



Almacenamiento de máquinas eléctricas girantes de mediano porte

Jorge Luis Morales Gularte
WEG
Brasil
gularte@weg.net

Resumen – Las máquinas eléctricas girantes, utilizadas en las más diversas aplicaciones, son suministradas en las condiciones ideales de funcionamiento y, en principio, deberían operar cuanto antes posible. Dependiendo de la aplicación, la máquina puede permanecer almacenada por semanas, meses e incluso años, hasta que sea instalada y comience a operar. Esto puede ocasionar alteraciones en sus propiedades eléctricas y mecánicas. Muchos factores influyen en las propiedades de la máquina, durante el período de almacenamiento, como por ejemplo, temperatura ambiente, humedad, contaminación, agentes corrosivos, brisa marina, vibración, etc.

Las áreas de mantenimiento de las empresas están adoptando cada vez más medidas preventivas para evitar problemas operacionales en lo que se refiere a puesta en operación, sustitución de motores o generadores eléctricos.

Los principales efectos provocados por largos períodos de almacenamiento son la corrosión de las partes mecanizadas, daños en los cojinetes y la reducción de la resistencia de aislamiento de los devanados. Es muy importante que los usuarios tengan conciencia de que el mantenimiento preventivo durante el almacenamiento es tan importante como el mantenimiento durante el funcionamiento de sus máquinas. Varios procedimientos y medidas deben hacer parte del plan de mantenimiento para almacenamiento de máquinas. En este artículo serán abordados los problemas que pueden ocurrir con las máquinas eléctricas girantes de mediano porte sujetas a largos períodos de almacenamiento y los cuidados que deben ser tomados para que estos problemas no ocurran, o sean minimizados. Se entiende por mediano porte, máquinas eléctricas con tamaño de carcasa IEC de 280 a 1250 y tamaño de carcasa NEMA 44 a 200.

ÍNDICE DE TÉRMINOS: MÁQUINAS ELÉCTRICAS, ALMACENAMIENTO, MANTENIMIENTO:

1 INTRODUCCIÓN

Son varias las situaciones en que los usuarios de máquinas eléctricas girantes necesitan almacenarlas o permanecer con las mismas paradas por largos períodos. Entre ellas se pueden destacar:

- La necesidad cada vez mayor de las industrias por mantener máquinas sobresalientes en stock, y de esa forma evitar paradas prolongadas para mantenimiento y mantener sus procesos de fabricación en operación;
- La construcción de nuevas plantas industriales o centrales de generación de energía que necesitan permanecer con sus máquinas almacenadas hasta el inicio de las operaciones;
- Paradas prolongadas para mantenimiento.

Se puede considerar “almacenamiento prolongado” cuando una máquina permanece parada por un período superior a 2 meses y, por tanto, pasa a requerir cuidados especiales de mantenimiento.

Por eso, las empresas están buscando cada vez más informaciones y planeando, no sólo el mantenimiento de las máquinas en operación, sino también de las que están paradas.

Un buen plan de mantenimiento preventivo puede evitar muchos problemas en el momento del comisionamiento y puesta en operación de máquinas paradas por largos períodos.

Las máquinas con características constructivas especiales muchas veces requieren cuidados específicos durante el almacenamiento.

Las partes y piezas suministradas separadamente de la máquina también requieren cuidados especiales cuando son almacenadas por largos períodos.

En este artículo son mencionadas las partes constructivas que requieren mantenimiento, los procedimientos que deben ser adoptados para mantenimiento durante el almacenamiento, así como los cuidados antes de la puesta en operación de motores de inducción, motores y generadores síncronos, motores y generadores de corriente continua, en las construcciones horizontal y vertical, utilizadas en las más diversas aplicaciones.

Todas las inspecciones y procedimientos deben ser realizados por personas experimentadas y con profundo conocimiento en máquinas eléctricas girantes.



2 PARTES CONSTRUCTIVAS

La Figura 1 muestra el ejemplo de un motor de inducción en corte, enumerando las principales piezas que normalmente hacen parte de una máquina eléctrica girante, conforme sigue:

1. Carcasa
2. Estator
3. Rotor
4. Cojinete
5. Eje
6. Ventiladores
7. Intercambiador de calor aire-aire



Figura 1: Piezas de un motor de inducción

3 ALMACENAMIENTO PROLONGADO

Cuando es almacenada por un largo período, antes de la puesta en operación, la máquina permanece expuesta a influencias externas, como fluctuaciones de temperatura, humedad, agentes agresivos, etc.

Las partes externas mecanizadas, como eje, bridas y los espacios vacíos en el interior de la máquina, como los de los cojinetes, de la caja de conexión y de los devanados, quedan expuestos a estos agentes. Como consecuencia, tras períodos prolongados de almacenamiento, la resistencia de aislamiento de los devanados puede disminuir, los cojinetes y las partes mecanizadas pueden oxidarse y las propiedades del lubricante de los cojinetes pueden ser alteradas.

Todas estas influencias aumentan el riesgo de fallas en el funcionamiento o daños en la máquina durante la puesta en operación.

4 LOCAL DE ALMACENAMIENTO

Preferentemente, las máquinas eléctricas girantes deben ser almacenadas en local cerrado, cubierto, limpio, ventilado, exento de humedad y de agentes corrosivos, así como libres de vibración y de variaciones bruscas de temperatura.

Es necesario también que el local de almacenamiento posea red eléctrica para

alimentación de las resistencias de calentamiento. El espacio alrededor de cada máquina almacenada debe ser suficiente para que el operador de mantenimiento pueda tener acceso fácil para realizar las inspecciones y los tests periódicos necesarios.

5 ALMACENAMIENTO EXTERNO

No es recomendable que las máquinas eléctricas girantes sean almacenadas en ambientes abiertos sin cobertura, ya que la acción del tiempo ocasiona serios daños en estos equipos. Si esta situación no pudiera ser evitada, deben ser tomadas algunas medidas de protección, tales como, poner el embalaje sobre estrados o cimientos para evitar que se hunda en el suelo, cubrir completamente el embalaje con una lona o plástico resistente y providenciar una cobertura (tejado) para evitar la acción directa de la lluvia, sol, nieve, polvo, brisa marina u otro agente nocivo para la máquina.

