

# INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Antonio Ordóñez Guerrero  
Universidad de Sevilla – Escuela Universitaria Politécnica  
c/ Virgen de África nº 7  
41011 SEVILLA (ESPAÑA)

Profesor Titular E.U. del Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales.  
Director del Master en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico de la Universidad de Sevilla.  
[www.us.es/mmindustrial](http://www.us.es/mmindustrial)

Director del Master en Ingeniería y Gestión del Mantenimiento de la Universidad de Sevilla.  
Director del grupo de trabajo de Mantenimiento Predictivo de la Fundación ProDTI (Fundación para la Promoción y el Desarrollo Tecnológico e Industrial. [www.prodti.us.es](http://www.prodti.us.es))  
Vicepresidente de INGEMAN (Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Mantenimiento).  
[www.ingeman.net](http://www.ingeman.net)

Email: [aordonez@us.es](mailto:aordonez@us.es)

## 1.- Introducción.

Abordar el mantenimiento sin ningún tipo de estrategia ni organización, limitándonos a reparar daños producidos o, en el mejor de los casos, realizando la gama de mantenimiento preventivo recomendada por el fabricante de los equipos, es la mejor forma de no hacer mantenimiento. En instalaciones críticas el mantenimiento predictivo cobra un papel primordial.

Aparece pues la necesidad de abordar el mantenimiento como una herramienta de valor dentro del proceso productivo, tratando de eliminar costes en la ejecución del mismo sin perder su finalidad, que es la explotación del medio a mantener el mayor tiempo posible y con el menor coste.

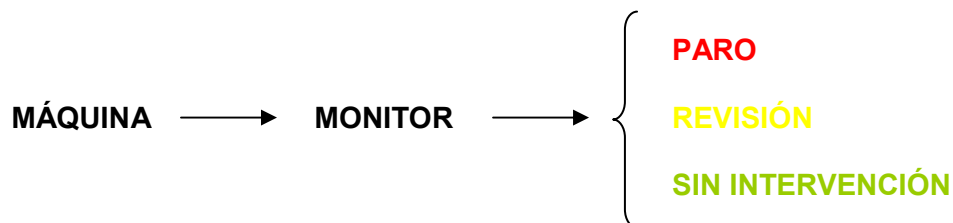
Realizaremos a continuación una presentación del mantenimiento predictivo o mantenimiento basado en la condición de máquina (CBN), estableciendo unos criterios básicos para su implantación. Posteriormente lo justificaremos técnica y económicamente, comparando ventajas e inconvenientes del mismo frente a los tipos de mantenimiento más elementales: Correctivo o de reparación y preventivo o mantenimiento basado en el tiempo de funcionamiento de la máquina (TBN). Finalmente nos centraremos en enumerar y valorar las diferentes tecnologías que están ligadas al mantenimiento predictivo.

