



# REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO PARA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS GIRANTES

Walter Evaldo Kuchenbecker<sup>1</sup>; Júlio Carlos Teixeira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Investigador Doctor Colaborador del Programa de Posgrado en ENERGÍA - UFABC, [walterk@weg.net](mailto:walterk@weg.net);

<sup>2</sup>Profesor del Programa de Posgrado en Energía, UFABC, [julioarlos.teixeira@ufabc.edu.br](mailto:julioarlos.teixeira@ufabc.edu.br)

## RESUMEN

La necesidad de medición de la elevación de temperatura es de común interés entre las empresas que suministran máquinas eléctricas o realizan servicio y, principalmente del usuario. La fabricación o una reparación deben cumplir los límites térmicos de la aislamiento de la máquina eléctrica, ya que eso compromete la vida útil del equipo. Además de la elevación de temperatura, el ensayo puede identificar posibles fallas de proyecto de fabricación y en los circuitos de refrigeración. Estas condiciones son posibles de evaluar solamente con pruebas a plena carga. Si esto no es posible, por lo menos, lo más próximo de las condiciones nominales, aunque para eso, tenga que utilizarse metodologías equivalentes y extrapolaciones. El artículo tiene como objetivo presentar una revisión en los métodos y técnicas para los ensayos de elevación de temperatura en máquinas eléctricas girantes, demostrando la importancia y la necesidad de realización para la garantía de estos equipos, tanto para reparaciones como para las máquinas eléctricas nuevas.

**Palabras clave:** Máquinas Eléctricas; clase de aislamiento; elevación de temperatura.

## 1. INTRODUCCIÓN

El calor es una forma de energía que, en el caso de las máquinas eléctricas, no son aprovechadas para la realización del trabajo. Se trata de una energía perdida. Cuanto mayores sean las pérdidas, menor será la eficiencia de la máquina eléctrica. El calor generado internamente acaba promoviendo una elevación de temperatura interna. Debido a la diferencia de temperatura establecida entre el interior de la máquina eléctrica y el medio exterior, ocurrirá un proceso de transferencia de calor [1].

La conversión electromecánica de energía en las máquinas eléctricas está compuesta por una parte de pérdidas que se transforman en calor. Esas pérdidas son compuestas por el efecto Joule de la corriente que circula en los devanados, tanto del estator como del rotor. La interacción entre el estator y la parte girante, el rotor, es hecha por el flujo magnético inducido entre los componentes. Este flujo circula por los núcleos del estator y del rotor, induciendo las indeseables corrientes parásitas o corrientes de Foucault, que también generan calor por las pérdidas en el hierro. Estas pérdidas en el hierro son minimizadas debido a los paquetes construidos por láminas



aisladas entre sí de chapa siliciosa. El paquete de chapas laminadas es influenciado por las fallas en los devanados o en la retirada de las bobinas en reparación, ya que estas láminas aisladas pueden entrar en corto y generar puntos calientes. En la composición de las principales pérdidas, se suman las pérdidas mecánicas por roce del eje y los rodamientos y la ventilación [1]; [6] y [9].

La elevación de temperatura es un factor determinante para las evaluaciones de las condiciones y características de las máquinas eléctricas, ya que es normalmente limitada por las propiedades térmicas de los materiales. La prueba en carga es fundamental, ya que ésta aproxima las condiciones de pruebas en fábrica con la aplicación final en campo y sirve, principalmente, para evaluar la temperatura en régimen. Cuanto mayor son las estructuras de los laboratorios, mejores son los resultados. No obstante, aunque estas características nominales no sean cumplidas, metodologías equivalentes normalizadas posibilitan estas evaluaciones. El mismo interés es del cliente que busca revitalizar el equipo, para retornar a las condiciones similares del equipo nuevo y que tenga garantía de operación por algunos años más.

Máquinas que trabajan con una elevación de temperatura por encima de lo especificado tendrán su tiempo de vida útil reducido. Construir nuevos laboratorios con potencia mayor y equipos de simulación de carga también mayores genera grandes inversiones, tanto en máquinas como en circuitos de potencia robustos, tableros electrónicos, programas de informática y otros. Laboratorios con capacidad en torno de 10MW atienden una gran cantidad de máquinas. Sin embargo, los métodos simulando carga equivalente son empleados para determinación de la elevación de temperatura de los motores que exceden la potencia nominal instalada en los laboratorios.

Las ventajas en realizarse ensayos en condiciones nominales son innumerables, entre ellas, se puede destacar la evaluación de la vibración tras la estabilización térmica. Esa verificación es importante para identificar si hay algún desbalance por desplazamiento de masa, así como posibles barras del rotor con grietas o interrumpidas. Para máquinas con tensiones inferiores a 1000V, la prueba se torna indispensable para evaluar temperaturas de cables del estator y rotor. Eso se debe a que las corrientes para esas máquinas eléctricas son elevadas y para atender esta densidad de corriente, son necesarios varios cables. La prueba con la capacidad nominal garantiza estas especialidades de estos proyectos. Los laboratorios que poseen capacidad en torno de 2500A, atienden la mayoría de los ensayos, cuando se trata de motores de inducción.

El ensayo en carga nominal también mostrará que el cambio de algún componente del sistema de refrigeración como, ventilador, intercambiador, radiador, fue eficaz. En máquinas con escobillas fijas, podemos comprobar que el cambio o la adecuación de la escobilla está cumpliendo los criterios de la norma o del fabricante de la escobilla, cuando haya Información. Para máquinas de corriente continua, además de los ítems ya citados, como temperatura de cables, escobillas y devanados, también puede verificar cuál es el nivel de chispas en las escobillas y realizar el debido ajuste, en caso de que esto sea necesario, garantizando que el motor opere sin necesidad de nuevos ajustes.



La figura 1 de abajo presenta un modelo térmico de una máquina eléctrica. Con base en esta figura, se puede verificar la complejidad y los componentes involucrados en un análisis térmico. Todos estos componentes deben ser garantizados en operación, para no comprometer la vida útil del equipo [6].

