

# IMPACTO DE LA TECNOLOGIA EN EL MANTENIMIENTO

Juan C. Hidalgo B., BSEE, MBA  
TERMOGRAM

**Abstracto**— En cuestión de muy pocos años, quienes estamos involucrados en el área del mantenimiento basado en la condición, hemos experimentado un gran número de innovaciones tecnológicas que hacen nuestra labor mucho más fácil, precisa y eficiente. Hoy vemos como el precio en estos equipos ha bajado, sin embargo, la diversidad y funcionalidad se han incrementado; a manera de ejemplo cuando antes usábamos cámaras infrarrojas con una memoria muy limitada para almacenar imágenes, ahora podemos guardar miles de éstas en tarjetas removibles. En cuanto al software, se han desarrollado herramientas que asisten al usuario a mejorar su diagnóstico, un ejemplo de ello son los programas de diagnóstico automatizado para análisis de vibraciones mecánicas con capacidad de detectar una anomalía, muchas veces desapercibida por el analista. Ahora tenemos integrados en los equipos de diagnóstico funciones como: Wi-Fi, Bluetooth, control remoto e integración de estos sistemas con iPad o iPhone, combinación de imágenes térmicas con digitales para visualización optimizada, etc., Todas estas son innovaciones tecnológicas que hacen de la labor del mantenimiento una especialización técnica que está acorde con la realidad mundial.

La tecnología actualmente es más asequible en términos de precio, peso y tamaño, el uso de sistemas digitales y procesadores esta ayudando en ello, pero esto supone un reto a nuestros técnicos e ingenieros de mantenimiento para aprovechar al máximo estas nuevas capacidades que redundan también en beneficios en seguridad y ambiente.

**Index Terms**—Vibraciones, infrarrojo, automatizado, gases, ISO 10816-5, FLIR, AzimaDLI, EPRI.

## I. LA IMPORTANCIA DEL MONITOREO DE LA CONDICION

### A. El Mantenimiento Predictivo o Basado en la Condición

Es conocido también como el mantenimiento según el estado o basado en la condición (MBC), se caracteriza principalmente porque para su ejecución se utilizan diferentes tipos de instrumentos y equipos de registro y diagnóstico, donde se capturan los parámetros de operación y con los cuales se predice la condición en la que se encuentra operando la maquinaria, sus resultados permiten ajustar el programa de intervenciones.

- Ventajas

- Disminuye la tasa de salida forzada
- Alta confiabilidad
- Alta disponibilidad
- Prolonga la vida útil de los equipos
- Disminuye el inventario de repuestos

- Desventajas:
  - El costo de la inversión en los equipos de diagnóstico es alto
  - El costo de inversión en el servicio contratado es alto
  - Requiere de personal especializado y experimentado.

El mantenimiento predictivo detecta la degradación en componentes críticos en tiempo real y permite a los encargados planear acciones correctivas antes de un paro no programado.

Los beneficios de un mantenimiento predictivo incluyen:

- Ahorros acumulados al poder utilizarse óptimamente el recurso
- Reducción del paro no programado del recurso
- Reducción del almacenamiento innecesario de partes de repuesto y su costo por obsolescencia

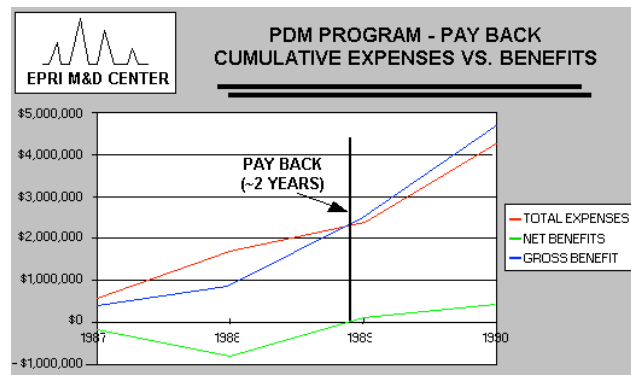


Figura 1: Retorno de la Inversión - Programa MBC (Estudio EPRI)

La figura 1 muestra como el mantenimiento basado en la condición llega a generar beneficios netos después de dos años de ser aplicado en forma periódica. EL estudio lo llevo a cabo el Energy Power Research Institute (EPRI) en Estados Unidos.