## 2.- ¿Qué es el mantenimiento predictivo?

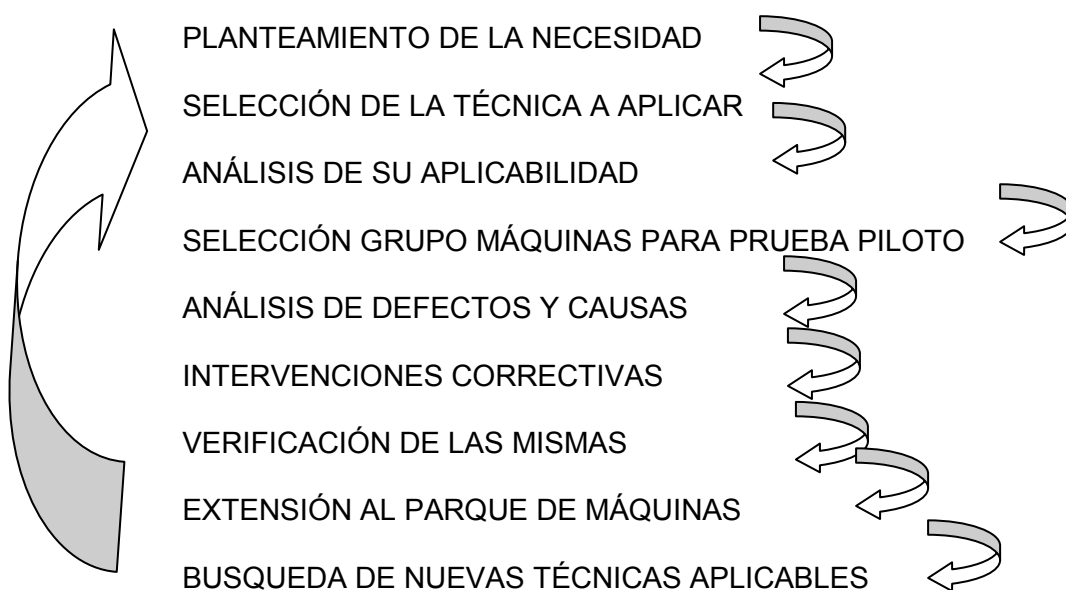
En el mantenimiento predictivo o bajo condición, evaluamos el estado de los componentes mecánicos o eléctricos mediante técnicas de seguimiento y análisis, permitiéndonos programar las operaciones de mantenimiento **“solamente cuando son necesarias”**. Consiste esencialmente en el estudio de ciertas variables o parámetros relacionados con el estado o condición del medio que mantenemos, como por ejemplo la vibración, temperatura, aceites, aislamientos, etc. El estudio de estos parámetros nos suministra información del estado de sus componentes y, algo también muy importante, del modo en que está funcionando dicho equipo, permitiéndonos no solo detectar problemas de componentes sino también de diseño y de instalación. El objetivo del mantenimiento predictivo es la reducción de los costes de operación y de mantenimiento incrementando la fiabilidad del equipo.

La base del mantenimiento predictivo radica en la monitorización de los equipos, ya que debemos evaluar los parámetros antes comentados con la instalación en funcionamiento normal. No es por tanto necesario hacer una parada para poder evaluar la condición de los mismos, conocemos el estado de nuestras máquinas mientras están trabajando.

Con las diferentes técnicas disponibles podemos evaluar los fallos en los componentes y seguir su evolución durante largos periodos de tiempo (a veces meses) antes de decidir nuestra intervención, de esta manera podemos coordinar con producción el momento más adecuado para la intervención de mantenimiento. Además podemos dar un paso más, pasando al llamado mantenimiento proactivo, si mediante un análisis de vibraciones detectamos problemas de cavitación en bombas y evaluamos las condiciones de funcionamiento de las mismas, podríamos llegar a la conclusión de malas condiciones en la aspiración, lo que nos llevaría replantearnos el diseño de la instalación. De la misma forma la detección de problemas en la alineación de motor y bomba podría indicarnos defectos en el montaje de las mismas, cuya solución evitaría daños posteriores en acoplamientos y rodamientos.



Para conseguir el éxito en la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo es necesario seguir una estrategia. El fracaso lo tendremos asegurado si pretendemos hacer una implantación del mismo en todos nuestros equipos y más aún cuando queramos implantar varias tecnologías simultáneamente. Si además no tenemos un sistema de gestión de la información adecuado, que nos permita tratar los datos correctamente, conseguiremos tirar a la basura una importante inversión económica y lo que es peor perderemos los beneficios de una buena implantación con una alta rentabilidad económica. Además perderemos la confianza en unas tecnologías que terminarán siendo de uso habitual.



Será necesario en primer lugar hacer una selección de los equipos que vamos a monitorizar, ésta vendrá condicionada por una serie de factores entre los que se encuentran la criticidad o responsabilidad del equipo, la accesibilidad al mismo y la información técnica que podamos disponer de él. Nos centraremos en un pequeño número de ellos, analizando que técnica podremos aplicar en un primer momento, normalmente el análisis de vibraciones es la de más amplia utilización. Se realizará un programa piloto con los mismos, localizando defectos, analizando causas y retroalimentando el sistema, una vez hayan sido erradicados los defectos. Asimismo aprovecharemos para probar distintos sistemas de GMAOS (software de gestión de mantenimiento asistido por ordenador), tratando de elegir aquel que se adecue más a nuestras necesidades y nos resulte de más fácil utilización.