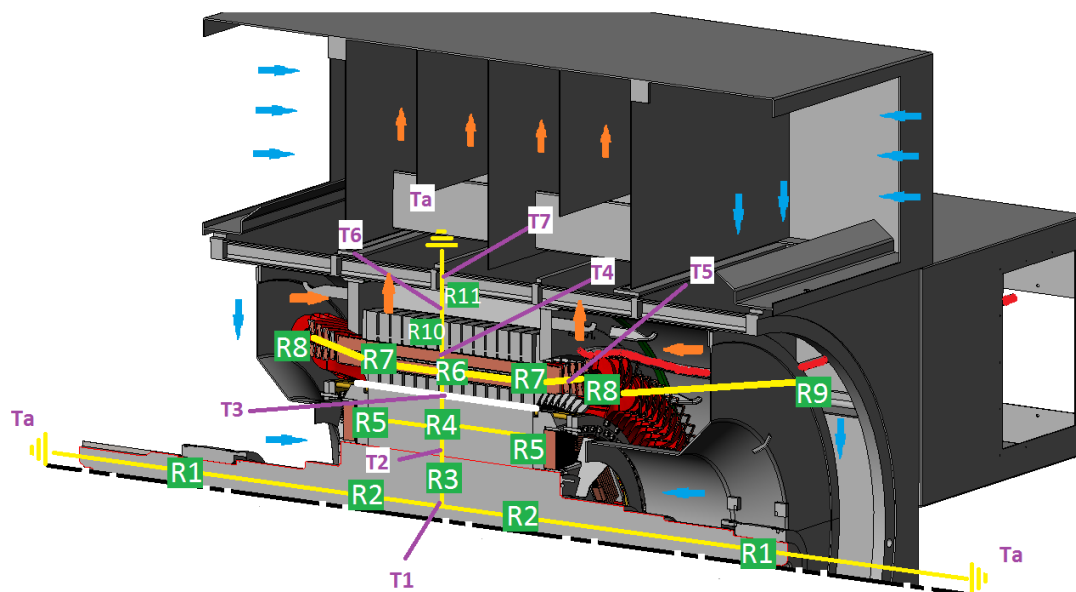


Figura 1: Circuito térmico de una máquina eléctrica.

## 2. MÉTODOS NORMALIZADOS DE ENSAYOS

### 2.1. Método de ensayo para elevación de temperatura en motores de inducción

Existen varios métodos para elevación de temperatura. El método de aplicación directa de carga, tal vez puede ser el más convencional, no obstante, demanda grandes estructuras y altos costos. Otro que también es muy conocido es el *Forward Short Circuit*, que consiste en acoplar la máquina a ser ensayada en otra con características similares, como carga. Este método también tiene limitaciones y dificultades, ya que se precisan máquinas similares para la carga, y toda la estructura para acoplar una contra la otra. La mayoría de los métodos necesita acoplamiento, tiene costo elevado y requiere máquinas extras para la aplicación de carga. La condición de acoplar es compleja, principalmente en caso de máquinas verticales.

El método más dinámico y viable para los ensayos de elevación de temperatura, en motores eléctricos de gran porte, es la doble frecuencia. Este método no requiere máquinas extras ni cargas mecánicas. La elevación de temperatura por la doble frecuencia requiere solamente dos fuentes de tensión y frecuencia variables. La prueba puede ser aplicada en cualquier tipo de motor de inducción, con la ventaja de la agilidad y el costo menor, además de consumir en torno de 40% de la potencia de la máquina a ser ensayada.



El ensayo de elevación de temperatura por doble frecuencia ya fue propuesto por Ytterberg en 1921. El motor no es acoplado mecánicamente, rueda libremente. La fuente principal suministra tensión y frecuencia nominales al motor en prueba. La fuente auxiliar tiene una frecuencia menor, en torno de 60 a 95% de la frecuencia y la tensión entre 5 y 25%, ambas referentes a la fuente principal. La tensión y la frecuencia de la fuente auxiliar son ajustadas hasta que la corriente nominal del motor en prueba es alcanzada. El rotor oscilará en torno a la velocidad síncrona, operando entre motor y el generador [4].

Existen dos posibilidades para aplicar el método de doble frecuencia. El método presentado en la figura 2 consiste en dos fuentes con un transformador. La fuente principal es interconectada en serie con uno de los devanados del transformador. la entrada es conectada al generador de fuente y la salida del devanado del transformador es conectada al motor en prueba. La segunda fuente que es auxiliar, sirve como control de la corriente del motor en prueba. La entrada de esta fuente auxiliar es conectada al otro devanado del transformador y la salida de este devanado es cerrada en Estrella [3].

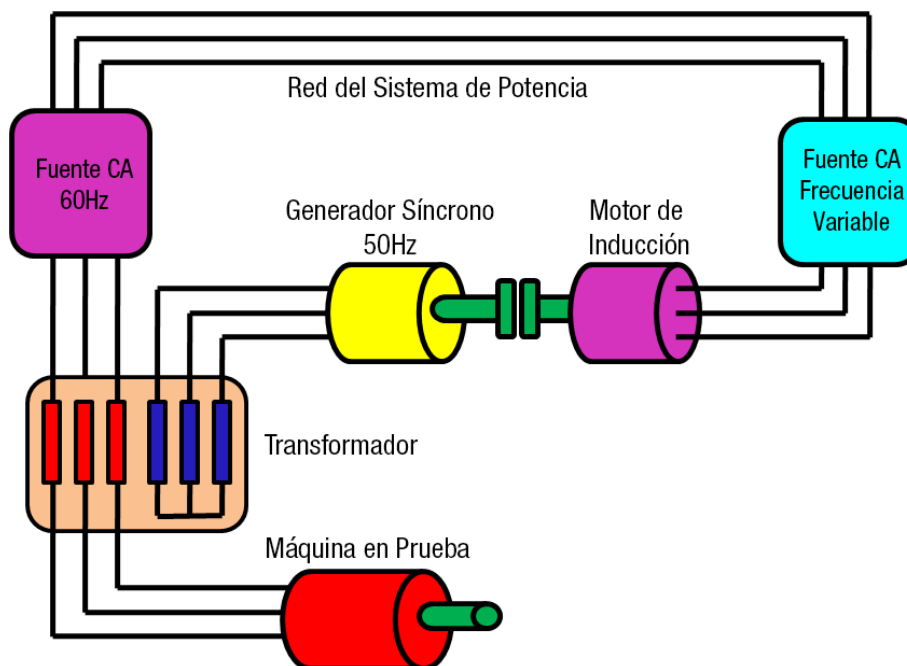


Figura 2: Interconexiones del circuito de doble frecuencia con transformador.

