

# **Ensayo de determinación de puntos calientes en estatores trifásicos de baja tensión**

## *Hot Spot Detection Tests on Low Voltage Three-Phase Stators*

Omar Dionisio Gallo<sup>1</sup>, Diego Martín Ferreyra<sup>2</sup> y Walter René Tonini<sup>3</sup>

### **Resumen**

En este trabajo, se describe el procedimiento de ensayo para la determinación de zonas o puntos calientes en las chapas de los estatores de máquinas trifásicas de baja tensión y algunos resultados obtenidos de él; esta prueba es encargada generalmente por los rebo-binadores y reparadores de las citadas máquinas.

Las zonas calientes se producen por las considerables corrientes parásitas que se originan cuando las chapas se sueldan entre sí debido a la acción de un cortocircuito importante.

El ensayo es sencillo, se realiza según un procedimiento estándar en los laboratorios especializados y arroja resultados y diagnósticos que conducen a la reducción de los costos económicos originados por reparaciones incompletas o pérdidas de producción del usuario.

**Palabras clave:** estatores trifásicos, ensayo de puntos calientes, corrientes parásitas en los estatores, soldadura de chapas del estator, cortocircuitos de motores.

---

1 Docente Investigador categorizado III. Magister en Docencia Universitaria. Profesor de Máquinas Eléctricas, 4° Nivel Electromecánica, Ingeniería Electromecánica. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco, Argentina.

2 Docente investigador categorizado D (UTN). Jefe de trabajos prácticos de Máquinas Eléctricas. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco, Argentina.

3 Docente categorizado D (UTN). Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Francisco, Argentina.

## **Abstract**

This work describes a test procedure for the detection of hot areas or spots in the stator laminations of low voltage three-phase rotating machines. Some test results are also included.

This test is usually required by rewinders and repairers of said machines. Hot areas appear when significant eddy currents circulate through the spots where laminations become welded together as the result of a high-power short-circuit.

This straightforward test is performed in specialized laboratories following standard procedures. The results and diagnoses obtained lead to the avoidance of expenses arising out of incomplete repairs or user production losses.

**Key words:** three-phase stators, hot spot test, eddy currents in stators, stator lamination welding, motor short circuits.

## Introducción

Cuando un motor eléctrico o un generador trifásico sufre un cortocircuito en sus arrollamientos, el efecto colateral que se origina en las chapas magnéticas del estator suele ser muy perjudicial y compromete seriamente su vida útil después de la reparación. Los cortocircuitos son frecuentes causas de daños y se producen por la falla de los aislantes debido a golpes, cortes, roces, resecamientos, vibraciones, contaminación o sobretensiones por altas corrientes en los arrollamientos (Rébora, 1956); en el momento que ocurren, se genera un arco eléctrico de gran efecto calórico que fusiona todo lo que encuentra en su camino, como conductores de bobinas y dientes de la chapa del estator. En estos últimos, la gran temperatura ocasiona la unión de las láminas y el consiguiente camino de baja resistencia para la circulación de corrientes parásitas (Corrales Martín, 1976) en esa zona.

En ocasiones, las zonas de fusión son muy notables por el tamaño que abarcan o por su ubicación; en otras oportunidades no se pueden notar a simple vista y pasan desapercibidas por el reparador, que en estos casos suele rebobinar la máquina sin atender a mayores precauciones. El problema resurge con posterioridad, generalmente a las pocas horas de uso del motor reparado, debido a que en la región donde se produjo la unión de láminas las temperaturas por efecto de realimentación son tan elevadas que superan rápidamente la clase térmica de los aislantes, causando su primeramente su resecamiento localizado y luego su falla prematura.

Estas anomalías dan origen a reclamos del usuario por garantías o pérdidas no programadas de producción y generan a veces una escalada de reparaciones seguidas y fallas repetidas sin que se pueda determinar la causa raíz (Wikipedia, 2014) del inconveniente. Es en tales casos que se requiere la realización de un *ensayo de determinación de puntos calientes* (Fernández Cabanas et al., 1998).

En el laboratorio del Grupo CIDEME (UTN) se realizan estas pruebas desde hace varios años, utilizando recursos similares a los que se aconseja en la bibliografía y recomendaciones especializadas (ANSI / IEEE, 1982) y obteniendo resultados harto satisfactorios que redundan en el diagnóstico de aquellas anomalías crónicas que no pudieron aclararse por otros medios.

