

## **El mantenimiento predictivo y su efecto en la optimización de costos de mantenimiento**

*Fernando Villada\**, *Germán Moreno\*\** y *Jaime A. Valencia\*\*\**

(Recibido el 5 de febrero de 2002)

### **Resumen**

En este trabajo se muestra la importancia del mantenimiento predictivo, su efecto en la optimización de costos de mantenimiento, técnicas de diagnóstico y resultados de algunos ensayos experimentales.

----- *Palabras clave:* mantenimiento predictivo, costos de mantenimiento, técnicas modernas de diagnóstico, inteligencia artificial.

## **The predictive maintenance and its influence in the optimization of the maintenance costs**

### **Abstract**

In this work, the importance of the predictive maintenance, its influence in the optimization of the maintenance costs, diagnosis techniques and some test results are shown.

----- *Key words:* predictive maintenance, maintenance costs, modern diagnosis techniques, artificial intelligence.

---

\* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica – GIMEL. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Antioquia. fvillada@udea.edu.co.

\*\* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica – GIMEL. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Antioquia. gmoreno@udea.edu.co.

\*\*\* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica – GIMEL. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Antioquia. jvalenci@udea.edu.co.

## Introducción

El mantenimiento es la preservación de la vida útil de la maquinaria y por tanto constituye una parte integral de la actividad de la empresa ya que garantiza la disponibilidad de los activos productivos. Su quehacer se ha basado fundamentalmente en reparar cuando se presente el fallo (correctivo) o en revisiones periódicas de equipos (sistemático). Aunque con este último se han logrado resultados satisfactorios, su costo no ha sido el óptimo ya que en muchas ocasiones se realizan cambios innecesarios de repuestos con vida residual considerable.

Una buena gestión del mantenimiento no se refiere solamente a la reducción de costos, su finalidad es prevenir pérdidas del negocio por lucro cesante y evitar costos excesivos por fallas catastróficas. La estrategia óptima de mantenimiento es aquella donde la suma de costos directos e indirectos se minimiza. Para lograrlo es necesario preparar un plan que optimice las tres principales estrategias: mantenimiento correctivo, mantenimiento sistemático y mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo es un procedimiento que ha sido ampliamente difundido en el sector productivo [1]. Se han desarrollado muchas técnicas de mantenimiento predictivo, pero las más aplicadas son las que incluyen análisis de vibraciones, análisis espectral de corriente, emisiones térmicas y análisis de aceites. Complementariamente, los nuevos avances en la informática [2] han propiciado el desarrollo de diferentes técnicas de la inteligencia artificial como son los sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos; las cuales se perfilan como herramientas poderosas en diagnóstico de equipos y sistemas industriales en general.

En este trabajo se presentan las técnicas del mantenimiento predictivo más utilizadas en sistemas eléctricos y mecánicos y la reseña de varias aplicaciones de la inteligencia artificial, la cual se perfila como herramienta poderosa para mejo-

rar la efectividad del mantenimiento. Adicionalmente se muestran los resultados de ensayos realizados sobre grupos de motores y ventiladores para corroborar la validez de las técnicas descritas.

## El mantenimiento preventivo

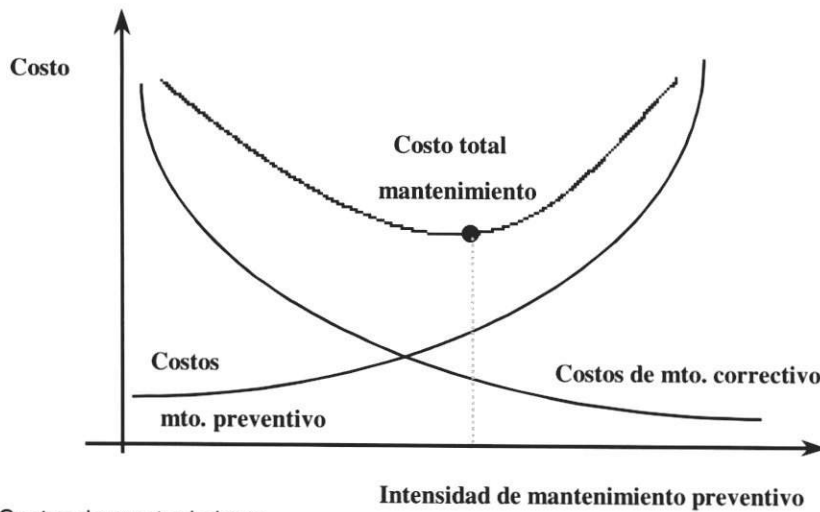
El mantenimiento preventivo corresponde a la unión entre mantenimiento sistemático y mantenimiento predictivo. Se puede definir como la realización de cualquier tarea programada, de acuerdo con un plan previamente establecido cuyo objetivo consiste en reducir el potencial de ocurrencia de fallos que tendrán un efecto adverso sobre la confiabilidad, la disponibilidad o la seguridad de la planta.