6 INSPECCIONES

Para que sean mantenidas las características originales, así como para evitar problemas durante la puesta en operación, las máquinas almacenadas deben ser inspeccionadas periódicamente y los registros de las inspecciones deben ser archivados.

6.1 INSPECCIÓN DE LA PINTURA

Además de la función estética, la pintura sirve también como protección contra corrosión. La inspección de la pintura debe ser realizada periódicamente durante el período de almacenamiento de las máquinas y reparada cuando sea necesario.

6.2 INSPECCIÓN DE LAS PARTES MECANIZADAS

Las superficies mecanizadas expuestas de las máquinas deben ser revestidas con un agente anticorrosivo. Este agente debe permanecer en estas superficies hasta la instalación de la máquina y, repuesto siempre que sea necesario. Para remoción de esta protección, durante la instalación de la máquina, se utiliza un diluyente alquídico específico.



Figura 2: Anticorrosivo en las partes mecanizadas

6.3 INSPECCIÓN DE LAS CAJAS DE CONEXIÓN

Durante las inspecciones periódicas de las máquinas almacenadas, las cajas de conexión precisan ser inspeccionadas con el objetivo de detectar cualquier señal de humedad, corrosión o fallas en el sellado.

El sellado de la tapa no debe permitir el pasaje de humedad o suciedad hacia el interior de la máquina.

Inspeccionar los aisladores, conectores y barras de conexión de los conductores y sustituir los que presentan señales de hendiduras, pedazos quebrados u otros daños físicos.

Las cajas de conexión que presenten señales de corrosión deben ser recuperadas o sustituidas antes de efectuar cualquier conexión eléctrica.



Figura 3: Cajas de conexión

6.4 INSPECCIÓN DE LAS ESCOBILLAS

Cuando la máquina posea escobillas eléctricas, éstas deben ser levantadas en el portaescobillas o retiradas de la máquina durante el período en que permanezca almacenada, para evitar marcaciones o corrosión de los anillos colectores o del conmutador.

Los anillos colectores deben ser cubiertos con parafina o con una fina película de aceite. Es importante recordar de remover completamente esta protección antes de poner la máquina en operación.



Figura 4: Escobillas retiradas de los portaescobillas

7 PRESERVACIÓN DE LOS COJINETES

Los cojinetes poseen piezas de contacto metálico deslizante que requieren condiciones excepcionales para su buen funcionamiento, y por consecuencia, el de la máquina. Por eso, es uno de los ítems de mantenimiento más importantes durante el almacenamiento.

La condición ideal de conservación del cojinete es cuando está en funcionamiento, girando y lubricando sus componentes.

En la condición estática, si no son seguidos los procedimientos de mantenimiento y conservación, la acción del tiempo puede causar daños a los cojinetes que serán identificados por falla de funcionamiento cuando la máquina entrar en operación.

En este capítulo son relacionados los principales tipos de cojinetes, posiciones de montaje, así como los cuidados requeridos durante el período de almacenamiento o de parada de la máquina.

7.1 TRABA PARA TRANSPORTE

Para evitar daños en los cojinetes, durante la manipulación y transporte de las máquinas, debe ser utilizada una traba en el eje, conforme el ejemplo mostrado en la Figura 5, manteniéndola durante el período de almacenamiento y retirándola para los procedimientos de mantenimiento de los cojinetes.

Una vez finalizado el procedimiento preventivo, si la máquina permanece almacenada, el dispositivo de traba del eje debe ser instalado nuevamente y retirado cuando la máquina sea instalada.



Figura 5: Traba del eje

7.2 COJINETES DE MÁQUINAS HORIZONTALES

7.2.1 COJINETES DE RODAMIENTO

La Figura 6 muestra un cojinete de rodamiento con lubricación a grasa y la Figura 7 muestra un cojinete de rodamiento con lubricación a aceite. Los cojinetes de rodamientos son lubricados en la fábrica, para realización de los ensayos en la máquina. El lubricante debe permanecer en los cojinetes durante todo el período de almacenamiento. En caso de que los cojinetes de rodamiento a aceite hayan sido transportados sin aceite, los mismos deben ser lubricados con el tipo y el nivel de aceite especificado por el fabricante para mantener la máquina almacenada. Para lubricar y conservar las partes internas de los cojinetes es recomendable que el eje de la máquina sea girado de 10 a 15 rotaciones cada 2 meses. Para eso, es necesario retirar la traba del eje.

Luego de 6 meses de almacenamiento, los cojinetes precisan ser relubricados y tras 2 años se recomienda desmontar, lavar, inspeccionar y relubricar los mismos.

Los fabricantes de rodamientos recomiendan que los rodamientos blindados que no permiten relubricación sean sustituidos tras 2 años de almacenamiento.



Figura 6: Cojinete de rodamiento a grasa



Figura 7: Cojinete de rodamiento a aceite

7.2.2 COJINETES HIDRODINÁMICOS

Los cojinetes hidrodinámicos, también conocidos como cojinetes de deslizamiento o cojinetes de casquillo, son lubricados en la fábrica para realización de los ensayos en la máquina. El lubricante debe permanecer en los cojinetes durante todo el período de almacenamiento. En caso de que los cojinetes hayan sido transportados sin aceite, deben ser lubricados con el tipo y nivel de aceite especificado por el fabricante para mantener la máquina almacenada. El procedimiento de conservación del cojinete hidrodinámico durante el período de almacenamiento puede variar de acuerdo con el tipo de cojinete. Para el tipo más común, con depósito de aceite y anillo móvil de lubricación, el procedimiento recomendado es girar el eje de 10 a 15 rotaciones con velocidad mínima de 30rpm, cada 2 meses.

Los cojinetes hidrodinámicos con cárter seco y sin anillo de lubricación necesitan de lubricación forzada para su funcionamiento, así como para que sea efectuado el giro del eje recomendado durante el almacenamiento, el sistema de lubricación externa o el sistema de aceite de alta presión (jacking), cuando exista, precisa estar encendido.