## Procedimiento para realizar el ensayo

Recibido el estator limpio y libre de bobinas, relevados los datos de placa de la máquina y los valores constructivos (número de ranuras y dimensiones del paquete), se realizan algunos cálculos preliminares, detallados en los apartados siguientes, para determinar la cantidad de espiras que se arrollarán y la sección de los conductores que se usará. Las espiras se arrollan manualmente alrededor

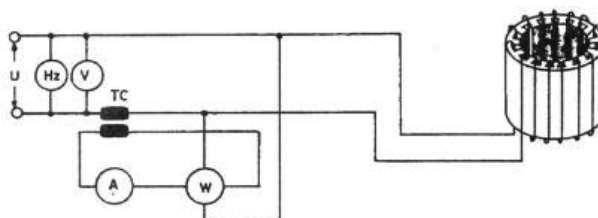
de la corona del estator formando un toroide con la corona del estator (Fig. 1), pasando uno o más conductores por las ranuras para posicionarlos lo más ordenados posible. La experiencia permite afirmar que si no se usa toda la circunferencia del paquete para distribuir la bobina, se corre el riesgo de generar un importante campo magnético disperso y no detectar puntos calientes en lugares alejados de la bobina.



**Fig. 1:** Paquete de chapas del estator con la bobina insertada

Se toma la resistencia óhmica de la bobina en frío y se alimenta con tensión alterna –de frecuencia industrial– creciente hasta lograr el valor de corriente previsto (Fig. 2). La intención es producir una densidad de flujo promedio en la corona del estator similar a la del funcionamiento normal de un motor (1,5 a 1,8 T); el ruido que eventualmente puede producir la vibración de la chapa es proporcional al nivel de excitación magnética de la misma.

Logrado esto, se mantiene funcionando en tales condiciones y se van registrando las temperaturas promedio a lo largo de todos los dientes con un termómetro de reflexión o una cámara termográfica. El proceso –que no suele superar la hora de duración– se de-tiene cuando los calentamientos llegan preferentemente al límite térmico de la clase de aislante que se usa en ese arrollamiento (130°C, 155°C y 180°C para las clases B, F o H respectivamente).



**Fig. 2:** Circuito de medición

*U es la tensión de alimentación; Hz, V, A, W son instrumentos de medición; TC es el transforma-dor de corriente*

Si se desean obtener mayores precisiones en los resultados, se puede invertir más tiempo o incluso llegar a la estabilización de temperaturas. Al final del ensayo, las diferencias se notan claramente y es posible realizar un gráfico representativo del fenómeno.

## Cálculos preliminares y posteriores al ensayo

Para hacer los cálculos previos, se deben tener todas las dimensiones del estator y realizar algunas estimaciones –debido a que normalmente no se dispone de la curva de magnetización  $B=f(H)$  del hierro–, a los fines de determinar la intensidad de corriente y las espiras necesarias para producir el campo magnético requerido. Aplicando la ley de Hopkinson al toroide formado por la corona:

$$\sqrt{2} NI = B S l / (\mu_o \mu_r S) \quad (1)$$

Donde:

$N$ : número de espiras a arrollar

$I$ : corriente alterna por la bobina, en A

$B$ : densidad de flujo en el hierro (1,5-1,8 T)

$S = k_{ll} \cdot h \cdot L_{fe}$ : sección de la corona estator, en m<sup>2</sup>

$k_{ll}$ : factor de apilado (0,85 a 0,95)

$h$ : altura de la corona estator, en m

$L_{fe}$ : largo del paquete de chapas, en m

$l$ : longitud media de la corona estator, en m

$\mu_o$ : permeabilidad absoluta,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$\mu_r$ : permeabilidad relativa (estimada 2 000 a 4 000)

Obtenida la fuerza magnetomotriz  $\sqrt{2}NI$ , se determina a priori  $N = K \cdot N_{re}$  en donde  $K = 1$  o más conductores por ranura y  $N_{re}$  es el número de ranuras del estator. Despejado el valor de la corriente y la sección del cable que la soportará, se verifica si éste entra en la ranura; de no ser así, se modifica el valor de  $K$  hasta lograrlo.