La instauración de un programa de mantenimiento sistemático requiere un análisis detallado de las actividades que se realizarán, frecuencias de ejecución, recursos, costos y del conocimiento del equipo productivo y sus componentes. No se puede caer en ninguno de los dos extremos: tener el equipo funcionando hasta su destrucción o desmontarlo continuamente para revisión incurriendo en costos excesivos de mantenimiento.

La curva de la figura 1 muestra la relación entre los dos tipos de mantenimiento más usados y sus costos. Se encuentra que a medida que se intensifica el mantenimiento preventivo se obtiene, desde luego, un costo excesivo en el mismo, pero los costos por correctivo son mínimos. De otro lado, si se invierte muy poco en preventivo los costos por correctivo serán exagerados.

Se requiere por tanto trabajar en el punto óptimo de la curva de la figura 1, es decir, donde el costo total de mantenimiento (preventivo más correctivo) es mínimo. Indudablemente esto no es fácil, se requiere conocer muy bien la maquinaria y la participación de todo el personal implicado en el mantenimiento y operación de los equipos.

Otro aspecto que ayuda a obtener los niveles óptimos de mantenimiento es que aproximadamente un 90% de todas las fallas están precedidas



**Figura 1** Costos de mantenimiento

por ciertos signos o condiciones indicadoras de que ellas se van a producir. Por tanto, el mantenimiento predictivo constituye una parte fundamental del mantenimiento preventivo pues evita fallas graves u optimiza los costos al eliminar la inspección de la máquina.

El uso de los signos de condición o mantenimiento predictivo permite determinar cuándo se debe dar servicio al equipo, lo cual evita fallas costosas prematuras. Estos sistemas predictivos permiten determinar cuándo se producirán interrupciones imprevistas en el servicio, evitan mantenimientos correctivos y también ahorrar costos por desarmes de los equipos para inspección.

### **Técnicas de diagnóstico utilizadas en mantenimiento predictivo**

#### **Análisis de vibraciones**

La vibración puede definirse como el movimiento de una masa desde su punto de reposo a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde queda lista para repetir el ciclo. El tiempo que requiere para esto es su período, y el número de repeticiones de este ciclo en un tiempo dado es su frecuencia.

La severidad de la vibración se determina por la amplitud, o el máximo movimiento de su velocidad pico y de su aceleración pico. El ángulo de fase a menudo se mide cuando se compara el movimiento de una pieza que está vibrando con respecto a una frecuencia fija. Las máquinas vibrarán en un amplio espectro de frecuencias. El análisis de vibraciones en el monitoreo de condiciones se realiza comparando las características de las vibraciones de la operación actual con respecto a una línea de referencia, la cual se midió cuando se sabía que la máquina estaba operando normalmente. La selección de los parámetros específicos que se miden depende principalmente de la frecuencia de vibración.

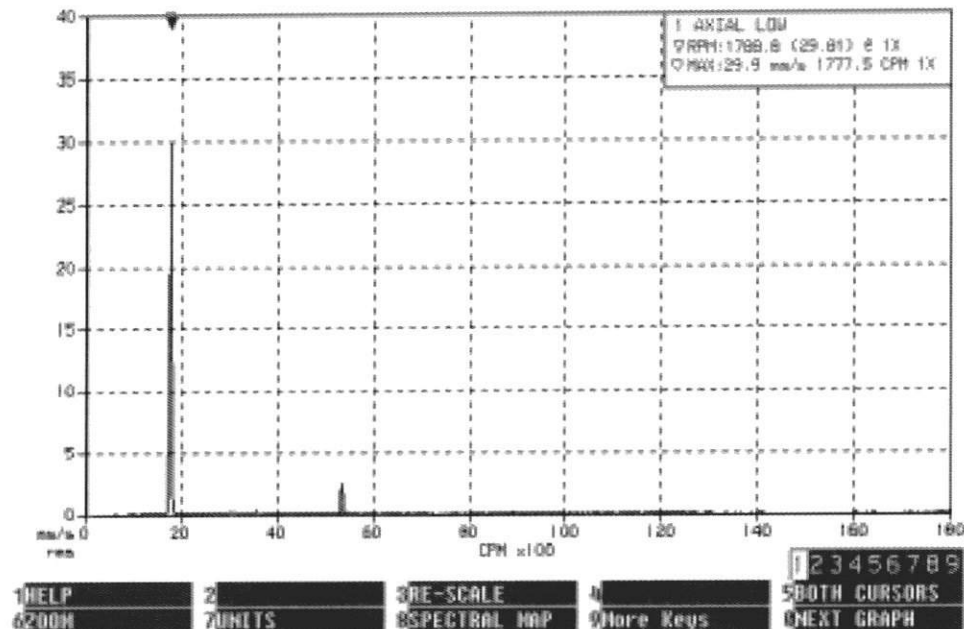
Por medio del análisis de las frecuencias de las vibraciones se pueden identificar problemas mecánicos como desequilibrios, desalineamientos, partes sueltas y defectos en los rodamientos. La tabla 1 es una guía general para identificar las causas posibles de la vibración.