En otro estudio del Electrical Power Research Institute (EPRI) en Estados Unidos, se estimaron los costos por HP instalados, en los tres tipos de esquema de mantenimiento que existen (en \$):

- Mantenimiento reactivo (correctivo): \$17 - \$18
- Mantenimiento Preventivo: \$11 - \$13
- MBC: \$ 7 - \$ 9

Entre las tecnologías más modernas para MBC, tenemos: la termografía infrarroja, análisis por vibraciones mecánicas, análisis de aceite, análisis de características eléctricas de motores y alineación de ejes.

Cualquier compañía, por pequeña que sea, debería de usar alguna de estas tecnologías con el fin de bajar sus costos por el mantenimiento de los equipos.

De las tecnologías anteriormente mencionadas, la termografía infrarroja es la que sobresale más, debido a su gran campo de aplicación; se puede aplicar a equipos rotatorios, hidráulicos, eléctricos, hornos, fluidos, etc. Y para equipo rotatorio sobresale el Análisis por Vibraciones, últimamente se esta considerando al alineamiento de ejes como una técnica predictiva debido a la necesidad del personal de planta de estar realizando verificaciones de alineación rutinariamente.

## II. AVANCES TECNOLÓGICOS EN TERMOGRAFIA INFRARROJA

Las primeras cámaras para uso comercial fueron fabricadas por AGA alrededor de 1964, eran tipo escáner y se enfriaban con nitrógeno liquido.

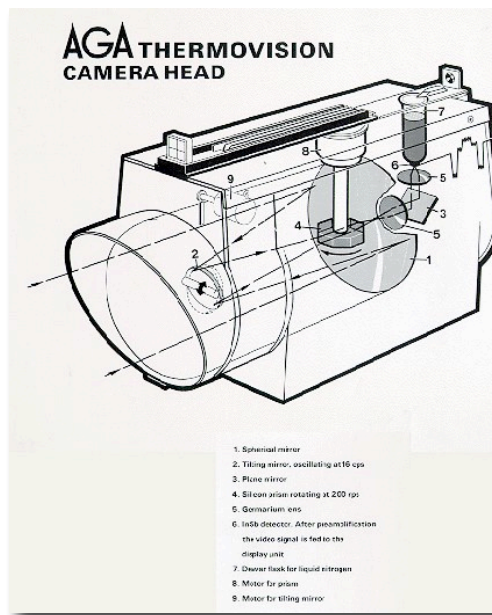


Figura 3: AGA - Cámara Thermovision 660

La radiación infrarroja ingresa a través de un lente y esta es enfocada hacia un detector de InSb (Indio Antimonio)

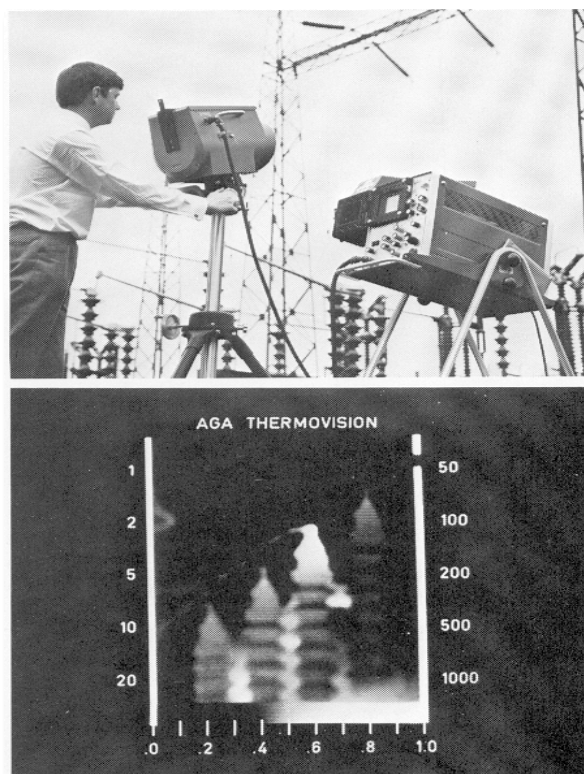


Figura 2: Thermovision 660 en una Subestación - Puntos calientes

enfriado por nitrógeno líquido por medio de una serie de espejos y prismas. La electrónica asociada al detector amplifica y acondiciona la señal e introduce factores de corrección como temperatura reflejada, emisividad y alguna desviación por temperatura ambiental.

