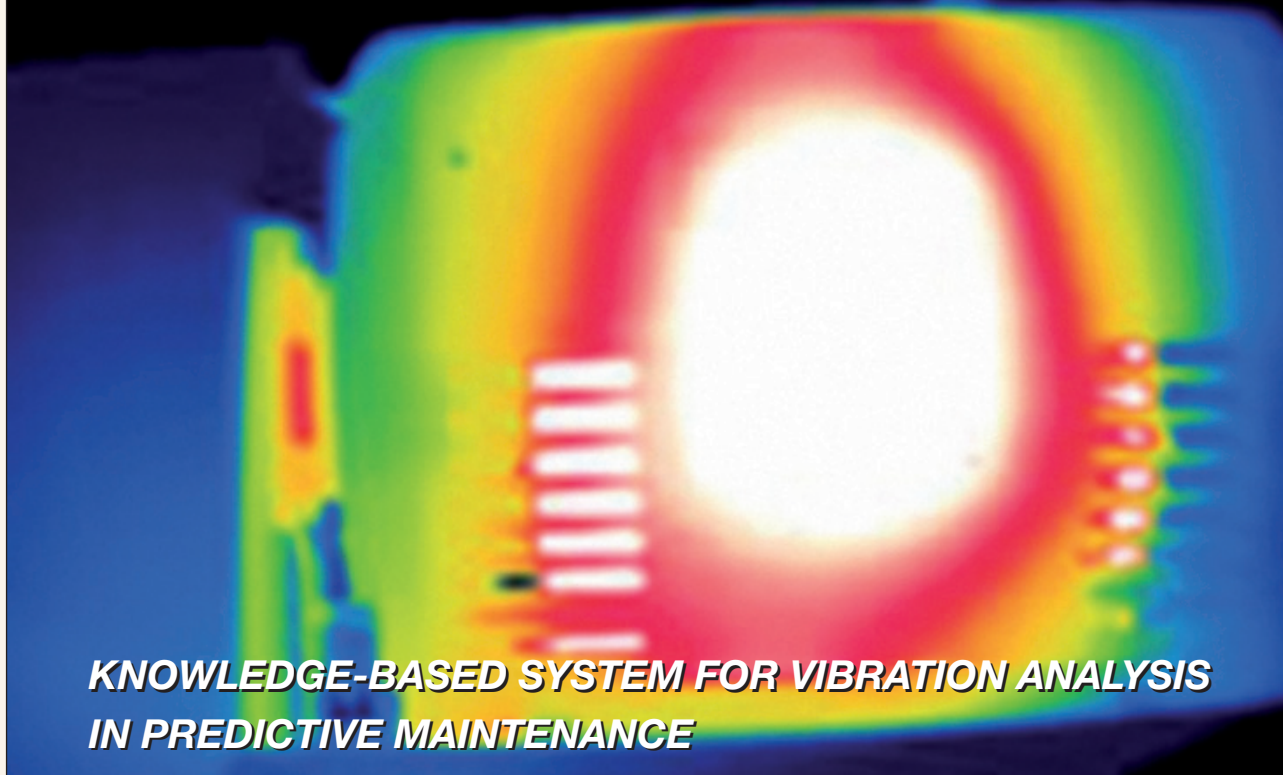


SISTEMA BASADO EN CONOCIMIENTO PARA ANALISIS DE VIBRACIONES EN MANTENIMIENTO PREDICTIVO



KNOWLEDGE-BASED SYSTEM FOR VIBRATION ANALYSIS IN PREDICTIVE MAINTENANCE

José Luis Calvo Rolle
Doctor Ingeniero Industrial
Universidad de La Coruña

Ramón Ferreiro García
Doctor en Maquinas Navales
Universidad de La Coruña

Recibido: 14/03/08
Aceptado: 12/05/08

Ángel Alonso Álvarez
Doctor Ingeniero en
Telecomunicaciones
Universidad de León

Héctor Alaiz Moretón
Ingeniero Informático
Universidad de León

RESUMEN

En el presente documento se muestra la metodología general a seguir, para implementar una aplicación inteligente con un sistema basado en conocimiento en el ámbito de mantenimiento, con el cual se realizará mantenimiento predictivo a partir de un mantenimiento basado en condición en el contexto del análisis de vibraciones. En este sentido se realiza una introducción del análisis de vibraciones para mantenimiento basa-

do en condición, con aquellos aspectos que se han de observar y de los cuales se deducirán las reglas con las que se implementará el sistema basado en conocimiento. Seguidamente se explica la topología de sistema basado en conocimiento empleada, así como las partes de las que constan.

Palabras clave: Mantenimiento Preventivo, Sistemas basados en conocimiento, análisis de vibraciones.

ABSTRACT

The present paper shows the general methodology to follow to implement an Intelligent application with a knowledge based system on the area of maintenance, which it will perform predictive maintenance from a condition based maintenance, in the context of vibration analysis. In this case it will be made an introduction of vibration analysis for condition based maintenance, with those aspects, that it is necessary to observe and from which it will be deducted the rules that implement the knowledge based system. Then it is explained the topology of knowledge based system used and all the parts of those appearing.

Key Words: *preventive maintenance, Knowledge-based system, vibration analysis.*

1.- INTRODUCCIÓN

Desde un punto de vista cronológico, en los inicios de las actividades de mantenimiento se comienza a practicar el mantenimiento corrector, subsanando las averías en el momento en que se producen. Seguidamente llegaría el mantenimiento preventivo sistemático, con sus inspecciones o intervenciones planificadas. Y más recientemente se ha comenzado a desarrollar el mantenimiento condicional, en el que se realizan actuaciones en función del estado de los equipos.

Sin embargo, esta progresión aún no ha terminado, de manera que se está asistiendo a una mutación hacia el mantenimiento del futuro, caracterizado por la evolución simultánea de la metodología y de los medios utilizados, primando en todo ello una buena gestión [1].