Una vez hayamos obtenidos una valoración positiva de nuestra experiencia piloto, pasaremos a realizar una extensión de la aplicación a un mayor número de equipos y así sucesivamente hasta conseguir una implantación total con la integración de distintas tecnologías y una gestión adecuada de los datos obtenidos. Si el proceso se realiza de forma progresiva y sin prisas los resultados económicos no tardarán en ser evidentes y en muchas ocasiones sorprendentes.

### **3.- Justificación técnica y económica del mantenimiento predictivo.-**

La justificación técnica del mantenimiento predictivo es evidente, basta para ello comparar las actuaciones que realizamos cuando efectuamos un mantenimiento preventivo o correctivo en nuestras instalaciones con las que tendríamos que realizar cuando tuviésemos monitorizadas nuestras máquinas, realizando un seguimiento de los parámetros a medir.

Cuando únicamente realizamos un mantenimiento correctivo, el termino “mantenimiento” es sinónimo de “reparación”. No quiere ello decir que no pueda existir este tipo de intervenciones, de hecho el fin último de todo tipo de mantenimiento es reparar o sustituir componentes dañados, con la finalidad de alargar la vida útil de la máquina, y para ello son inevitables las intervenciones correctivas. Pero sí es un error centrar todas las actuaciones de mantenimiento con esta única finalidad. Ello solo presenta una ventaja: Coste de la inversión inicial prácticamente nulo; no obstante tiene serios inconvenientes:

- Paradas inesperadas, normalmente suelen ocurrir cuando la producción debe ser mayor, es decir en el peor momento.
- Estas paradas suelen ser catastróficas, ya que suelen producirse roturas importantes. A veces por la pérdida de un rodamiento podemos tener serias roturas en las transmisiones.
- Los costes de reparación de las mismas llegan a ser muy elevados.
- La necesidad de tener piezas de repuesto en almacén se incrementa ante la incertidumbre de que me puede fallar.
- Los riesgos de accidentes se incrementan.
- Desconocemos totalmente el estado de nuestras máquinas.
- Tratamos fallos crónicos como habituales sin descubrir el origen del problema, por ejemplo si un rodamiento se deteriora prematuramente y tomamos la rutina de sustituirlo, estamos ocultando un posible problema de desalineación o de desequilibrio que puede ser la causa del daño prematuro de este componente.

Un paso más lo representa el mantenimiento preventivo o programado, que se basa en la sustitución de componentes cuando suponemos que se ha agotado la vida de los mismos. El estudio teórico de sus vidas lo suele suministrar el fabricante del

equipo, quien normalmente incluye una gama de mantenimiento preventivo, con indicación de sustitución de componentes y cambios en la lubricación.

Claramente de esta forma conseguimos evitar averías, pero debemos tener cuidado con su aplicación, por ejemplo, los fabricantes de rodamientos indican en sus catálogos que “la vida media de los rodamientos es aproximadamente cinco veces la vida nominal (Catálogo General SKF 4000/II Sp, pág. 27)”. Quiere esto decir que si prolongásemos la vida de los rodamientos a su duración real conseguiríamos quintuplicar la duración de los mismos, este argumento por si solo es valido para querer monitorizar en muchas ocasiones.

Por otro lado el mantenimiento preventivo presenta también una serie de inconvenientes:

- El principal radica en intervenir una máquina que está funcionando correctamente, simplemente porque le toca una revisión. Las máquinas adquieren con su funcionamiento un equilibrio que es difícil de restablecer una vez que intervenimos en las mismas y con las actuaciones preventivas estamos modificando constantemente este equilibrio de funcionamiento.
- Cuando actuamos sobre la máquina, cambiamos componentes que normalmente están en buen estado y desconocemos el estado real de los mismos hasta que desmontamos.
- Podemos cambiar componentes que han agotado su vida teórica y no ver otros que se encuentran en mal estado. No tenemos control sobre los daños ocultos.
- En cuanto a su coste, puede dispararse como consecuencia de las frecuentes intervenciones en las máquinas, muchas de ellas innecesarias.