Una vez arrollados los conductores alrededor de la corona, se realiza una prueba preliminar en frío aplicando al arrollamiento una tensión creciente hasta obtener la corriente calculada y se retoman los cálculos, a los fines de efectuar los ajustes necesarios para comprobar la densidad de flujo  $B$  preestablecida. Despreciando las caídas de tensión en la bobina:

$$B \cong U / (4,44 f N S) \quad (2)$$

Donde:

$U$ : tensión aplicada a la bobina, en V

$f$ : frecuencia de la red, en Hz

En caso de que el valor no sea el requerido, se ajustará nuevamente la tensión hasta lograrlo. Si se desearan obtener datos más exactos de la densidad de flujo  $B$  se arrollará una segunda bobina auxiliar de conductor muy delgado y de igual número de espiras, superpuesta a la principal, que actuará como el secundario de un transformador en vacío y se medirá la tensión a sus bornes. El efecto de transformación se podrá aprovechar también para obtener las reactancias de dispersión y las caídas de tensión en carga.

Finalmente, las expresiones 3, 4 y 5 indican la obtención de pérdidas y permeabilidad al final del ensayo, luego de relevados los distintos valores:

$$P_{cu} = I^2 R \quad (3)$$

$$P_{fe} = P_e - P_{cu} \quad (4)$$

$$\mu_r = B l / (\mu_o \sqrt{2} NI) \quad (5)$$

Donde:

$P_{cu}$ : pérdidas en el cobre, en W

$R$ : resistencia del arrollamiento, en  $\Omega$

$P_{fe}$ : Pérdidas en el hierro, en W

$P_e$ : Potencia de entrada, en W

$\mu_r$ : permeabilidad relativa final de la chapa

Estos últimos valores pueden usarse como ampliatorios o para elaborar una base de datos que se pueda tomar como referencia en ensayos posteriores; se recalca que lo que realmente interesa a los fines prácticos es la delimitación concreta de las regiones donde se alojan las chapas soldadas y por ende las mayores temperaturas.

## Resultados

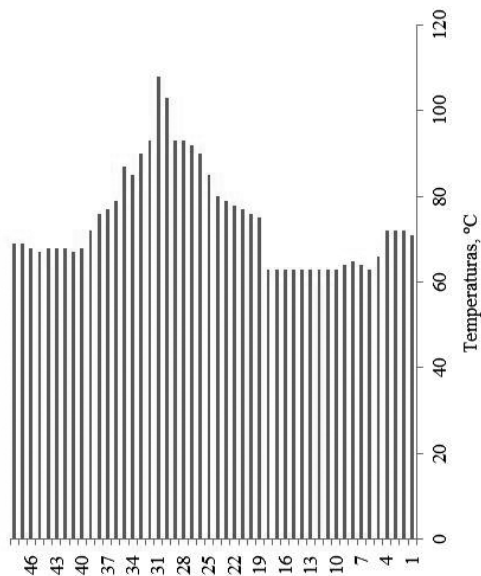
Los diversos ensayos realizados arrojaron resultados muy satisfactorios. En algunos casos, las chapas mostraban serias secuelas como producto del cortocircuito entre las bobinas y ellas, pero en otros no era muy notable el daño o se encontraba muy oculto. Las regiones más comunes de producción de cortocircuito fueron en el perfil de las ra-nuras a los extremos del paquete de chapas (donde suele cortarse el aislante

por las curvas de los conductores) o en el interior de la ranura (en donde el aislante pudo haber sido dañado por la presión de los conductores o las vibraciones) (Fig. 3).



**Fig. 3:** Daños visibles por soldadura de chapas  
*Cortocircuito entre bobinas y chapas en el interior de la ranura*

Los valores de temperaturas fueron variados en proporción a la magnitud de la soldadura, pero se insiste nuevamente que lo importante es evaluar y graficar los desequilibrios térmicos y sus ubicaciones. La figura 4 se refiere a un estator de 48 dientes que mostró desequilibrios térmicos de 50 K entre distintas zonas, con soldaduras en la parte central.