Si no fuera posible girar el eje de la máquina, se recomienda desmontar los cojinetes, limpiarlos y aplicar un compuesto anticorrosivo en los casquillos, en la superficie de contacto del eje y en las partes internas del cojinete. También es recomendado colocar bolsas de deshumidificadores (sílica-gel) en su interior para, de esa forma, absorber la humedad.

Montar nuevamente el cojinete y, para evitar la penetración de humedad y de impurezas. Es necesario sellar completamente el cojinete, cerrando los agujeros roscados y sellando los intersticios entre eje y el cojinete con cinta adhesiva a prueba de agua.

Para conservar las partes internas del cojinete, este procedimiento debe ser repetido cada 6 meses de almacenamiento. Luego de 2 años, se recomienda desmontar el cojinete y preservar las piezas.

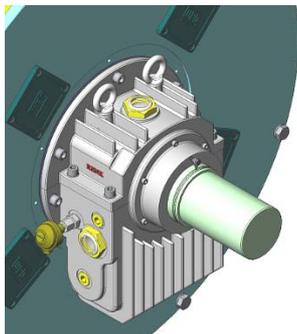


Figura 8: Cojinete hidrodinámico

7.2.3 MÁQUINAS CON COJINETE ÚNICO

Para algunas aplicaciones específicas, las máquinas eléctricas pueden tener cojinete solamente en la parte trasera, donde el acoplamiento es hecho por los ejes y bridas de las máquinas acopladas.

Debido al hecho de que la máquina no posee cojinete delantero, el eje permanece trabado durante el período de almacenamiento y la traba solamente es retirada en el momento de la instalación.

Si el cojinete trasero es de rodamiento, éste precisa ser relubricado cada 6 meses y antes de la puesta en operación, es necesaria también una evaluación de las condiciones del rodamiento antes de colocar la máquina en funcionamiento.

Si el cojinete trasero es del tipo hidrodinámico, la conservación del cojinete se basa en la protección de los casquillos, de la superficie de contacto del eje y de las partes internas del cojinete, con la aplicación de anticorrosivo, así como la utilización de deshumidificadores y sellado del cojinete, conforme el procedimiento descrito en el ítem 7.2.2. Antes de la puesta en operación, el cojinete hidrodinámico precisa ser desmontado para evaluar las condiciones del cojinete, y principalmente del casquillo inferior, que estuvo sujeto al peso del rotor de la máquina.



Figura 9: Máquina con cojinete único

7.3 COJINETES DE MÁQUINAS VERTICALES

Los tipos de cojinetes utilizados en máquinas eléctricas girantes con montaje vertical dependen del tamaño, de las características de la máquina eléctrica y de las características de la máquina acoplada a ella. La velocidad de la máquina, el empuje axial impuesto por la carga y el sentido de la carga son los factores preponderantes para esta definición.

Las recomendaciones para conservación de los cojinetes de máquinas verticales durante el almacenamiento varían de acuerdo al tipo de cojinete, conforme sigue:



Figura 10: Ejemplo de máquina eléctrica girante vertical

7.3.1 COJINETES VERTICALES DE RODAMIENTO LUBRICADOS A GRASA

La conservación de los cojinetes de rodamiento a grasa con montaje vertical se basa en la lubricación de sus partes internas, girando el eje de la máquina de 10 a 15 rotaciones cada 2 meses y efectuando la relubricación cada 6 meses de almacenamiento. Tras 2 años de almacenamiento, los rodamientos relubricables deben ser desmontados, lavados y relubricados. Si los rodamientos fueran del tipo blindados, deben ser sustituidos.

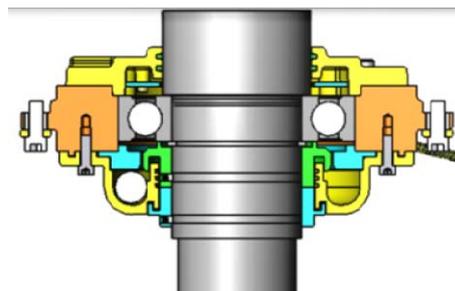


Figura 11: Cojinete lubricado a grasa - superior

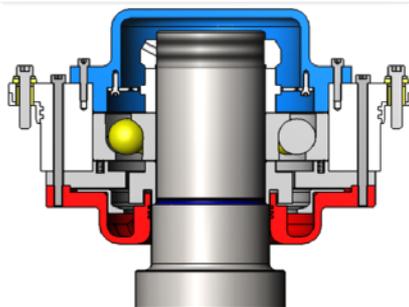


Figura 12: Cojinete lubricado a grasa - inferior

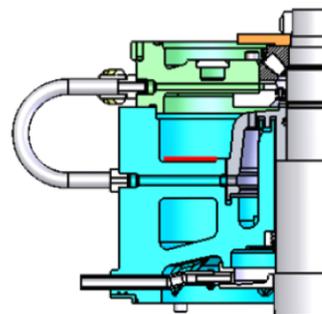


Figura 14: Cojinete de rodamiento vertical lubricado por bombeo de aceite

7.3.2 COJINETES VERTICALES DE RODAMIENTO LUBRICADOS A ACEITE

En máquinas con cojinetes de rodamiento sumergidos en aceite, es permitido hacer el giro del eje haciendo circular el aceite por las partes de contacto.

Los cojinetes de rodamiento no sumergidos en aceite precisan que las partes de contacto sean lubricadas antes de efectuar el giro del eje.

Cuando los cojinetes poseen autobombeo de aceite, la rotación mínima para bombeo de aceite debe ser respetada, por eso, es recomendado que la máquina sea accionada a la rotación nominal para que el aceite sea bombeado hacia los cojinetes y los lubrique.

Los cojinetes con rodamiento no sumergido pueden, inclusive, tener lubricación forzada, a través de una bomba de aceite externa o del sistema de niebla de aceite (oil mist). Para estos casos el sistema de lubricación de los cojinetes precisa ser accionado antes de efectuar el giro del eje de la máquina para mantener lubricadas las partes internas del cojinete.