La segunda posibilidad es que la interconexión en serie del circuito de la fuente principal, conectada al motor en prueba, pase por el devanado del generador de la fuente auxiliar. Los ajustes y los controles son los mismos de la primera metodología. Las interconexiones son presentadas en la figura 3.

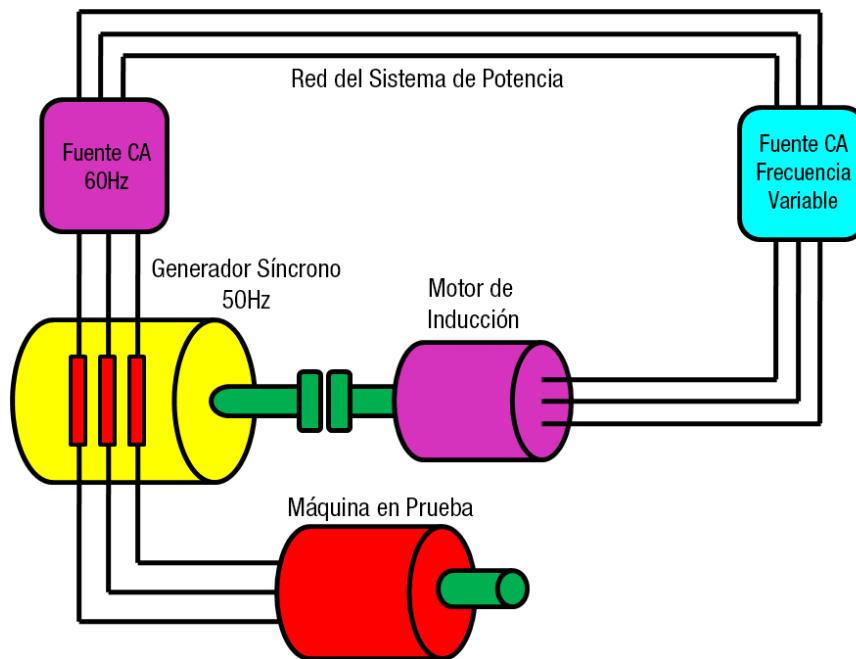


Figura 3: Interconexiones del circuito de doble frecuencia pasando por el generador auxiliar.

La posibilidad de realización del ensayo en las condiciones nominales de tensión y corriente dependen de la capacidad de las dos fuentes que componen el laboratorio de doble frecuencia. Las fuentes generadoras con capacidad mayores atienden la mayoría de las máquinas. No obstante, en caso de motores eléctricos a ser ensayados para la evaluación de la temperatura, con potencias por encima de la capacidad del laboratorio, se pueden utilizar también dos metodologías gráficas para extrapolar los resultados.

El ensayo de elevación de temperatura debe ser priorizado en las condiciones nominales en doble frecuencia, ya que se trata de solamente un ensayo, rápido, preciso y directo. Habiendo limitaciones, se puede aplicar este mismo método de forma reducida. Por ejemplo, el motor a ser ensayado es ajustado en tensión nominal y corriente reducida, por la capacidad de corriente de la fuente del laboratorio y un ensayo en vacío más componen el resultado. O también, tensión y corriente del motor a ser ensayado reducidos, en este caso, el método requiere tres ensayos en la composición del resultados de la elevación de temperatura final.

El método gráfico de extrapolación con los dos ensayos a tensión nominal consiste en un ensayo a vacío y otro en carga con el mínimo de 70% de la potencia nominal de la máquina a ser ensayada. Con los resultados de estos dos ensayos se obtienen los dos puntos de la recta para la extrapolación, considerando el eje x por la relación cuadrática de la corriente y el eje Y los resultados de las elevaciones de temperatura de los dos ensayos, conforme la figura 4.

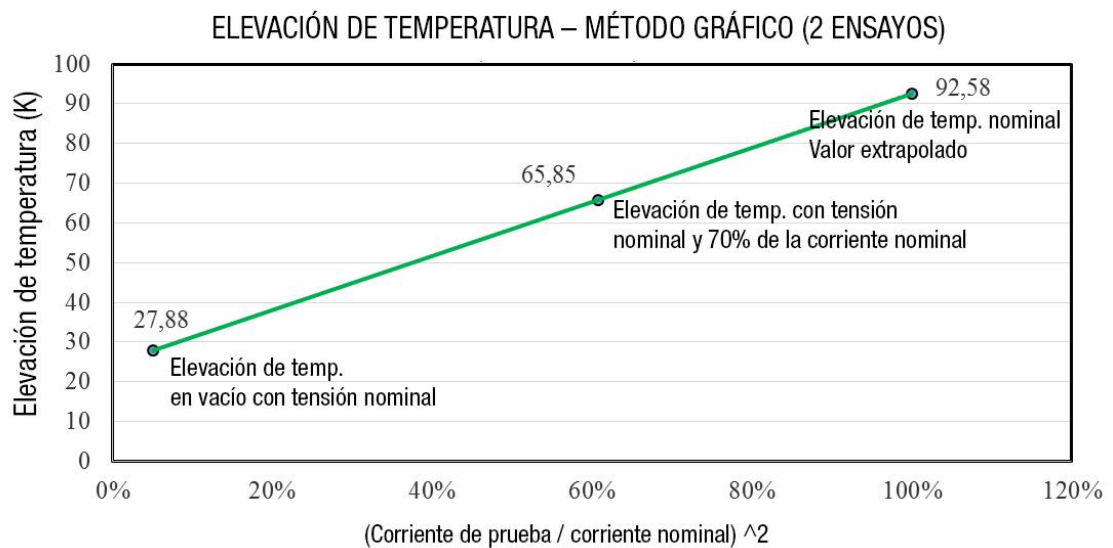


Figura 4: Extrapolación por el método gráfico con dos ensayos a tensión nominal.

