

Mantenimiento:

Algunas consideraciones sobre el análisis de vibraciones en máquinas rotativas

Luis Lezáun Martínez de Ubago, Dr. Ing. Industrial
Francisco Javier Martínez Gómez, Dr. Ing. Industrial
Javier Abad Blasco, Ing. Técnico Industrial
Universidad de Zaragoza

Introducción

Una de las claves de la gestión eficiente de un proceso de fabricación industrial radica en el control del proceso productivo, no sólo en cuanto a los parámetros del propio proceso, sino también a las informaciones relativas al estado y funcionamiento de la maquinaria. En este sentido, la función de los departamentos de Mantenimiento se está desplazando de la tradicional reparación de las máquinas que se averían (correctivo) a realizar las actuaciones necesarias para impedir que éstas fallen (preventivo y predictivo).

Este tipo de Mantenimiento no es nuevo. Tradicionalmente el supervisor de Mantenimiento experimentado colocaba un extremo de su des-

tornillador sobre la carcasa de un rodamiento, el otro sobre su oído y de esta manera conducía las vibraciones hacia el analizador: su cerebro.

El Mantenimiento predictivo tiene como objetivo la detección precoz de la aparición de causas de fallo en maquinaria, mediante la medición de variables en operación y su posterior análisis y diagnóstico. Este Mantenimiento engloba un amplio abanico de tecnologías (termografía, análisis de aceites, ultrasonidos, etc.), pero la más extendida es, sin duda, el análisis de vibraciones. Esta técnica es utilizada actualmente

en gran número de instalaciones industriales para seguir el estado de funcionamiento de las máquinas críticas en el proceso. En muy pocas palabras, se trata de auscultar el latido de la maquinaria.

El dominio del tiempo y de la frecuencia

El análisis de la evolución en el tiempo de las señales representativas de fenómenos físicos objeto

de interés en el campo de la Ingeniería, se ha venido haciendo clásicamente por la visualización de las mismas en pantallas de osciloscopio o a través de su impresión en registradores gráficos. Es cierto que en la señal representada en el dominio del

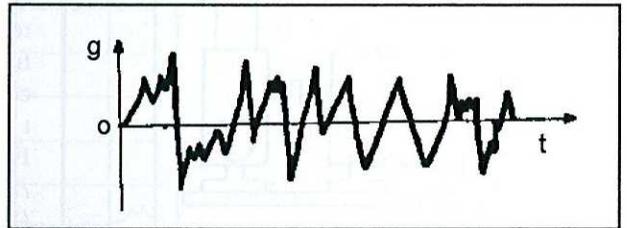
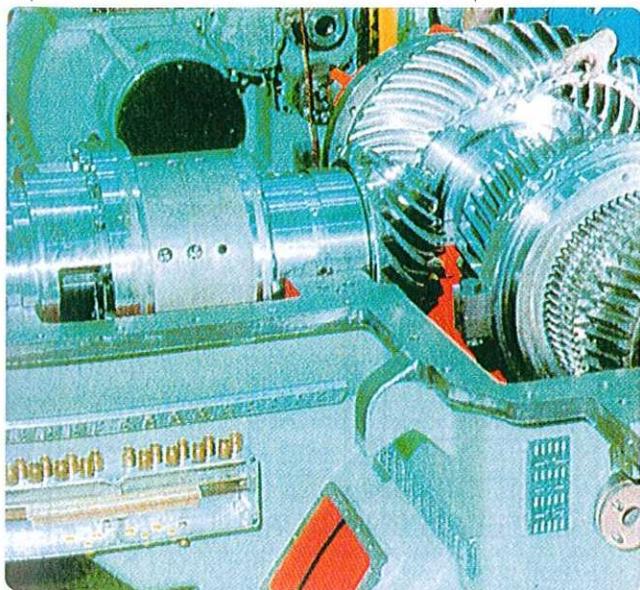


Figura 1: Representación de una vibración en función del tiempo

tiempo está contenida toda la información del parámetro físico en estudio, pudiendo ser su valoración muy sencilla como en el caso de una temperatura, pero en una vibración (Figura 1) la medida de los valores pico y otros que pueden obtenerse del gráfico son totalmente insuficientes para poder definir el fenómeno vibratorio.

Si la misma señal es presentada en el dominio de la frecuencia, es decir en ordenadas amplitudes y en abscisas frecuencias, se obtiene el gráfico de la figura 2 ya que la señal se considera como una suma infinita de ondas senoidales.

