

# Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos

Ing. Juan C. Hidalgo B., MBA  
Especialista en termografía Nivel II y en análisis de fallas en motores eléctricos

Grupo TERMOGRAM, San José, Costa Rica

## RESUMEN

EL personal de mantenimiento ha estado sumamente limitado al tratar de diagnosticar fallas en motores eléctricos. Las herramientas más comunes han sido un medidor de aislamiento (megger) y un ohmímetro. Aunque recientemente el análisis de vibraciones ha ayudado a determinar fallas de tipo eléctrico en motores, no se puede asumir que un pico a 2 veces la frecuencia de línea es una falla de tipo eléctrico. Se deben de tomar en cuenta otras variables antes de sacar un motor de servicio. Aun con el megger muchas anomalías pueden ser pasadas por alto. El determinar problemas en motores debe ser confiable y seguro, por esto un análisis de motores eléctricos debe contener resultados en las siguientes zonas de falla: Circuito de Potencia, Aislamiento, Estator, Rotor, Entrehierro y Calidad de energía. Las pruebas a realizar deben de contemplar pruebas tanto con motor detenido como con motor energizado.

## 1. Introducción

Comúnmente las únicas herramientas usadas por el personal de mantenimiento para detectar fallas en motores han sido un megger (medidor de aislamiento) y un ohmímetro. Desdichadamente la información brindada es muy general y no precisa la zona de falla del motor en estudio. Es muy fácil el diagnóstico erróneamente si se confía solo en los resultados de un megger.

Por ejemplo, un corto entre espiras o entre fases puede perfectamente estar disparando un motor y al medir el aislamiento este está en buen estado.

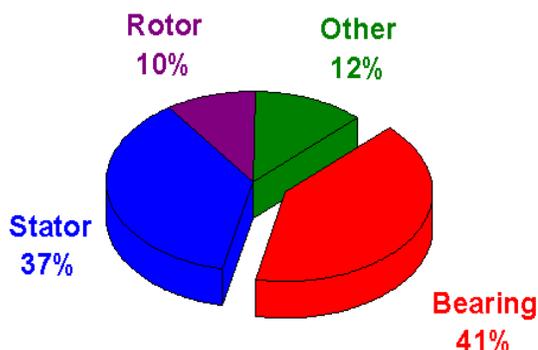
Ya que estas fallas aunque son un problema de aislamiento en el devanado podrían estar aisladas completamente de tierra y por lo tanto el megger no las detecta.

Este tipo de anomalías deteriora rápidamente el devanado lo cual resultara en un futuro reemplazo u "overhaul" del motor.

También se ha usado el análisis por vibraciones para detectar fallas en el rotor, estator y excentricidad. Por ejemplo en el rotor se encuentran a la frecuencia de paso de polo

(barra) para el caso de motores con rotor jaula de ardilla (motores de inducción de CA), con bandas laterales alrededor de esa frecuencia, y excentricidad y cortos en el estator a 2 veces la frecuencia de línea sin ninguna banda lateral. Sin embargo, el análisis a 2 veces la frecuencia de línea no detalla cual de las dos fallas es la que está afectando más al motor. Y estas son determinadas por

**Ilustración 1: Estudio de Fallas en Motores Eléctricos**



especialistas en vibraciones muy experimentados y pueden ya sea pasar desapercibidas por completo o confundirse con otro tipo de influencia.

La ilustración 1 muestra un estudio realizado entre el Electric Power Research Institute (EPRI) y General Electric en 1985. El propósito de este estudio fue el mostrar las verdaderas fuentes de falla en motores eléctricos.

Entonces no preguntamos, estamos realmente diagnosticando todas las zonas posibles de falla en un motor?

Realmente la respuesta es simple, ni vibraciones, ni un ohmímetro ni un megger logran revisar todas las zonas de falla de un motor, entonces, la tecnología predictiva que esta aplicando en su planta es suficiente para evaluar todos los componentes que pueden causar la falla de un motor?.

Las pruebas eléctricas aplicadas a un motor deben de ser confiables y nos deben dar un diagnostico completo de todas las zonas o áreas de falla de un motor. Las pruebas a realizar deben incluir pruebas tanto con motor energizado como con motor detenido. Las pruebas con motor detenido son de particular importancia en aquellos casos en que un motor se este disparando y su puesta en funcionamiento puede terminar de dañarlo, o en el caso de pruebas de puesta en marcha al instalarse un nuevo equipo de producción.