Por otro lado, el método gráfico de extrapolación con los tres ensayos, donde dos son con tensión reducida, consiste en un ensayo a vacío y otro en carga con la misma tensión reducida y corriente nominal. También es posible considerar una corriente reducida con el mínimo de 70% de la corriente nominal. Y, se hace necesario un tercer ensayo en vacío con tensión nominal, para el ajuste de la diferencia de la tensión reducida en el ensayo en carga con la tensión nominal del motor. La figura 5 presenta la extrapolación, mostrando que la compensación de la diferencia de la tensión es hecha por una recta paralela a los dos ensayos de tensión reducida.

De esa forma, con el descriptivo presentado, se muestra la viabilidad de la realización del ensayo de doble frecuencia para la evaluación de las características térmicas de un motor eléctrico de inducción. La única limitación en este método es la evaluación de vibración y el ruido durante el ensayo, ya que el efecto de la simulación de carga hace que el motor a ser ensayado aumente estos parámetros. Es necesaria una prueba adicional al final de la elevación de temperatura, con la máquina caliente y térmicamente estabilizada, accionar el motor con una fuente senoidal para la evaluación de la vibración y del ruido.

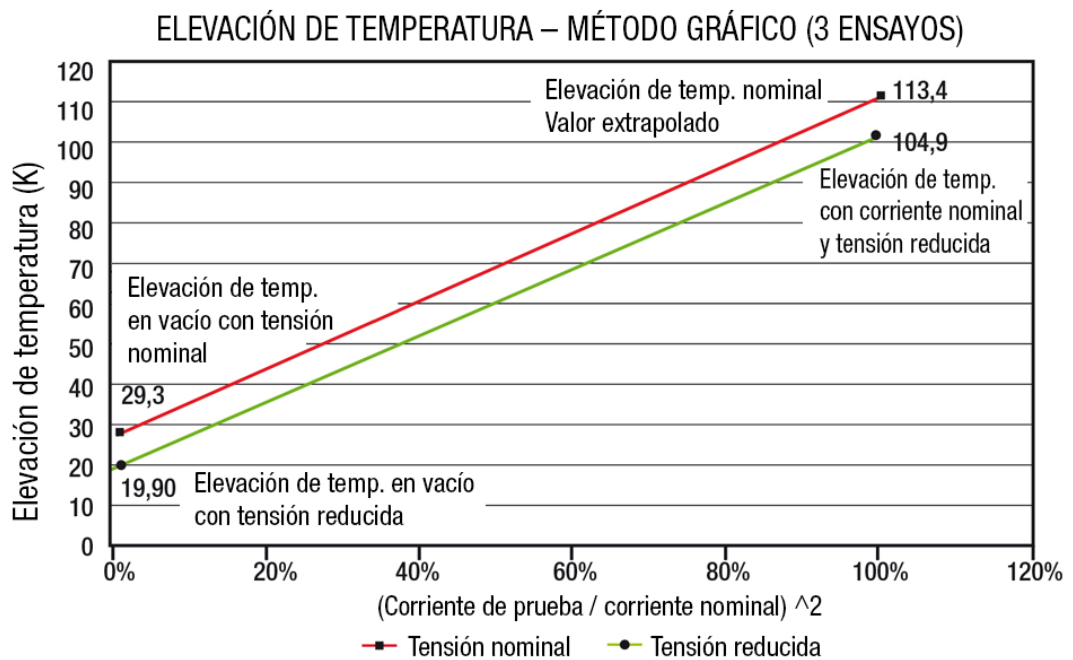


Figura 5: Extrapolación por el método gráfico con tensión reducida y tres temperaturas.

## 2.2. Método de ensayo para elevación de temperatura en máquinas síncronas

Existe una gran dificultad de realizarse ensayos en carga de máquinas síncronas de gran porte, en régimen de producción. Esto incluye, tanto máquinas operando como generador, como también motor. Entonces, para realizar este tipo de ensayo y verificar la real elevación de temperatura de estas máquinas, se necesita utilizar métodos equivalentes normalizados. No obstante, para alcanzar los valores nominales se hace necesario extrapolar los valores encontrados en esos métodos y, debido a inúmeras variables del proyecto y del proceso de fabricación, los resultados pueden presentar algunas imprecisiones.

De acuerdo con las normas, existen tres métodos para este tipo de ensayo: aplicando directamente la carga nominal, este caso no será discutido en este estudio debido a la inviabilidad en la ejecución, y los dos métodos equivalentes de la sumatoria de corto más vacío y sin excitación y la prueba de factor de potencia nulo. El trabajo define claramente la imprecisión de cada método y los ajustes que podrán ser realizados para disminuir estos errores. Los resultados deben garantizar la atención de los criterios de la clase térmica y también realimentar los datos de proyecto, consecuentemente, podrán optimizar los nuevos proyectos.

La gran ventaja en la realización del ensayo por el método de temperatura de la sumatoria de corto y vacío y sin excitación es que no existe limitación de





la potencia para las pruebas. En el ensayo en vacío, la máquina es accionada en la tensión nominal, y genera básicamente el calor de las pérdidas en el hierro hasta la estabilización térmica. Las pérdidas en el hierro están compuestas básicamente por dos fenómenos: la histéresis del material del núcleo ferromagnético del estator, cuando es sometido a un campo variable en el tiempo (tensión alterna generada por el generador) y las corrientes inducidas en las chapas del estator que producen calor (efecto Joule), dando origen a las pérdidas por corrientes de Foucault.