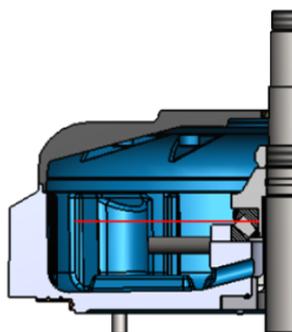


Figura 13: Cojinete de rodamiento vertical lubricado a aceite - sumergido

7.3.3 COJINETES HIDRODINÁMICOS VERTICALES

Las máquinas verticales con cojinetes hidrodinámicos normalmente están compuestas de uno de los cojinetes del tipo guía/escora y otro cojinete guía. El peso del rotor y el empuje de la carga son soportados por las zapatas del cojinete escora y de guía.

Durante el período de almacenamiento, para que sea efectuado el giro del eje recomendado para conservación de los cojinetes, es necesario que el rotor sea suspendido algunos milímetros con una palanca o gato hidráulico para crear la película de aceite entre las zapatas y el runner del cojinete, posibilitando el giro del eje, lo que debe ser hecho cada 2 meses.

En caso de que no sea posible girar el eje de la máquina, se recomienda desmontar los cojinetes, limpiarlos y aplicar un compuesto anticorrosivo. Se recomienda también la aplicación de bolsas de deshumidificador (silica gel) en el interior del cojinete para absorber la humedad.

Montar el cojinete nuevamente, cerrando los orificios roscados y sellando los intersticios entre el eje y el cojinete, a través de cinta adhesiva a prueba de agua, para que no haya penetración de impurezas o humedad.

Todas las bridas (Ej.: entrada y salida de aceite) deben ser selladas.

Repetir este procedimiento cada 6 meses, sustituyendo también los deshumidificadores.

Si el período de almacenamiento es superior a 2 años, se recomienda desmontar el cojinete y preservar las piezas.

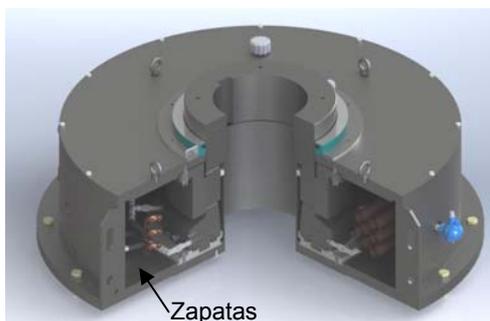


Figura 15: cojinete hidrodinámico vertical (escora y guía)

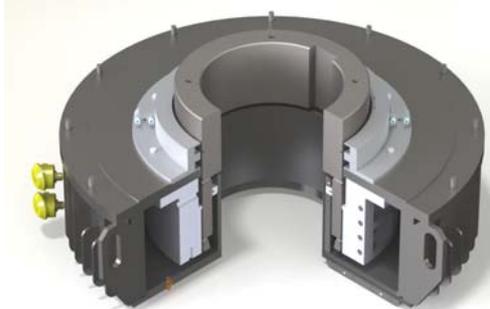


Figura 16: cojinete hidrodinámico vertical (guía)

8 PRESERVACIÓN DEL AISLAMIENTO

8.1 RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Cuando un material aislante separa dos conductores, bajo influencia de una diferencia de potencial, aparecen corrientes de fuga. La resistencia de aislamiento corresponde a la resistencia que el material aislante ofrece al pasaje de esa corriente de fuga, la cual puede circular a través de la masa aislante, o por su superficie.

8.2 EFECTO DE LA HUMEDAD EN EL AISLAMIENTO

Independientemente del estado de limpieza de la superficie del devanado, si la temperatura del mismo está por debajo del punto de condensación del aire ambiente, puede formarse una película de humedad sobre la superficie de aislamiento, lo que puede reducir la resistencia de aislamiento o el índice de polarización. El efecto es más evidente si la superficie está también contaminada, o si existen fisuras en el aislamiento.

Durante el período de almacenamiento, principalmente en ambientes con rápidos cambios de temperatura, el interior de la máquina debe ser mantenido con temperatura de 2 a 3°C por encima de la temperatura ambiente, para evitar la condensación de agua en el interior de la máquina. Esto puede ser logrado, encendiendo la resistencia de calentamiento que normalmente es suministrada como accesorio de la máquina.

Si la máquina no posee resistencia de calentamiento, pueden ser utilizadas lámparas incandescentes u otro tipo de calentador, en el interior de la máquina.

El dren, normalmente localizado en la parte inferior de la máquina, debe ser abierto periódicamente para la remoción de la posible agua condensada.

8.3 CONTROL DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La resistencia de aislamiento de los devanados debe ser medida regularmente durante el almacenamiento de las máquinas para, de esa forma, garantizar que los niveles de humedad y otros factores ambientales no estén provocando daños al aislamiento de los devanados.

El objetivo del control de la resistencia de aislamiento, durante el período de almacenamiento y antes de la puesta en operación, es la obtención de un alerta cuando esta resistencia se reduzca a un nivel en que una falla en el aislamiento pueda ocurrir, cuando el devanado sea energizado con su tensión nominal. Constantes reducciones en los valores de la resistencia de aislamiento indican presencia de humedad y/o suciedad en los devanados y deben ser eliminadas.

8.4 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La medición de la resistencia de aislamiento es realizada con un equipo específico (megóhmetro) para medición de alta resistencia en $M\Omega$.

La alta tensión CC impuesta por el equipo causará un pequeño flujo de corriente (microamperios) a través del devanado y del aislamiento. La intensidad de la corriente eléctrica depende de la tensión aplicada, de la capacitancia del sistema, de la resistencia eléctrica total y de la temperatura del material. Para una tensión fija, cuanto mayor sea la corriente, menor será la resistencia ($U=I \cdot R$, $R=U/I$). La resistencia total es la suma de la resistencia interna del conductor (valor pequeño) más la resistencia del aislamiento en $M\Omega$.