Para el diagnóstico de un motor, se han establecido las siguientes zonas o áreas de fallas.

- Circuito de Potencia
- Aislamiento
- Estator
- Rotor
- Excentricidad (entrehierro)
- Calidad de energía

El análisis de estas 6 zonas nos permite distinguir entre un problema mecánico o eléctrico. Y en el caso de un problema eléctrico detallar la solución.

## 2. Zonas de Falla

### I. Circuito de Potencia

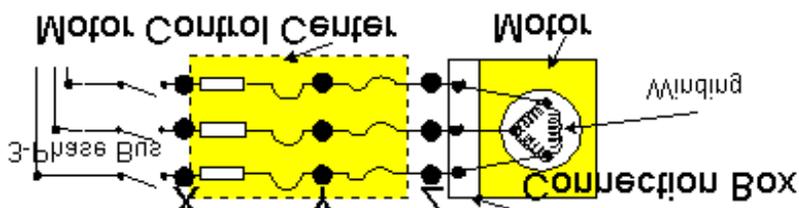
Generalmente se establece desde el Centro de Control del Motor (CCM) hasta la caja de bornes del mismo, e involucra a todos los conductores con sus bornes, interruptores, protecciones térmicas, fusibles, contactores y cuchillas.

La ilustración 2 muestra un típico circuito de potencia, se ha demostrado por EPRI que los falsos contactos han sido la fuente de un 46% de las fallas en motores, por lo que aunque muchas veces el motor este en excelente estado, este se instala en un circuito de potencia defectuoso, que a la postre lo daña.

Los problemas de conexiones de alta resistencia (se oponen al paso de la corriente) son variados, entre ellos,

- Generación de armónicas
- Desbalances de voltaje
- Desbalances de corriente

**Ilustración 2: Típico circuito de potencia**



Tipicamente las conexiones de alta resistencia son causadas por:

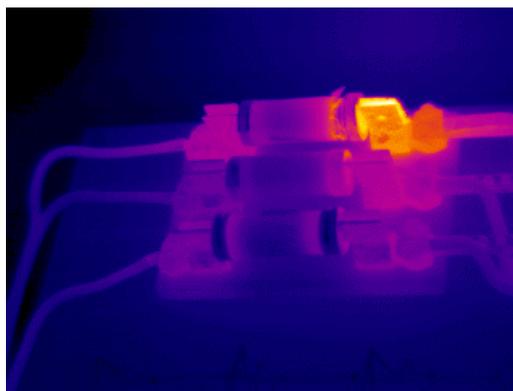
- Terminales corroídos
- Cables sueltos
- Barras sueltas
- Prensa fusibles corroídos
- Hilos abiertos
- Conexiones entre Aluminio – cobre
- Diferentes tamaños de conductores

Uno de los métodos que usamos para detectar defectos en el circuito de potencia en un motor / generador, trifásico es la medición de resistencia entre fases, es una prueba estática con motor detenido. En un equipo en buen estado las tres lecturas entre las fases deberían ser casi idénticas, su desbalance resistivo debe ser menor a un 5%. Dinámicamente, con motor energizado el circuito es evaluado completamente al detectarse desbalances de voltaje en cualquiera de las fases.

Otro de los métodos utilizados para complementar el diagnostico del circuito de potencia es la termografía IR, sin duda una de las técnicas mas conocidas para detectar falsos contactos.

AC Standard	Polarization Index	
Test Date	05/15/2007	05/15/2007
Test Time	02:09:04 PM	02:15:33 PM
	Baseline	
Frequency	1200	1200
Mohm Ph 1 to Gnd		
Charge Time	30	30
Voltage	500	500
Motor Temp	40	40
Measured Mohm	97.6	97.8
Corrected Mohm	97.6	97.8
pF Ph 1 to Gnd	9760	9500
ohm Ph 1 to 2	1.08900	0.75600
ohm Ph 1 to 3	0.75500	0.75550
ohm Ph 2 to 3	1.19250	0.75600
mH Ph 1 to 2	4.260	4.200
mH Ph 1 to 3	3.880	3.800
mH Ph 2 to 3	3.915	3.865
Avg. Inductance	4.018	3.995
% Res. Imbalance	25.47	0.04
% Ind. Imbalance	6.01	5.63
% Power Loss	78.53	0.09
Test Location	Top OL	Top OL
MCE #	030453	030453
User		