La figura 3 muestra el diagrama interno de esta cámara (tipo escáner), la cual contenía otros accesorios no mostrados como: la fuente de poder (sin baterías) y tanques para el nitrógeno liquido. La misma por su peso y tamaño tenía que ser llevada en un automóvil para realizar la inspección.

La figura 2 muestra una termografía infrarroja de 1964 así como el tamaño de la Thermovision 660 fabricada por AGA, Suecia.

### A. Detector Infrarrojo

El detector es el corazón de un instrumento infrarrojo, estos sensores la energía infrarroja y producen señales eléctricas proporcionales a la temperatura del objeto en estudio.

#### Arreglo de Plano Focal (Focal Plane Array – FPA)

Ventajas	Desventajas
Menos peso comparado con el escáner mecánico	Complejas
Más portátiles con mejoría en la vida de la batería	Requieren de enfriamiento
Resolución excelente	Tiempos de encendido largos

#### Micro bolómetros (detector FPA sin enfriamiento)

Ventajas	Desventajas
Mecánica simplificada, mejoría en la confiabilidad	Estabilidad interna en la temperatura, factores de llenado bajos

Tabla 1: Tipos de Detectores

Las cámaras más compactas son con detector Focal Plane Array (FPA), las fabricadas con FPA enfriado fueron introducidas al mercado comercial en 1987. Y hasta 1997, después de varios años de uso por los militares se tuvo acceso comercialmente a las FPA no enfriados o micro bolómetro.

Los parámetros más importantes son la resolución, la sensibilidad térmica y constante de tiempo del detector.

1) Resolución y Sensitividad térmica

En términos de espacio o geometría es una medida del detalle apreciable por el detector, y se mide por la cantidad de

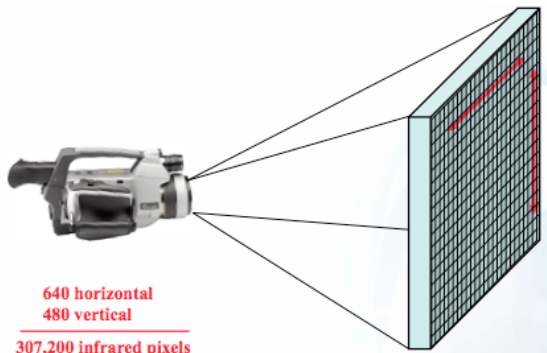


Figura 4: Cámara de alta definición 640x480 pixeles. Modelo P660 cortesía FLIR

pixeles en dirección horizontal por la cantidad de estos en dirección vertical. Se entiende, que una mayor resolución implica mayor cantidad de pixeles.

Con la fabricación de detectores con tecnología de 17 micrones se han logrado alcanzar a nivel comercial resoluciones de 1024 x 768 pixeles, ejemplo: FLIR X8000sc sin embargo a nivel militar se tiene una resolución superior. Las ventajas de una mejor resolución permiten al termógrafo:

- Encontrar problemas pequeños a mayores distancias
- Encontrar problemas no encontrados con cámaras de menor resolución
- Las inspecciones infrarrojas son realizadas con mejor eficiencia, se pueden cubrir la misma área con menos imágenes. Inspecciones y generación reportes más rápidas.

