

## Aplicaciones de la monitorización y análisis acústicos para el mantenimiento predictivo de maquinaria.

Jorge Pistono, Jorge L.Parrondo, Carlos Santolaria

E.T.S.I.I. de Gijón, Universidad de Oviedo

### INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo se caracteriza por llevar a cabo una comprobación, continua o periódica, del estado de los elementos principales de una máquina o instalación, por medio del registro y análisis de una o varias variables muy correlacionadas con dichos estados; con ello pueden conocerse las tendencias, prediciendo el momento esperado del fallo y cuáles serán las averías a reparar. Se le conoce también como mantenimiento por condición.

Entre la variables utilizadas se encuentran la presión, la temperatura, las vibraciones, la corrosión, los consumos, los residuos y el estado de los lubricantes, que normalmente precisan de varios sensores que han de ser colocados dentro o sobre diversas partes de la máquina monitorizada. Apenas se hace uso de las posibilidades proporcionadas por los registros acústicos. Esta comunicación se presenta con objeto de impulsar su aplicación, demostrando su utilidad por medio de trabajos realizados en este campo en varios tipos de máquinas.

Es de notar que los primeros intentos de realizar predicciones de averías, si bien de tipo exclusivamente empírico, son probablemente los basados en señales acústicas. Antaño el operario solía conocer el estado de su máquina, y prever posibles problemas, precisamente por el ruido generado; y aún hoy se golpean las ruedas del ferrocarril con un martillo para detectar la aparición de fisuras, ya que la defectuosa suena de modo distinto.

### FUNDAMENTOS

Las máquinas se componen de elementos mecánicos que tienen entre sí ciertos juegos en funcionamiento normal; estos elementos sometidos a las variaciones de cargas que se producen en su movimiento emiten sonidos de frecuencias y amplitudes características. Pueden coexistir otras fuentes acústicas, como fluidos e movimiento o con variaciones de presión, por ejemplo por combustiones; los parámetros de la emisión también son función de las condiciones de funcionamiento. Es posible, por lo tanto, registrar el espectro, de presión o de intensidad, de la emisión acústica de la máquina nueva, en su caso tras el rodaje, es decir, en condiciones de funcionamiento correcto. Cuando la velocidad, carga o potencia puedan variar se hará un registro para cada uno de los regímenes de marcha significativos. A estos espectros se los suele denominar *firma espectral* de la máquina.

Cualquier cambio del espectro acústico emitido por la máquina es debido a cambios de su funcionamiento o estado. Una variación de alguna importancia demuestra la aparición de alguna anomalía, a menudo la existencia de un fallo incipiente, que es precisamente lo que se pretende detectar a tiempo en un sistema de mantenimiento predictivo.

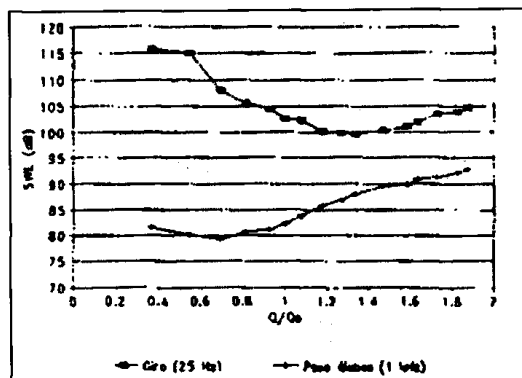


Figura 1: Ventilador centrífugo de 38 álabes; velocidad ~24,33 Hz.; evolución de las frecuencias fundamentales de la emisión sonora con el caudal.

El conocimiento detallado de la máquina y un estudio previo a veces laborioso, en el que la intensimetría puede ser esencial, permite muchas veces determinar cuáles son la/s frecuencia/s correspondientes a cada pieza o elemento. En ocasiones es posible obtener, por el análisis de la variación con el régimen de marcha, firmas adimensionalizadas, válidas para cualquier velocidad o carga. En cualquier caso la comparación del espectro monitorizado, de modo continuo o periódico, con la firma original proporciona generalmente información sobre la aparición de anomalías. La calidad y precisión del diagnóstico depende de la calidad de la preparación previa, que ha de ser realizada para cada tipo de máquina, y a menudo para cada modelo, o incluso para cada máquina en las condiciones de instalación específicas, para lo que, nuevamente, suele ser indispensable la medida de intensidad acústica.