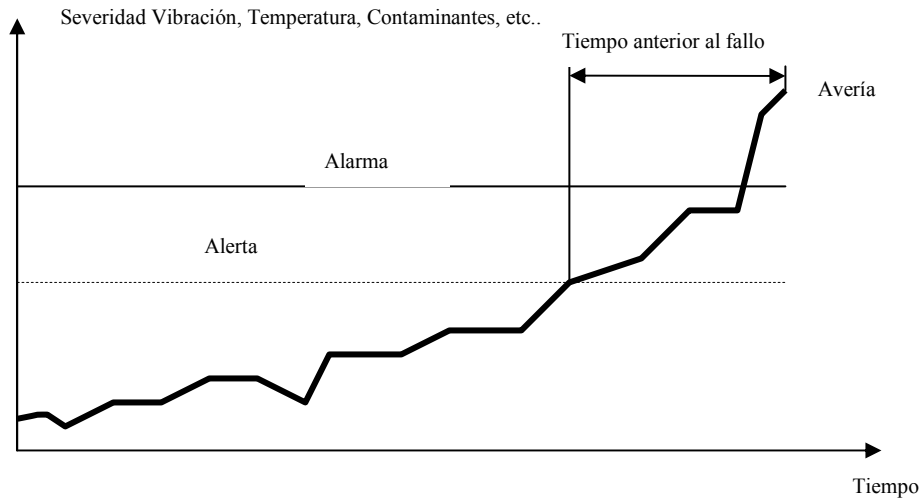
Las actuaciones con mantenimiento predictivo pasan por unos inconvenientes iniciales de elevados costes de inversión en tecnología y formación, con una rentabilidad de la misma a medio y largo plazo. Pero las ventajas son evidentes:

- Conocemos el estado de la máquina en todo instante.
- Eliminamos prácticamente todas las averías.
- Solo paramos o intervenimos en la máquina cuando realmente es necesario.
- Conocemos el daño en los componentes desde una fase inicial del mismo, permitiéndonos programar su sustitución en el momento más conveniente.
- Al intervenir en la máquina conocemos el problema, reduciendo el tiempo de la reparación.
- Podemos identificar los fallos ocultos, así como la causa de fallos crónicos.
- Reducimos las piezas del almacén, adquiriéndolas cuando detectamos el problema en una fase primaria.
- Conseguimos bonificaciones en los seguros.
- Incrementamos la seguridad de la planta.

El gráfico que mostramos a continuación es la mejor forma de entender en que consiste el mantenimiento predictivo. Se trata de un gráfico de tendencias en el que en el eje de ordenadas evaluamos uno de los parámetros que estemos midiendo (severidad de vibración, temperaturas, contaminantes, etc...) y en el eje de abscisas medimos tiempo, mientras la severidad de nuestro parámetro permanezca estable no tendremos porqué preocuparnos (el equipo está bien), pero cuando ésta comience a subir será un indicativo de que algo va mal. Con técnicas de análisis podremos determinar con extraordinaria precisión la causa del daño.

Mención particular merece el establecimiento de los límites de alerta y de fallo, debido a su clara importancia. Existen diversas formas de establecerlos, siendo

necesario siempre disponer de un histórico de medidas que nos permita realizar un estudio estadístico de las mismas.



La rentabilidad económica del mantenimiento bajo condición está fuera de toda duda, como puede demostrarse con datos numéricos reales de empresas de distintos sectores donde se ha implantado o está en periodo de implantación. La evaluación de esta rentabilidad no es sencilla, es necesario disponer de una información histórica, aunque siempre es posible la estimación del coste directo evitado. Aún, sin necesidad de declarar “catástrofes” evitadas se obtienen rentabilidades atractivas para competir con otros proyectos.

Por último indicar una aplicación más de las técnicas predictivas y que no está directamente relacionada con el mantenimiento y es su utilidad en la recepción de equipos, como verificación del correcto funcionamiento de los mismos o de la bondad de las reparaciones que se les hayan efectuado.

#### **4.- Tecnologías aplicables.-**

Son muchas y muy variadas las tecnologías que se pueden aplicar al campo del mantenimiento bajo condición, podemos enumerar algunas:

- Análisis de vibraciones
- Termografía infrarroja
- Análisis de aceites
- Análisis espectral de intensidades de corriente.
- Análisis del flujo de dispersión.
- Detección ultrasónica de defectos
- Ensayos de aislamiento de motores
- Descargas parciales
- Ensayos no destructivos
- Etc.