Luego se realiza el ensayo en cortocircuito, donde se circula la corriente nominal, elevando su temperatura debido a las pérdidas Joules. Este efecto térmico expresa la relación del calor generado por una corriente eléctrica en un determinado tiempo. La elevación de temperatura del estator es la sumatoria de las elevaciones de temperatura de estos dos ensayos, menos la elevación de temperatura del ensayo sin excitación. Esta substracción es necesaria debido a la duplicación de las pérdidas por roce y ventilación que están contenidas en los dos ensayos de corto y vacío. Sin embargo, en estos dos casos no se alcanza la corriente nominal de campo. A continuación, en este caso, se hacen necesarias las extrapolaciones de la elevación de temperatura del rotor, conforme las normas IEC 60034-29 [11] o IEEE 115 [12].

En el caso de la prueba de factor de potencia nulo, la corriente de campo puede ser impuesta conforme la necesidad, consiguiendo alcanzar los valores nominales y aumentando así la precisión de la temperatura del rotor. La gran dificultad es conocer la corriente de campo para las condiciones nominales. No es simplemente utilizar el valor proyectado, porque estos valores varían por innúmeros factores intrínsecos al proceso productivo. Otro agravante es la capacidad de la fuente que alimentará la máquina para la prueba, que debe tener una potencia aproximadamente 50% mayor que la de la máquina en prueba, pudiendo muchas veces limitar las condiciones.

Para máquinas de gran porte, principalmente con alta polaridad, se puede considerar que para reducir los errores de los ensayos de temperatura rotórica (en los devanados de campo) se debe iniciar realizando los ensayos de saturación en vacío, cortocircuito y curva "V" para el cálculo de la corriente de excitación por la reactancia de Potier, consecuentemente, utilizar el valor calculado para el ensayo de temperatura.

El ensayo de curva "V" es para determinar el punto de corriente de excitación, para las condiciones nominales del generador, en factor de potencia nulo. Este ensayo es realizado con el generador operando como motor, la corriente de excitación es variada, midiendo la corriente del estator. Los puntos son registrados y ploteados conforme la figura 6. El punto nominal, puede ser ensayado, siendo posible, do lo contrario, el valor es extrapolado linealmente. Este punto de excitación en factor de potencia nulo es el referenciado como "A" en la curva de determinación de la reactancia de Potier de la figura 7. El ensayo para la determinación de este punto, normalmente es el de saturación en factor de potencia nulo, no obstante, para máquinas de gran porte, es inviable. Por eso, se sustituye por la curva "V".



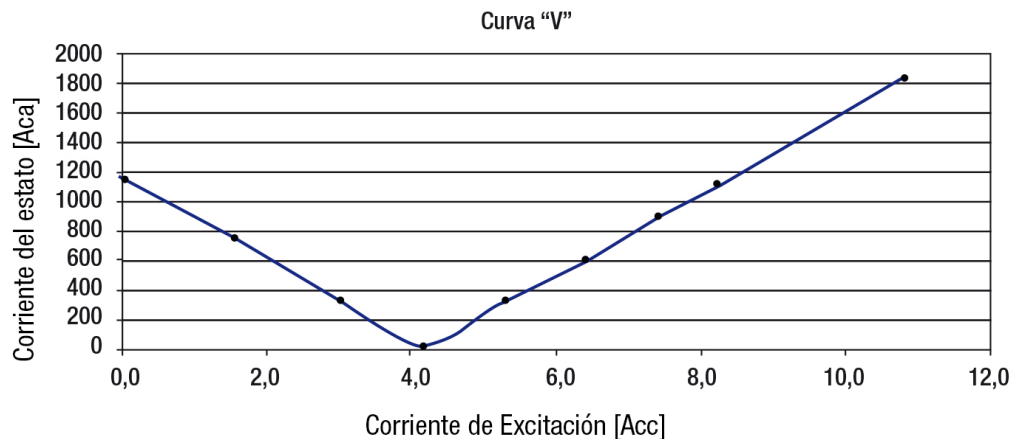


Figura 6: Ensayo de curva "V" para determinación del punto A de la reactancia de Potier.

Las curvas características de saturación en vacío, cortocircuito y el punto "A" que corresponde a la tensión y a la corriente nominal del estator en factor de potencia nulo, son colocados en la misma figura 7. El punto "A", cuya ordenada es la tensión nominal de la máquina (pu) y la abscisa a corriente de excitación medida, correspondiente a la corriente nominal de la armadura a factor de potencia nulo con sobreexcitación. Debido a las limitaciones de las fuentes de pruebas de los laboratorios, el punto nominal en factor de potencia nulo es retirado por la extrapolación de la curva "V", a partir de los valores ensayados.

Sobre la paralela al eje de las abscisas (eje x) por el punto "A", se toma, a la izquierda de éste, una longitud igual a la corriente de excitación  $i_{fk}$  que equivale a la corriente de excitación correspondiente a la corriente nominal del estator en el ensayo de saturación en cortocircuito, que está ubicado en el eje de las abscisas  $i_f$ , identificando el punto "F".

La curva de saturación en vacío, antes de entrar en la región de saturación, presenta una parte lineal, se traza una línea paralela a la región lineal de la curva de saturación en vacío en la distancia del punto "F". Con la intersección de esta línea paralela con la curva de saturación se encuentra el punto "H".

La longitud de la línea perpendicular HG bajada del punto "H" sobre la recta AF representa la caída de tensión en la resistencia XP bajo la corriente nominal de la armadura. En valores por unidad  $XP = HG$ . La figura 7 fue retirada de la norma ABNT NBR5052.