La figura 5 muestra la diferencia entre distintos detectores

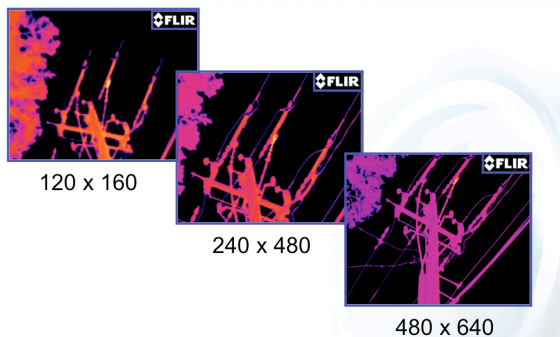


Figura 5: Imágenes a diferentes resoluciones de un seccionador a 11m. Cortesía FLIR

con resoluciones distintas. Esto impacta notablemente la medición de temperatura, en la imagen de 120x160 la temperatura medida fue de 52 Celsius, en la imagen de 240 x 480 la temperatura medida fue 68 Celsius mientras que en la de 480 x 480 la temperatura medida fue 78 Celsius; claramente hay un mejoramiento en la medición de temperatura con la cámara de mayor resolución.

Por otro lado, la Sensitividad Térmica o el cambio mínimo detectable por el detector es considerado uno de los parámetros más importantes en termografía, se expresa en términos de temperatura, un valor bajo implica que la sensibilidad del detector es alto. La forma más común se expresa como NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) y se mide en Kelvin o en Celsius. Una alta sensibilidad mostrará imágenes más nítidas, la figura 6

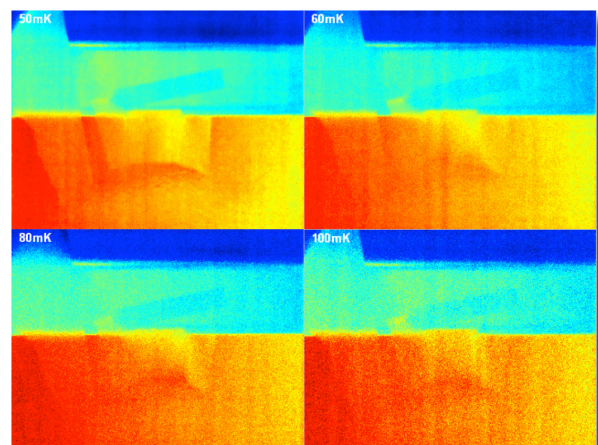


Figura 6: Diferencias en la Sensitividad Térmica para distintos detectores con la misma resolución. Cortesía FLIR

muestra una comparación entre distintos detectores con la misma resolución, siendo la imagen de 50 mK la que tiene menor ruido térmico. Aunque las cámaras tienen igual resolución la diferencia importante es el factor de llenado en el detector de 50 mK, este es construido con espacio entre pixeles más pequeño lo cual se traduce en menos fotones perdidos o ruido térmico, la calidad de la imagen es clara con respecto a la de 100 mK.

Las ventajas para el termógrafo:

- Observara problemas donde antes no los había
- Acceso a aplicaciones científicas
- Imágenes más claras

2) Constante de Tiempo del Detector

Con los nuevos tipos de detectores, es hoy en día uno de los parámetros más importantes en el diseño de un detector infrarrojo y superior a la importancia de otros. Con los nuevos detectores y sus estructuras tan delgadas se tienen cámaras con constantes de tiempo muy cortos y tiempos de respuesta muy rápidos. Usualmente, los tiempos de respuesta de miden en milisegundos, a manera de ejemplo; para una FPA operando a 30 Hz su tiempo de respuesta no debería de exceder de 10ms

(es aceptado como normal 1/3 de la taza de actualización de cuadros o "Frame Rate").

Estas constantes cortas permiten que las cámaras infrarrojas produzcan imágenes de calidad superior y puedan capturar objetos en movimiento con mayor definición y claridad.

En la figura 7 se observan dos imágenes de dos cámaras con actualización de cuadros de 60Hz, pero con tiempos de respuesta diferentes. La imagen de la derecha es de 7ms ( $1000/7 = 142\text{Hz}$ ) y la izquierda es de 12ms ( $1000\text{ms}/12\text{ms} = 83\text{Hz}$ ).