A manera de ejemplo, en la figura 2 se muestran los resultados del análisis espectral de vibraciones para un grupo motor ventilador. Se aprecia cómo existe un pico alto de vibración a la frecuencia fundamental y otro de menor valor pero igualmente importante a tres veces la frecuencia de rotación. De acuerdo con la guía dada en la

**Tabla 1** Identificación de la causa de vibración según la frecuencia

<i>Frecuencia en RPM</i>	<i>Causas más probables</i>	<i>Otras causas posibles</i>
1 x RPM	Desequilibrio	1) Chumaceras, engranajes o poleas excéntricas 2) Eje desalineado o deformado 3) Resonancia
2 x RPM	Juego mecánico excesivo	1) Desalineación en caso de alta vibración axial 2) Correas defectuosas (2 x RPM de la correa)
3 x RPM	Desalineamiento	1) Juego axial excesivo
4 x RPM	Partes sueltas	
Frecuencia elevada	Rodamientos	1) Motores de inducción alimentados por inversor
Sincrónica con la línea AC	Problemas eléctricos	Los problemas eléctricos incluyen barras de rotor rotas, rotor excéntrico y desequilibrio entre fases; pero no determina exactamente el problema

PLANT: 252 AREA: LOCOMOTORA 252038 23 Jun 99  
 MACHINE: VENTILADOR RESISTENCIAS 1 [SRS] MID: 2  
 LOCATION: APOYO MOTOR [1AL] DATE: 5 May 1999/11:28:57 RPM: 1770  
 FREQ: 23 CPM ORDER: .01 X LEVEL: .00273 mm/s DELTA: -----



**Figura 2** Análisis de vibraciones para un equipo con problemas de desalineamiento

tabla 1, se tiene que la falla posible corresponde a desalineamiento, lo cual fue comprobado al sacar el equipo de servicio para revisión.

### **Análisis de aceites**

Cuando se analiza el aceite de una máquina, existen varias técnicas diferentes que pueden

aplicarse para determinar la composición química del aceite y buscar materiales extraños en él. Una de ellas es la ferrografía que permite la detección de virutas magnéticas en los aceites lubricantes; también se utiliza la cromatografía que mide los cambios en las propiedades de los lubricantes incluyendo la viscosidad, punto de inflamación, pH, contenido de agua y fracción insoluble, mediante la absorción y análisis selectivos.

El análisis espectrométrico del aceite mide la presencia y cantidad de contaminantes en el aceite mediante el espectrómetro de emisión atómica u absorción. Es útil para determinar la presencia no sólo de hierro, sino también de otros elementos metálicos y no metálicos, que pueden estar relacionados con la composición de las diversas partes de la máquina, como rodamientos, cojinetes, anillos de pistones, etc. Es útil cuando las partículas de desgaste se generan en las primeras etapas de la falla, pues son pequeñas.

El análisis de aceites también se aplica a los transformadores que están sometidos a esfuerzos térmicos y eléctricos. Estos esfuerzos pueden averiar los materiales aislantes y liberar gases producto de la descomposición. Las tres principales fallas relacionadas con los gases son sobrecalentamiento, efecto corona y arcos. Los gases emitidos son principalmente hidrógeno  $H_2$ , monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), etano ( $C_2H_6$ ) y etileno ( $C_2H_4$ ). El análisis de estos gases disueltos es una herramienta poderosa para detectar la evolución de fallas en los transformadores de potencia. Se han utilizado muchos criterios para la interpretación de los gases disueltos los cuales relacionan directamente o a través de cocientes el contenido de gases con las condiciones de falla.

### ***Ensayos de aislamiento [3]***

Los ensayos de aislamiento son pruebas periódicas realizadas para determinar la condición del aislamiento de motores y transformadores. Normalmente son pruebas de resistencia convencionales y reflejan la presencia de humedad y

suciedad. Sin embargo, pueden requerirse otras pruebas físicas, químicas o de laboratorio para determinar la causa de algunas fallas poco usuales en el aislamiento.