**Ilustración 3: Desbalance resistivo - falso contacto severo**



## II. Calidad de energía

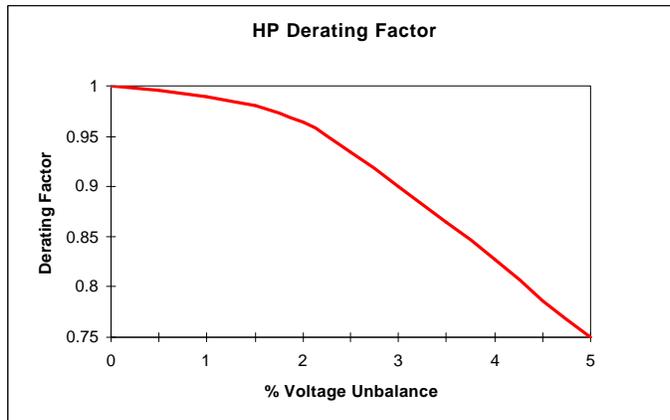
La calidad de energía ha sido ignorada en muchos casos por el personal de mantenimiento y sin duda es una zona de falla con mucha influencia en la vida de un motor.

Existen varios factores involucrados en la calidad de energía; distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, picos de voltaje, desbalances de voltaje y factor de potencia son algunos de estos.

Sin embargo, con relación a las fallas en motores eléctricos nos concentraremos en dos de estos factores:

- Desbalance de Voltaje

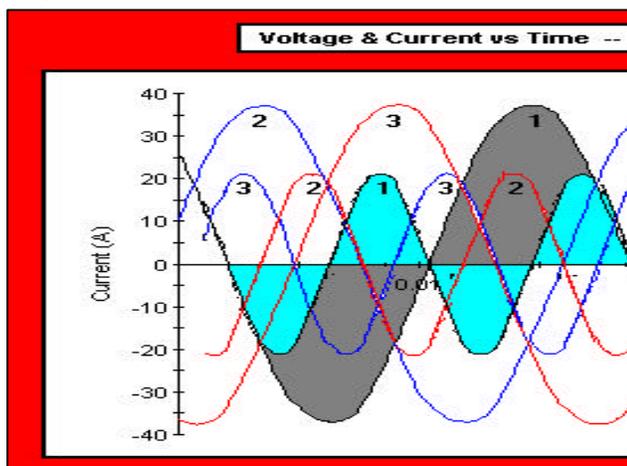
Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor no son equilibrados se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator, a estas se les conoce como corrientes de secuencia negativa y reducen el torque del motor. Se producen dos efectos importantes, aumenta la temperatura en el devanado y aumenta su vibración. Un aumento de la temperatura por encima de su valor permitido provocaría danos al aislamiento, y el aumento en los niveles de vibración provocaría en algún grado solturas mecánicas,



**Ilustración 4: Factor de reducción de potencia (NEMA)**

rodamientos y aflojamiento de las bobinas. Con desbalances de voltaje presentes, la potencia de placa de un motor debe ser multiplicado por un factor de reducción tal y como se observa en la ilustración 4. De acuerdo a NEMA ningún motor debe ser operado con desbalances de voltaje mayores a un 5%.

- Armónicas  
Con la popularidad de los "drives" de CA y CD para motores (Aresep habla



**Ilustración 5: Armónicas**

ulación específica) se crean distorsiones importantes en la forma de onda de voltaje, a estas se les conoce como armónicas. El parámetro más conocido es la distorsión armónica Total (THD, en inglés) en términos simples es el valor RMS de la señal con la frecuencia fundamental

removida. O sea, una onda sinusoidal perfecta de 60Hz tendría un THD de 0%. Cualquier otra onda presente junto con la fundamental se le considera distorsión armónica.

Entonces, los armónicas son señales que distorsionan a la onda fundamental, tienen una forma sinusoidal y están presentes en múltiplos de la fundamental. El siguiente gráfico muestra la onda fundamental a 60Hz pero con otra onda sobrepuesta, esta última completa 2 ciclos en el mismo tiempo que la fundamental completa uno. Si se observa la fase 1 de la fundamental (gris), la armónica forma los dos ciclos (verde)

A la onda sobrepuesta se le conoce como la 2da. Armónica  $2 \times 60\text{Hz} = 120\text{Hz}$

Las armónicas existen en todos los sistemas trifásicos y son generadas por cargas no-lineales como:

- o Convertidores de potencia electrónicos: rectificadores y vaciadores de frecuencia (VFD)
- o Fluorescentes
- o Hornos de arco
- o UPS
- o etc.

