didácticos

<b>Vibraciones mecánicas</b>	Causas, mecanismos de aparición, desequilibrio, rotor Laval, resonancia, amortiguación, impacto
<b>Tecnología de medición de vibraciones</b>	Sensor de medición, amplificador de medida, representación, osciloscopio, medición del número de revoluciones
<b>Análisis de vibraciones</b>	Aceleración, velocidad de la vibración, desplazamiento de la vibración, parámetros, representación en el área del tiempo y de la frecuencia, espectro, FFT (Fast Fourier Transformation), órdenes, análisis de seguimiento, análisis de envolvente, órbita, trayectoria
<b>Diagnóstico de máquinas</b>	Vibración de los cojinetes y de árbol, intensidad de la vibración permitida, daños en rodamientos, vibraciones electromagnéticas, vibraciones por desequilibrio y equilibrado, daños en engranajes, vibraciones en transmisiones por correa, cavitación en bombas, vibraciones de álabes, vibraciones e impactos en mecanismo de biela-manivela, vibraciones que dependen del número de revoluciones

Además, también se enseñan destrezas prácticas y experiencias en lo que al montaje de los elementos de máquina, como cojinetes, árboles y acoplamientos, se refiere. También se puede estudiar la estructura de máquinas mecánicas.

Las siguientes preguntas son de gran ayuda para la futura práctica industrial:

- ¿qué sensor de medición debo emplear?
- ¿dónde puedo registrar una señal de medición servible?
- ¿cómo oculto las señales de interferencia?

#### Daños en los elementos de accionamiento en el ejemplo de los cojinetes



Algunas de las señales que pueden indicar un fallo en los elementos de accionamiento son:

- formación de sedimentos en las superficies de rodadura, por ejemplo, oxidación en el taladro de un anillo interior
- corrosión debido a la humedad y a la paralización del cojinete
- daños en la superficie en forma de picadura
- daños en los cojinetes debido al resbalamiento
- fisuras y roturas

Si se ignoran los primeros síntomas de un daño en la máquina, el daño aumentará y podrá llegar a producirse una rotura.

# Diagnóstico de máquinas

## Resultados típicos del ensayo en el diagnóstico de máquinas

### 1. Identificación de los daños en el cojinete

#### Análisis de envolvente

El análisis de envolvente se aplica para, por ejemplo, identificar daños en los rodamientos y en los engranajes. Estos daños provocan impactos con una incidencia muy elevada de vibraciones. La frecuencia de impacto de baja frecuencia relevante

para el diagnóstico de daños apenas se puede identificar en el espectro normal o su identificación es complicada. El análisis de envolvente desmodula la señal de impacto de alta frecuencia, permitiendo, así, la medición de la frecuencia de impacto.

#### Desarrollo del análisis de envolvente

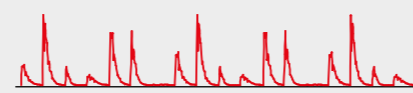
Medición de la señal de impacto de alta frecuencia y filtro paso alto para reprimir las señales de interferencia de baja frecuencia (desequilibrio, fallo de alineación)



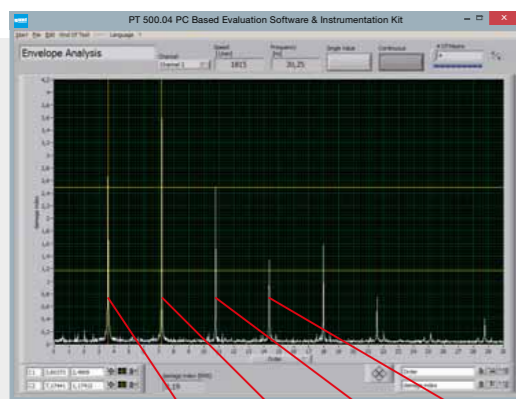
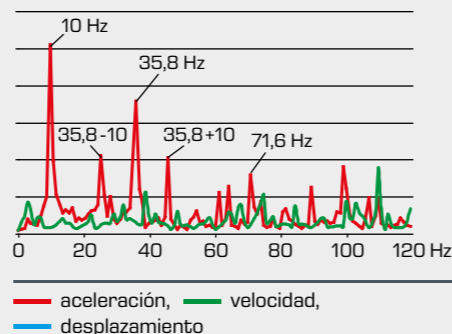
Rectificación de la señal de alta frecuencia



Generar la envolvente de la señal rectificada por medio de un filtro paso bajo



Ejecutar FFT, para determinar el espectro de la envolvente. El número de revoluciones (10 Hz) y la frecuencia de impacto (35,8 Hz) quedan patentes. Las bandas laterales a distancia del número de revoluciones (35,8 -10, 35,8 +10) indican una modulación de amplitud. Se trata de un fallo del anillo exterior con carga en circulación.



