



## La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos

Por Juan C. Hidalgo B., BSEE, ITC Instructor Nivel II, Analista de Motores Eléctricos

[jchidalgo@termogram.com](mailto:jchidalgo@termogram.com)

Como especialista en termografía infrarroja por más de 7 años y especialista y usuario de otras técnicas predictivas, he encontrado diversos problemas usando la termografía infrarroja. Pero, sin duda alguna, el diagnosticar con certeza la causa exacta de falla en un motor eléctrico con solamente termografía, es sumamente difícil.

Podría afirmarse que la termografía infrarroja es la técnica predictiva más rápida, se puede recolectar mucha información en cuestión de segundos, contrario a esto, las técnicas de análisis por vibraciones y análisis de motores eléctricos demoran más tiempo. Pero la calidad de información de un termograma está sujeta a varios parámetros que las otras tecnologías mencionadas sí toman en cuenta.

Este artículo pretende, sobre la base de un ejemplo real donde se encontró una falla eléctrica, mostrar los beneficios de la termografía infrarroja y el análisis de motores eléctricos, utilizando tecnologías dinámicas y estáticas para determinar la causa de falla. También se resumen las ventajas y desventajas de cada técnica con el fin de orientar a los especialistas en predictivo a tomar mejores decisiones en su labor.

Por ejemplo, la figura No. 1 muestra el rodamiento del lado de carga un motor con alta temperatura. En termografía usualmente asociamos los colores claros a altas temperaturas y los colores oscuros a bajas temperaturas. En este caso, estoy seguro de que un especialista en termografía afirmarían la existencia de un problema. Sin embargo, tómesese muy en cuenta que este es el efecto y no la causa real del problema, es muy probable que la causa raíz sea un problema de alineación, o daño en la pista interna del rodamiento, o en un problema de excentricidad. Esto nos muestra que la termografía IR nos puede dar una rápida indicación de un problema, se debe extremar cuidado a la hora de hacer un diagnóstico preciso.

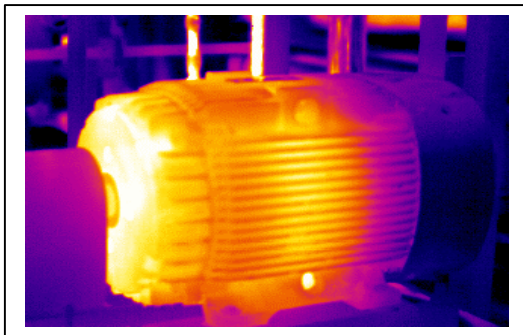
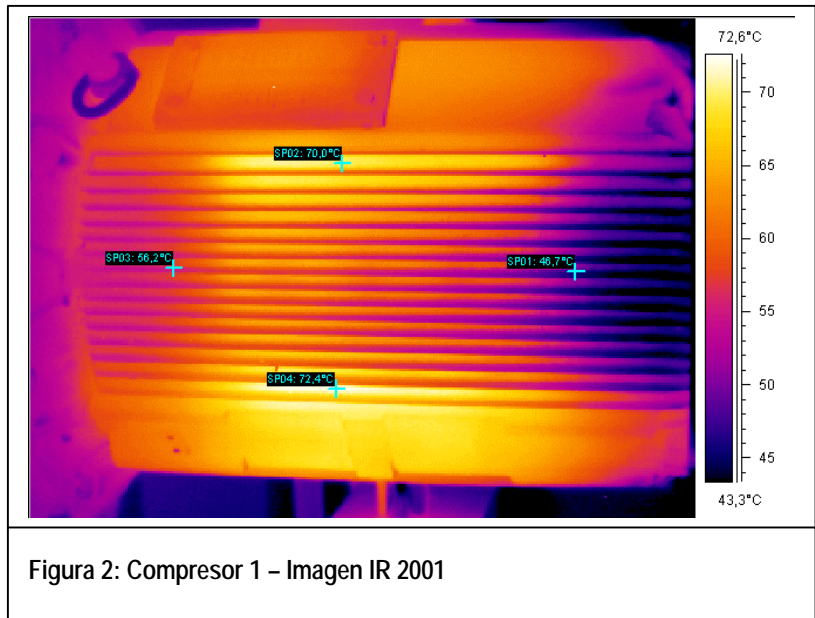