Las ventajas de la señal en el dominio de la frecuencia aparecen como evidentes, pues si la señal de la vibración la consideramos como imagen de la respuesta de un sistema a un determinado número de excitaciones, podremos incidir sobre éstas



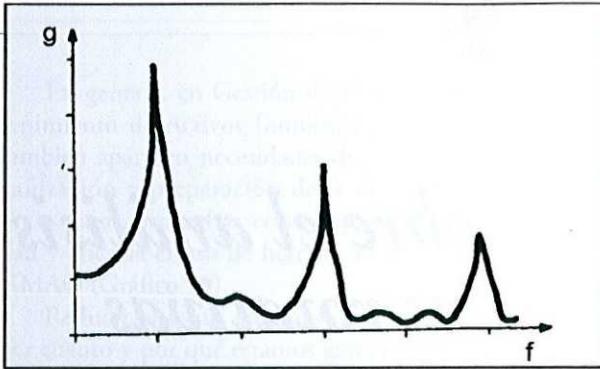


Figura 2: Representación de una vibración en función de la frecuencia

al valorar su influencia por la información obtenida del espectro de frecuencias.

Obsérvese que en ordenadas se representan valores de aceleraciones en unidades usuales divididas por el factor 9,81 (aceleración de la gravedad).

siglo XVIII por el barón de Fourier, pero es la disponibilidad que actualmente se tiene de métodos e instrumentos digitales lo que ha permitido la popularización de tecnologías basadas en el análisis espectral como es el análisis de vibraciones en máquinas rotativas.

de la máquina y, por lo tanto, conocer dónde ejercer acciones concretas para predecir averías.

Los fundamentos teóricos para pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia fueron establecidos en el

Si se desea conocer el fundamento de estas técnicas hace falta profundizar en conceptos como series de Fourier, transformada de Fourier, transformada rápida de Fourier (F.F.T), etc. Para ello pueden consultarse [1] y [2].

Sin embargo, lo que se pretende no es explicar esas técnicas sino aclarar algunos conceptos que pueden entenderse sin necesidad de ese dominio específico.

¿Qué hace un analizador de señal?

La mayoría de los equipos que se ofrecen para análisis de vibraciones utilizan la técnica matemática nombrada anteriormente F.F.T (*Fast Fourier Transform*). Para que la señal pueda ser procesada con esta técnica es preciso que el analizador la acondicione debidamente (Figura 4) [3].

Los acelerómetros son los transductores que más se utilizan para la medida de vibraciones debido a su robustez y precisión. La mayoría se basa en elementos piezoeléctricos que generan una tensión proporcional a la aceleración. El proceso de acondicionamiento incluye la amplificación de la señal analógica procedente del transductor y su filtrado para eliminar las frecuencias que se encuentran por encima del alcance de medida. La señal filtrada pasa por un convertidor A/D, que toma muestras de la misma a intervalos de tiempo iguales y genera un código digital que guarda relación con la amplitud de cada muestra. Por supuesto, cuanto mayor es la frecuencia de muestreo más fiel es la conversión. La siguiente operación consiste en filtrar las frecuencias que están por encima o por debajo de las que interesan y así se conseguirá mejor resolución en la pantalla. A continuación se obtiene la F.F.T de la señal.

Completado el proceso, aparece en la pantalla el espectro de frecuencias.