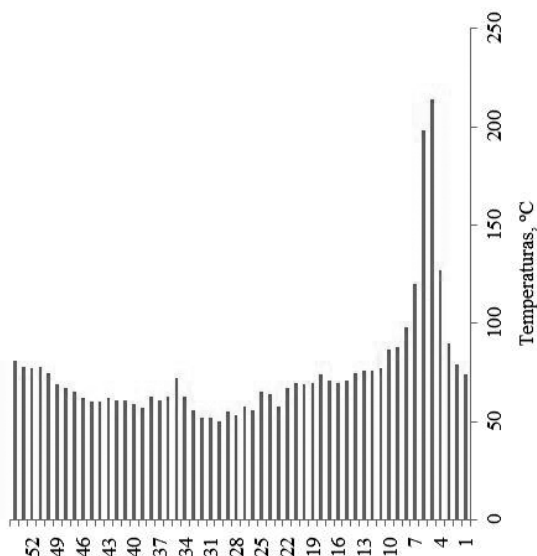


**Fig. 4:** Un gráfico de temperaturas en un estator de 48 dientes  
*Motor de 260 kW, 2965 rpm, 380 V*

En la figura 5 se observan desequilibrios de 200 K para un estator de 54 dientes, estando la zonas calientes más bien localizadas en varios dientes cercanos.

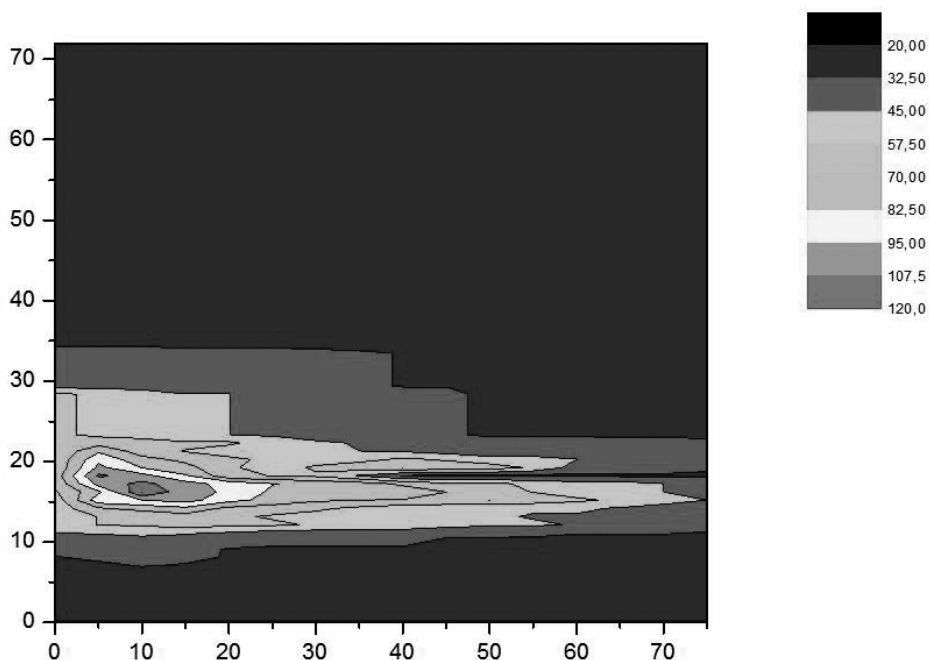
La figura 6 representa la distribución térmica en un estator de 72 dientes en función de la longitud del paquete de chapas, donde se observa una soldadura central muy localizada (120 °C) y desequilibrios térmicos de 100 K . El calor se irradia hacia los laterales de la zona caliente afectando los chapas cercanas.

Las corrientes usadas para obtener las fuerzas magnetomotrices estuvieron comprendidas entre 10 y 50 A, las tensiones entre 100 y 450 V y las potencias entre 1800 y 3500 W. Naturalmente, estos valores son propios de cada experiencia y dependen, aparte de la laboriosidad para construir la bobina, de la densidad de flujo adoptada, la calidad de la chapa y del tamaño de la corona del estator.