Por lo que a los métodos se refiere, es de observar la evolución del mantenimiento condicional hacia el mantenimiento predictivo, ampliado con una dimensión más: el tiempo, en el que se pretende prever la evolución de los deterioros de los equipos para intervenir en el momento más oportuno. Este hecho ocasiona que los otros métodos, el corrector y el preventivo sistemático, sólo subsisten de forma parcial, simplificados y optimizados.

Cada vez con mayor frecuencia, el mantenimiento se plantea a partir de su misma concepción, examinando los posibles fallos, sus consecuencias y previendo los dispositivos de diagnóstico, con la intención de estimar el coste global de ciclo de vida; es decir, desde una óptica de coste global mínimo en cuanto a adquisición y utilización se refiere.

En este sentido, se tiende actualmente a la incorporación de nuevas técnicas, como son la inteligencia artificial en sus diferentes disciplinas (redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica fuzzy, sistemas expertos e híbridos de estos) [3, 4, 5 y 6], que

vienen a mejorar o a apoyar las existentes y, de este modo conseguir mejores resultados en general. En esta línea, en este documento se describe la elaboración de un sistema basado en conocimiento, con el cual se apoyará la práctica del análisis de vibraciones en el ámbito del mantenimiento basado en condición, con el cual se podrán predecir de manera altamente satisfactoria las diferentes actuaciones necesarias.

2.- INGENIERÍA DE CONOCIMIENTO - SISTEMA BASADO EN CONOCIMIENTO

Ante la pregunta ¿Qué es Ingeniería de Conocimiento?, atendiendo al significado de las dos palabras por separado, enunciada por el diccionario de la *Real Academia*, se puede establecer como definición “*Conjunto de conocimientos y técnicas que permiten aplicar el saber científico a la utilización del conocimiento*”, pero no sería esta una definición muy adecuada, optando por la siguiente “*la disciplina que permite construir sistemas inteligentes mediante la deducción de conocimientos, teniendo como procesos centrales la adquisición, representación, manipulación y validación de éste*”.

Dentro de la Ingeniería de Conocimiento se tienen los Sistemas Basados en el Conocimiento, que se pueden definir como “*sistemas software que mantienen una gran cantidad de conocimiento y que incluyen métodos adecuados para explotarlo*”. Desde este punto de vista aparece en ocasiones el término de *Sistema Experto*, que se suele reservar para aquellos Sistemas Basados en Conocimiento que se relacionan más directamente con el conocimiento utilizado por expertos humanos, a diferencia del que se puede extraer de los libros o de personas no expertas, aunque a veces se emplea de manera indistinta uno de otro. Una de las ventajas que tienen estos sistemas, es que son capaces de capturar experiencia y comportamientos escasos y específicos, haciéndola mas ampliamente disponible.

El sistema basado en conocimiento se trata de una aplicación informática cuyo funcionamiento se puede regir por un esquema como el de la figura 8. En ella se observa un bloque central que es la base de conocimiento, que son especificaciones formales de los conceptos y métodos correspondientes al dominio que se esté tratando, en este caso las reglas deducidas en base a los análisis de vibraciones realizados a una máquina concreta, con las correspondientes conclusiones tras realizar el oportuno estudio de la procedencia de la desviación del análisis de vibración con respecto al considerado como normal.

De forma general, el sistema recibirá peticiones desde el exterior a través de la interfaz de entrada (petición) que en el caso que se presenta consiste en la parte correspondiente del software implementado a la introducción de datos. Existe un módulo de planificación que se encarga de solucionar la petición utilizando métodos y conceptos existentes en la base de conocimiento. El sistema dará como resultado una respuesta a través de una interfaz de salida, que es otra parte de la aplicación destinada a mostrar los resultados deducidos.

Los métodos para resolver problemas se encuentran definidos en la base de conocimiento, pero no tiene los mecanismos para realizar las acciones asociadas a cada método. Para hacer esto existe el solucionador de problemas, que es el módulo del sistema basado en conocimiento al que se le han programado los pasos a seguir para llevar a cabo una tarea.

Para realizar operaciones específicas puede ser necesario recurrir a aplicaciones concretas como los cálculos necesarios asociados a la base de conocimiento. Se completa finalmente con otros bloques ejemplo que puedan ser necesitados, como son otras bases de conocimiento genéricas ya creadas y que no son propias del dominio que se está tratando (bases para cálculos de los parámetros como la transformada de **Fourier** comentada posteriormente), bases es-

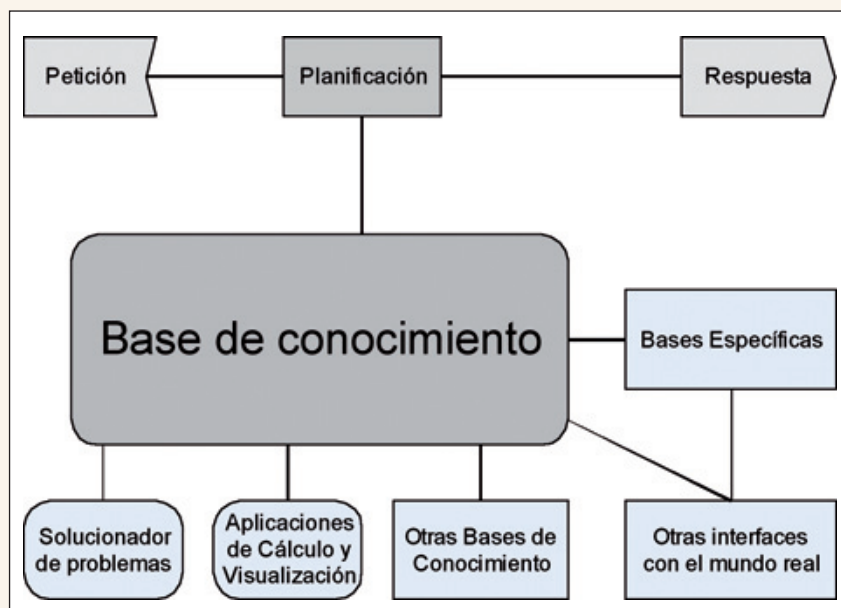


Figura 8. Esquema general de sistema basado en conocimiento

pecíficas (en este caso no se ha utilizado ninguna pero en la ampliación de prestaciones puede ser necesario implementar una nueva base de conocimiento de apoyo a la existente), y otras interfaces con el mundo real, que capten información necesaria del exterior, como son los sensores que incluye el vibrómetro.