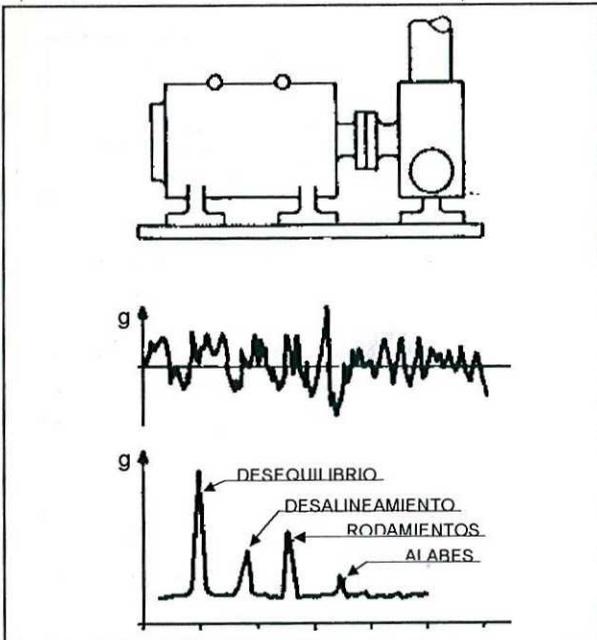
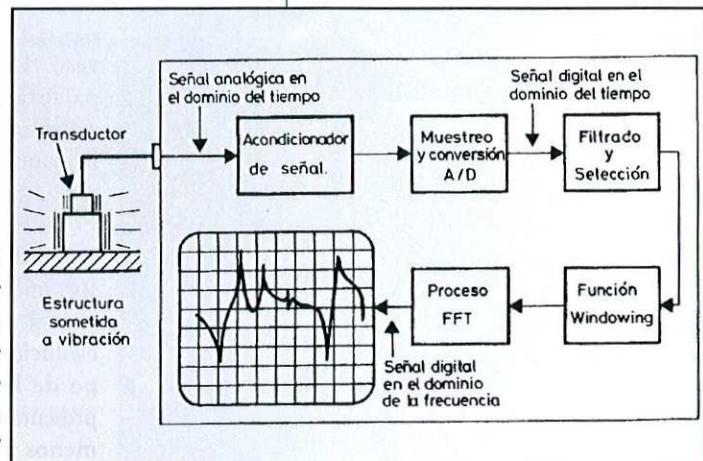


Figura 3: Comparación de dominio del tiempo y la frecuencia

A título de ejemplo, se considera un motor rotativo acoplado a una bomba (Figura 3); de la señal en el dominio del tiempo sólo podemos evaluar si el nivel total de la vibración está dentro de los límites exigidos a la instalación y quizás algún otro dato derivado de la forma de onda, pero el análisis del espectro de frecuencias permite discriminar la influencia que en el conjunto tiene cada elemento

Figura 4: Diagrama de bloques de un analizador de señales que utiliza la técnica FFT



Interpretación del espectro de frecuencias

Para explicarlo de la manera más sencilla, vamos a centrarlo en un elemento mecánico que aparece en gran cantidad en las instalaciones asociadas a las máquinas rotativas: el rodamiento. En una refinería, por poner un ejemplo, puede haber miles de rodamientos funcionando en un instante dado.

Centrándonos, a su vez, en los de bolas sabemos que constan esencialmente de: pista interior, bolas, jaula

Sin embargo, los espectros aparecen siempre "contaminados" por distintas causas como ruidos, defectos asociados a la transformada de Fourier, etc. El problema se acentúa si el fallo en el rodamiento está comenzando a producirse y por tanto se transmite como una señal de poca energía (Figura 5). Es entonces cuando hay que aplicar otros métodos complementarios del simple cálculo del espectro de amplitudes. De todos esos métodos sólo se van a nombrar dos, aunque existen muchos más.

la procesada por la transformada de Fourier pero agrupando armónicos en una sola señal. Se ha "limpiado" de alguna manera el espectro y su interpretación puede ser más clara [6].

Volviendo al rodamiento de bolas que se puso como ejemplo, se comentaba que si los defectos en el mismo en la pista interior, exterior, etc. son de gran magnitud, el espectro de frecuencias nos revelaría un aumento de amplitud a la frecuencia correspondiente que, por otra parte, está tabulada según las características geométricas del rodamiento. En este caso el diagnóstico es fácil. Lo que ocurre es que, para que realmente sea eficaz el Mantenimiento predictivo, nos interesa que se detecte el defecto antes de que éste adquiriera proporciones alarmantes. Esto con el espectro normal no puede conseguirse y es aquí donde puede intervenir otra técnica avanzada para aclarar el problema: la demodulación de amplitud o procesado de envolvente. El procedimiento, expuesto de la forma más sencilla posible, podría ser el siguiente.

Los defectos del rodamiento, aunque sean incipientes, provocan unos impulsos en la carcasa del soporte donde se alojan. Estos impulsos excitan las frecuencias propias de la citada carcasa (que suelen ser del orden de varios kilohertzios). Por lo tanto, en el espectro "normal" en el rango de las altas frecuencias aparecerá un aumento en las amplitudes. Este aumento se debe a la "mezcla" de dos señales, la propia del defecto (moduladora) y la de vibración de la carcasa (portadora). Con el método de la envolvente se consigue separar las señales (demodulación) y comprobar si la frecuencia de modulación corresponde a algún defecto de los mencionados.