**Fig. 5:** Un gráfico de temperaturas en un estator de 54 dientes  
*Motor de 440 kW, 2960 rpm, 380 V*





**Fig. 6:** Distribución térmica para 72 dientes y 750 mm de longitud  
*Motor de 300 kW, 990 rpm, 380 V*

## Discusión

En máquinas de importante potencia (mayores de 10 000 kVA, a las que se refieren las normas recomendando estos ensayos), la realización de estas pruebas es común, siempre evitando el uso de fuertes campos magnéticos por los riesgos de accidentes que ellos significan; en su reemplazo se usa instrumentación específica de baja potencia (Posedel, 2001; IRIS Power, 2014), que genera un claro mapa termográfico del estator mediante el procesamiento de corrientes desequilibradas en las chapas, sin necesidad de quitar los devanados de su posición. Este procedimiento se suele realizar durante el mismo proceso de fabricación, ahorrando tiempo de mano de obra y otorgando seguridad en el diagnóstico temprano.

A la inversa de lo que ocurre en grandes máquinas, en menores potencias como las que aquí se exponen, el ensayo de determinación de puntos calientes tal como aquí se expone, sigue siendo una alternativa de diagnóstico poco común; la mayoría de los reparadores no recurre al laboratorio por estas fallas y, apelando a su experiencia, realiza tratamientos locales de la chapa (limado de rebabas) o rearmado parcial del paquete del estator cuando es muy notable el daño y la importancia de la máquina lo justifica. Estos arreglos encarecen bastante la reparación por la gran

incidencia de mano de obra y en algunos casos no solucionan el problema en toda su magnitud porque en las regiones cortocircuitadas de la chapa que están ocultas a la vista, la falla se suele producir nuevamente.

Para realizar estos ensayos en el laboratorio de baja tensión, no son intensos ni peligrosos los campos magnéticos requeridos, por lo que ya no se necesita instrumentación específica ni importantes fuentes de alimentación; los mayores inconvenientes operativos se deben a la dificultad de construcción de una bobina propia para cada estator y el relevamiento manual de la distribución térmica, que extienden ligeramente los plazos de diagnóstico.

Otro problema surge cuando la bobina no puede arrollarse en toda la longitud del estator por falta del canal entre carcasa y paquete de chapas (es el caso de muchos motores de protección IP55) y debe usarse solo el espacio del túnel de cables (Fig.7) para alojar los conductores, siendo mayores las posibilidades de pasar por alto aquellos puntos calientes más alejados del arrollamiento.



**Fig. 7:** Arrollamiento que se aloja en el túnel de cables del motor  
*Motor de 110 kW, 2960 rpm, 380 V, IP55*

No obstante los detalles operativos mencionados, que siempre son factibles de minimizar mejorando las técnicas o usando instrumental de superiores prestaciones, se considera que estos ensayos en motores de baja tensión ofrecen una excelente opción a quienes deben tomar rápidas y fundamentadas decisiones sobre la conveniencia de reparar el equipo dañado o comprar uno nuevo y confiable; especialmente aquellos usuarios cuyas máquinas son críticas cuando forman parte de un proceso productivo continuo en el que cualquier parada ocasiona importantes pérdidas de materias primas o cuantiosos lucros cesantes.

## Bibliografía

- ANSI / IEEE Std 56-1977. Reaffirmed 1982. *IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10000 kVA and Larger)*. Appendix pp. 22-23.
- Corrales Martín, J. *Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas*. Ed. U. Politécnica de Barcelona, 1976, Tomo 1, Cap. 1, pp. 121-131.
- Fernández Cabanas, M. et al. *Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Ed. Marcombo, Barcelona, 1998, pp. 95-99.
- IRIS Power. *Probador del Núcleo del Estator Iris Power el CID Evolution®*. Disponible marzo 2014: [http://www.irispower.com/pdf/Espanol/ELCID\\_ESP.pdf](http://www.irispower.com/pdf/Espanol/ELCID_ESP.pdf)
- Posedel, Z., *Inspection of stator cores in large machines with a low yoke induction method-measurement and analysis of interlamination short-circuits*. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2001, vol. 16, no 1, p. 81-86.
- Rébora, G. *La Costruzione delle Macchine Elettriche*. Ed. U. Hoepli Milano, 1966, pp. 50-96.
- Wikipedia. *Análisis de Causa Raíz*. Disponible marzo 2014: [http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis\\_de\\_causa\\_ra%C3%ADz](http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_causa_ra%C3%ADz)