Su aplicación más importante se tiene en el diagnóstico de fallas de aislamiento en motores y generadores eléctricos, donde además de ensayos con tensión continua, se realizan pruebas de sobretensión, ondas de choque, tangente delta y descargas parciales.

*Ensayos con tensión continua.* Se basan fundamentalmente en la resistencia del aislamiento, la cual indica la condición del aislamiento y refleja la presencia de humedad y suciedad. El valor de la resistencia varía ampliamente para diferentes clases de máquinas y depende de su tipo, tamaño, voltaje, etc. La importancia de esta medida está reflejada por tanto en los valores relativos de resistencia para los mismos aparatos trabajando bajo condiciones similares y en diferentes instantes de tiempo. Esta medida refleja normalmente qué tan bien ha sido mantenida la máquina.

*Ensayos de ondas de choque.* Suministran información sobre el estado del aislante, que no proporcionan los ensayos de tensión continua ni los de sobretensión, ya que ninguno de éstos es sensible a la condición del aislamiento entre espiras. Muchos fallos en devanados empiezan con defectos de aislamiento entre espiras, entre bobinas o entre fases que, eventualmente, degeneran en fallos a tierra. Los ensayos de ondas de choque evalúan la integridad del aislamiento entre espiras, así como la capacidad del aislante a tierra para soportar transitorios de frente de onda abrupto como los que pueden aparecer en servicio. Este tipo de ensayos se usa tanto para control de calidad de devanados recién fabricados o reparados como para detectar si existe fallo en una máquina ya en funcionamiento.

*Ensayos de tangente de delta.* Son ensayos que se realizan aplicando una tensión alterna y que se han venido mostrando durante años como herramientas muy valiosas para determinar,

tanto la calidad en la fabricación de devanados, como el estado de éstos en máquinas ya en funcionamiento. Este tipo de ensayo es sensible a la condición interna del muro aislante y se aplica a devanados de motores de media tensión. Aunque por sí misma, una sola medida de tangente delta sobre un devanado completo tiene uso limitado, las medidas realizadas a lo largo del tiempo pueden proporcionar información útil sobre la tendencia de la condición del aislamiento.

*Ensayos de descargas parciales.* Las descargas parciales se definen como aquellas descargas eléctricas que cortocircuitan sólo parcialmente el material aislante entre conductores. Aunque su magnitud es habitualmente pequeña, provocan un deterioro progresivo del material aislante que puede ser la causa de su fallo definitivo, por lo cual es importante la detección de su existencia y el seguimiento de su valor.

Los ensayos para la medida de descargas parciales permiten obtener magnitudes que están directamente relacionadas con los puntos o zonas deterioradas del aislamiento, las cuales pueden ser la causa final de un fallo del sistema aislante. El hecho de que detecten los fenómenos individuales que se generan de forma directa en los defectos del aislamiento —huecos— determina que se muestren más sensibles que los ensayos de tangente de delta para el diagnóstico y evaluación del aislante en máquinas rotativas.

#### **Análisis térmico**

La temperatura es una indicación de fuentes de calor indeseables en una máquina. Bajo condiciones normales, el calor emitido tiene correspondencia directa con la potencia transmitida a través del equipo, la cual es proporcional al cuadrado de la corriente. En máquinas eléctricas y mecánicas, la generación de calor es con frecuencia una señal anticipada de falla. La temperatura se mide usando sensores de contacto de punto como termopares o termistores, y técnicas de no contacto como el pirómetro infrarrojo.

Una técnica flexible que permite el recorrido rápido de grandes áreas es la imagen infrarroja, la cual se aplica ampliamente en distribución eléctrica para identificar y clasificar las fuentes posibles de calor en interruptores, paneles, barrajes, conexiones y aislamientos.

### **Nuevos métodos de diagnóstico utilizados en mantenimiento predictivo**

Investigaciones recientes realizadas por grupos de investigación de universidades españolas [4], italianas [7] e inglesas [5], han mostrado la posibilidad de aplicación de otros métodos para el diagnóstico de averías eléctricas y mecánicas. Estos métodos incluyen el análisis espectral de corriente, la medición del flujo axial de dispersión y las aplicaciones de la inteligencia artificial.

#### **Análisis espectral de corriente**

El análisis espectral de corriente constituye un complemento para el diagnóstico mediante vibraciones ya que esta última tiene limitaciones al detectar problemas eléctricos como excentricidades en el entrehierro y barras rotas en los rotores de los motores de inducción causadas por esfuerzos mecánicos, magnéticos o térmicos.