Para llevar a cabo este proceso, y entender lo que se hace, es necesario recordar conceptos como convolución de señales, transformada de Hilbert, funciones analíticas de variable compleja [7]. Algunos de estos conceptos se estudiaban en la asignatura

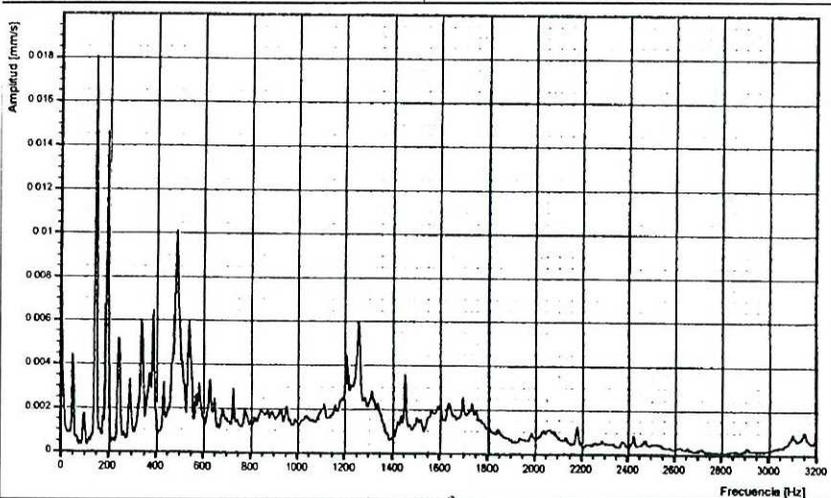


Figura 5: Vibración axial en un rodamiento nuevo

y pista exterior. El deterioro de cada uno de estos elementos generará una o varias frecuencias características que, reflejadas en los espectros, nos permitirán, en teoría, una rápida aclaración del problema.

Existen fórmulas teóricas que dan los valores de dichas frecuencias: de deterioro de la pista exterior (BP-FO), de deterioro de la pista interior (BPMI), etc [4].

El problema expuesto hasta aquí sería de muy fácil interpretación si en los espectros apareciesen claramente las frecuencias características (que están catalogadas no sólo para rodamientos tal como se ha indicado) con amplitudes significativas. Bastaría con ir al catálogo y sabríamos qué elemento está funcionando anormalmente y por tanto puede ser aconsejable su sustitución.

Técnicas avanzadas para el análisis de vibraciones

Estas técnicas son aplicadas con menos frecuencia en la industria y por eso lo de técnicas avanzadas. Han demostrado su gran utilidad a la hora de detectar problemas que pasarían desapercibidos utilizando las técnicas más sencillas [5].

La primera técnica que se va a citar es el llamado análisis CEPSTRUM.

Solamente se cita la definición, pero se comprende que el que quiera profundizar debe primeramente desempolvar lo que estudió en la carrera sobre análisis de Fourier. Así, la realización de una transformada de Fourier sobre el logaritmo de un espectro de vibración da como resultado el cepstrum. De esta forma se muestra una información semejante a

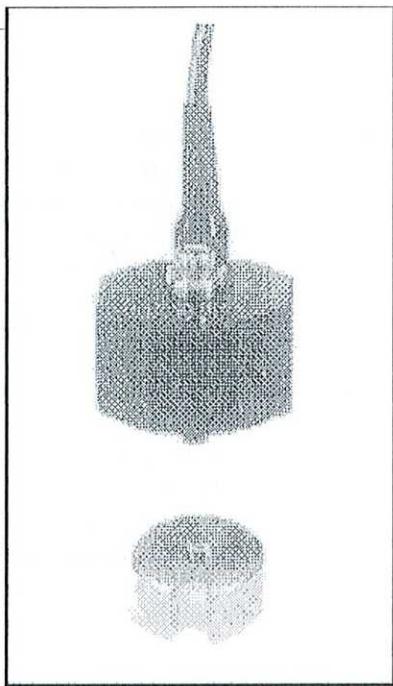


Figura 6. Sensor triaxial y taco de fijación

de ampliación de Matemáticas a lo largo de la carrera (Plan 64).

Finalmente, y dentro de lo que se ha apuntado como técnicas avanzadas, cabe indicar que, para mejorar la capacidad de diagnóstico, se pueden emplear sensores triaxiales (Figura 6). El diagnóstico correcto de los fallos en maquinaria rotativa depende de tener una información completa acerca de los datos espectrales de vibración. Como las máquinas en general tienen tres grados de libertad en su movimiento lineal, la lógica sugiere que los datos de vibración en tres ejes darán más información, si se pueden analizar adecuadamente [8].