Es necesario indicar que ha de existir una alimentación constante del sistema con nuevas reglas, para que este sea más potente en cuanto a barajar una mayor cantidad de posibilidades. Dicho de otra forma, ampliar el conocimiento del sistema. Este hecho ocasiona que la misma base de conocimiento de una máquina pueda tener aplicación en otra de similares características.

2.1. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO

El desarrollo de sistemas basados en conocimiento es muy aconsejable para ciertos dominios, e incluso imprescindible en otros. Algunas de las ventajas más importantes que ofrecen los sistemas basados en conocimiento son las que siguen:

- **Permanencia:** A diferencia de un experto humano un Sistema Basado en Conocimiento no envejece, y por tanto no sufre pérdida de facultades con el paso del tiempo.
- **Duplicación:** Una vez programado un Sistema Basado en Conocimiento lo podemos duplicar infinitas veces, lo que repercute en una reducción de costes.
- **Rapidez:** Un Sistema Basado en Conocimiento puede obtener información de una base de datos y realizar cálculos numéricos mucho más rápido que cualquier ser humano.
- **Bajo costo:** A pesar de que el costo inicial pueda ser elevado, gracias a la capacidad de duplicación el coste finalmente es bajo.
- **Entornos peligrosos:** Un Sistema Basado en Conocimiento puede trabajar en entornos peligrosos o dañinos para el ser humano.
- **Fiabilidad:** Los Sistema Basado en Conocimiento no se ven afectados por condiciones externas, un humano sí (cansancio, presión, etc.).
- **Explicación del razonamiento:** Permite justificar las salidas en el caso de dominios problemáticos o críticos. Esta cualidad puede ser empleada para formar a personal no experto en el ámbito de aplicación.

2.2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO

El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y “saber hacer” que sirve como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información. Se origina y aplica en la mente de los conocedores. En las organizaciones no solo se encuentra dentro de documentos o almacenes de datos, sino que también está en rutinas organizativas, procesos, prácticas y normas. El conocimiento es intuitivo y difícil de captar en palabras o de entender plenamente de forma lógica, y existe dentro de las personas, como parte de la complejidad humana, que se presenta como un proceso o un stock. El conocimiento es específico de la materia y del dominio. El conocimiento es un tipo especial de información que se puede definir como “información de la información”. Como ejemplo de esto se puede tomar un caso clínico en el que un individuo posee 160 pulsaciones por minuto, a priori parecería una información preocupante, pero no lo sería en el contexto de que se estuviese hablando de un feto, en cuyo caso sería normal.

Si es difícil definir el concepto de conocimiento, lo es más aun representarlo, siendo necesario que el conocimiento adquirido de una materia deba ser organizado y, preparado para su utilización computacionalmente en un sistema. Al desarrollar un sistema basado en conocimiento, primero se intenta ver el problema desde el punto de vista de usuario y después se cambia la perspectiva para verlo desde el punto de vista del sistema. Se intenta por tanto pasar del dominio de la aplicación al de la implementación. Para realizar esta transformación se debe llevar a cabo una actividad de modelado del sistema que se divide en dos partes. La primera es una especificación de lo que debe hacer el sistema; determina si el sistema es válido y se actúa a las necesidades del usuario. Esta primera parte se conoce como modelado conceptual y crea los denominados modelos conceptuales del sistema. Éstos

representan la estructura de los conceptos identificados en la fase de adquisición del conocimiento y los métodos de resolución empleados por expertos del dominio y otras fuentes. La segunda parte de modelado del sistema determina que el producto software sea correcto y permita representar todo el conocimiento necesitado y tenga capacidad para realizar los procesos de inferencia para dar soluciones; esta parte es la denominada modelado formal.

3.- BENEFICIOS DEL MANTENIMIENTO POR EL CONTROL DE LA CONDICIÓN

El mantenimiento por el control de la condición no sustituye a otros métodos de mantenimiento tradicionales (correctiva, preventiva sistemática). Es un valioso complemento para una mejor comprensión de un programa integrado de mantenimiento. No consigue eliminar todos los aspectos de los programas de mantenimiento preventivo sistemático o correctivo, pero puede reducir significativamente el número de averías inesperadas y, mejorar la planificación y programación de intervenciones de mantenimiento.

El mantenimiento por control de la condición no tiene solo efectos en la disminución de costes, tiene también algo mucho más importante como es el aumento de la seguridad de las personas e instalaciones. Dado que este tipo de control permite diagnosticar más temprano la evolución de la avería, se disminuyen las averías catastróficas, las cuales podrían provocar daños en el personal de producción o en los demás sistemas de la instalación.

Este tipo de mantenimiento también mejora la calidad en la recepción de nuevos equipos o que fuesen reparados por terceros. Las técnicas usadas permiten diagnosticar el verdadero estado o condición en que la máquina se encuentra. De este modo se evitan costos resultantes de todo un proceso, normalmente tedioso y difícil, para la corrección de problemas. Cada vez es más importante la

exigencia al proveedor de análisis vibratorios de referencia, para comparar con las medidas realizadas en las revisiones.