Las barras rotas en el rotor generan dos campos magnéticos opuestos que giran a las frecuencias  $\pm sf$ , donde  $s$  es el deslizamiento del motor y  $f$  la frecuencia de la línea. Estos campos originan bandas laterales de vibración alrededor de los primeros seis armónicos de la velocidad de rotación dadas por las frecuencias indicadas en la ecuación 1.

$$f_b = [(1 - s)k/p \pm s] * f \quad (1)$$

Donde,  $f_b$  = frecuencia producida por las barras rotas;  $k$  = índice armónico ( $k=1, 2, 3, 4, 5$  y  $6$ );  $p$  = número de pares de polos del motor;  $s$  = deslizamiento por unidad.

La figura 3 muestra los resultados del análisis espectral de corriente realizados en un motor de



inducción con barras rotas en el rotor. En esta gráfica se muestran claramente los valores pico a las frecuencias descritas. Por otro lado Cabanas [4] mostró cómo el análisis espectral de corriente se puede usar para diagnosticar desalineamiento; de acuerdo con sus resultados, las amplitudes de los armónicos con frecuencias  $f - f_r$ ,  $f + f_r$  y  $f + 2f_r$  son proporcionales al nivel de desalineamiento, donde  $f_r$  es la velocidad del rotor en Hz.

Estos resultados se verificaron con el grupo motor ventilador al cual se le había diagnosticado desalineamiento en el análisis de la figura 2. Los resultados de la figura 4 muestran claramente picos altos a las frecuencias  $f - f_r$ ,  $f + f_r$  y  $f + 2f_r$  lo que permite identificar de una forma más clara el problema de desalineamiento.

### Medición de flujo axial

El flujo axial de dispersión está presente en las máquinas eléctricas como consecuencia de que éstas nunca pueden ser construidas de forma

perfectamente simétrica. Siempre se puede encontrar pequeñas e inevitables asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos debidas a diferencias propias del proceso de fabricación, tolerancias, anisotropía de los materiales, etc. A estas asimetrías, que dan lugar a pequeñas variaciones en las corrientes que circulan por las bobinas de la máquina, hay que añadir las pequeñas diferencias que pueden surgir como consecuencia de las variaciones en la disposición física de los conductores, tanto en las zonas de ranura como en las de cabezas de bobina.

En los estudios realizados por Penman [5], a partir de la ecuación de distribución espacial de armónicos con alimentación y carga trifásicas equilibradas y dejando sólo los armónicos de magnitudes significativas, se obtuvieron los componentes de frecuencia de flujo axial inducidos en el rotor y que son importantes para la detección de cortocircuitos entre espiras. Estos resultados se pudieron verificar experimentalmente.

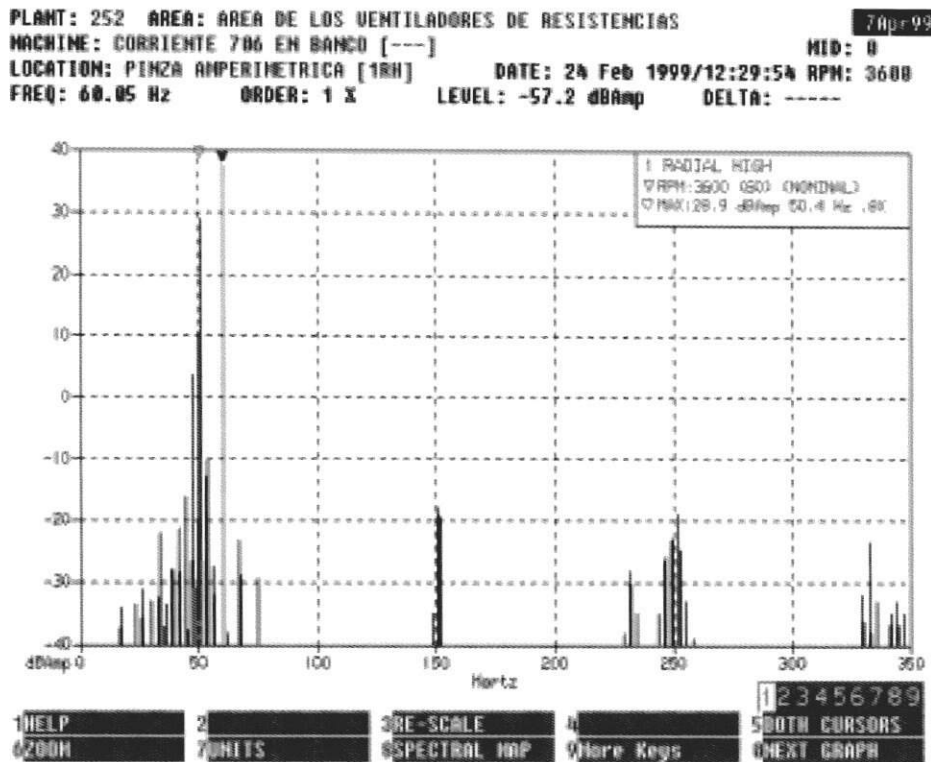


Figura 3 Análisis espectral de corriente para un motor con barras rotas en el rotor