Analogías con la Medicina y Conclusión

Ciertamente se pueden establecer analogías con la Medicina. Se recuerda a propósito de esto que en 1816 el médico francés René Laennec presentó un invento que revolucionó el diagnóstico de las enfermedades cardiopulmonares: el estetoscopio. Dicho aparato se puede aplicar sobre el pecho y la espalda, y amplifica los ruidos producidos por los pulmones y el corazón. El invento permitió sustituir la auscultación directa (es decir, colocando la oreja sobre el pecho del

paciente). Más tarde, Laennec preparó un estudio pormenorizado de las diferentes categorías de ruidos percibidos y su relación con las distintas enfermedades cardiorrespiratorias.

Lo equivalente en el tema que nos ocupa sería el catálogo de posibles averías en los distintos elementos de las máquinas rotativas: cojinetes, engranajes, rodamientos, etc. [9] y [10].

Como se ha indicado al principio, hemos omitido deliberadamente todo desarrollo matemático. Sin embargo, el que desee profundizar en estos temas debe, tener ciertos conocimientos matemáticos desempolvando lo que aprendió sobre series de Fourier y aumentando lo estudiado. De lo contrario, como nos comentaba el Doctor Jens Jensen (experto en análisis de vibraciones) de la Hochschule de Bremen, hay Casas comerciales que venden sofisticados aparatos a las empresas diciendo que sirven para todo y luego quedan arrinconados por no entender los técnicos de mantenimiento sus múltiples posibilidades.

Convendría al respecto hacer una reflexión sobre una cita que el ilustre maestro, Doctor ingeniero industrial y matemático, Pedro Puig Adam, hacía en uno de sus libros:

“Se cuenta que Thales de Mileto paseaba una noche tan absorto en la contemplación del firmamento que se cayó a un foso, accidente que comentó una vieja del lugar diciéndole:

¿Cómo queréis enseñarnos lo que pasa ahí arriba si no os dais cuenta siquiera de lo que pasa a nuestros pies?”

La anciana razonaba bien dentro de su estrecho campo visual. No podía entrar en su previsión el que anhelos como los de Thales iban a crear una Ciencia que permitiera, siglos más tarde, orientar a los navegantes. Lo mismo puede decirse del llamado análisis armónico de Fourier inventado hace dos siglos y utilizado actualmente en el diagnóstico de averías en máquinas rotativas.

Como la mujer de entonces razonan algunos ingenieros con respecto

a las Matemáticas; y tampoco carecen de razón dentro de su concepción de la Ingeniería. De lo que carecen es de perspectiva.

Otra cosa bien distinta es que, en una buena parte de las Escuelas de Ingenieros, la enseñanza de las Matemáticas no está orientada adecuadamente. Pero ése es otro tema ajeno al mantenimiento.

Bibliografía

[1] Villena, J.L. Bases prácticas para el estudio de señales en el dominio de la frecuencia. Revista A.I.T número 61, diciembre 1984.

[2] Grupo de Vibroacústica de la Universidad de Zaragoza. Aplicaciones del análisis de vibraciones en la industria. Zaragoza, 12-16 de abril de 1999.

[3] Castells, J. Medida de vibraciones en máquinas rotativas. Revista Mantenimiento y Electrónica industrial, enero 1992

[4] Blasco, M.A; Guillén, J.J. Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas para el estudio de vibraciones en rodamientos. Proyecto de Fin de Carrera. Bremen, 1996.

[5] Hurtado, A. Detección precoz de fallos en maquinaria. Revista Ingeniería Química, octubre 1998.

[6] Barranco, E. Aplicación del método Cepstrum en la detección de defectos en rodamientos. Proyecto de Fin de Carrera. Bremen 1998.

[7] Ibáñez, D. Detección de defectos en rodamientos a través del método de la envolvente. Proyecto de Fin de Carrera. Bremen 1999.

[8] Watts, B; Hurtado, A; Charray, C. Toma de datos de vibraciones triaxiales. Revista Ingeniería Química, septiembre 1999.

[9] Bolaños, F. Mantenimiento predictivo de maquinaria análogo a la Medicina. Revista Ingeniería Química, octubre 1995.

[10] Heraldo de la Historia (años 1810-1824). Publicación extraordinaria del Heraldo de Aragón, 1999. ■