El valor de la resistencia de aislamiento varía inversamente, en base exponencial, a la temperatura del devanado, por eso, durante el test de resistencia de aislamiento, la temperatura del devanado debe ser registrada y el valor de la resistencia de aislamiento medido debe ser referido para 40°C, conforme la curva de la Figura 17, suministrada por la norma NBR 5383/IEEE-43. Las tensiones de test para los devanados, recomendadas por la norma IEEE-43, están mostradas en la Tabla 1:



Tabla 1: Tensiones de test

Tensión nominal del devanado (V)	Test de resistencia de aislamiento - tensión continua (V)
< 1000	500
1000 - 2500	500 - 1000
2501 - 5000	1000 - 2500
5001 - 12000	2500 - 5000
> 12000	5000 - 10000

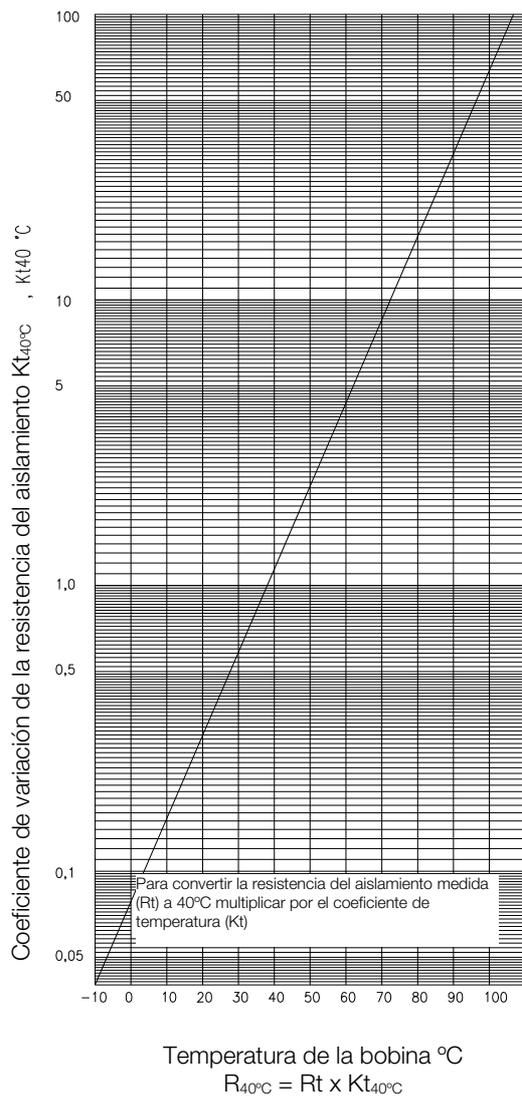


Figura 17: Coeficiente de variación de la resistencia de aislamiento en función de la temperatura

8.4.1 DEVANADOS DEL ESTATOR

Para medir la resistencia de aislamiento de los devanados del estator de la máquina, el medidor (megóhmetro) debe ser conectado entre la carcasa de la máquina y los terminales del estator, conforme el ejemplo de la Figura 18. La carcasa tendrá que estar puesta a tierra. Esta medición normalmente es hecha directamente en la caja de conexión de la máquina.

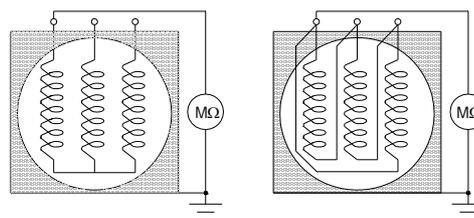


Figura 18: conexión del megóhmetro

Este test no evalúa la integridad del aislamiento entre espiras o entres las fases del devanado, sino las condiciones del aislamiento del devanado en relación a la parte puesta a tierra de la máquina.

8.4.2 DEVANADOS DEL ROTOR

Para medición de la resistencia de aislamiento del devanado del rotor de máquinas síncronas brushless (motores y generadores) es necesario que a máquina posea acceso a la excitatriz. La medición es realizada entre los cables de conexión del rotor y el eje de la máquina. Para eso es necesario soltar los cables del rotor conectados a la rueda de diodos del rotor de la excitatriz.

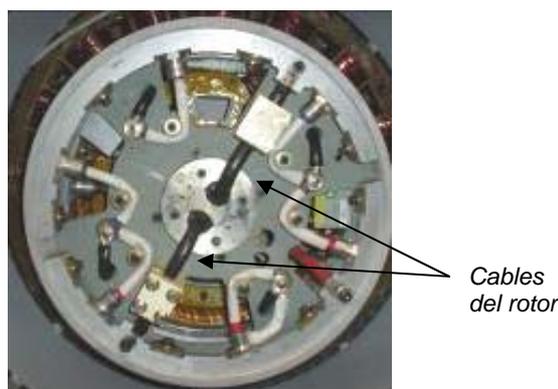


Figura 19: Ejemplo de rueda de diodos de una máquina síncrona brushless

En máquinas que poseen anillos colectores (motores síncronos, generadores síncronos y motores asíncronos de anillos), la medición es realizada entre los anillos colectores y el eje de la máquina. Para eso es necesario levantar o retirar todas las escobillas.

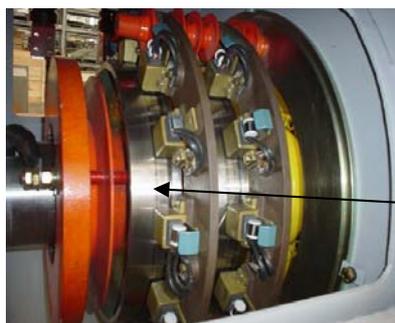
Anillos
colectores

Figura 20: Ejemplo de anillos colectores y escobillas de una máquina síncrona

En máquinas de corriente continua, la medición es hecha entre el conmutador y el eje del motor, con las escobillas levantadas o retiradas de la máquina.



Figura 21: Conmutador de un motor CC

8.4.3 DEVANADOS DE LAS EXCITATRICES DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

En máquinas síncronas brushless, la medición de la resistencia de aislamiento de los devanados del estator de la excitatriz principal y de la excitatriz auxiliar (PMG) puede ser hecha directamente en la caja de conexión, entre los terminales de conexión y la carcasa.

Para medición en el rotor de la excitatriz principal, es necesario desconectar los cables del devanado del rotor principal conectados a los diodos. Soltar también las conexiones del devanado del rotor de la excitatriz en la rueda de diodos. La medición es realizada entre los alambres o cables del devanado del rotor de la excitatriz y la carcasa.