Cada una de ellas tiene un campo de aplicación más o menos concreto, existiendo complementariedad, prácticamente entre todas. A continuación comentaremos brevemente algunas de ellas.

## 5.- Análisis de vibraciones.-

De las distintas tecnologías aplicables al mantenimiento predictivo, quizás el análisis de vibraciones sea la más popular. La razón la encontramos en la posibilidad de determinar una gran cantidad de defectos, en una amplia gama de máquinas con una inversión económica inicial razonable.

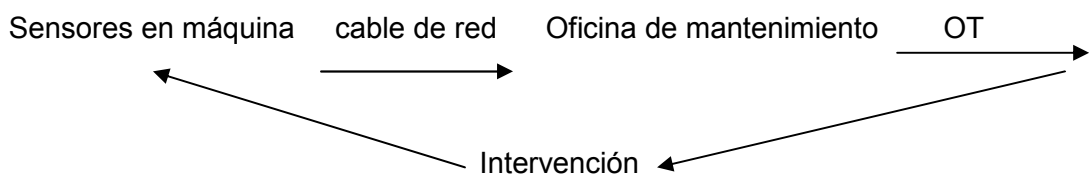
La vibración es uno de los indicativos más claros del estado de una máquina. Bajos niveles de vibración indican equipo en buen estado, cuando estos niveles se elevan es claro que algo comienza a estar mal.

Los equipos utilizados para la adquisición de datos de vibraciones en las máquinas van desde los portátiles o de campo hasta la monitorización en continuo u “on line”. Existe una amplia gama y modelos de unos y otros, siendo los distribuidores y fabricantes de los mismos los que pueden orientarnos sobre las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. En un primer contacto con la tecnología los equipos portátiles son una buena solución para validarla. Dentro de ellos nos encontramos con “vibrómetros” que nos miden niveles de vibración globales con poca capacidad de diagnóstico, (solo indican si la vibración sube o baja, aunque vibrómetros de última generación son capaces de realizar análisis espectrales con ciertas limitaciones), y colectores de datos portátiles con un software de diagnóstico y tratamiento de datos. Estos equipos son más elevados en precios, pero tienen una capacidad de análisis importante a la hora de discernir distintos tipos de problemas en máquinas.

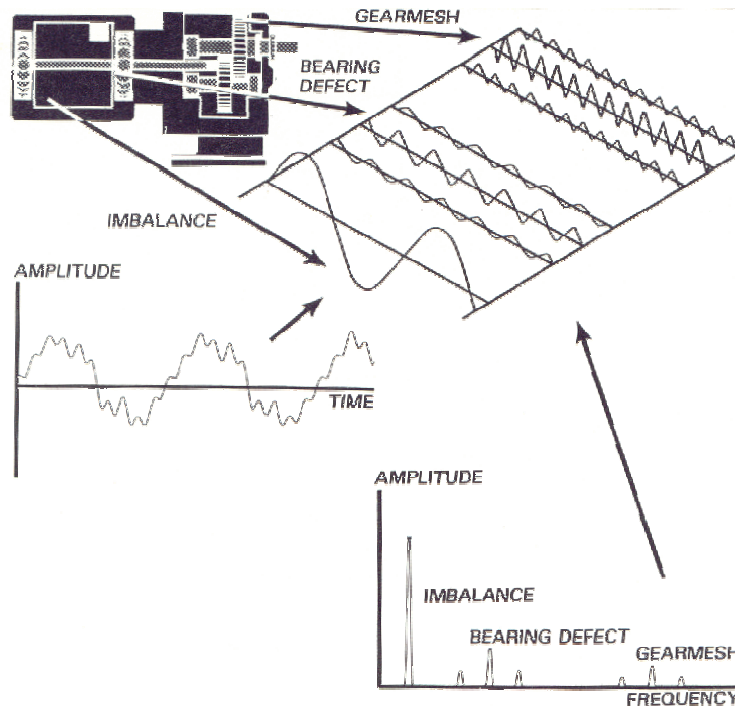
La toma de datos de vibración en máquinas evoluciona hacia sistemas automatizados (sistemas “on line”) que reportan mayores beneficios que la adquisición de datos con colectores portátiles:

- Reducción drástica de los intervalos de toma de datos. Ya que estos se toman de forma continua.
- Menor coste de explotación. Al ser la toma de datos automática, eliminamos el coste de la mano de obra por tomar los datos de vibración de la máquina.
- Mayor calidad en la toma de datos tomados. La exactitud en el punto de toma de datos es mayor, puesto que siempre se mide en el mismo sitio y con el mismo sensor y además podemos condicionar la toma de datos siempre que se den unas determinadas condiciones de operación (velocidad y carga dadas).