Figura 7: Imágenes con detectores con tiempos de respuesta distintos. Cortesía FLIR



Figura 9: Fuga gas Butano de 3 gramos/hora

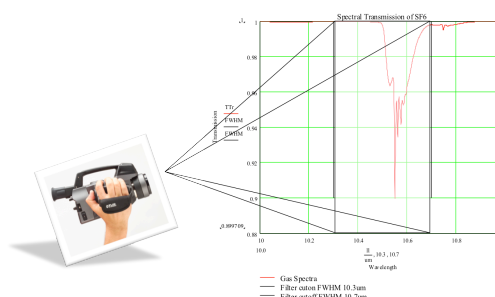


Figura 8: Ubicación filtro de 10 micrones para "ver" gas SF6. Cortesía FLIR

### B. Nuevas Tecnologías

Para beneficio del especialista en termografía se han desarrollado nuevas tecnologías y aplicaciones que nunca se imaginó poder tener.

#### 1) Cámaras infrarrojas que "ven" nubes de gas

Se han desarrollado cámaras que visualizan nubes de gas, no solo potencialmente peligroso al humano sino para la atmósfera. Entre los gases de efecto invernadero más peligrosos tenemos al SF6, usado hoy en día como aislante eléctrico en más del 80% de subestaciones en el mundo.

También se han desarrollado cámaras que "ven" nubes de hidrocarburos, para ambientes peligrosos como refinerías, centros de distribución de combustibles (gas, gasolinas, etc.) y plantas de generación geotérmica con turbinas encapsuladas en pentano.

Los métodos de detección de gas involucran usualmente el uso de un "sniffer" o detector infrarrojo de gas.

Las cámaras GF tienen detectores cuánticos enfriados a -100 Celsius con enfriadores Stirling, siempre muy portátiles, a estas cámaras se les colocan filtros dependiendo del gas a observar con el fin de "empatar" la respuesta espectral de la cámara con el "pico" espectral de absorción del gas a "ver". La figura 9 muestra la ubicación espectral del gas SF6 alrededor de 10 micrómetros.

La mayoría de hidrocarburos absorben la energía infrarroja alrededor de 3.4 micrones, a la cámara se le instala un filtro en esa banda.

#### 2) Cámaras con mejoramiento térmico de imagen MSX™

Las cámaras con tecnología MSX logran mejorar los detalles con bajo contraste, aumentan la profundidad y textura y permite leer rótulos o etiquetas en una imagen infrarroja.

La técnica toma la imagen visual normal, la pasa por un filtro pasa altas frecuencias y suprime los gradientes de mayor escala o detalle. Luego la fusiona con la imagen infrarroja normal, al final se obtiene una imagen infrarroja con mayor definición. Los especialistas en termografía serán capaces de terminar mejor la fuente del problema con esta tecnología desarrollada.

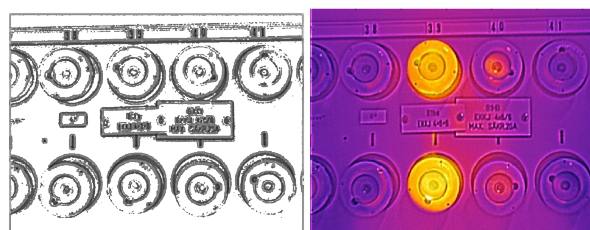


Figura 10: MSX - Imagen izquierda visual filtrada en altas frecuencias, derecha la fusión resultante con la infrarroja

#### 3) Wi-Fi y Software para dispositivos móviles

IDC predice que para el 2013, las tabletas y los teléfonos inteligentes tendrán una participación de cerca del 60% del mercado de Tecnología. Y las mini tabletas como la iPad mini o la Nexus entre otras, tendrán un crecimiento del 42% en el 2013.

genera una señal eléctrica que es proporcional a la señal de vibración emitida por la maquina.

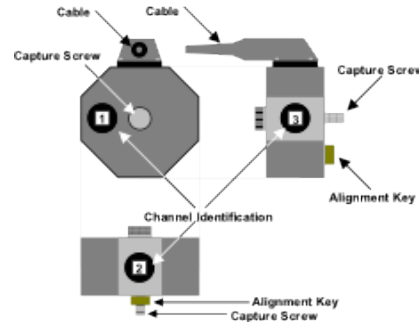


Figura 12: Acelerómetro Triaxial. Cortesía Wilcoxon Research-MEGGITT

Dentro de cada acelerómetro hay un cristal piezoeléctrico con una masa unida a él. Cuando el cristal piezoeléctrico es presionado este genera un impulso eléctrico. Un amplificador dentro del acelerómetro convierte la pequeña señal eléctrica en una fuerte señal de tensión que es alimentada al colector de datos.