## APLICACIONES EXPERIMENTALES

### Turbomáquinas

En el estudio del mantenimiento de turbomáquinas se ha demostrado (Egusquiza, 1986) la potencialidad del análisis de registros acústicos, en particular del ruido fluidodinámico, separándolo del debido a elementos mecánicos, para detectar, en estado incipiente:

- el desprendimiento rotativo, que puede presentarse en compresores y ventiladores axiales.
- la cavitación que puede ocurrir en las bombas; su detección inicial es posible por el registro del ruido antes que por cualquier otra señal; la señal acústica máxima coincide con el mayor daño por erosión y tiene lugar antes de llegar al NPSH crítico, que daría lugar a una clara señal de disminución de caudal o de presión.

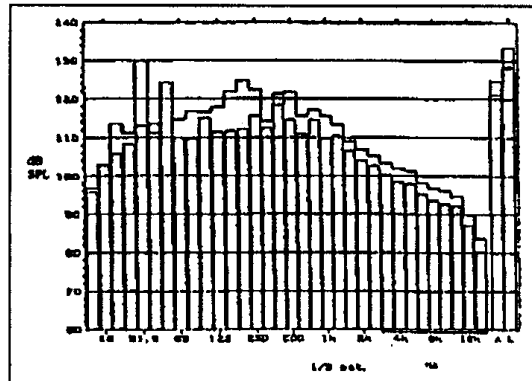


Figura 2: Comparación de espectros nominal y tras la aparición del desprendimiento rotativo; frecuencias fundamental: 50 Hz; de palas: 400 Hz; de celdas: 30 Hz.

Igualmente se ha probado (Velarde y Santolaria, 1994) que elevados niveles de potencia sonora en un ventilador están relacionados con su funcionamiento a carga parcial, en zona de inestabilidad, como muestra la figura 1.

La detección por medidas acústicas, en estado incipiente, del desprendimiento rotativo en ventiladores axiales, ha sido demostrado y caracterizado (Santolaria y Blanco, 1992), como muestra la figura 2, en la que puede verse el incremento de nivel de la frecuencia de las celdas tras la aparición del mencionado desprendimiento.

Otros trabajos (Velarde, 1993), confirman que la cavitación en bombas centrífugas se determina con mayor precisión, y en puntos más próximos a su aparición, con registros acústicos, comparando los resultados con otras monitorizaciones usuales (presión, caudal y vibraciones).

Queda así probado que en máquinas fluidodinámicas de velocidad de giro estable la monitorización de la presión acústica, o de la intensidad en caso de ambientes con elevados niveles de presión proporciona diagnósticos útiles para el mantenimiento predictivo, proporcionando en muchos casos la información más precisa obtenible de anomalías en estado incipiente.

### Rodamientos

Un detallado análisis del sonido emitido por rodamientos a bolas (Li, 1991), comparando espectros con y sin defectos tallados en pistas exteriores, interiores, y en una bola, ha permitido implementar un sistema de diagnóstico que discrimina entre los tres tipos de defectos mencionados, y detecta los rodamientos defectuosos con un nivel de aciertos del 97,5%, seis puntos porcentuales superior a la técnicas basadas en vibraciones. Esto se atribuye a que la proporción de energía debida a la presencia del defecto es mayor en la emisión acústica de lo que ocurre con la vibración, lo que permite una más fácil detección, y el espectro sonoro resulta ser una señal mejor, sobre todo si el sensor ha de estar a cierta distancia de la pieza directamente excitada.