8.4.4 COMPONENTES AISLADOS

Así como los devanados son aislados eléctricamente de la parte estructural de la máquina, otros componentes, como aisladores, portaescobillas y accesorios (resistencia de calentamiento, sensores de temperatura, etc.) también lo son y necesitan ser inspeccionados durante el almacenamiento para, de esa forma,

asegurarse que la resistencia de aislamiento esté dentro de los valores recomendados.

Las tensiones de test utilizadas normalmente para estos componentes son de 500V para resistencia de calentamiento y portaescobillas, y 100V para los demás accesorios. El test de resistencia de aislamiento con aplicación de tensión no es recomendado para los sensores de temperatura.

8.4.5 COJINETES AISLADOS

Algunas máquinas pueden tener uno de los cojinetes aislados, o ambos. Es necesario un buen aislamiento en el cojinete para eliminar la posibilidad de circulación de corriente en el mismo. La corriente puede ser inducida por tensiones del eje, en máquinas grandes.

La verificación de la resistencia de aislamiento del cojinete es una operación hecha en fábrica durante el montaje final y test de la máquina. Durante el almacenamiento de la máquina montada, la medición del aislamiento del cojinete solamente puede ser realizada cuando ambos cojinetes sean aislados. La medición es hecha directamente de cada cojinete hacia el eje, teniéndose el cuidado de retirar la escobilla de puesta a tierra del eje (si existe).

En máquinas en que solamente uno de los cojinetes es aislado, no es posible realizar la medición de la resistencia de aislamiento del cojinete aislado sin que otro cojinete sea desmontado y aislado. En estos casos, la medición es recomendada solamente cuando la máquina sea desmontada para mantenimiento. La resistencia de aislamiento mínima recomendada para cojinetes aislados es de 10k Ω .

8.5 ÍNDICE DE POLARIZACIÓN

Otro método para determinar la calidad del aislamiento de una máquina eléctrica es el test de índice de polarización (IP).

El índice de polarización es la proporción de dos lecturas de tiempo: una es tomada después de 1 minuto y la otra luego después de 10 minutos del inicio del test.

Los resultados del índice de polarización son obtenidos dividiéndose el valor de test de 10 minutos por el valor de test de 1 minuto. Un valor bajo de índice de polarización indica problemas con el aislamiento. El ítem 8.7 muestra el valor mínimo recomendado para IP, según la norma IEEE-43.



8.6 TEST DE ABSORCIÓN DIELECTRICA

El test de tiempo puede ser realizado en máquinas eléctricas, independientemente del tamaño y de la temperatura. La tensión de test es aplicada en un período de 10 minutos, con los datos registrados cada 10 segundos, del primero al último minuto. La interpretación de la curva de la resistencia de aislamiento, en función del tiempo, determina la condición del aislamiento.

Cuando el aislamiento es adecuado, la resistencia de aislamiento comienza baja y crece a medida que la corriente de fuga capacitiva disminuye, conforme la curva mostrada en la Figura 22. Este test es particularmente valioso para determinar el grado de humedad y de entrada de aceite que genera corrientes de fuga y eventualmente circuitos en cortocircuito, causando un efecto de achatamiento en la curva de absorción dieléctrica mostrada en la Figura 22.

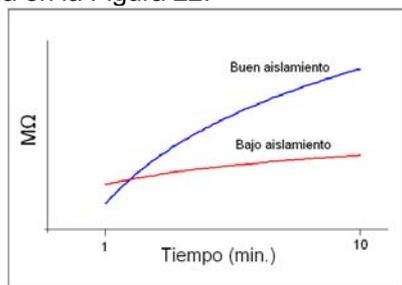


Figura 22: Absorción dieléctrica

8.7 EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO

De acuerdo con la norma IEEE-43, el valor mínimo recomendado para resistencia de aislamiento e índice de polarización, en máquinas eléctricas girantes, referido para 40°C, debe ser considerado conforme la Tabla 2:

Tabla 2 Valores mínimos de RI e IP

Devanado testeado	RI1min
Fabricado antes de 1970	kV + 1
Fabricado después de 1970	100MΩ
Devanados en general con kV < 1.	5MΩ
Índice de polarización (IP) mínimo = 2	

8.8 MÉTODOS DE SECADO DE LOS DEVANADOS

8.8.1 PREMISAS

Si el valor de la resistencia de aislamiento medida es menor que los valores recomendados en la Tabla 2 y la causa determinante de eso es la humedad, los devanados deben ser sometidos a un procedimiento de secado. La temperatura final recomendada para secado de devanados aislados es de 120°C.

En todos los procedimientos de secado, la resistencia de aislamiento y la temperatura de los devanados deben ser monitoreadas durante todo el proceso. La temperatura del devanado no debe sobrepasar la temperatura máxima de la clase de aislamiento. El procedimiento puede ser finalizado cuando los valores de resistencia de aislamiento se tornen constantes.

8.8.2 SECADO EN ESTUFA

El secado del devanado en estufa exige que la máquina sea desmontada y que solamente la parte donde el devanado (rotor, estator, etc.) se encuentra deba ser sometida al proceso de secado.

La temperatura debe ser aumentada gradualmente hasta alcanzar el valor deseado. El incremento de temperatura recomendado es de un máximo de 30°C por hora.

Para evitar la formación de vapor en el interior del devanado, se recomienda mantener la temperatura de 80°C por aproximadamente 6 horas, antes de alcanzar la temperatura máxima de secado (120°C).

8.8.3 SECADO CON CALENTADORES ELÉCTRICOS INTERNOS

El proceso consta en aplicar calor dentro de la carcasa de la máquina, sin necesidad de desmontarla, a través de lámparas incandescentes o calentadores eléctricos, direccionando un ventilador o extractor en el devanado para retirada de la humedad. No son recomendados, para este proceso, calentadores radiantes que generan calor a través de ondas infrarrojas, ya que algunas partes del devanado pueden calentarse de más y quemarse antes que otras partes del devanado alcancen la temperatura deseada.