Existen tres tipos de armónicas:

- Secuencia positiva: Crea un campo magnético en la dirección de rotación, por lo tanto ayuda al torque del motor.
- Secuencia negativa: Se opone a la rotación del motor e incrementa la demanda de corriente a una carga determinada.
- Secuencia cero: No produce ningún trabajo, pero causa calentamiento y retorna al transformador de alimentación y sobre carga al nuestro. Produce por lo tanto calentamiento en el transformador también.

La siguiente tabla muestra la clasificación de cada armónica para un sistema

Armoni	HZ	Secuen	Armoni	HZ	Secuen
1	60	+	7	420	+
2	120	-	8	480	-
3	180	0	9	540	0
4	240	+	10	600	+
5	300	-	11	660	-
6	360	0	12	720	0

El fenómeno de las armónicas que más afecta para el caso de los motores eléctricos es el excesivo calor que se produce por las demandas de corriente anormales. Un motor diseñado para consumir a plena carga 150amp. Podría consumir 180 A. Si el THD es alto. Este aumento de corriente perfectamente podría no ser tolerado por el motor y provoca daños severos al aislamiento y posible colapso del mismo.

Si este alto THD no es corregido, al instalarse un nuevo motor en este circuito, el fenómeno se repetiría y sería de nunca acabar, por esto un análisis de la calidad de energía que le llega a un motor es irremplazable.

Existe un factor de reducción conocido como el factor de voltaje armónico (HVF, en ingles), el cual se utiliza para reducir la potencia del motor en presencia de un THD alto.

El estándar IEEE519-1992 reconoce que son las cargas las que introducen armónicas al sistema y nos da ciertos limites que se deberían de manejar en las industrias. En este caso la distorsión armónica de voltaje es más importante, según la tabla 3.3.1 de este estándar, el THD para sistemas operando a menos de 69KV debería ser no mayor a 5%.

Aun recomiendan que cada armónica de voltaje individual no exceda de un 3%.

Una correcta identificación de las armónicas presentes en el circuito de distribución permitirá a los ingenieros de calidad de energía, diseñar filtros pasivos y activos para eliminar el efecto anteriormente discutido.

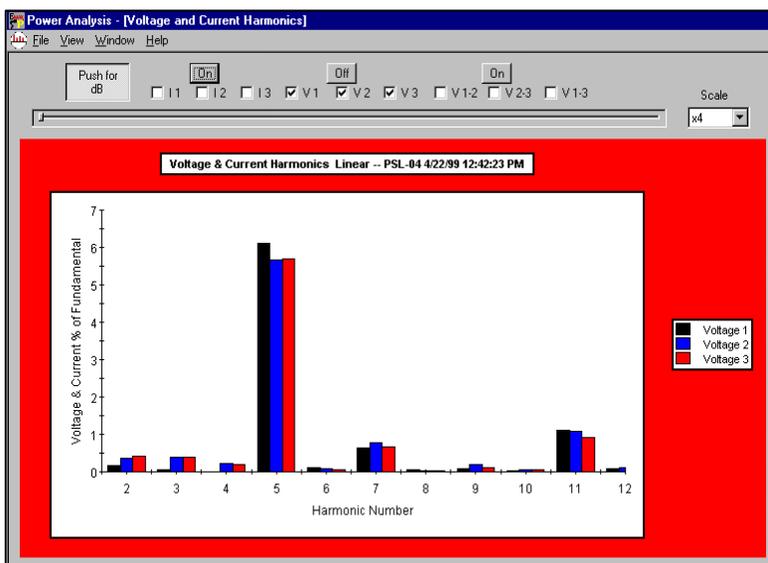


Ilustración 6: Medicion de armonicas

### III. Aislamiento

Cuando hablamos de la condición de aislamiento nos referimos a la resistencia que existe entre este a tierra (RTG, en ingles). La RTG indica que tan limpio o sano esta un aislamiento.

Para que se de una falla a tierra, deben de ocurrir dos cosas. Primero debe crearse un camino de conducción a través del aislamiento. Conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor. Segundo, la superficie exterior del aislamiento se contamina de material conductor y conduce suficiente corriente a la carcasa o núcleo del motor que esta conectado a tierra.