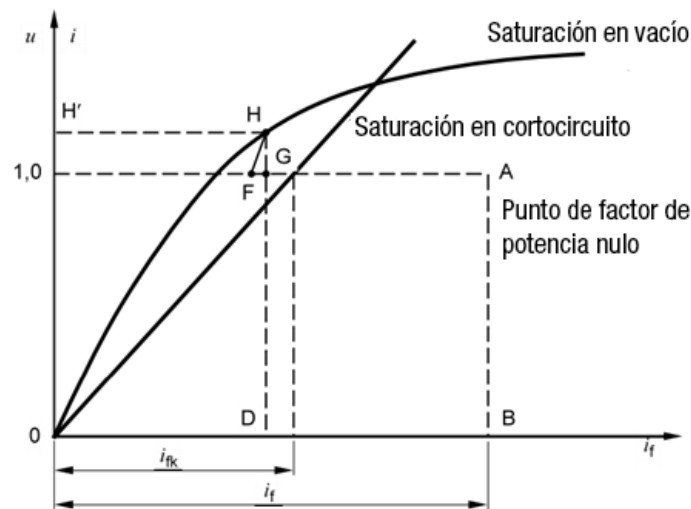


Figura 7 – Determinación de la reactancia de Potier, basado en la norma NBR5052.

Sobre el eje de las abscisas el vector de la corriente nominal ( $i_N$ ) de la armadura de la máquina bajo ensayo y, por la origen, formando con el eje de las abscisas un ángulo  $\varphi_N$  (considerando positivo en el caso del generador sobreexcitado) el vector de la tensión nominal  $U_N$  correspondiente al factor de potencia de la carga para el valor de la corriente de excitación deseada. De la extremidad libre del vector de la tensión, se traza una perpendicular al vector de la corriente de la armadura, la cual representa el vector de la caída de tensión ( $i_N \cdot X_p$ ) de la reactancia de Potier  $X_p$ , conforme la figura 8.

La suma vectorial de la tensión nominal y de la caída de tensión en la reactancia  $X_p$  da el vector de la fuerza electromotriz  $e_p$ . La corriente de excitación  $i_{fp}$ , correspondiente a esta fuerza es determinada sobre la característica en vacío es trazada en el gráfico a partir del origen, a  $90^\circ$  del vector de la fuerza electromotriz. La componente de la corriente de excitación que compensa la reacción de la armadura bajo la corriente nominal ( $i_{fa}$ ) es determinada como la diferencia entre la corriente de excitación, correspondiente a la corriente nominal de la armadura en la saturación en cortocircuito, y la corriente de excitación, correspondiente a la caída de tensión en  $X_p$  debida a la corriente nominal de la armadura en la característica en vacío.

El vector  $i_{fa}$  es trazado a partir de la extremidad del vector  $i_{fp}$  paralelamente al vector de la corriente de la armadura. La corriente de excitación nominal  $i_{fN}$  es la suma vectorial de  $i_{fp}$  e  $i_{fa}$ , conforme es demostrado en la figura 8, que fue retirada de la norma ABNT NBR5052.

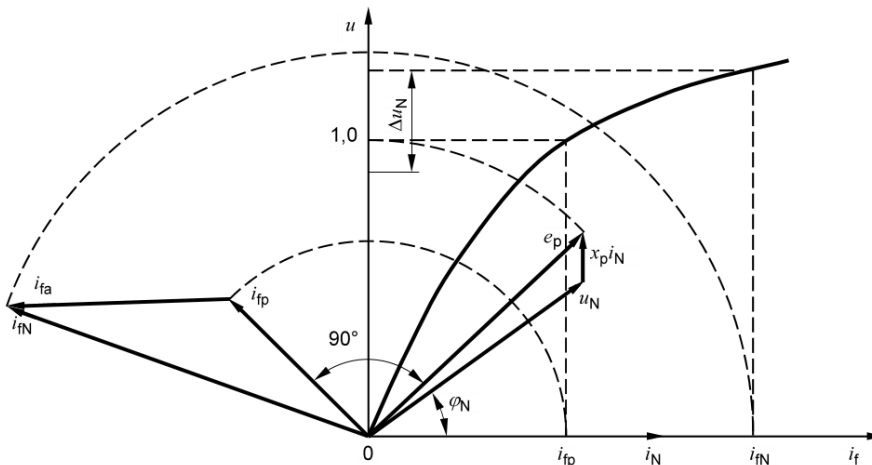


Figura 8 – Determinación de la corriente de excitación nominal por medio del gráfico de Potier, basada en la norma NBR 5052.

Con la determinación de la corriente de excitación del rotor para la máquina síncrona, operando a carga nominal, el ensayo de elevación de temperatura del rotor para ser extrapolado en el caso del ensayo de corto más vacío o impuesto para el factor de potencia nulo.

### 2.3. Métodos de ensayo para elevación de temperatura en máquinas de corriente continua

La metodología más común para grandes máquinas de corriente continua es el *back-to-back*, sin embargo, depende mucho de las limitaciones estructurales de los laboratorios. En máquinas más pequeñas, es posible realizar la prueba en carga. Para máquinas de corriente continua, La metodología equivalente del cortocircuito, vacío y sin excitación es aplicable, mismo método aplicado en las máquinas síncronas.

Una característica específica a ser verificada en las máquinas de corriente continua en elevación de temperatura y en carga es el chisperío. La condición de sin chisperío o chisperío mínimo confirma la perfecta funcionalidad de la máquina. El ajuste de las escobillas en la zona neutra hace que la conmutación sea hecha sin tensión entre las lamelas, no causando pequeños cortos, que son las fuentes de los chisperíos. Este ajuste en la práctica no es tan simple, ya que existen influencias de los campos distorsionados en el entrehierro.

El ajuste de la zona neutra es posible a partir de cuatro métodos: (1) Ajuste grueso: energizar la armadura entre 50 y 80% de la corriente nominal, como máximo por 30 segundos, usando una tensión cc baja, como por ejemplo, de batería. Si la zona neutra está desajustada, el rotor tenderá a girar. Para el ajuste de la posición neutra, girar el anillo de los portaescobillas en el sentido contrario al giro del motor. La zona neutra estará ajustada cuando el rotor quede parado. El ajuste fino es hecho por la aplicación de carga con tensión y corriente nominal, para ambos lados de sentido de giro. La diferencia de la velocidad entre ambos lados no puede ser superior a 1%.