8.8.4 SECADO CON AIRE CALIENTE FORZADO

Para utilizar el proceso de secado del devanado, utilizando aire caliente forzado, es necesario construir un sistema con ducto y calentadores eléctricos.

Este dispositivo es instalado en una de las entradas de aire de la máquina (máquinas abiertas) o a través de una de las aberturas para inspección (máquinas cerradas), donde el lado opuesto debe tener una abertura para salida de aire. El aire caliente es soplado hacia el interior de la máquina, pasando a través de los devanados secándolos y retirando la humedad.

En este proceso no es necesario desmontar la máquina.



8.8.5 SECADO POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA

Uno de los medios más eficaces de secado de los devanados de una máquina eléctrica es por la circulación de corriente a través de estos devanados.

Entre los métodos recomendados está el de la aplicación de tensión en los terminales del devanado, a través de una fuente de tensión continua (12 ó 24 Vcc) con capacidad para alta corriente y posibilidad de ajuste de tensión (normalmente son utilizadas máquinas de soldar). También pueden ser utilizadas fuentes de corriente alterna, pero solamente cuando exista la posibilidad de remoción del rotor del interior de la máquina para impedir su calentamiento excesivo. En generadores y motores síncronos, la circulación de corriente puede ser hecha con la máquina funcionando como generador y con los terminales del devanado del estator conectados en cortocircuito.

8.8.5.1 SECADO DE LOS DEVANADOS DEL ESTATOR

El procedimiento de secado de los devanados del estator de máquinas eléctricas girantes, en general (motores y generadores) puede ser hecho con la máquina parada y sin desmontarla.

Los devanados deben ser conectados en serie para que la misma corriente circule a través de todos los devanados.

La tensión CC debe ser aplicada en los devanados y elevada lentamente hasta alcanzar alrededor de 15% a 25% de la corriente nominal del devanado. Mantener la tensión en este nivel y monitorear la elevación de la temperatura a través de los sensores de temperatura. Cuando la temperatura del devanado se estabilice, aumentar la tensión gradualmente, de tal forma que el incremento de temperatura permanezca en el orden de 30°C por hora.

Al alcanzar 80°C, mantenga esa temperatura del devanado por aproximadamente 6 horas y posteriormente aumentarla hasta alcanzar la temperatura máxima de secado (120°C), permaneciendo por más 2 ó 3 horas hasta que el devanado esté totalmente seco.

En devanados trifásicos, con solamente 3 terminales accesibles, la aplicación de la corriente debe ser realizada entre una de las fases y las otras dos conectadas en paralelo, alternando la conexión de las fases a cada hora. La fase conectada sola tendrá el doble de la corriente de las demás y su temperatura deberá ser preferentemente monitoreada y controlada.

8.8.5.2 SECADO POR EL MÉTODO DE CORTOCIRCUITO

Específicamente, para máquinas síncronas (motores y generadores), puede ser utilizada una de las formas más simples y económicas de secado de los devanados.

Para eso, la máquina debe ser accionada por la máquina primaria (turbina, motor diesel, etc.), girando en las condiciones de funcionamiento normales de rotación, lubricación de los cojinetes y refrigeración, pero sin carga.

Los terminales del estator son conectados en cortocircuito y la excitación (campo) es accionada gradualmente en el modo manual, de tal forma que la corriente del estator también aumente de forma gradual.

De la misma forma que los otros procedimientos, el incremento de temperatura ideal para secado del devanado es de 30°C por hora y, para eso, el procedimiento debe comenzar con la corriente del estator en el orden de 15% a 25% de la corriente nominal del devanado, y aumentando gradualmente.

La temperatura del devanado debe ser monitoreada a través de los sensores de temperatura y no debe sobrepasar 120°C al final del proceso.

Con el giro del rotor, el aire circula internamente y ayuda a expulsar la humedad hacia fuera de la máquina.

Este método se muestra bastante eficaz, ya que permite secar tanto el estator como el rotor de la máquina.

8.8.5.3 SECADO DE LOS DEVANADOS DE ROTORES

Para ejecutar el secado por circulación de corriente, en devanados de rotores de generadores y motores síncronos, los cuales no poseen sensores para monitoreo de temperatura, es necesario calcular la temperatura del devanado durante el procedimiento de secado.

Haciendo un registro preciso de la resistencia óhmica del devanado y de la temperatura, antes de iniciar el procedimiento, es posible calcular la temperatura media del devanado. A través de una medición precisa, en intervalos de tiempo regulares, de la corriente eléctrica y de la tensión continua aplicada durante el procedimiento de secado, conforme sigue:

- Cálculo de la resistencia óhmica del devanado:

$$R_e = V_{cc} / I_{cc}$$

Donde

R_e = resistencia del devanado en Ω



Vcc = Tensión aplicada en V
Icc = Corriente continua medida en A

- Cálculo de la temperatura media del devanado:
$$T_e = [(Re-R1) / R1] \cdot (235+t1) + t1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde:

Te = temperatura media del devanado [°C];
t1 = temperatura del devanado antes del procedimiento (prácticamente igual a la del medio refrigerante) [°C];
R1 = resistencia óhmica del devanado medida antes del procedimiento [Ω];
Re = resistencia óhmica del devanado, medida durante el procedimiento [Ω].

Medir la resistencia de aislamiento al final del procedimiento de secado, asegurándose de que esté dentro de los valores recomendados por la norma IEEE-43.

La tensión no debe ser aplicada a través de los anillos colectores, sino directamente en los cables del devanado del rotor.

Este procedimiento no es aplicado para rotores bobinados de motores de inducción (motores de anillos) ni motores de corriente continua.