Figura 1: Imagen IR – problema de rodamiento



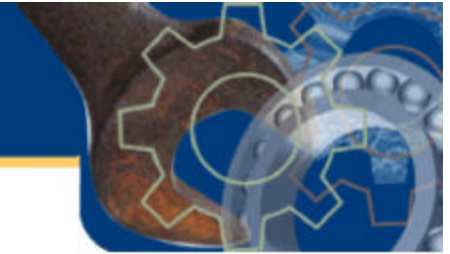
La figura No.2 corresponde a una inspección IR de un motor para un compresor de aire en una compañía de semiconductores tomada en el 2001.



La figura No. 2 es un motor con aislamiento clase F con algunos puntos calientes bien definidos en su carcasa, pero con termografía apenas se registró una temperatura máxima de 72° C. Es importante que un especialista en termografía tome muy en cuenta que las lecturas de temperatura en la carcasa del motor no son una verdadera indicación de la temperatura actual de los devanados del motor. Basado en mi experiencia y en la de otros autores<sup>1</sup> existe alrededor de 15° C a 20° C de diferencia entre la temperatura de la carcasa y del devanado y la misma depende también de la temperatura ambiente.

Continuando con la explicación dada anteriormente, la transferencia de calor en un motor no solo dependerá de su temperatura actual, sino también en el tamaño de la carcasa, su forma y tipo, la masa del motor tome un papel importante, como ya sabemos a mayor sección transversal la transferencia de calor aumenta. También es importante el tipo de “enclosure” que el motor tenga y si tiene asociados sistemas de enfriamiento.

Así que la temperatura del devanado debería estar cerca de  $72^{\circ} + 20^{\circ} = 92^{\circ} \text{ C}$ .



Este valor es bastante menor al máximo permitido para esta clase de aislamiento, según la norma IEEE 117-2000.

La Tabla 1 muestra en forma resumida la temperatura máxima permitida para cada clase de aislamiento.

**Tabla 1: Clasificación por temperatura de varios aislamientos**

Tipo de aislamiento	Temperatura	
Clase A	105° C	221° F
Clase E*	120° C	248° F
Clase B	130° C	266° F
Clase F	155° C	311° F
Clase H	180° C	35 ° F
<b>Clase N</b>	<b>200° C</b>	<b>392° F</b>

*Basado para una temperatura ambiente de 40 ° C (104 ° F)*

*\* Usado en equipo Europeo*

Es importante que los especialistas en termografía IR reconozcan y utilicen adecuadamente esta tabla para determinar la severidad de un problema potencial en un motor.

Por los puntos calientes que notamos en la figura 2, se decidió tener monitoreado el motor, la figura 3, muestra una nueva termografía tomada en el 2002:

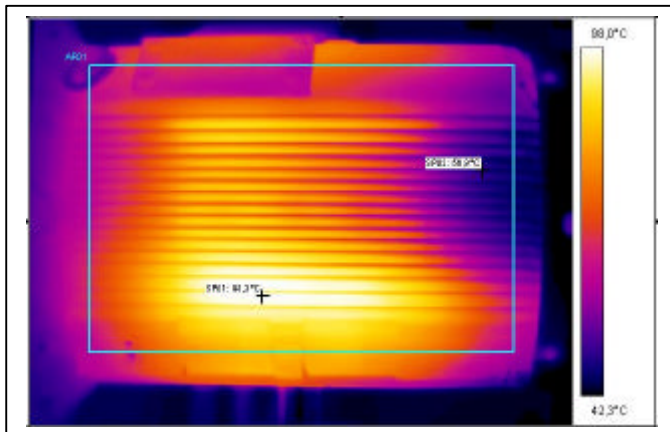


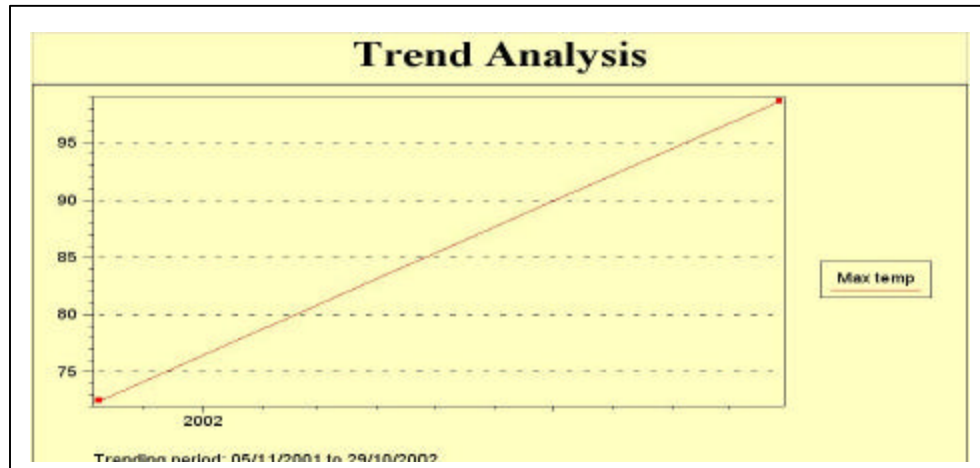
Figura 3: Compresor 1 – Imagen IR 2002

En termografía IR, así como en otras técnicas predictivas, el uso de tendencias es sumamente importante, en mi experiencia he encontrado sumamente útil el software ThermoCAM Database, el cual permite, bajo rutas muy bien establecidas, hacer consultas en una poderosa base de datos. Usando entonces las funciones del software mencionado junto



OCTUBRE 30-31, 2003 – LEÓN, GTO. MÉXICO

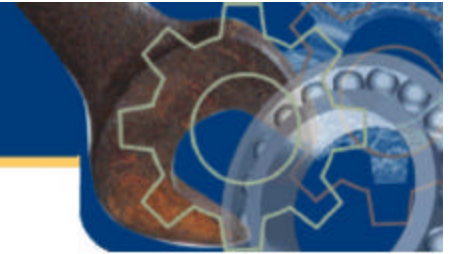
con el ThermaCAM reporter 2000 profesional de FLIR, obtuvimos un gráfico de tendencia para la carcaza del motor del Compresor 1 de esta compañía.



Claramente el gráfico obtenido mostró un Delta-T de aumento de temperatura de 27° C, la temperatura máxima en la carcaza aumentó hasta 99° C., y la temperatura aproximada del devanado estaría cerca de 119° C. Es importante que cuando se realicen análisis de tendencias, el equipo se encuentre bajo las mismas condiciones operativas, en este caso en particular, el motor compresor tenía exactamente el mismo consumo de corriente y la presión de descarga era constante en ambas mediciones.

Ahora son aun más claros los puntos calientes en la base de la carcaza del motor, lo que indica un problema en el motor y, tal y como se observa en la tendencia, se deteriora con el tiempo. Si usamos solamente la tabla 1 acerca de la clase de aislamiento para aceptar o rechazar el estado de este motor, podríamos concluir que el motor es aceptable. Y es una práctica común entre los especialistas en termografía utilizar como parámetro esta tabla para diagnosticar un motor. La tendencia de las imágenes infrarrojas nos esta mostrando que dentro del motor existe una situación especial, muy probablemente en los devanados del mismo.

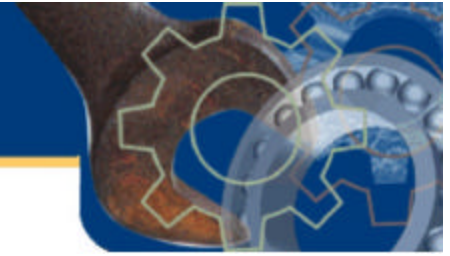
Las máquinas eléctricas están diseñadas para un intercambio de calor eficiente. Cuando algo de calor es atrapado, se desarrollan "estreses" mecánicos y eléctricos y pueden causar que ciertas tolerancias se excedan o las características de los materiales eléctricos sean cambiadas radicalmente.