4.- TÉCNICAS DE CONTROL DE LA CONDICIÓN

Existe una gran variedad de técnicas basadas en diferentes tecnologías, que pueden y deben ser usadas como parte de un programa de mantenimiento por control de la condición. Debido a que la mayor parte de los equipos de la industria son mecánicos y rotativos [7], la medición de vibraciones es normalmente la técnica clave en la mayor parte de los programas de mantenimiento [17]. Esta técnica se limita a la monitorización de la condición mecánica de las máquinas, y no de otros parámetros requeridos para el mantenimiento de fiabilidad y rendimiento de las instalaciones. Otras técnicas usadas son: inspección visual, parámetros procesales, termografía, tribología, otras técnicas no destructivas (p. ej.: ultrasonidos, líquidos penetrantes, magnetoscópica,...), análisis de aceites, etc. [8]

La medición de vibraciones, el análisis de aceites, y más recientemente la termografía son las técnicas más utilizadas en mantenimiento basado en condición, por tanto tendrán un desarrollo superior a las restantes existiendo un gran número de estudios y contribuciones en este sentido véase [9 y 10]. Este artículo trata la medición de vibraciones, pero perfectamente la metodología expuesta puede ser aplicable a las otras técnicas mencionadas.

5.- MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

La importancia de la utilización de este tipo de técnicas, deriva del hecho de existir relaciones causa-efecto entre las vibraciones medidas y las averías de las máquinas rotativas. Según estudios efectuados, cerca del 90% de las averías de las máquinas rotativas fueron precedidas de un aumento significativo de sus niveles de

vibración. Cada máquina posee en sus condiciones normales de funcionamiento una curva vibratoria característica, tal como el ser humano tiene un electrocardiograma característico. Cuando una avería comienza a desarrollarse el comportamiento dinámico de la máquina se altera y, consecuentemente también se altera su curva vibratoria. Puede demostrarse que existen curvas vibratorias típicas para cada tipo de avería. También aquí existe un ejemplo análogo en el ser humano. El electrocardiograma permite al cardiólogo diagnosticar ciertas dolencias sin necesidad de operar al paciente.

Una medición y análisis de vibraciones permite que se aplique a las máquinas una filosofía de prevención semejante a la que la medicina aplica a los seres humanos. Verdaderamente, las grandes ventajas de esta técnica son: detectan un gran número de averías, lo hacen en su fase inicial (ideal para aplicación del método de análisis de tendencia), a menudo no es necesario parar la máquina, permiten diagnosticar la causa de la avería, etc.

Las vibraciones son un fenómeno natural en las máquinas rotativas. Las necesidades cada vez son mayores (mas potencia, mejores rendimientos y mayores velocidades), aliadas a una exigencia creciente en cuanto a la incomodidad y a la seguridad, por lo que las técnicas de aislamiento y reducción de vibraciones se tornaron parte integral del proyecto de las máquinas.

La necesidad de reducir costes de mantenimiento y de aumentar la seguridad del personal e instalaciones, ocasiona que el control de la condición por medición de vibraciones pase a ser parte integrante de cualquier hoja de mantenimiento.

En la práctica es muy difícil evitar la vibración. Esta existe debido a efectos dinámicos resultantes de tolerancias de fabricación, holguras, desequilibrios residuales y fricción. Muchas veces, pequeñas fuerzas desequilibradas (y consecuentemente pequeñas vibraciones) pueden excitar frecuencias naturales de componen-



Figura 1. Deterioro en rodamiento

tes estructurales, dando origen a vibraciones de gran amplitud, muchas veces destructivas, en el estado que es conocido por resonancia.

La vibración es un fenómeno que puede ser nocivo para las personas que se encuentren sometidos a ellas [11]. No obstante las vibraciones no siempre son indeseables, incluso en algunos casos pueden ser útiles, como es el caso de los martillos neumáticos, los compactadores de hormigón y otras máquinas. En cuanto al mantenimiento por control de la condición, las vibraciones que se miden están normalmente relacionadas con fenómenos indeseables, como es el caso del desequilibrio, del desalineamiento, de las holguras, de los desgastes (figura 1), etc.

¿Que es la vibración?

Una posible definición de la vibración sería “un movimiento oscilatorio en torno a una posición de referencia o de reposo”. Este movimiento puede ser previsto en el tiempo, o sea, la posición espacial del sistema en vibración puede ser determinada en el futuro, llamándose vibración periódica. La vibración originada por las máquinas rotativas es normalmente de este tipo.

Cuando el movimiento oscilatorio no puede ser previsto se llama vibración aleatoria. Ejemplos de esta vibración son los terremotos, la cavitación y determinadas turbulencias hidráulicas en bombas y tuberías. Pero, si este movimiento es de corta duración es denominado vibración transitoria. Son ejemplos de este tipo

de vibración, las que resultan de velocidades críticas, resonancias o choques.

6.- CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN

Vibración armónica

La vibración más simple es el movimiento sinusoidal o armónico. Este es el movimiento que una masa suspendida en un muelle describiría idealmente, siguiendo la dirección vertical, si fuese perturbada de su posición de reposo y no hubiese disipación de energía. El movimiento sinusoidal es descrito matemáticamente por la expresión (1) donde $\omega = 2\pi f$ es la velocidad angular en rad/s, X es la amplitud del pico en m (deslizamiento) y Φ es el ángulo de desfase en rad.

$$x(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t + \Phi) \quad (1)$$

La frecuencia indica el número de ciclos por segundo que efectúa el sistema. Puede ser representada en unidades de velocidad angular (rad/s) o en ciclos por segundo. Es también usual en mantenimiento, la utilización de la unidad de revoluciones por mi-

esta razón que la determinación de frecuencias de las vibraciones es fundamental para el diagnóstico de la causa de averías.

La amplitud de pico muestra cual es el máximo de amplitud de movimiento que describe el sistema. Este parámetro da una idea, si bien incompleta, de la gravedad de la vibración. El ángulo de desfase, normalmente en radianes, permite medir el movimiento en relación a una referencia. Entre otras cosas, la medición del desfase posibilita distinguir el modo de vibración de una máquina. La representación gráfica de la vibración armónica puede tener una forma como la que se muestra en figura 2.