### Motores Diesel

Dada la coexistencia de movimientos alternativos y rotativos, la combustión y movimientos de fluidos, los motores de combustión interna presenta emisiones sonoras extraordinariamente complejas. Con todo el análisis del funcionamiento de la máquina permite estimar la relación entre la frecuencia de emisión

más destacada de los elementos principales y la frecuencia tomada como fundamental (combustión); posteriormente la aplicación del método del paso por el cero de la intensidad y la elaboración de mapas intensimétricos, combinados con desmontajes parciales del motor, hace posible asignar a cada elemento su frecuencia característica (Pistono et al., 1995 a) y determinar la amplitud de la señal para cada régimen de marcha.

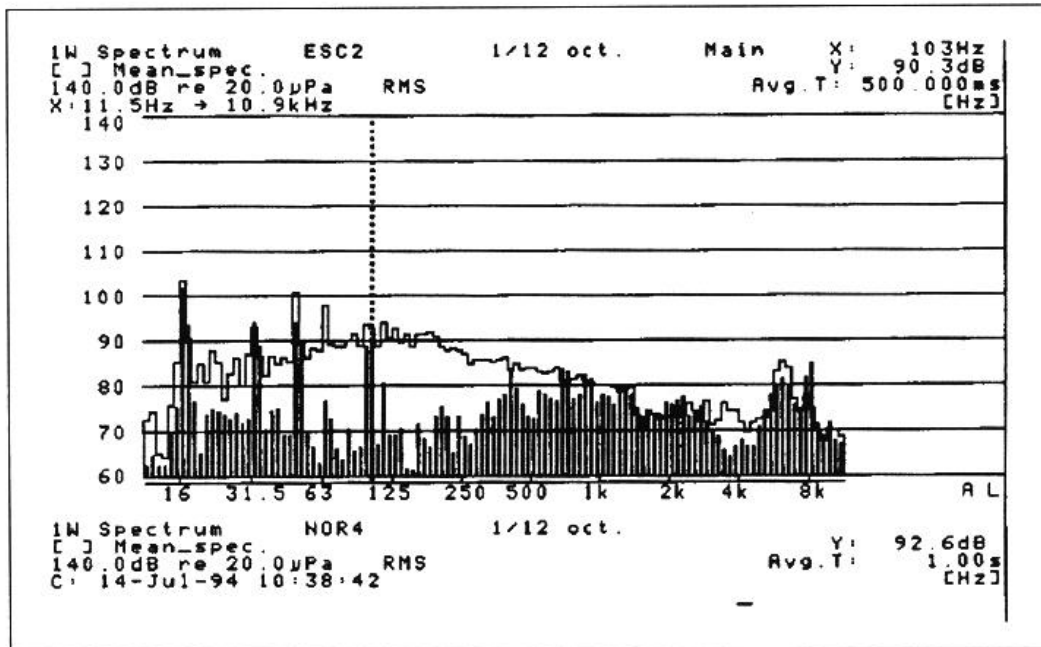


Figura 3: Motor Diesel monocilíndrico; comparación de espectros de presión normal (superior) y con cierre defectuoso de válvula de escape.

La simulación de anomalías pone de manifiesto la variación de la amplitud de la señal en las frecuencias seleccionadas (Pistono et al., 1995 b). En ocasiones la variación del espectro es muy llamativa, como en el fallo de cierre de la válvula de escape que muestra la figura 3. En otros es menos notable, pero claramente detectable, como en el adelanto de inyección que se presenta en la figura 4.

Para máquinas complejas, como la tratada, se hace preciso un estudio previo algo laborioso para establecer un catálogo de averías y su correspondencia con la variación del espectro acústico, antes de poder aplicar la monitorización de la emisión sonora al mantenimiento predictivo.

### CONCLUSIONES

Las principales ventajas del análisis de espectros acústicos para el mantenimiento predictivo, en comparación con otras técnicas pueden resumirse como sigue:

- Es un método absolutamente no intrusivo.
- Toda la información se consigue con un solo sensor, lo que se compara favorablemente con sistemas más conocidos, como los basados en vibración, que a menudo requieren varios acelerómetros situados en distintos puntos y direcciones.
- Las medidas de intensidad pueden efectuarse para la máquina en su lugar de funcionamiento real, proporcionando información que no se obtiene con otros medios.
- Algunos averías en estado inicial (defectos en engranajes, cavitación en bombas, desprendimiento rotativo en ventiladores) se detectan mejor por control de la emisión acústica que por ningún otro método existente.