Gracias a las inspecciones infrarrojas y a su análisis de tendencia, se recomendó efectuar un análisis más específico al motor, la técnica utilizada fue análisis de Motor Eléctrico, conocido también como análisis del Circuito del Motor; esta es una prueba estática.

**Tabla 2: Análisis de Zonas de Falla**

Fault Zone	Test Type	Date	Condition
Power Circuit	Voltage Imbalance Ph-Ph (%)	0,38	12/18/02
	<b>Resistive Imbalance (%)</b>	<b>22.86</b>	<b>12/18/02</b>
Power Quality	Voltage THD Ph-Ph (%)	1,65	12/18/02
	Current THD (%)	3.97	12/18/02
	HVF (%)	0.01	12/18/02
Insulation	Stator		
		OVR	
	RTG (Meg)	(MCE)	12/18/02
	PI	N / C	12/18/02
	CTG (pF)	80750.00	12/18/02
	Zero Sequence (%)	0.58	12/18/02
	Rotor		
	RTG (Meg)	N/A	
Stator	Imp. Imbalance (%)	4.21	12/18/02
	<b>Inductive Imbalance (%)</b>	<b>10.02</b>	<b>12/18/02</b>
Rotor	Fp Amplitude (Delta dB)	77,9	12/18/02
	Inductive Imbalance (%)	N/A	
	Resistive Imbalance (%)	N/A	
	Inductance Ph-Ph (mH)	N/A	
	Resistance Ph-Ph (Ohm)	N/A	



El equipo usado en nuestro diagnóstico fue el MCEmax manufacturado por PdMA Corporation, esta herramienta nos permite realizar fácilmente tanto pruebas dinámicas como estáticas a un motor, comprendiendo entre ellas 6 zonas de falla: Calidad de energía, circuito de potencia, aislamiento, rotor, estator y excentricidad.

Los resultados para el motor en cuestión mostraron un claro desbalanceo resistivo e inductivo; esto nos confirmó que había efectivamente un daño en los devanados del motor, específicamente un corto entre espiras. Si observamos el valor de Resistencia a Tierra (RTG, siglas en inglés) es muy alto, significando que no había fugas a tierra, el aislamiento todavía está en buen estado. Efectivamente, la empresa semiconductora realizó un chequeo del motor con un megger y encontró el RTG alto. El problema con estos aparatos de medición es que son efectivos en forma parcial, si la falla de aislamiento da a tierra, son excelentes; en nuestro caso el corto estaba entre espiras o vueltas.

El monitorear la inductancia junto con el desbalance resistivo nos permite determinar en forma prematura una causa de falla al aislamiento, en nuestro caso el motor pudo ser salvado de un rebobinado total.

La siguiente tabla <sup>ii</sup> resume las tecnologías predictivas más importantes para el diagnóstico de fallas en motores eléctricos. A manera de ejemplo, el diagnóstico de devanados es objetivamente evaluado por: Evaluación del circuito del motor, análisis de Vibraciones, análisis de Corrientes del Motor y análisis de Potencia.

Entre más condiciones de falla monitoree una tecnología, mejor será esta para el diagnóstico en motores eléctricos.

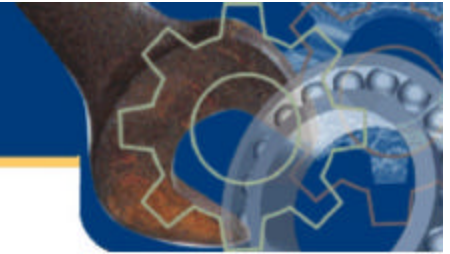


Tabla 3 - Correlación de varias tecnologías predictivas en motores eléctricos.