Vibración periódica no armónica

La vibración periódica existe en todas las máquinas rotativas. De hecho, la armónica es un caso particular de esta en donde sólo existe una frecuencia, una amplitud de pico y un ángulo de desfase. En la vibración periódica no armónica se encuentran varias frecuencias, tantas como amplitudes y desfases. Este tipo de vibración puede ser interpretado como la suma, instante a instante, de varias vibraciones armónicas, cada una de ellas con una frecuencia, amplitud y desfase.

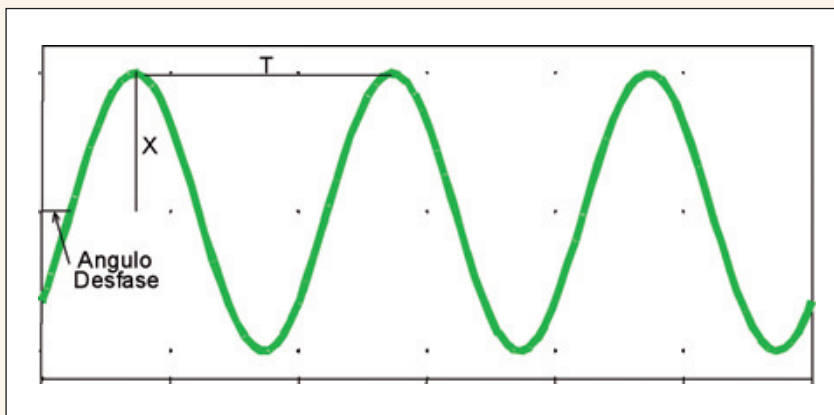


Figura 2. Forma de la vibración armónica

nuto (RPM), debido a la relación directa entre frecuencia de determinadas vibraciones y la rotación de los componentes de máquinas. Es por

La vibración de una máquina puede ser vista como la vibración resultante de las contribuciones individuales de sus componentes, que

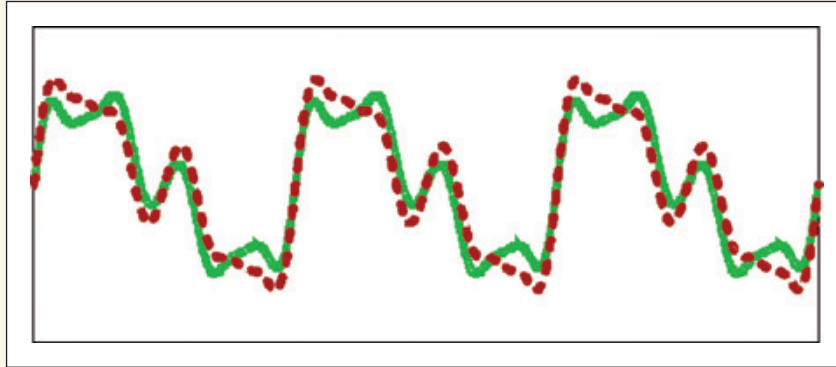


Figura 3. Gráficas de vibración con respecto al tiempo de una máquina

naturalmente también vibran y, consecuentemente, transmiten su vibración a la máquina. La contribución mas simple será una vibración armó-

dente que una tiene amplitudes más elevadas la mayor parte del tiempo. Si pertenecen a la misma máquina se puede concluir que la vibración au-

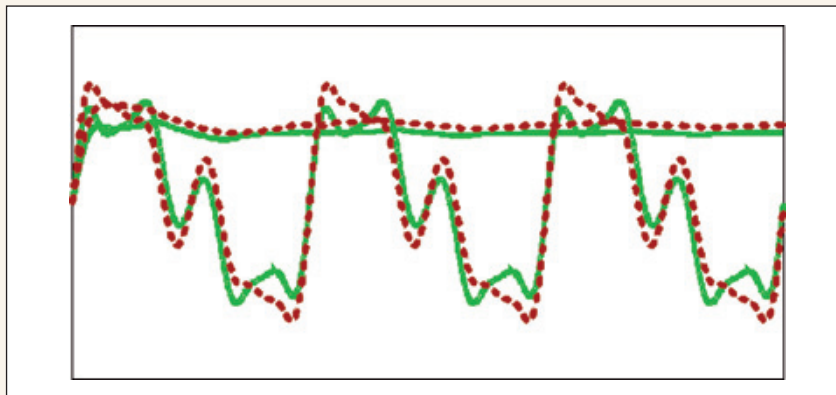


Figura 4. Valores RMS de las dos gráficas

nica, normalmente resultante de ejes desequilibrados, pero también habrá contribuciones de vibración periódica aleatoria, formada por muchas frecuencias, amplitudes y desfases, como en el caso de la cavitación, holguras, desalineamientos, etc.

La cuestión que se plantea es como distinguir la vibración de dos máquinas iguales, o la vibración de la misma máquina medida en instantes diferentes; o cual de las vibraciones es mas grave. En el caso de la vibración armónica es una respuesta simple, pero en el caso de la vibración periódica no lo es. Se describe seguidamente para ello un ejemplo.

En la figura 3 están representadas dos vibraciones cuya diferencia parece residir esencialmente en la amplitud y, consecuentemente, parece evi-

mentó de una a la otra. Pero no es posible cuantificar ese aumento ni siquiera saber cual es la causa que lo produjo.

Pueden darse en ocasiones casos más complejos, en los que no se puede saber a simple vista cual es la vibración con mayor amplitud, en ese caso la vibración se cuantificaría de diferente forma. De este modo, si la vibración es armónica se cuantifica con el valor de la amplitud de pico, si fuese periódica se cuantifica con el parámetro raíz media cuadrática (valor eficaz o RMS). Calculando los valores RMS de las señales de la figura 3 se concluye que vibración es la que presenta mayor nivel (figura 4).

A pesar de todo, en la vibración periódica el parámetro amplitud de pico no pierde interés a favor del

RMS. En realidad, ambos son importantes pues representan información complementaria. El pico revela cual es la amplitud máxima verificada y, el valor RMS cual es la media de todas las amplitudes instantáneas. La razón pico/RMS, también conocida como factor de cresta, indica si la vibración en análisis es mucho mas impulsiva, con muchos choques (factor de cresta > 10), o si por el contrario no representa choques significativos (factor de cresta < 3). Una aplicación en la que se analiza este factor es la inspección del estado de rodamientos para su mantenimiento (figura 5).