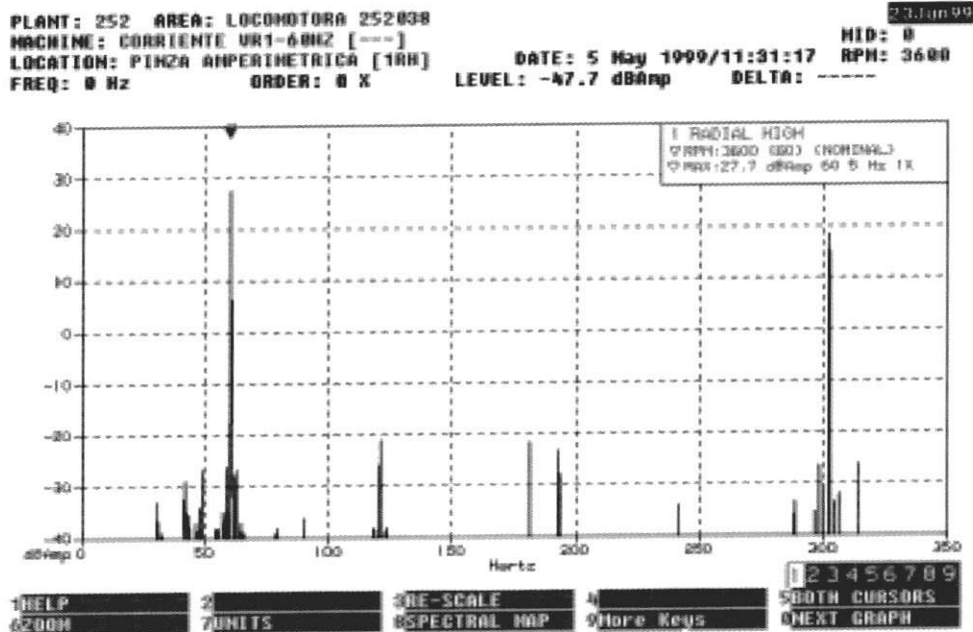


Figura 4 Análisis espectral de corriente para un equipo con problemas de desalineamiento

**Inteligencia artificial aplicada al mantenimiento predictivo**

La inteligencia artificial y en especial las redes neuronales han encontrado múltiples aplicaciones en la solución de problemas de diagnóstico de equipos, sobre todo en la detección de fallas de sistemas dinámicos, no lineales y difíciles de modelar matemáticamente [2]. Villada [6] entrenó una red neuronal de respuesta impulsional finita que permite detectar fallas internas en los estatores de los generadores síncronos utilizando las señales de corriente. Filippetti [7] utilizó una red neuronal para diagnosticar fallas en el rotor de un motor de inducción entrenándola con base en las pruebas experimentales para máquinas en buen estado y con simulación para máquinas en estado de fallo.

En los transformadores de potencia, Zhang [8] encontró una red neuronal para diagnosticar el estado del aceite utilizando como entradas el contenido de gases disueltos (H, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO y CO<sub>2</sub>). Sobre esta base se determina el grado de deterioro respecto a calentamiento, corona, presencia de arcos y papel aislante.

Se tienen también sistemas expertos que realizan monitoreo y diagnóstico en línea de plantas termoeléctricas; así como también en la clasificación de señales de vibración en el dominio de la frecuencia. El sistema experto está capacitado para ajustar su base de reglas, aprender de sus históricos de fallas y de esta forma mejorar su capacidad de diagnóstico.

**Análisis económico de los proyectos de mantenimiento predictivo**

La justificación económica de cualquier proyecto de mantenimiento predictivo es difícil por la situación particular de cada empresa en lo referente al grado de desarrollo de su mantenimiento preventivo y el estado actual de los costos de mantenimiento. Adicionalmente, los equipos de diagnóstico requeridos son costosos, demandan personal bien capacitado y no hay certeza en la magnitud de los beneficios esperados en lo referente a disminución de costos de mantenimiento, tiempo perdido por fallas de la maquinaria y lucro cesante.



Generalmente el análisis se realiza con base en datos globales, tomando como referencia las experiencias reportadas por algunas empresas después de haber evaluado los resultados del proyecto de mantenimiento predictivo. A continuación se muestran algunos de estos resultados [9].