Proceso y mantenimiento son las dos áreas de actividad más vinculadas a la productividad en la explotación. El control de los parámetros de proceso (presión, temperatura, caudal, etc.) de los equipos ha sido objeto de automatización desde hace más de una década en base a sistemas de control distribuido y redes de autómatas programables con interfaces Scada. El control de los parámetros de mantenimiento (vibración, temperatura, etc.) de los mismos equipos tienen todavía un largo camino que recorrer antes de lograr una implantación generalizada y una integración dentro del proceso de planta.

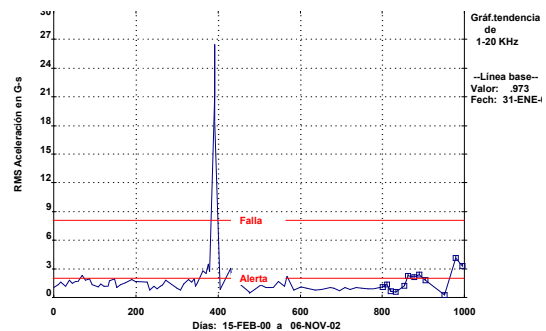
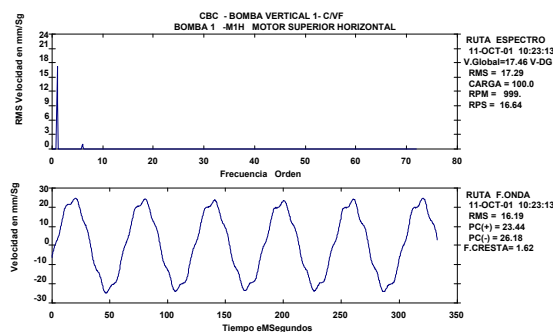


El análisis espectral de vibraciones consiste simplemente en realizar una transformación de una señal en el tiempo al dominio de la frecuencia, donde podemos identificar la vibración característica de cada uno de los componentes o defectos que puede presentar nuestro equipo.



No es este el momento de entrar en profundidades sobre cada una de las tecnologías que vamos a presentar, cada una de ellas es motivo en si de una formación específica. Basta por el momento comentar algunos de los problemas que se pueden detectar fácilmente con una análisis vibracional: Desequilibrios, desalineaciones, holguras, aflojamientos, problemas de lubricación en cojinetes, daños en rodamientos, en engranajes, en motores eléctricos, problemas hidráulicos, etc...

Además un gráfico de tendencias de vibraciones en un nivel global o bien en un rango frecuencial dado es una herramienta de un valor muy alto para el control de nuestros equipos. Volver a insistir e la importancia de la creación de los niveles de alerta y de alarma en los mismos para optimizar los análisis.



## 6.- Termografía infrarroja.-

La termografía infrarroja se podría definir brevemente como una técnica que permite, a través de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, la medida superficial de temperatura.

El instrumento que se usa en termografía para medir, es la cámara de infrarrojos.

La principal ventaja de la medida de temperatura mediante termografía, es que es una técnica de medida de no contacto, no requiere contacto físico, por lo que no afectará a las condiciones de los objetos observados. Esta cualidad la hace especialmente interesante en el control y mantenimiento de elementos en tensión.