Ordenes: 3,58 7,16 10,74 14,32

La ilustración muestra el espectro de la envolvente de un daño típico en el cojinete. Para obtener una imagen independiente de la frecuencia de giro, se ha seleccionado la abscisa como orden. Una señal con frecuencia de giro tiene el orden 1. Se leen líneas de frecuencia en múltiplos del orden 3,58. Esto significa que hay un fallo en el anillo exterior del cojinete. Las líneas de las bandas laterales faltantes con la distancia de un orden indican una dirección de fuerza constante, en este caso, la tensión de la correa, y no un desequilibrio por la carga circulante.

### 2. Equilibrado en funcionamiento

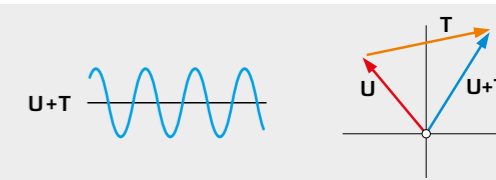
Al ejecutar un proceso de equilibrado lo que se pretende es volver a alinear el centroide del rotor con el eje de rotación. Para ello, se añaden o se retiran masas al rotor. Para determinar la ubicación y el tamaño de las masas de equilibrado necesarias,

primero se ha de establecer el desequilibrio desconocido. Ya que el desequilibrio no se puede medir directamente, hay que calcularlo indirectamente partiendo de las vibraciones de cojinetes medibles.

Medición de las vibraciones de cojinetes en máquinas desequilibradas (primera marcha desequilibrada **U**).



Medición de las vibraciones de cojinetes después de que la máquina haya sufrido otro desequilibrio adicional de origen conocido (desequilibrio de prueba **T**). Comparando ambas mediciones, se puede calcular el desequilibrio original.



Cálculo del tamaño y la ubicación de las masas de equilibrado que hay que añadir o retirar (**C**). Medición de control (**A**) tras la corrección de masas realizada. Dependiendo de si el equilibrado tiene éxito o no, se continuará repitiendo el procedimiento hasta que se cumplan los valores límite de las vibraciones de cojinetes.

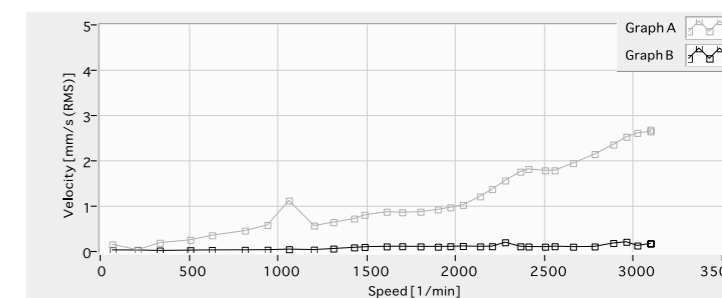


### 3. Identificación de grietas en árboles

Los árboles con grietas generan una señal de vibración característica que se puede utilizar para identificar la grieta. Un posible método de análisis es el **análisis de seguimiento**, en el que

se procede a registrar la señal de vibración durante un amplio espectro de números de revoluciones y que se analiza en un filtro especial en función de los diferentes órdenes con rotación.

El gráfico A muestra la proporción de la vibración del cojinete de 1<sup>er</sup> orden (1Ω), el gráfico B muestra la proporción de 2<sup>o</sup> orden (2Ω).



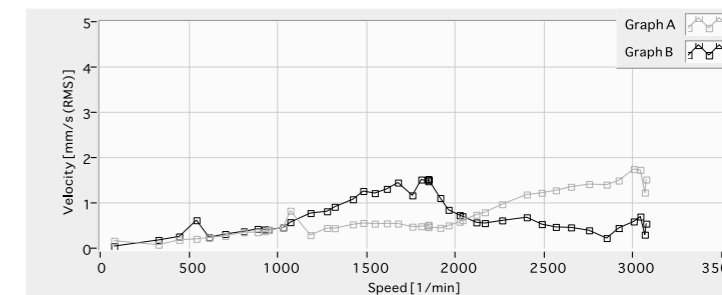
Análisis de seguimiento de un árbol sin grieta

#### Estado sin grieta:

las vibraciones de cojinetes de 1<sup>er</sup> orden aumentan en función del número de revoluciones de manera normal debido al desequilibrio. Las vibraciones de cojinetes de 2<sup>o</sup> orden son muy pequeñas.

#### Estado con grieta profunda:

Mientras que las vibraciones de cojinetes de 1<sup>er</sup> orden muestran un comportamiento similar al que se produce en un árbol sin grieta, en las de 2<sup>o</sup> orden se produce un incremento muy fuerte en el espectro medio del número de revoluciones, lo que indica claramente la existencia de una grieta.



Análisis de seguimiento de un árbol con grieta