8.8.5.4 CUIDADOS EN EL SECADO DE DEVANADOS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTE

Se debe prestar atención a los siguientes aspectos del procedimiento de secado por circulación de corriente:

- Cada máquina posee características específicas, por tanto, antes de iniciar el procedimiento de secado, el fabricante de la máquina debe ser siempre consultado a fin de definir los criterios para ejecución del procedimiento (tensión, corriente, temperatura), etc.
- El proceso debe ser hecho solamente cuando sea constatado que la humedad en los devanados es la causa del bajo aislamiento de la máquina.
- Cuando el devanado esté muy húmedo, primeramente debe ser realizado un presecado con aire caliente forzado.
- En ninguna fase del proceso, la temperatura en los devanados podrá sobrepasar la temperatura máxima de (120°C).
- El incremento de temperatura en el devanado no debe sobrepasar 30° por hora.
- Al alcanzar 80°C, se debe mantener esa temperatura del devanado por

aproximadamente 6 horas y posteriormente aumentarla hasta alcanzar la temperatura máxima de secado (120°C), permaneciendo por más 2 ó 3 horas hasta que el devanado esté totalmente seco.

- El trabajo debe ser realizado por personas experimentadas y con profundo conocimiento del proceso, ya que la aplicación incorrecta de corriente o el control inadecuado de la temperatura del devanado puede causar daños, o inclusive, la quema completa del devanado.

9 PREPARACIÓN PARA PUESTA EN OPERACIÓN

Para garantizar el buen funcionamiento de una máquina eléctrica girante, que haya permanecido almacenada o parada durante un largo período, deben ser seguidos algunos procedimientos, antes de ponerla en operación:

- La máquina debe ser retirada del embalaje con cuidado, evitando daños a la pintura o a las partes externas mecanizadas;
- Inspeccionar la máquina externamente, principalmente la pintura, partes mecanizadas, bridas, eje;
- Efectuar una limpieza completa de la máquina, y remover la protección anticorrosión de las partes mecanizadas externas;
- Los cojinetes deben ser inspeccionados y lubricados, antes de la puesta en operación;
- La resistencia de aislamiento de los devanados debe ser medida y respetar los valores mínimos recomendados por la norma IEEE-43;
- En máquinas con escobillas, inspeccionar los anillos colectores, o el conmutador, y recolocar las escobillas en los portaescobillas asegurándose del libre movimiento de las mismas dentro de los alojamientos;
- Verificar el funcionamiento de todos los accesorios;
- La traba del eje debe ser retirada y guardada para ser utilizada cuando la máquina necesite ser transportada.

10 EJEMPLOS DE PROBLEMAS DE MÁQUINAS ALMACENADAS SIN LOS DEBIDOS CUIDADOS

Los ejemplos a seguir tienen el objetivo de mostrar algunos problemas ocurridos en máquinas eléctricas girantes almacenadas o paradas por largos períodos, sin los debidos cuidados.



Figura 23: Corrosión estática en la pista externa del rodamiento

La Figura 23 muestra un rodamiento con marcaciones significativas de corrosión. La corrosión en el rodamiento puede ocurrir debido a que el lubricante no posee inhibidores de herrumbre y corrosión adecuados, para proteger las superficies metálicas, o por la falta lubricación de las piezas metálicas, cuando los componentes móviles del rodamiento permanecen estáticos por mucho tiempo (sin girar).



Figura 24: Impresiones superficiales (false brinelling)

La Figura 24 muestra la pista interna de un rodamiento con marcaciones superficiales equidistantes. Este tipo de falla es causada por la vibración del rodamiento en una posición estática, lo que hace que los elementos rodantes vibren contra la pista en un sólo lugar. Con el pasar del tiempo esto puede llegar a remover pequeños pedazos de superficies metálicas.



Figura 25: Marcación en el casquillo

La Figura 25 muestra la falla en el casquillo inferior de un cojinete hidrodinámico, causada por el peso del eje. Este tipo de falla ocurre cuando el eje permanece durante un largo período estático, sin formación de la camada de aceite entre la superficie deslizante del eje y el casquillo del cojinete.



Figura 26: Humedad en los devanados

La Figura 26 muestra los devanados con gotas de humedad formada por la condensación de agua en el interior de la máquina. Este tipo de falla ocurre cuando el ambiente de almacenamiento sufre variaciones significativas de temperatura y no son utilizados calentadores internos para mantener la temperatura interna de la máquina superior a la temperatura ambiente. La humedad causa la reducción de la resistencia de aislamiento de los devanados.



Figura 27: Corrosión en el eje

La Figura 27 muestra el eje con señales significativas de herrumbre y corrosión. Esto ocurre cuando la pieza mecanizada permanece expuesta en ambiente húmedo o contaminado, sin ningún tipo de protección anticorrosiva.

11 RECOMENDACIONES

Las sorpresas desagradables, causadas por fallas presentadas durante el comisionamiento y puesta en funcionamiento de máquinas eléctricas girantes, pueden y deben ser evitadas con procedimientos correctos de inspección y mantenimiento, durante el período de almacenamiento.

Un buen plan de mantenimiento durante el almacenamiento debe contemplar inspecciones visuales, limpieza, test de resistencia de aislamiento e índice de polarización, preservación de los cojinetes, conexión de la resistencia de calentamiento, inspección de la pintura y partes mecanizadas expuestas, aplicación de anticorrosivo, y demás procedimientos informados por el fabricante de la máquina.



12 CONCLUSIÓN

Los tipos de máquinas eléctricas girantes varían significativamente, conforme su tamaño, componentes, montaje, aplicación y funcionamiento.

Guardadas las debidas proporciones y especialidades, todas las máquinas eléctricas girantes precisan de cuidados, tanto en el almacenamiento como en la puesta en operación. Los tópicos presentados en este artículo ofrecen orientaciones y recomendaciones para un correcto almacenamiento de los principales tipos de máquinas eléctricas girantes de mediano porte. No obstante, también es necesario que las características específicas de cada máquina, así como las instrucciones de los fabricantes, sean evaluadas y seguidas con atención.

13 REFERENCIAS

- [1] IEEE-43 – Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [2] Fowle, Frank Fuller; Knowlton, A. E. Standard Handbook for Electrical Engineers, 7th edition, Washington.
- [3] Storage of Electric Motors, IEEE, 1995.
- [4] Electric Motor Storage: Protecting Your Investment, IEEE, 2011.
- [5] Test de Resistencia de Aislamiento – Fluke / Vortex.
- [6] Guide to Electric Motor Bearing Lubrication – Exxon Mobil, catalog nr. 02-F2003767, USA, 2002.