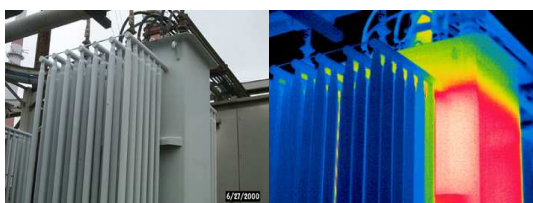
Entre las principales aplicaciones de la termografía podríamos citar:

- Medidas de espesores y detección de discontinuidades en productos aislantes térmicos y refractarios.
- Inspección de tubos y tuberías.
- Inspección en soldaduras
- Posicionamiento de componentes y fallos en circuitos eléctricos.
- Aplicaciones en seguridad y defensa.
- Aplicaciones médicas.
- Aplicaciones de prevención y detección de incendios.
- Medición en tanques de almacenamiento.
- Control de calidad en procesos de producción.
- ....

De todas las aplicaciones las instalaciones eléctricas son candidatas naturales a la aplicación de la termografía infrarroja. Podremos detectar puntos calientes en los termogramas realizados a las mismas. Las causas de estos puntos calientes pueden ser varias:

- Reflexiones
- Radiación aportada por el sol
- Carga
- Variaciones de emisividad
- Calor inducido por corrientes de Eddy
- Aumento de resistencia, ocasionado por:
  - Conexión floja
  - Conexión con suciedad
  - Conexión con corrosión
  - Conexión con ajuste deteriorado
  - Componente incorrecto
  - Instalación incorrecta

Será labor del inspector de termografía saber discernir, filtrar y evaluar los puntos calientes encontrados en los termogramas, buscando la causa y el origen de los mismos.





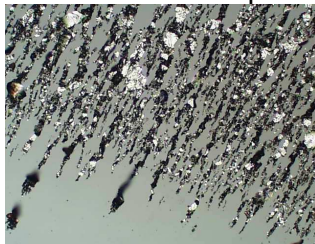


## 7.- Análisis de aceites.-

El análisis de aceites en nuestras instalaciones tiene dos objetivos claros: Conocer el estado del aceite y conocer el estado de la máquina. Tradicionalmente éste último se obviaba, centrándonos siempre en determinar únicamente el estado del lubricante, para lo cual se realizan una serie de ensayos rutinarios de viscosidad, acidez, basicidad, análisis de aditivos, inspecciones visuales, etc. No es este el objetivo de la analítica del aceite como técnica de mantenimiento predictivo.

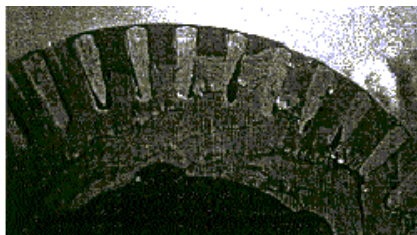
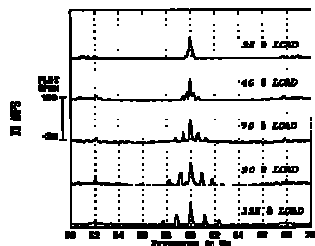
Las espectrometrías, ferrografías y contenidos de partículas aportan valiosa información del estado de los componentes de las máquinas que bañamos con nuestros lubricantes. Podemos detectar defectos con una antelación mucho mayor que con otras técnicas como podría ser el análisis de vibraciones, la dificultad estriba en el alto costo de la tecnología implicada en ello.

En casos de alta responsabilidad podría emplearse como técnica complementaria para verificar un diagnostico realizado, por ejemplo, con un análisis vibracional. Por ejemplo defectos en rodamientos, cojinetes o transmisiones pueden corroborarse al encontrar partículas de los mismos en un ferrograma.



## 8.- Análisis espectral de intensidades de corrientes.-

El análisis de motores eléctricos puede realizarse mediante termografías o mediante análisis de vibraciones, pero otra de las técnicas que podemos emplear para detectar problemas en barras es el análisis espectral de corriente, consistente en tomar el espectro de intensidades en las fases de alimentación del motor. Esta tecnología puede realizarse en paralelo con el análisis de vibraciones, usando los mismos colectores de datos, cambiando los sensores de vibración por una pinza amperimétrica.



## **9.- Análisis del flujo de dispersión.-**

El espectro de flujo magnético es una técnica prometedora que ha despertado gran interés desde su aparición, hace menos de 5 años. Aunque la técnica no está demasiado probada en máquinas reales, los ensayos de laboratorio presentan resultados sorprendentes en el control de evolución de fallos de aislamiento, cortocircuitos de espiras, y otros problemas relacionados con estator y rotor.