	Sistema de Aislamiento	Excentricidad	Contaminación	Devanados	Rotor	Circuito de Potencia
<b>Evaluación del Circuito del Motor (pruebas estáticas)</b>	<p>○</p> <p>Bajo RTG y el PI/AD dan una medición cuantitativa del estado del aislamiento</p>	<p>○</p> <p>Variaciones en la amplitud pico a pico de la inductancia con respecto a la posición del rotor</p>	<p>○</p> <p>La forma de la curva PI/AD determinan si el aislamiento esta humedo, contaminado o resquebrajado, asi como también la CTG indica el grado de contaminación presente en los devanados del motor</p>	<p>○</p> <p>Desbalances Inductivos y/o resistivos, presencia de cortos entre espiras o entre fases. 5-7% es alarma. Depende del tipo de motor (i.e Siemens)</p>	<p>○</p> <p>Inductancia entre fases cambia radicalmente con respecto a la posición del rotor. Indica falla en barras del rotor, anillos de cortocircuito o burbujas en el molde en rotor de aluminio fundido</p>	<p>○</p> <p>Desbalance resistivo en el conductor mayora 3% requiere investigación. Posible determinar fase de la anomalia</p>
<b>Termografía Infrarroja</b>	<p>S/D</p> <p>Termógrafos muy experimentados pueden determinar la causa raiz del calentamiento</p>	<p>NO</p>	<p>S/D</p> <p>Termógrafos muy experimentados pueden determinar la causa raiz del calentamiento</p>	<p>S/D</p> <p>Termógrafos muy experimentados pueden determinar la causa raiz del calentamiento</p>	<p>S/D</p> <p>Termógrafos muy experimentados pueden determinar la causa raiz del calentamiento</p>	<p>○</p> <p>un punto caliente en el circuito del motor puede ser facilmente detectado por termografía, siempre y cuando este visible. Falsos contactos internos no podran ser detectables</p>
<b>Análisis de Vibraciones</b>	<p>NO</p>	<p>○</p> <p>Generalmente a 2°FI con bandas laterales</p>	<p>○</p> <p>una contaminación severa en el rotor es una causa de desbalance. Depende del conocimiento del analista el detectar esta causa raiz</p>	<p>○</p> <p>Desbalances Inductivos y/o resistivos, presencia de cortos entre espiras causa vibraciones excesivas. Usualmente a 2°FI con armónicas</p>	<p>○</p> <p>Desbalances Inductivos y/o resistivos, presencia de cortos entre espiras causa vibraciones excesivas. Usualmente a 1x con bandas laterales</p>	<p>NO</p>
<b>Análisis de Corrientes del Motor (Pruebas dinámicas)</b>	<p>NO</p>	<p>○</p> <p>Bandas laterales alrededor de la Frecuencia de Excentricidad</p>	<p>NO</p>	<p>○</p> <p>Alto desbalance de corrientes y alta corriente de arranque</p>	<p>○</p> <p>tiempo de arranque más prolongado, bandas laterales de paso de polo</p>	<p>○</p> <p>Desbalance de corriente, la corriente es baja en la fase con la falla</p>
<b>Análisis de Potencia (Pruebas dinámicas)</b>	<p>S/D</p> <p>monitoreando altos niveles de corrientes de secuencia cero</p>	<p>NO</p>	<p>NO</p>	<p>○</p> <p>Alto desbalance de impedancia, bajo factor de potencia</p>	<p>S/D</p> <p>mayor consumo de energia para la misma carga mecánica</p>	<p>○</p> <p>desbalance de voltaje y de corrientes</p>

○ - Objetivamente  
 S/D - Subjetivamente  
 NO - No es objetiva

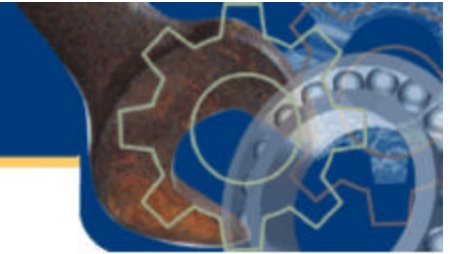
## Conclusión

El usar diferentes tecnologías juntas definitivamente ayudará a obtener mejores resultados y corroborar los diagnósticos.