Hoy en día los sistemas de aislamiento han mejorado notablemente y son capaces de soportar mayores temperaturas sin sacrificar su vida esperada.

La máxima temperatura de operación de un motor / generador depende principalmente de los materiales usados en su construcción, existen varias clases, pero las más usadas son:

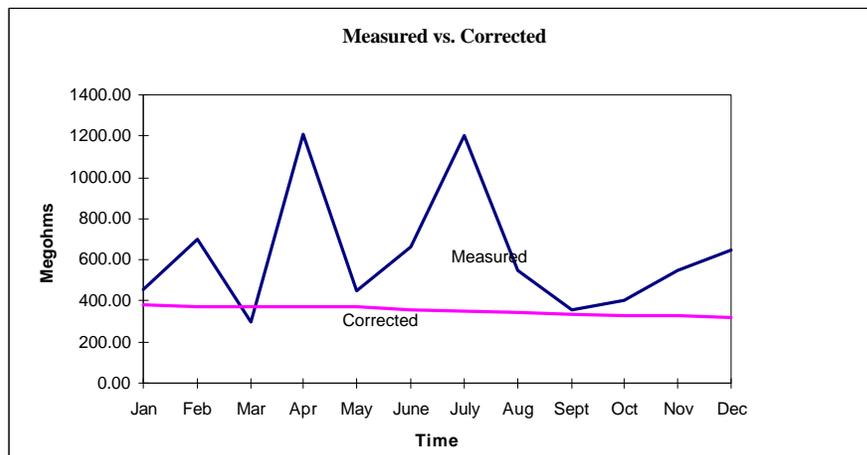
- Aislamiento clase B, temperatura máxima 130°C
- Aislamiento clase F, Temperatura máxima 155°C
- Aislamiento clase H, temperatura máxima 180°C

Dichas temperaturas máximas, son a las cuales el aislamiento podría colapsar.

En termografía IR es posible detectar una falla en el aislamiento de un motor si se tiene la clase de aislamiento del mismo (dato de placa). Generalmente al medir la temperatura de la carcasa del motor, asumimos que el aislamiento esta en 20°C más alto que esta. Por ejemplo, si observamos que la temperatura de la carcasa de un motor clase B es de 120°C, podría estar muy seguro que la temperatura del aislamiento esta a por lo menos 140°C excediendo la temperatura máxima permitida para esa clase de aislamiento.

El aislamiento pierde muy rápido sus propiedades al aumentar la temperatura, este mismo motor en vez de durar aproximadamente 15 años, duraría alrededor de 3 años.

La termografía IR es una herramienta muy útil para detectar un sobrecalentamiento en el motor, y aunque podría precisar el área donde se produce el calentamiento (corto entre espiras), sin embargo es todavía bastante limitada en su capacidad de indicar el porque se produce este.



**Ilustración 7: Medicion de aislamiento corregida con Temp.**

El determinar la causa raíz de una falla en el aislamiento de un motor, puede involucrar alguno de estas causas posibles:

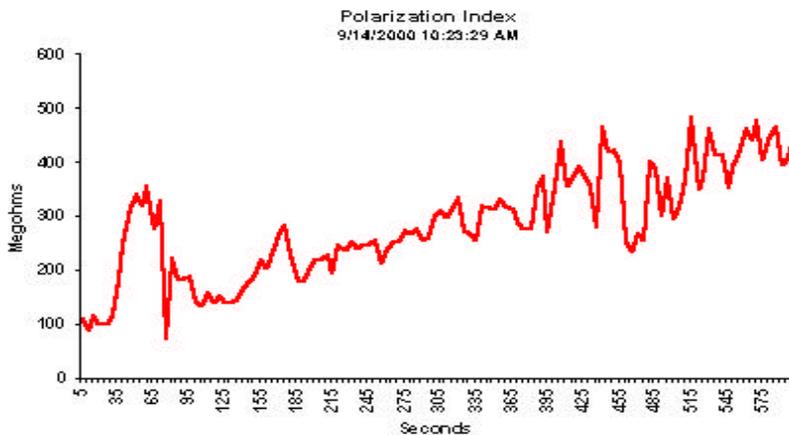
- Circuito de potencia: Una conexión de alta resistencia, produce un voltaje de línea desbalanceada
- Armónicas: que introducen corrientes de secuencia negativa y sobrecalentando el devanado.