## **10.- Detección ultrasónica.-**

Existen numerosos fenómenos que van acompañados de emisión acústica por encima de las frecuencias del rango audible. Las características de estos fenómenos ultrasónicos hacen posible la utilización de detectores de ultrasonidos en infinidad de aplicaciones industriales dentro del mantenimiento.

- Detección de grietas y medición de espesores (por impulso eco).
- Detección de fugas en conducciones, válvulas, etc.
- Verificación de purgadores de vapor.
- Inspección de rodamientos.
- Control de descargas eléctricas.
- ...

Estas son algunas de las aplicaciones no habituales de los ultrasonidos, además de las normalmente usadas como ensayo no destructivo para la determinación de defectos internos en piezas, en este caso somos nosotros los que realizamos la emisión acústica para poder detectar el defecto.

## **11.- Tecnologías aplicables a máquinas eléctricas.-**

Sin extendernos ni profundizar demasiado en las técnicas predictivas que comentamos, mencionar algunas que son específicas de máquinas eléctricas, entre ellas las más comunes son:

- DESCARGAS PARCIALES.- Se monitorizan descargas parciales durante el funcionamiento normal de la máquina mediante captadores capacitivos. Los sensores han de ser fijos a la máquina. El equipamiento de medida deberá rechazar ruidos y filtrar/discriminar señales.
- ENSAYOS EDA.- Permite detectar problemas en el aislamiento, causados por degradación del mismo, sustancias contaminantes, vibraciones, descargas parciales, etc. Los datos obtenidos con este ensayo se pueden complementar con “tangente de Delta” o “medida de descargas parciales”.

## **12.- Conclusiones.-**

Lejos de pretender hacer una descripción exhaustiva de las distintas técnicas aplicables al mantenimiento condicional, hemos mencionado algunas de las más comúnmente empleadas.

Es conveniente conocer la tecnología disponible para el fin que nos ocupa, saber el campo de aplicación más apropiado de cada una de ellas. También es importante poder realizar una integración de las mismas y disponer de una herramienta

informática apropiada que nos permita gestionar los datos que obtengamos. Todo ello nos llevará a una concepción distinta del mantenimiento, dándole valor añadido a esta actividad.

Podemos realizar una evaluación de la inversión en mantenimiento predictivo con datos obtenidos en distintos sectores, siendo el parámetro más extendido el “retorno de la inversión” ROI, que es una razón que relaciona el ingreso generado por un centro de inversión a los recursos (o base de activos) usados para generar ese ingreso:

$$\text{ROI} = \text{Ingreso (ahorro)} / \text{Inversión}$$

La tabla siguiente muestra datos obtenidos en diversos sectores:

SECTOR	ROI
PETROLEO	11
QUÍMICO	11
SERVICIOS (GAS, AGUA,..)	10.5
PAPEL	9.7
METAL	8
AUTOMOCIÓN	7.5
FABRICACIÓN	7
MINERÍA	3
OTROS	5

### **Bibliografía:**

TÉCNICAS PARA EL MANTENIMIENTO Y DIAGNOSTICO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.

Autores: FERNÁNDEZ CABANAS, GARCÍA MELERO, A. ORCAJO...

Editorial: MARCOMBO

ISBN:84-267-1166-9

MACHINERY VIBRATION

Autor: VICTOR WOWK

Editorial: McGRAW HILL

ISBN: 0-07-071936-5

AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE

Autor: R. KEITH MOBLEY

Editorial: BUTTERWORTH HEINEMANN

ISBN: 0-7506-7531-4

Documentación de diversas Fuentes del MASTER EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL Y TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA.

PREDITEC- GRUPO ÁLAVA INGENIEROS, Ponencias jornadas Mantenimiento.

DYNAMIC SIGNAL ANALYZER APPLICATIONS, Effective Machinery Maintenance Using Vibration Analysis, de Hewlett Packard.

ENGINEERING CONDITION MONITORING, Practice, Methods and Applications.

Autor, editor: Ron Barron (University of Strathclyde, Glasgow)

Editorial: LONGMAN

ISBN: 0-582-24656-3