San Diego Gas & Electric Company implantó un programa de monitoreo de condiciones que incluye las turbinas que generan un rango entre 100 y 320 MW. La disponibilidad de las unidades de generación tiene un promedio, en el período durante el cual ha funcionado el programa, de 87,1% contra un promedio en el mismo período, para la industria de generación de energía, de 77,9%. Además se han ahorrado alrededor de \$750.000 dólares en costos de mantenimiento.

Shell Oil Co., refinería localizada en Martínez (California, USA), aplicando un programa de monitoreo periódico en su equipo liviano (especialmente bombas y motores de aproximadamente 50 HP), bajó los costos de reparación por bomba de un promedio de 5.000 a \$2.500 dólares por año.

Una empresa colombiana después de tres años de haber instaurado un programa de mantenimiento predictivo en sesenta máquinas, consideradas críticas, cuyo consumo de energía es de 12.000 HP y teniendo en cuenta estadísticas de costos de mantenimiento con base en costo/kW/año, tuvo una evolución de un costo inicial de \$98 USD/kW/año a \$87,5 USD/kW/año.

#### **Determinación de los costos**

El costo del programa de mantenimiento existente incluye personal de mantenimiento, repuestos para reparación o reemplazo, contratos externos de mantenimiento y gastos fijos, los cuales pueden determinarse a partir de los reportes financieros existentes.

El costo del programa de mantenimiento predictivo consiste en:

- Equipos y software.

- Costos de servicio técnico.
- Costos fijos
- Costos de entrenamiento.

#### **Costo de equipos y software**

Este costo depende de los requerimientos específicos de cada empresa. Un equipo estándar consiste en un colector y analizador de datos, un computador y un software de análisis; el costo de este ítem completo cuesta aproximadamente \$20.000 dólares.

#### **Servicios técnicos externos**

El costo de los servicios técnicos externos como termografía, análisis de aceites y pruebas de ultrasonido a ejes están directamente relacionados con los requerimientos particulares. El análisis de cada muestra de aceite por ejemplo, puede costar aproximadamente \$8 dólares.

#### **Costos fijos**

Los costos fijos incluyen espacio, secretaria y otros que pueden ser estimados en porcentaje del costo total. De todas formas el programa de mantenimiento predictivo busca disminuir los costos de mantenimiento, lo que se traduce en una reducción del personal operativo; por tanto, la mano de obra utilizada en mantenimiento predictivo es producto de la reubicación del personal sobrante de las otras actividades.

#### **Costos de entrenamiento**

El entrenamiento es uno de los renglones más importantes del presupuesto. Tanto en el inicio del programa, como en el transcurso del mismo, se requiere desarrollar nuevas habilidades y mejorar las existentes, en el personal involucrado.

Con personal bien entrenado, que posea buenas habilidades de análisis, se tendrá plena certeza en los resultados del diagnóstico. Un presupuesto razonable para entrenamiento por empleado

es de \$5.000 dólares por año, el cual incluye transporte, hospedaje, alimentación y matrícula.

**Aplicación a la evaluación económica de las técnicas modernas de diagnóstico**

En el capítulo de técnicas de diagnóstico utilizadas en mantenimiento predictivo se describieron los métodos más utilizados en la actualidad (vibraciones, termografía, análisis de aceites y ensayos de aislamiento); existen otras técnicas que están en desarrollo que incluyen el análisis espectral de corriente, medición de flujo axial y aplicaciones de la inteligencia artificial.

Estas últimas tecnologías apenas se están proponiendo en los países más desarrollados y por tanto no se tienen implementadas muchas aplicaciones. Como ejemplo de evaluación económica se tomarán dos de estas tecnologías modernas como son el análisis espectral de corriente y la medición de flujo axial de dispersión, las cuales son aplicables al diagnóstico de fallas en el estator y el rotor de las máquinas eléctricas.

**Costo de equipos y software**

Asumiendo que la empresa dispone de un equipo analizador de vibraciones con su respectivo software, las mediciones de corriente y flujo axial requerirán los siguientes elementos adicionales:

- Pinza de corriente: \$2.000 dólares
- Bobina de flujo axial \$1.000 dólares
- Software que se implementa: \$5.000 dólares

Total inversión en equipos y software	\$8.000 dólares
---------------------------------------	-----------------

**Costos fijos**

Para la instauración de las dos técnicas propuestas es suficiente con una persona dedicada a la configuración de los puntos de medición y análisis de los resultados. Teniendo en cuenta que las dos técnicas son aplicables a las máquinas eléctricas y asumiendo un período de revisión de seis meses por máquina, un analista puede cubrir sin ninguna dificultad quinientas máquinas. El salario neto anual de este analista puede ser aproximadamente de \$6.000 dólares.