También como ajuste fino existen otras dos posibilidades: operar el motor cc como generador, tanto para el circuito abierto (generando tensión) como para el generador cc con la salida en cortocircuito (circulando corriente). Ajustando el parámetro (tensión de salida o cortocircuito), la diferencia tampoco puede ser mayor a 1%, entre el parámetro, para ambos sentidos de giro. Para los tres métodos de ajuste fino, el ajuste de la posición neutra también es girando el anillo de los portaescobillas en el sentido contrario al giro del motor.

En el caso del ensayo de elevación de temperatura en vacío, más corto y sin excitación, el campo tampoco será probado en las condiciones nominales. Una prueba específica aplicando tensión nominal en el campo, con el sistema de ventilación encendido, será suficiente para determinar la elevación de temperatura de este devanado. Normalmente, se hace solamente el ensayo en vacío con la máquina operando como motor, así tanto el campo es ensayado en las condiciones nominales como se puede determinar la elevación de temperatura en vacío.

### 3. DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS

Una máquina eléctrica en uso, dentro de las características especificadas, mantiene sus componentes calentados y libres de absorciones de humedad. Por otro lado, parámetros no respetados comprometen el desempeño. Si este parámetro resulta en aumento de temperaturas de los devanados, la degradación de los aislantes es potencializada exponencialmente con el aumento de la temperatura, pudiendo llevar a quemadas prematuras.

Es necesaria una prueba precisa de elevación de temperatura en la fabricación de una máquina eléctrica nueva o reparada, para garantizar un perfecto funcionamiento en la aplicación. Garantizando así la vida útil estimada de una máquina eléctrica. Son varios los factores que llevan a una sobretemperatura, no solamente una sobrecarga. Por eso, el circuito de refrigeración requiere toda atención, ya que puede reducir la eficiencia durante la operación por medio de contaminantes.

Esta cuestión es tan importante que la propia norma IEC, más precisamente la IEC60034-29, fue desarrollada para atender específicamente el tema de ensayos de elevación de temperatura para máquinas eléctricas de gran porte, motores de inducción, máquinas síncronas y motores de corriente continua. La aplicación de carga directa para determinar la elevación de temperatura para estas máquinas es posible solamente para bajas potencias. Por eso, la IEC desarrolló esta norma que describe solamente metodologías indirectas para la determinación de la elevación de temperatura. La norma IEC 60034-29 presenta una tabla con los métodos, los equipos para el laboratorio del respectivo método, preferencia para el tipo de máquina y las imprecisiones. Las descripciones a seguir se basan en esta tabla.

La prueba de doble frecuencia es llamada por la IEC, como “*Mixed-frequency or Bi-frequency method*” y por la IEEE122 como: “*Primary-superposed equivalent loading method*”. La norma IEC considera una imprecisión en el método de +/-5%. Por otro lado, la IEEE no menciona



imprecisiones. De esa forma, se puede considerar que el método de doble frecuencia es el más común, debido a sus versatilidades y por ser mundialmente normalizado.

Las máquinas síncronas son tratadas en normas únicas, tanto para la operación como motor como para generador. Para el caso de motor síncrono, la opción del ensayo dinamométrico puede ser considerada, si posee estructura para eso. Sin embargo, requiere cuidado mecánico para el torque pulsante característico de este proyecto de máquina. Esto significa acoplamientos, base y fijaciones reforzadas y diferenciadas. Por lo tanto, esta prueba puede ser viable solamente en bajas potencias, siendo más común utilizar las metodologías indirectas. Incluso las normas se concentran más en estas metodologías.

El método de cortocircuito, vacío y sin excitación, es sin duda muy preciso para la determinación de elevación de temperatura del estator de las máquinas síncronas. Esta metodología compone todas las pérdidas que generan las temperaturas en las condiciones nominales. Además de este método, el otro es el factor de potencia nulo, que también es común, pero depende de la estructura del laboratorio. Una fuente ideal para atender las características nominales de la máquina a ser probada debe tener una potencia mayor. O se escoge solamente un parámetro para la prueba, o sólo el rotor (excitación como un todo) o sólo el estator.

Con el rotor existen dos dificultades, la primera es saber el valor de la corriente de excitación real que la máquina precisará para atender las condiciones de carga nominales y el segundo es cómo alcanzar este valor de corriente y consecuentemente la temperatura. El valor de corriente de excitación es difícil de ser proyectado, ya que los procesos de fabricación del rotor pueden contener variables desconsideradas en el proyecto, que resultan en diferencias del proyectado, necesario para atender las condiciones de carga. La posibilidad, en este caso, es la reactancia de Potier, donde se consigue determinar indirectamente la corriente de excitación a plena carga.

Después de determinada la corriente de excitación, la dificultad es cómo imponer este parámetro. Se aplican tres metodologías, accionar la máquina síncrona como motor (aunque funcione como generador), en factor de potencia nulo y ajustar la corriente de excitación de Potier. No obstante, esta condición depende de la capacidad del laboratorio, que debe ser superior a la de la máquina a ser ensayada. Una segunda opción sería utilizar la conexión delta y trabajar en la curva de saturación de la máquina, sobreexcitándola. En esta condición, se debe estar atento al calentamiento de las barras que sustentan el paquete de chapas, ya que podrán calentarse excesivamente. Este hecho acontece debido a la saturación del núcleo estatórico y estas barras son inducidas por el campo magnético generado por el rotor. Además de eso, el aislamiento de la tensión entre espiras también debe ser analizado. La tensión de salida es limitada por la conexión delta, pero la máquina es sobreexcitada y esta tensión es mayor entre espiras. Estos dos factores pueden limitar la imposición de la corriente de excitación de Potier. Una tercera posibilidad es la extrapolación lineal de las tres temperaturas de los ensayos de elevación de temperatura en corto, vacío y sin excitación.