Figura 5. Detalle de efecto del golpeteo en rodamiento

Otro parámetro que acostumbra a ser usado para cuantificar la vibración es el valor de pico-pico de la vibración, que no es más que la amplitud total de deslizamiento del sistema. Este parámetro tiene gran utilidad en la monitorización de holguras radiales de bancadas, en líneas de ejes lentos de gran dimensión.

Análisis de la frecuencia

Presuponiendo que las vibraciones de la figura 3 pertenecen a la misma máquina y que una fue adquirida un determinado intervalo de tiempo posterior a la otra. En lugar de analizar para cada vibración resultante, se observan los armónicos que componen a cada una (figura 6-1 y figura 6-2).

Se hace evidente la razón del aumento del valor RMS de la vibración de la máquina. Este aumento se debe a un aumento para la amplitud de la 2ª componente armónica de 2.5 a 6.

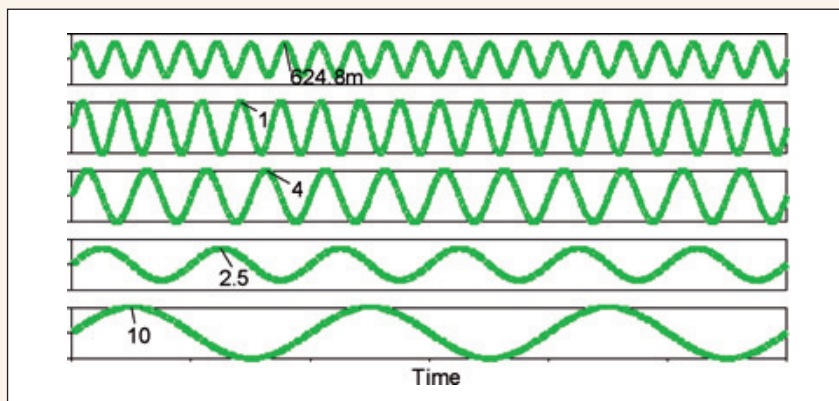


Figura 6-1. Armónicos de la onda de menor valor eficaz

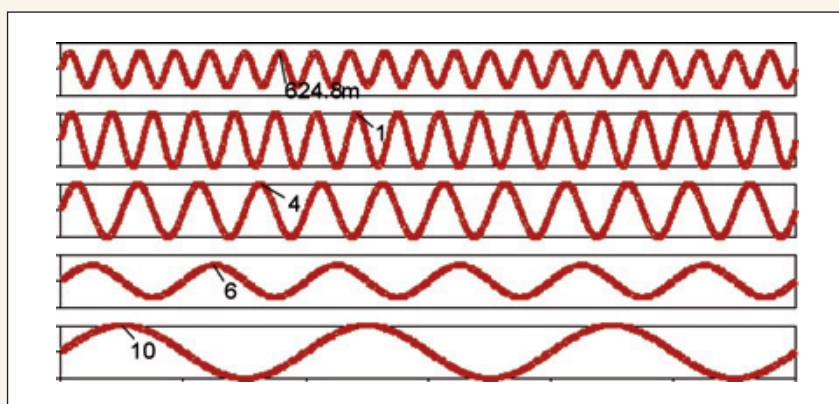


Figura 6-2. Armónicos de la onda de mayor valor eficaz

Si existe en la máquina algún eje o rotor que gire a esa frecuencia, se tendrá quizá determinado el origen del problema, que será probablemente un desequilibrio, excentricidad o desalineamiento de ese elemento.

Se puede entonces concluir, que la observación de cada armónico que compone la vibración global de la máquina, es mucho más informativo en cuanto al origen de los problemas, y por tanto alertará su presencia más pronto que el valor RMS.

La representación en frecuencia (Figura 7-1 y Figura 7-2) contiene información sobre las diferentes amplitudes (ordenadas) y frecuencias (abscisas) de los armónicos que componen la vibración. Sólo falta el ángulo para tener la información completa. A esta representación usualmente se le denomina "espectro de frecuencia" siendo la más utilizada en la medición y análisis de vibracio-

nes en el mantenimiento industrial.

La importancia del espectro de frecuencia reside en el hecho de tener control sobre la evolución de cualquier componente de la frecuencia (armónico), pudiendo detectar cualquier variación (caso del armónico segundo que pasa de 2.5 a 6) y, relacionarla con algún elemento o avería de la máquina. Puede ocurrir también que aparezca un nuevo armónico.

Existen diferentes técnicas para diagnosticar las vibraciones [12], pero quizás la más conocida es la transformada de **Fourier**, en la que en lugar de obtener la vibración en función del tiempo se hace en función de la frecuencia. **Jacques Fourier**, matemático del siglo XVIII, demostró que es posible transformar una función de tiempo en frecuencia (transformada directa) y viceversa (transformada inversa). En el procesamiento de la señal digital estas transformadas

asumen la forma de *transformadas discretas de fourier* (DFT).

Hasta los años 60 era impracticable esta técnica, debido al tiempo necesario para su cálculo. En esa década, gracias al desarrollo de las computadoras, se evolucionó el algoritmo que revolucionó el procesamiento de la señal digital. Ese algoritmo se llamó *transformada rápida de fourier* (FFT), que no es más que la DFT calculada de forma mucho más rápida. Hoy en día es la FFT la que los analizadores utilizan en el cálculo de los espectros de frecuencia.