De la configuración de este sensor se desprenden claras ventajas sobre la recolección tradicional de datos mediante sensores mono axiales:

- Una única localización de medición para tomar las tres direcciones de medición: Estas son capturadas simultáneamente desde una única localización definida a conveniencia, esta característica es muy ventajosa en aquellas maquinas que por su instalación cuentan con posiciones de difícil acceso.
- Medición simultanea en las tres direcciones: La captura simultánea de los tres espectros en cada dirección permiten al analista hacer comparaciones válidas entre espectros, en iguales condiciones.
- Reduce a un 60% el tiempo tradicional de medición: Con los sensores tradicionales cada dirección es medida independientemente, contrario al caso del sensor triaxial que captura simultáneamente las tres direcciones, esta característica permite un ahorro de tiempo de 60% por cada máquina, permitiéndole al inspector abarcar mayor cantidad de equipos durante la ruta.
- Fiabilidad de la información: Durante la medición el sensor triaxial es atornillado temporalmente al motor mediante una base metálica de bronce o acero inoxidable previamente adherida a él, esta

Lo anterior demuestra que cada día, la movilidad es cada día más importante en nuestras labores cotidianas. IDC confirma que dentro de los próximos 4 años los usuarios visitaran mas el internet con equipos móviles que con computadoras.

Hoy en día se han desarrollado sistemas para tabletas y smartphones que se comunican vía Wi-Fi con capacidad de crear reportes de termografía completos, con comentarios y análisis que pueden ser enviados al instante.

En muchas casos se esta ante una anomalía severa y el enviar un informe a los tomadores de decisión para intervenir el sistema en falla a tiempo, evita no solo daños catastróficos sino el salvar vidas humanas.



Figura 11: Aplicación para Tabletas y Smartphones iOS y Android - FLIR Tools Mobile. Cortesía de FLIR

### III. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EQUIPOS DE MONITOREO PARA MAQUINARIA ROTATORIA

#### A. Análisis por Vibraciones Mecánicas

El avance en los equipos para el monitoreo de vibraciones ha dado un salto importante; desde sus inicios con equipos analógicos como osciloscopios de tubos rayos catódicos a los modernos analizadores y colectores de datos portátiles con Transformada Rápida de Fourier (FFT).

#### 1) Sistemas con cuatro canales con sensores triaxiales e inalámbricos

Durante el análisis de vibraciones el acertado diagnóstico de las fallas mecánicas en la maquinaria rotativa no solo depende de la habilidad del analista sino que también depende de la calidad de los datos recolectados durante el barrido de la ruta. Hoy en día se emplean sensores triaxiales durante la ruta de análisis de vibraciones en la planta.

Como su nombre lo sugiere un sensor triaxial es un sensor que incorpora tres sensores mono axiales en una misma pieza. Los acelerómetros del sensor son orientados de modo que cada uno de ellos coincida con la dirección de los ejes de la maquina: axial, vertical y horizontal. Cada acelerómetro

característica permite garantizar que los datos son precisos evitando la atenuación de las altas frecuencias de la señal además se garantiza la repetitividad en mediciones subsiguientes al medir exactamente sobre el mismo punto ya que la base permanece fija en el motor.

Hoy en día se han desarrollado sistemas inalámbricos para asistir al especialista, entre sus ventajas se tiene:

- Es más seguro para el analista, porque la adquisición de datos es inalámbrica. permite alejarse de máquinas peligrosas mientras se toman los datos.
- Algunos modelos tienen comandos por voz lo que permite usar las manos para otras cosas.



Figura 13: TRIO - Analizador de Vibraciones de 4 canales con WiFi y Bluetooth. Cortesía AzimaDLI

## 2) Software con Diagnóstico Automatizado

El preparar un buen analista de vibraciones toma al menos 3 años y la cantidad de información recolectada es bastante, su tiempo de procesamiento toma tiempo.

Es por ello, que se han desarrollado herramientas de apoyo al analista, no solo con reglas de decisión sino con métodos sofisticados y algoritmos que detectan y diagnostican las fallas en una máquina, dando información del diagnóstico de la falla, su severidad y su prioridad para ser intervenida.