La termografía IR es una herramienta rápida y fácil de usar. Una imagen infrarroja puede ser tomada en menos de 1 minuto y el costo asociado por equipo es bajo comparado con otras tecnologías (sin tomar en cuenta el valor inicial de compra de un equipo, solo la hora/hombre). En este caso la termografía IR nos ayudó a identificar un problema y el análisis de motores eléctricos a determinar la causa exacta de falla.



# 1er CONGRESO MEXICANO DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO



OCTUBRE 30-31, 2003 – LEÓN, GTO. MÉXICO

El análisis de motores eléctricos es una herramienta excelente pero toma más tiempo el analizar un motor completamente, desde media hora hasta una hora dependiendo de la serie de pruebas involucradas. Por consiguiente, su costo asociado por equipo es mas alto (horas/hombres invertidas) que la termografía IR, pero sin duda sus resultados son mucho más finos.

El correlacionar las tecnologías predictivas de diferentes fuentes como el análisis por vibraciones, termografía IR y el análisis de motores eléctricos, etc. nos ayudarán a confirmar y aumentar el nivel de certeza en nuestros diagnósticos respecto a la severidad de fallas en motores eléctricos. Como se observa en la tabla 3, juntas cubren todas las condiciones de falla que se puedan presentar en un motor eléctrico.

---

<sup>i</sup> *Revista P/PM, Octubre 1997, Jack Nicholas*

<sup>ii</sup> *Revista P/PM Diciembre 1997, Jack Nicholas;*  
MCEmax Data Interpretation Book, Pdma Corporation  
Basic Machinery Vibrations, Vibration Institute, Ronald L. Eshleman



# 1er CONGRESO MEXICANO DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO

OCTUBRE 30-31, 2003 – LEÓN, GTO. MÉXICO

## PERFIL DEL CONFERENCISTA



**Juan C. Hidalgo B.**

Socio fundador y Gerente General de TERMOGRAM, compañía ubicada en Costa Rica y dedicada a la consultoría y capacitación en temas de monitoreo de la condición.

Juan Carlos Hidalgo; es Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Costa Rica, con un postgrado en administración de empresas (MBA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Con amplia experiencia en plantas de generación hidroeléctrica y GEO-térmica, especialista en mantenimiento predictivo, siendo el primer especialista en termografía certificado en Centroamérica con 6 años de experiencia, actualmente es nivel II por el Infrared Training Center. Ha desarrollado e impartido seminarios y cursos de certificación sobre Termografía IR y Mantenimiento Predictivo en Costa Rica, Panamá, México y Colombia.

Colabora como autor de artículos técnicos de mantenimiento para revistas como **Mantenimiento**, voz oficial del Comité Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento y de la Asociación Costarricense de Ingeniería de Mantenimiento; y la revista **Industria** de la cámara de Industrias de Costa Rica.

Trabaja actualmente como consultor para la empresa TERMOGRAM ubicada en Costa Rica, brindando servicios de monitoreo de la condición para toda la región centroamericana en: Termografía IR, Análisis por Vibraciones, Análisis de Aceites, Análisis de Motores Eléctricos, Detección de Fugas por Ultrasonido, etc.  
Es miembro activo de la ASNT (American Society of Non-destructive Testing).

### Estudios en Monitoreo de la condición:

- ✓ Teoría Infrarroja, fundamentos de sistemas infrarrojos, hardware y software – FLIR Systems, Portland, OR y LAND Infrared, Reino Unido.
- ✓ Especialista en Termografía Nivel I – Snell Infrared
- ✓ Especialista en Termografía Nivel II – Infrared Training Center Número de Certificación 2000031102
- ✓ Especialista en análisis de motores eléctricos, utilizando técnicas dinámicas y estáticas – PdMA Corporation
- ✓ Estudios Avanzados para el diagnóstico de fallas en motores y generadores – PdMA Corporation
- ✓ Mantenimiento Proactivo en análisis de Aceites – Noria Latín América, S. A. De C.V.
- ✓ Análisis de Vibraciones y Alineación láser – Pruftechnik AG en Alemania y Brasil.
- ✓ Instructor Certificado Nivel I por el Infrared Training Center