La FFT convierte una señal en el tiempo mostrado en N lecturas, x_i ($i = 0 \dots N-1$) durante T segundos en una señal de frecuencia discreta con $N/2$ componentes de frecuencia X_k ($k = 1 \dots N/2$) igualmente espaciadas de $1/T$ Hz, donde la primera frecuencia es exactamente $1/T$ (también conocida como frecuencia fundamental), la segunda será $2/T$, la tercera $3/T$ y así en adelante hasta N/T . Así, para una señal a la que se realiza la FFT, las amplitudes de las componentes armónicas de frecuencias coincidentes con k/T Hz (con $k = 1 \dots N/2$) aparecerán en el espectro, sin embargo las no coincidentes, se dividirán por las frecuencias de los espectros mas próximos.

7.- BENEFICIOS CON EL PLANTEAMIENTO PROPUESTO

7.1.- BENEFICIOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento por el control de la condición no sustituye a otros métodos de mantenimiento tradicionales (correctiva, preventiva sistemática). Es un valioso complemento para una mejor comprensión de un programa integrado de mantenimiento. No consigue eliminar todos los aspectos de los programas de mantenimiento preventivo sistemático o correctivo, pero puede reducir significativamente el número de averías inesperadas y, mejorar la planificación y programación de intervenciones de mantenimiento. En 1988, investigaciones efectuadas

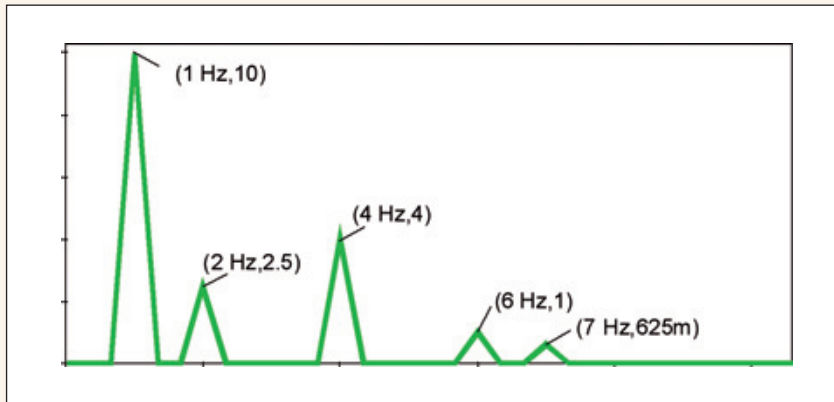


Figura 7-1. Armónicos de la gráfica de menor valor eficaz

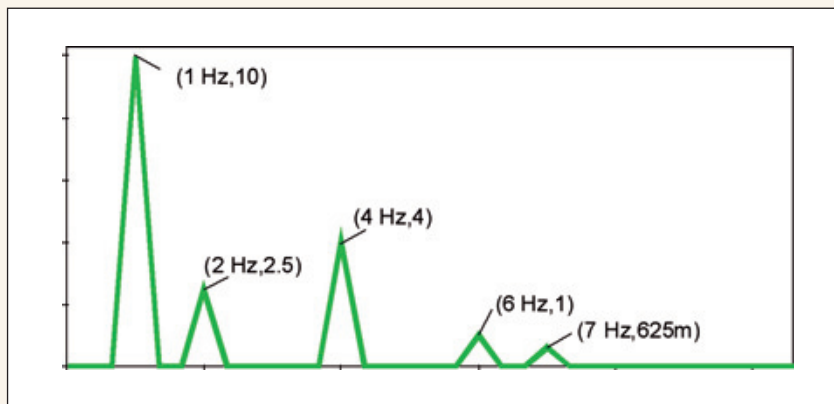


Figura 7-2. Armónicos de la gráfica de mayor valor eficaz

en 500 empresas [16], de las industrias de producción de energía eléctrica, papel, textil, acero y otras, permitieran concluir que el impacto de una filosofía de mantenimiento por control de la condición, como parte integrante de sus programas de mantenimiento, fue:

- reducción de los costes de mantenimiento de 50% a 80%
- reducción de las averías de 50% a 60%
- reducción de los *stocks* repuestos entre 20% y 30%
- reducción de paradas de 50% a 80%
- aumento del tiempo de vida de las máquinas de 20% a 40%
- aumento de la productividad de 20% a 30%
- aumento de beneficios de 25% a 60%

El mantenimiento por control de la condición no tiene solo efectos en la disminución de costes, tiene también algo mucho más importante como es el aumento de la seguridad de las personal e instalaciones. Como este tipo de control permite diagnosticar más temprano la evolución de la avería, entonces disminuyen las averías catastróficas, que podrían provocar daños en el personal de producción o, en los demás sistemas de la instalación. Este tipo de mantenimiento también mejora la calidad en la recepción de nuevos equipos o de equipos reparados por terceros. Las técnicas usadas permiten diagnosticar el verdadero estado o condición en que la máquina se encuentra. De este modo se evitan costos resultantes de todo un proceso, normalmente moroso y difícil, para la corrección de problemas. Cada vez es mas impor-

tante la exigencia al proveedor de análisis vibratorios de referencia para comparar con las medidas realizadas en las revisiones.

7.2.- BENEFICIOS DE LA ADICIÓN DEL SISTEMA BASADO EN CONOCIMIENTO

Las ventajas propias de los sistemas basados en conocimiento relacionadas previamente, tienen presencia en el planteamiento propuesto. Así pues en cuanto a la permanencia, indicar que si la tarea de mantenimiento la venía realizando una persona determinada, y esta por las circunstancias que sean no sigue realizando esa labor, con el sistema basado en conocimiento, otra persona va a poder realizar esa función de una manera satisfactoria, pese a no tener una gran experiencia acumulada. La característica de duplicidad del sistema, dado que es una herramienta informática, con facilidad se va a poder portar a otro equipo, hecho que es útil cuando se trata de instalaciones que poseen equipos iguales, susceptibles de realizarles mantenimiento. El razonamiento de un sistema basado en conocimiento es prácticamente inmediato, en cambio una persona pese a que tenga una gran destreza necesita un determinado tiempo para alcanzar conclusiones. El costo del sistema se reduce a la creación del mismo, una vez que está implementado cuantas más veces se emplee más barato resulta. En cuanto a la fiabilidad y el trabajo en entornos peligrosos, decir que no está sometido a factores humanos, y por tanto es bueno en estos dos aspectos. Una virtud muy relevante es su utilización en formación, ya que este tipo de sistemas está basado en reglas, y cada una de las decisiones tomadas es realizada en base a algún parámetro concreto, pudiendo ser usado este en labores de adiestramiento.