Este software disponible en el mercado tienen capacidad de detectar cerca de 650 fallas con 4500 reglas únicas y procesar cientos de espectros de vibración en minutos.

Y logran asistir al analista, quien muchas veces solo se concentra en ver fallas de rodamientos o problemas a 1x o 2x de la velocidad de rotación y pasa desapercibido otras fallas importantes.

### B. Alineación de Ejes

La desalineación es sin duda una de las causas principales de problemas en maquinaria. Diversos estudios han demostrado que un 50% de los problemas en maquinaria son causa de la desalineación y que un 90% de las máquinas corren fuera de las tolerancias de alineación permitidas. La verificación de alineación debería de ser realizada de forma periódica como si fuera otra técnica de MBC.

Una máquina desalineada puede costar desde un 20% a un 30% de tiempo de paro no programado, además de partes de repuesto, inventarios y consumo de energía.

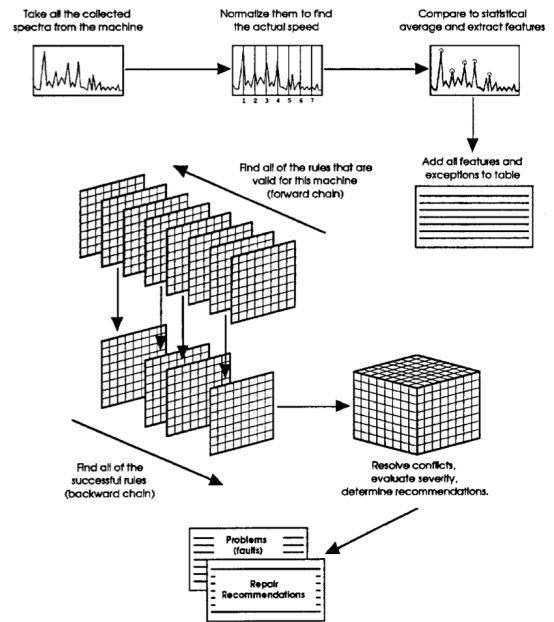


Figura 14: Flujo de un Sistema de Diagnóstico Automatizado. Cortesía AzimaDLI

El corregir un problema de alineación identificado puede ser en extremo frustrante, si se tiene un sistema de alineación incapaz de determinar la verdadera condición de esta u ofrece correcciones difíciles de ejecutar.

Una correcta alineación nos dará los siguientes beneficios:

- Reducción en las vibraciones
- Ahorros de energía
- Reducción en el desgaste de componentes asociados
- Mayor capacidad de producción
- Mayor calidad de producto

Los sistemas mecánicos como el nivel de precisión y palpadores, no son tan exactos y conllevan a errores en la alineación. Los métodos con indicadores de carátula, son más precisos pero se necesita tener más conocimiento para usarlos y muchos técnicos cometen el error de no compensar por el pandeo de la barra o el efecto de la gravedad sobre los indicadores. El método de la figura 15 es recomendado por API (American Petroleum Institute)

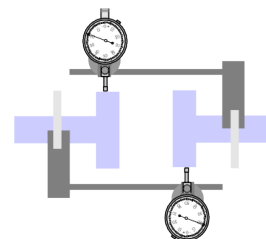


Figura 15: Método con Indicadores de Carátula en posición Reversed RIM. Cortesía Fixturlaser

### 1) Sistemas Laser

Existen en el mercado varias tecnologías láser que facilitan esta labor y no requieren de personal muy capacitado pues estas realizan todos los cálculos.

La tecnología más reciente en detectores se centra en el uso de CCD (Charged Couple Devices) en lugar de detectores PSD (Position Sensitive Devices). Los CCD tienen las siguientes ventajas sobre los PSD:

- Alta linealidad y resolución
- Menor tamaño y bajos costos por calibración
- Capacidad de efectuar post/procesamiento de imagen: Supresión de luz y otras ventajas.