- Ambiental: Contaminación en el motor

Es fácil diagnosticar una falla en el aislamiento de un motor, pero se deberá realmente por esto?. Si se instala nuevamente el motor reparado o uno nuevo, es muy probable que la falla se repita.

El utilizar un megger es un buen inicio para probar el aislamiento eléctrico pero no da información completa, otro aspecto importante de resaltar es que el Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) basa los límites de aislamiento a una temperatura de 40°C. Por ello es muy importante hacer lectura con corrección de temperatura, de otro modo se tendrían valores con variaciones altas y bajas, tal y como se observa en la ilustración 7. La norma de la IEEE a la que hacemos referencia es la IEEE 43-2000.

También IEEE indica que se debe de calcular el Polarization Index (PI), es el valor de aislamiento tomado a los 10 minutos entre el valor de 1 minuto, básicamente da una indicación de la pendiente del perfil del índice de polarización; un PI de 2.0 según IEEE es aceptable para aislamientos clases B, F y H; pero desdichadamente motores / generadores con sistemas de aislamiento inestables pueden dar valores cercanos a 2.0; por esto recomendamos el evaluar el perfil del índice de aislamiento y no solo su valor.



**Ilustración 8: Perfil del índice de polarización inaceptable**

La ilustración 8 muestra el perfil para un motor con una contaminación severa y posible daño o resquebrajamiento del aislamiento. La prueba del PI es una prueba que se realiza con voltaje CD y no es potencialmente destructiva como lo son otro tipo de pruebas como Hi-Pot y la prueba de Impulso, que se utilizan también para este efecto.

Otra tipo de parámetro utilizado para evaluar la contaminación interna del aislamiento es la Capacitancia a tierra (CTG, en inglés).

Una máquina que esta limpia y seca exhibe un CTG bajo en comparación con una que esta contaminada. Un aumento en la contaminación es comparable con el aumento en el material dieléctrico entre las dos placas de un capacitor, conforme se deposite más material en el aislamiento el dieléctrico aumenta y la Capacitancia crece.

Para aquellas compañías que efectúan paros para limpieza de motores esta es una herramienta de gran importancia para ahorrar tiempo de paro para este tipo de mantenimiento.

## IV. Estator

En un estator es importante el diagnosticar: los devanados, el aislamiento entre vueltas, juntas de soldado entre las espiras y el núcleo del estator o laminaciones.

Tal vez, la falla más común es un corto entre vueltas, esto reduce la habilidad de producir un campo magnético balanceado. Esto a la vez trae otras consecuencias como un aumento en la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. Generalmente este tipo de cortos aumenta la temperatura y el corto se expande a un corto entre espiras y eventualmente destruye todo el motor.

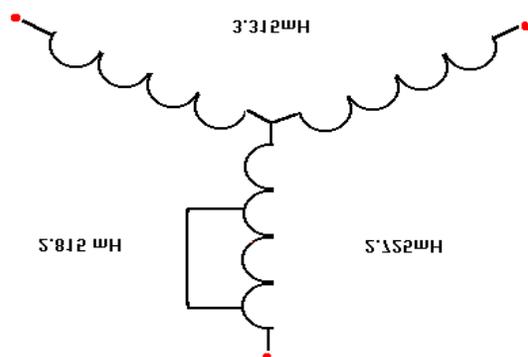
Aún más grave que esta es la falla entre fases, un corto de este tipo acelera rápidamente la destrucción del motor.

Fallas de este tipo pueden ocurrir varias veces en un motor y no resultan en una falla a tierra. Debido a esta razón, el utilizar solamente un megger como herramienta predictiva es insuficiente ya que este tipo de fallas pueden ser pasadas por alto. Si el núcleo del motor se llegase a dañar el reemplazo del motor sería total.

El diagnóstico de esta zona de falla puede ser efectuada directamente en los terminales del motor o desde el Centro de Control de Motores (CCM).

La prueba estática involucra mediciones de inductancia entre fases, para esto se envían señales de CA a alta frecuencia, y se calcula un desbalance inductivo. Un desbalance presente implica que las fases producen campos magnéticos desbalanceados y que muy probablemente tiene cortos entre vueltas o espiras. También como parte de la prueba se toman valores de resistencia, si excede un valor predeterminado indica que pueden existir conexiones de alta resistencia en el circuito hacia el motor o en las juntas de soldado.

La siguiente muestra gráficamente el efecto en un devanado en estrella.