Todos estos aspectos de los sistemas basados en conocimiento contribuyen a mejorar los porcentajes anteriormente expuestos en los beneficios del mantenimiento predictivo, dependiendo de la ventaja que se po-

tencia, ya que si por ejemplo se tienen en cuenta en los gastos de mantenimiento la formación, este sistema es una potente herramienta en ese aspecto, y dichos gastos se verán enormemente reducidos.

8.- CONCLUSIÓN

La importancia del mantenimiento por Control de Condición como una técnica de Mantenimiento Preventivo es evidente, pero cabe destacar la necesidad de un Mantenimiento Predictivo para conocer con la mayor fiabilidad posible la condición en la que se encuentra cierta máquina, equipo o componente.

Es conocido que hay máquinas o equipos en los que es inviable ver físicamente el estado de partes o componentes internos debido al elevado coste que supone el consecuente desmontaje (tanto de la mano de obra como de las pérdidas de producción que originan el tener la instalación parada).

En este caso, cabe destacar la importancia del Mantenimiento Predictivo mediante el Análisis de Vibraciones como una técnica muy útil con la que se pueden obtener los datos necesarios para tomar decisiones oportunas y correctas.

Debido a la relativamente reciente aparición de los sistemas basados en conocimiento, y en concreto aplicado a Análisis de Vibraciones, no existen históricos suficientes para cada máquina o componente y para cada una de las condiciones (tanto de funcionamiento como de contorno) que se pueden dar en cada caso. Por lo que la implantación de ésta reportará buenos resultados a largo plazo, pudiendo llegar a tomar decisiones de actuación altamente acertadas.

La implementación de un sistema basado en conocimiento aunque sea en sus fases iniciales (conceptualización) es de gran ayuda en el diagnóstico de averías de una forma anticipada, con las consecuentes ventajas que conlleva. La implementación es bastante sencilla, y puede resultar útil en otros aspectos que no sean mantenimiento, tal y como pueden ser la

formación de personal con las reglas deducidas para su inclusión en la base de conocimiento, con la correspondiente autoevaluación del usuario que se esté adiestrando gracias a las conclusiones que se obtienen del sistema basado en conocimiento. Son de aplicación las prerrogativas que conceden este tipo de sistemas de una forma general, también en la aplicación que se ha descrito en este documento.

9.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pavón MA. La gestión del mantenimiento, un valor añadido. Revista *DYNA Ingeniería e Industria* Octubre 2007 V82 N°4 ISSN 0012-7361 p 27-30
- [2] Randall RB, *Frequency Analysis*, Copenhagen: Bruel & Kjaer, (1977, revised ed. 1987). 344 p. ISBN 8787355078.
- [3] Xiao H.; Vian, J.; Slepiski, J.R.; Wunsch, D.C. *Vibration analysis via neural network inverse models to determine aircraft engine unbalance condition*. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, (2003) Portland, USA, p 3001-6 vol.4. ISBN 0780378989
- [4] Karam M, Ghassemzadeh M, Dai N, Gandikota M, Trzynadlowsky AM. *Validation and recovery of vibration data in electromachine systems using neural network software IAS'93*. Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, (1993), Toronto, Ont., Canada 225-32 vol.1 ISBN-10: 0 7803 1462 X
- [5] Caulkins C, Oliveira R, Carvalho A, Rezende S, Monard M. *Applying neural networks to determine vibration parameters in a turbine IJCNN'99*. International Joint Conference on Neural Networks. (1999), Washington, USA 3371-6 vol.5 ISBN-10: 0 7803 5529 6
- [6] Ebersbach S. *Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring* Expert Systems with Applications, v 34, n 1, Ene. 2008, 291-9 ISSN: 0957-4174
- [7] Redondo C, Zapico P, Esquivel LA. *Manual de Regulación de Má-*

quinas Eléctricas. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de León. (2006). 550 p. ISBN 84-9773-252-9

[8] González Fernández FJ. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial (2003). p.133-136 ISBN 84-96169-03-0

[9] Saez I, Alonso F, Gambín B. *Diferentes técnicas end mediante termografía infraroja. aplicaciones en la industria aeroespacial*. Revista DYNA Mayo 2005 V80 N° 4 ISSN 0012-7361 p. 35-38

[10] Rikondo M. *Vibraciones mecánicas que son y como se evalúa el riesgo*. Revista DYNA Mayo 2005 V82 N°9 ISSN 0012-7361 p 499-506

[11] Santurio JM, Ferrera A, López VM. *Vibraciones: valoración actual de los niveles de exposición laboral en maquinaria y vehículos de obra*. DYNA Ingeniería e Industria Abril 2005 V80 N°3 ISSN 0012-7361 p 48-53

[12] Gavilán CJ. *El uso de la transformada de Hilbert para el diagnóstico de vibraciones*. DYNA Ingeniería e Industria Octubre 2007 V82 N°7 ISSN 0012-7361 p 382-386

[13] Keith Mobley R. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd edition. Wisconsin. (2002). Elsevier Science. 454 p. ISBN 0-7506-7531-4.

[14] González Fernández FJ. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial (2003). 528 p. ISBN 84-96169-03-0

[15] Boucly F. *Gestión del mantenimiento*. Ed. AENOR, Madrid, 1999. 310p. ISBN 84-8143-160-5

[16] *Simplicidade e economia no controlo de vibrações*. Revista Manutenção. Ed. Publindústria. 2004 N°81 ISSN 0870-0702 p 72-78

[17] Crespo A, Moreu P, Sánchez A. *Ingeniería de Mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Ed. AENOR, Madrid, 2004. 412p. ISBN 84-8143-390-X ■