El entrenamiento de la persona responsable del manejo del equipo y del software, como se explicó anteriormente puede costar aproximadamente \$5.000 dólares en el caso más crítico que sería desplazándose a los Estados Unidos. Se asume también que por efectos de actualización y de rotación de personal esta capacitación se debe realizar cada cinco años.

**Costo de entrenamiento**

El entrenamiento de la persona responsable del manejo del equipo y del software, como se explicó anteriormente puede costar aproximadamente \$5.000 dólares en el caso más crítico que sería desplazándose a los Estados Unidos. Se asume también que por efectos de actualización y de rotación de personal esta capacitación se debe realizar cada cinco años.

**Análisis financiero**

Tomando como referencia el caso mostrado de la Shell Oil Co., en la cual la implementación del mantenimiento predictivo permitió el ahorro del 50% en los costos de mantenimiento por equipo, se puede estimar que el uso de las dos técnicas propuestas permitiría un ahorro adicional del 5% en dichos costos. De esta forma, los costos de mantenimiento se reducirían de \$2.500 a \$2.375 dólares por equipo y para una cobertura de quinientos equipos por analista por año, se tendría un ahorro neto de \$62.500 dólares por año.

Bajo estas condiciones y asumiendo una tasa de interés de oportunidad del 6% en dólares, el análisis financiero para un período de cinco años sería el siguiente:

- Inversión inicial (equipos, software y entrenamiento) \$13.000 dólares
- Costos fijos por año (salarios) \$6.000 dólares
- Ahorro anual en costos de mantenimiento \$62.500 dólares

En estas condiciones el valor presente neto es de \$224.998 dólares. Haciendo un análisis de sensibilidad, se concluye que el método propuesto

sigue siendo rentable aun con un presupuesto pesimista de reducción en los costos de mantenimiento del 1%, con lo cual el valor presente neto sería de \$14.380 dólares.

### Conclusiones

La aplicación de las técnicas del mantenimiento predictivo permite optimizar las labores de mantenimiento y conseguir una reducción significativa en los costos, al evitar mantenimientos innecesarios, reducir el número de fallas y limitar daños potenciales

De esta forma se mostró con algunos resultados experimentales cómo se pueden detectar fallas en el rotor, problemas de desalineamiento, desequilibrios y rodamientos defectuosos entre otros; sin necesidad de parar el equipo de producción ni incurrir en cambios costosos y reparaciones innecesarias. Se presentó también la justificación económica de algunas de las técnicas modernas, las cuales pueden llegar a permitir la rápida recuperación de la inversión en equipos, software, entrenamiento y salarios.

Otro desarrollo notable son las múltiples aplicaciones de la inteligencia artificial a la solución de problemas de diagnóstico y optimización del mantenimiento. Se tienen así redes neuronales para detectar y clasificar fallas en los estatores y motores de las máquinas eléctricas, de igual forma se utilizan para diagnosticar fallas en los transformadores de potencia mediante los resultados de los análisis del aceite aislante.

### Referencias

1. Starr, A.; Wynne, R. "An Introduction to Condition Based Maintenance and its Management". 2°. Seminario Internacional de Sistemas Avanzados de Manufactura, Colombia. 1996. pp. 124-134.
2. Polimac, V. *et al.* "Assessment of Present Maintenance Techniques and Future Trends", CIREDA. Amsterdam, 2001.
3. Salvador, C. "Ensayo de Calidad de Aislamiento de Máquinas Eléctricas Rotativas". En: *Revista Mantenimiento*. Septiembre, 1995.
4. Cabanas, M.F. *et al.* "Shaft Misalignment Diagnosis of Induction Motors Using Current Spectral Analysis: A Theoretical Approach". En: *The International Conference on Electrical Machines*. ICEM96. September, 1996. pp. 384-389.
5. Penman, J. Sedding. *et al.* "Detection and Location of Interturn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 9. No. 4. December, 1994.
6. Villada, F. *et al.* "Finite Impulse Response Artificial Neural Networks Based Internal Fault Detector for Synchronous Generators". *The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Grado*. Italy. September, 2001. pp. 603-608.
7. Filippetti, F. *et al.* "Neural Networks Aided On-Line Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 31. No. 4. July, 1995. pp. 892-899.
8. Zhang, Y. *et al.* "An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 11. No. 4. October, 1996. pp. 1836-1841.
9. Mojica, M. "Apuntes para una exitosa justificación de un proyecto de monitoreo de condiciones". *Reporte técnico*. SKF Latintrade Inc. 1996.