**Ilustración 9: Desbalance inductivo - corto entre espiras**

La prueba dinámica con motor energizado identifica una falla en el estator tomando mediciones de voltaje y corriente por fase y calculando la impedancia en cada una. Si una fase tiene problemas en los devanados, el desbalance de impedancia aumenta.

## V. Rotor

Cuando nos referimos a la condición de un rotor se deben de revisar; las barras, laminaciones y los anillos de corto circuito.

Un estudio del EPRI mostró que un 10% de fallas en motores se debió al rotor.

Una barra rota genera un calor intenso en la zona de ruptura y puede destruir el aislamiento cercano a las laminaciones y el devanado estático colapsara.

Desdichadamente, muchas veces, los problemas en las barras del rotor no son fácilmente detectables con tecnologías comunes y se obvia como causa-raíz. Hemos tenido la experiencia de muchas empresas que rebobinan varias veces un motor sin saber que la raíz del problema en el devanado estaba en el rotor.

El MCEmax detecta un problema en el rotor mediante la prueba del Rotor Influence Check (RIC), esta prueba es estática y relaciona el magnetismo entre el rotor y el estator. La prueba se realiza al rotor en incrementos específicos (determinados por el número de polos del motor) y tomando la lectura en el cambio de inductancia para cada fase.

El RIC de un motor normal tiene la forma de la ilustración 10 y el RIC de un rotor con barras rotas muestra valores de inductancia erráticas y periódicas causado por la distorsión del flujo alrededor de la barra rota.

Se recomienda efectuar la prueba del RIC como prueba inicial para un motor en su primer análisis.

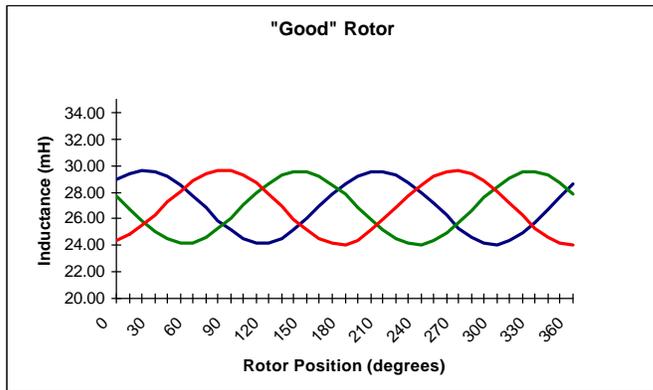


Ilustración 10: RIC - rotor en buen estado

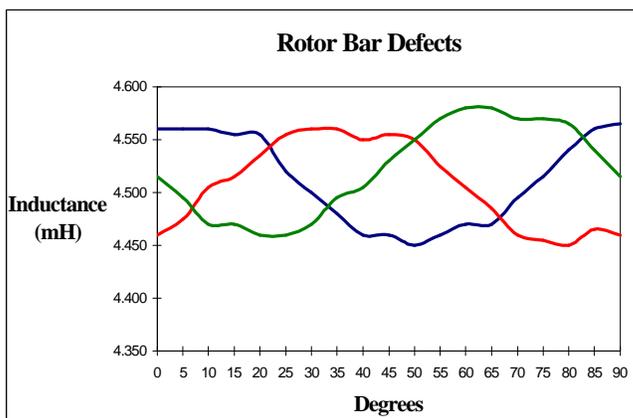


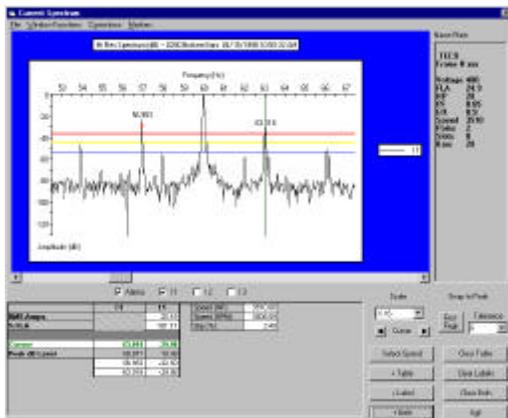
Ilustración 11: RIC rotor con barras rotas

Dinámicamente se identifica las barras rotas en un análisis de corriente del motor, este se desarrolla al tomar la señal corriente de las tres fases del motor y se pasa al dominio de la frecuencia (FFT).

El análisis dinámico identifica una falla en el rotor como una banda lateral, a la frecuencia de línea a una frecuencia llamada frecuencia de paso de polo ( $F_p$ ).