Se tienen dos sistemas en el mercado:

- Sistemas con un solo láser: Son precisos en distancias cortas y mejor con ejes acoplados. Y son afectados por variaciones angulares pequeñas. Usan detectores PSD con punto laser.
- Sistemas con doble láser: Usan el método de Reversed RIM recomendado por API. Se consiguen tanto en PSD como con detectores CCD. En CCD los detectores son de mayor tamaño y en vez de usar un punto láser se usa una línea láser



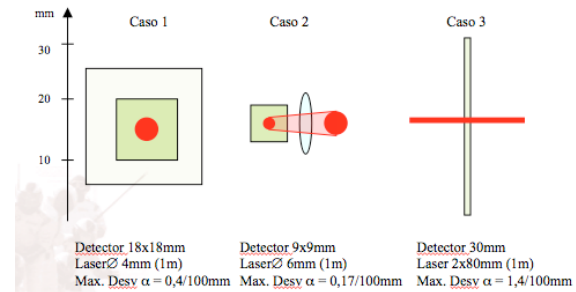
**Figura 17: Sistema con doble láser, detector CCD inalámbrico, haz láser de línea. Cortesía Fixturlaser**

La figura 17 muestra la comparación entre varios equipos de alineación de ejes, el caso 1 corresponde a un sistema PSD con doble detector, el caso 2 a un sistema PSD con haz láser puntual y el caso 3 a un sistema CCD con doble detector y haz laser de línea. En todos los casos se muestra la máxima desviación angular que cada sistema soporta.

Un sistema con una amplia desviación angular permite realizar menores correcciones y hacer el trabajo de alineación en un menor tiempo, esto debido a que el láser no se sale del detector tan fácilmente.

### IV. RETOS

Hemos resumido un poco los avances tecnológicos y los beneficios que estos aportan al usuario final. Sin embargo, es importante que se tome muy en cuenta que ningún equipo por sí solo sustituye la educación y experiencia de un técnico.



**Figura 16: Desviación Angular máxima para varios sistemas, según tamaño del detector v tipo de haz láser**

y de tomar muy en cuenta al operador de la máquina, quién en muchas instancias la conoce mejor que cualquier profesional de confiabilidad.

Es muy recomendable, que cada empresa que quiera incursionar en el MBC, forme un grupo de técnicos y que se conviertan en el equipo de confiabilidad con la educación necesaria y con los equipos predictivos con la mejor tecnología posible. Para ello, es recomendable que en sus inicios cuente con la guía de un profesional que conozca sobre distintas técnicas y le asesore en seleccionar las mejores herramientas y capacite al personal que inicia en el departamento de confiabilidad.

La certificación del personal en Termografía Infrarroja, Análisis de Vibraciones, Alineación de Ejes, etc., es una tarea muy importante, cuesta dinero pero rendirá frutos en un corto plazo.

### V. REFERENCIAS

#### Reportes Técnicos:

- [1] "Gas Detection: The Professional Guide", FLIR-ITC, 2009
- [2] Gens, Frank "IDC Predictions 2013: Competing on the 3rd Platform", IDC, November 2012, International Data Corporation #238044, Volume: 1

#### Literatura:

- [3] *Level III Study Guide Infrared and Thermal Testing Method*, ASNT, Kaplan, Herbert; 2001
- [4] *Machine & Systems Condition Monitoring Series*, Coxmoor, Roderick, Thomas; 1999

### VI. BIOGRAFÍA

**Juan C. Hidalgo**, nació en 1968 y se graduó de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica con un énfasis en Electrónica y Telecomunicaciones. Y obtuvo un grado de Master en Administración de Empresas con mención honorífica del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Trabajó para el Instituto Costarricense de Electricidad por 7 años donde adquirió experiencia en las Plantas Hidroeléctricas del Complejo Arenal-Corobici-Sandillal y comenzó a usar la termografía con cámaras infrarrojas tipo FPA. Fundó la empresa TERMOGRAM dedicada al Monitoreo de la Condición y brinda cursos y ponencias para IEEE y otros eventos a nivel regional en monitoreo de la condición. Es Nivel III en Termografía Infrarroja por el Infrared Training Center, Analista Categoría II en Vibraciones por el Vibration Institute, Especialista en Alineación de Ejes, etc.

E-mail: [juan.carlos@termogram.com](mailto:juan.carlos@termogram.com)