Por estas razones puede predecirse que el análisis acústico jugará un papel cada vez más importante en los próximos años en el campo del mantenimiento predictivo.

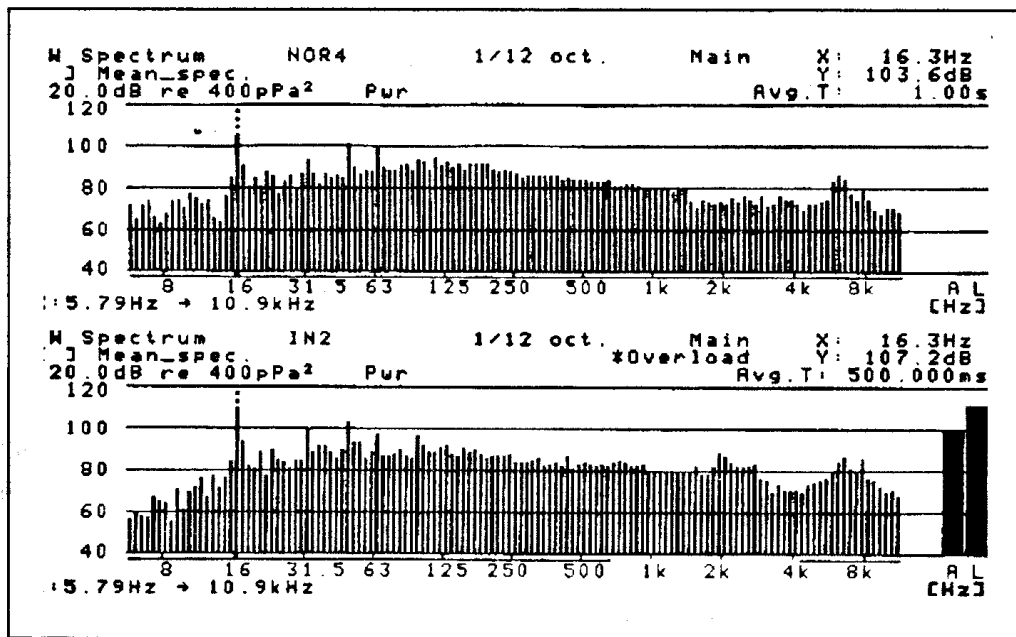


Figura 4: Motor Diesel monocilíndrico; comparación de espectros de presión normal (superior) y con adelanto de inyección

#### REFERENCIAS

Egusquiza, E.: Introducción al mantenimiento predictivo de turbomáquinas, Symposium "Mantenimiento predictivo en máquinas rotativas", Gijón, 1986.

Li, C.J.; Li, S.Y.: *Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring*, ASME Journal of Engineering, 1991.

Pistono, J.; Santolaria, C.; Martínez, J.: *Intensimetric location of sound sources. Application to Diesel engines*, Congr.Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Belo Horizonte, 1995 a.

Pistono, J.; Santolaria, C.; Martínez, J.: *Spectral acoustic analysis for machinery early damage detection. Application to Diesel engines*, Congr.Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Belo Horizonte, 1995 b.

Santolaria, C.; Blanco, E.: Spectral characterization of rotating stall in an axial flow fan with variable pitch blades, Symposium "Fan Noise", Senlis, 1992.

Velarde, S.: *Diagnóstico de daños incipientes en bombas centrífugas mediante el estudio de la firma*, Memoria de investigación, E.T.S.I.I., Gijón, 1993.

Velarde, S.; Santolaria, C.: *Manifestaciones acústicas de la inestabilidad a carga parcial de un ventilador centrífugo*, Congr.Nac.Ingeniería Mecánica, Valencia, 1994.