Al utilizar tanto el análisis estático como dinámico para diagnosticar un problema en un rotor se tiene un alto nivel de confianza, especialmente cuando se tiene que sacar un motor importante de servicio.

La ilustración 12 muestra problema en un rotor obtenido mediante un análisis de corrientes.

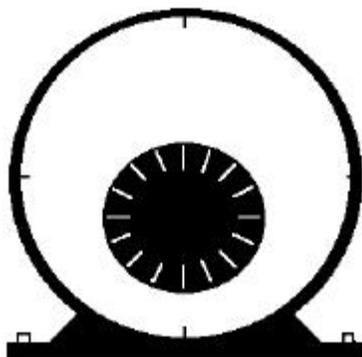


**Ilustración 12: Prueba dinámica - falla en rotor**

## VI. Excentricidad

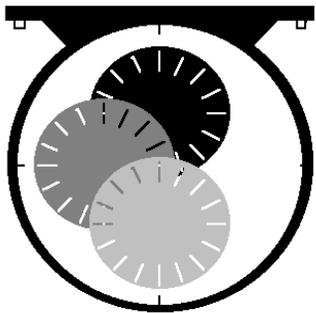
El rotor de un motor / generador debe estar centrado, existe un claro entre estos denominado "Air Gap", si este Air Gap no está bien distribuido en los 360° del motor se producen campos magnéticos desiguales.

Se ha discutido ampliamente el efecto adverso que provocan estos campos magnéticos desiguales que a la larga resultará en una falla en el aislamiento y falla en los rodamientos. Este problema se le conoce como excentricidad, existen básicamente dos tipos, la estática en la cual el rotor está descentrado pero fijo en un lugar generalmente este tipo de problemas es causado cuando los alojamientos de los roles están desalineados, por un inadecuado alineamiento o por que la carcasa del motor fue torcida cuando se instaló en su base. La ilustración 13 muestra como es la excentricidad estática.



**Ilustración 13: Excentricidad estática**

El otro tipo de excentricidad es la dinámica, y como resultado el rotor se balancea dentro del estator, por lo tanto la inductancia varía. La excentricidad dinámica es producida por una deflexión en el eje generalmente



**Ilustración 14: Excentricidad dinámica**

## VII. Conclusiones

Como se ha discutido en este artículo, las tecnologías predictivas más comunes tienen severas limitaciones y fallan en precisar la causa de la anomalía en un motor eléctrico. Pero si ayudan a dar un indicio de donde podría estar el problema.

El diagnosticar el problema en un motor debe involucrar todas las zonas de falla presentes como lo son: Calidad de energía, circuito de potencia, aislamiento, estator, rotor y excentricidad, para ello deben utilizarse tanto tecnologías dinámicas como estáticas. Y estas deben ser de tipo no destructivas para no acelerar el daño en el motor.

Actualmente se utiliza el equipo MCEmax fabricado por PdMA para todas las zonas de falla en un motor y es considerado la herramienta más completa para el diagnóstico eléctrico de motores, tanto estática como dinámicamente a la fecha. Este equipo permite probar tanto motores de inducción, sincrónicos, de rotor devanado y de corriente directa. Se han probado motores desde menos de 1 HP hasta 2000 HP, realmente el tamaño no importa.

La tecnología dinámica es de particular importancia para diagnosticar anomalías en aquellos motores que por razones del proceso productivo no pueden ser detenidos.

Y la tecnología estática es vital para revisar aquellos motores que se dispararon por algún motivo y su puesta en funcionamiento es peligrosa para el motor. O para revisar aquellos motores que han sido reparados por un taller de reparación de motores y se quiere tener certeza de que están aptos para funcionamiento.

Como se ha explicado ambas tecnologías son vitales.

### **Del autor**

*Juan Carlos Hidalgo, es fundador del Grupo TERMOGRAM, una empresa costarricense especializada en mantenimiento predictivo, autor de diversos artículos técnicos y textos sobre mantenimiento predictivo, termografía infrarroja y confiabilidad de motores eléctricos. Es instructor en termografía infrarroja y otras técnicas predictivas y actualmente es instructor de cursos nivel I para el Infrared Training Center en Boston, MA, USA.*

*Ha sido consultor en diversos países del área centroamericana y ha impartido cursos en Colombia. Y es conferencista activo de la IEEE.*