Por otro lado, para las máquinas de corriente continua, las técnicas del back-to-back y de corto más vacío y sin excitación son las comúnmente utilizadas. El back-to-back depende de la estructura, del acoplamiento y de otra máquina con características similares o superior para el ensayo. Lo más recomendado es que eso sea cumplido. La otra posibilidad del corto más vacío y sin excitación, no tiene limitación, puede atender cualquier potencia, desde que haya un motor accionante que consiga suplir las pérdidas generadas por las condiciones de ensayos, más roce y ventilación de la máquina a ser ensayada. El campo puede no ser atendido con este ensayo, no obstante, como estas máquinas son normalmente proyectadas con ventilación forzada, debido a la posibilidad de trabajar en diversas velocidades, el campo puede tener un ensayo independiente.

Además de elevación de temperatura, la característica del chisperío debe ser monitoreada y evaluada. La condición de chisperío en carga o en corriente plena debe ser ensayada, tanto a frío como a caliente. El chisperío puede ser ocasionado por problemas de proyecto en caso de máquinas nuevas, errores de conexión, conmutación débil o fuerte, o asentamiento de las escobillas. De esa forma, se tiene una garantía de funcionamiento en la aplicación.





#### 4. CONCLUSIÓN

La elevación de temperatura es el ensayo para evaluar las características térmicas de la máquina eléctrica girante. Esto puede ser considerado tanto para las máquinas nuevas, como para reparaciones. El ensayo tiene el objetivo de evaluar si las temperaturas cumplen la clase térmica de los materiales utilizados en la fabricación de la máquina. Sin embargo, además de eso, se pueden detectar errores en la fabricación, como número de espiras, montajes de los ventiladores, intercambiadores de calor y posibles componentes que reducen la eficiencia del circuito de intercambio térmico. La vibración de la máquina también es una característica que es influenciada por la temperatura y es evaluada en este ensayo. Los componentes que hacen parte del rotor pueden acomodarse, debido a la dilatación térmica, e influenciar en los valores de vibración con la máquina a caliente. La revisión se concentró en los motores de inducción, máquinas síncronas y de corriente continua. Para los motores de inducción, entre las varias posibilidades ya estudiadas, el ensayo de doble frecuencia se muestra el más viable, ya que no requiere acoplar el equipo, y además las estructuras son menos complejas, incluso siendo necesarias dos fuentes para el ensayo.

En las máquinas síncronas, la aplicación de carga directa es posible solamente en generadores pequeños. Las dos posibilidades son los ensayos de la sumatoria de corto más vacío y sin excitación y el ensayo de factor de potencia nulo. El ensayo de corto más vacío y sin excitación es el más viable, ya que no existen limitaciones de potencia. La dificultad está en la corrección de la temperatura del rotor, ya que requieren correcciones y extrapolaciones, pero que están normalizadas. El factor de potencia nulo, incluso siendo un ensayo que la máquina síncrona es ensayada como motor es la prueba que se puede imponer a condiciones nominales, incluso siendo un generador. Depende solamente de la potencia de la fuente disponible para los ensayos.

En las máquinas de corriente continua, el ensayo en carga es fundamental para evaluar la principal característica que es el chisporío. La elevación de temperatura también puede ser determinada por la metodología de corto más vacío y sin excitación, el mismo de las máquinas síncronas.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ 1 ] BAUER, C.; Ensayos de elevación de temperatura por el método “*Forward Short Circuit*” en motores de inducción. Disertación de Maestría de la Universidad Federal de Santa Catarina, 2008.

[ 2 ] ÇOLAK, I.; BAL, G.; ELMAS, Ç.; *Review of the testing methods for full-load temperature rise testing of induction machines*. EPEJournal, Vol. 6, NO. 1, 1996.

[ 3 ] CISZ, G.; RÜNCOS, F.; NEVES, C. G. C.; *Comparative analyses of standards temperatura rise test methods sea induction machines*. 55th Petroleum and Chemical Industry Committee - PCIC 2008.



[ 4 ] HO, S. L.; FU, W. N.; *Analysis of indirect temperature-rise tests of induction machines using stepping finite element method*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, 2001.

[ 5 ] DEACONU, S. I.; TUTELEA, L. N.; POPA, G. N.; LATINOVIC, T.; *Artificial loading sea rotating electric machines*. Annals of Faculty Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering, Romania, 2011.

[ 6 ] PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V.; *Design diseño of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6, 2008.

[ 7 ] STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H.; *Electrical insulation for rotating machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and repair*. IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.

[ 8 ] YANG, Y.; BILGIN, B.; KASPRZAK, M.; NALAKATH, S.; SADEK, H.; PREINDL, M.; COTTON, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A.; *Thermal management of electric machines*. IET Journals, ISSN 2042-9738, 2016.

[ 9 ] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A.; Máquinas Eléctricas. Editora McGraw-Hill del Brasil, Ltda, 1975.

[ 10 ] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**. *Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance*, IEC 60034-1. Geneva, 2004.

[ 11 ] **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**. *Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance*, IEC 60034-29. Geneva, 2008.

[ 12 ] **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS**. Guide for test procedures for synchronous machines. IEEE Std 115 - 2009



**Walter Evaldo Kuchenbecker** es PhD en ENERGÍA, en la línea de investigación de Máquinas Eléctricas Girantes, de UFABC. Actualmente participa del programa de investigación PDC (Investigador Doctor Colaborador) y es postdoctorado en ENERGÍA en la misma universidad. Sus investigaciones y publicaciones están focalizadas en máquinas eléctricas girantes. Experiencia de 33 años en la empresa WEG Equipos Eléctricos, también concentrada en aplicaciones, fabricación y análisis de máquinas eléctricas. Es, desde hace 10 años, supervisor de las áreas de la calidad y ensayos eléctricos.



**Julio Carlos Teixeira** miembro del IEEE, Profesor titular en la Universidad Federal de ABC (UFABC). Ingeniero electricista graduado en (1983) con Maestría en ingeniería eléctrica, ambas graduaciones en el centro politécnico de USP. Su graduación de Ph.D fue en INPG, Francia (1994).