



Armazenagem de máquinas elétricas girantes de médio porte

Jorge Luis Morales Gularte
WEG
Brasil
gularte@weg.net

Resumo – As máquinas elétricas girantes utilizadas nas mais diversas aplicações são fornecidas nas condições ideais de funcionamento e, em princípio, deveriam operar o quanto antes possível. Dependendo da aplicação, a máquina pode ficar armazenada por semanas, meses e até anos, até que seja instalada e comece a operar. Isto pode ocasionar alterações nas suas propriedades elétricas e mecânicas. Muitos fatores influenciam nas propriedades da máquina durante o período de armazenagem, como por exemplo, temperatura ambiente, umidade, poluição, agentes corrosivos, maresia, vibração, etc. As áreas de manutenção das empresas estão cada vez mais adotando medidas preventivas para evitar problemas operacionais quando da colocação em operação ou substituição de motores ou geradores elétricos.

Os principais efeitos provocados por longos períodos de armazenagem são a corrosão das partes usinadas, danos nos mancais e a redução da resistência de isolamento dos enrolamentos.

É muito importante que os usuários tenham consciência de que a manutenção preventiva durante a armazenagem é tão importante quanto a manutenção durante o funcionamento de suas máquinas. Vários procedimentos e medidas devem fazer parte do plano de manutenção para armazenagem de máquinas. Neste artigo serão abordados os problemas que podem ocorrer com as máquinas elétricas girantes de médio porte sujeitas a longos períodos de armazenagem e os cuidados que devem ser tomados para que estes problemas não ocorram ou sejam minimizados.

Entende-se por médio porte, máquinas elétricas com tamanho de carcaça IEC de 280 a 1250 e tamanho de carcaça NEMA 44 a 200.

ÍNDICE DE TERMOS: MÁQUINAS ELÉTRICAS, ARMAZENAGEM, MANUTENÇÃO:

1 INTRODUÇÃO

São várias as situações em que os usuários de máquinas elétricas girantes necessitam armazená-las ou permanecer com as mesmas paradas por longos períodos. Dentre elas pode-se destacar:

- A necessidade cada vez maior das indústrias manterem máquinas sobressalentes em estoque para evitar paradas prolongadas para manutenção e manter seus processos de fabricação em operação;
- A construção de novas plantas industriais ou usinas de geração de energia que necessitam permanecer com suas máquinas armazenadas até o início das operações;
- Paradas prolongadas para manutenção.

Pode-se considerar “armazenagem prolongada” quando uma máquina permanece parada por um período superior a 2 meses e, portanto, já requer cuidados especiais de manutenção.

Por isso, as empresas estão buscando cada vez mais informações e planejando não só a manutenção das máquinas em operação, como também das que estão paradas.

Um bom plano de manutenção preventiva pode evitar muitos problemas no momento do

comissionamento e colocação em operação de máquinas paradas por longos períodos.

Máquinas com características construtivas especiais muitas vezes requerem cuidados específicos durante a armazenagem.

Partes e peças fornecidas separadamente da máquina também requerem cuidados especiais quando armazenadas por longos períodos.

Neste artigo são mencionadas as partes construtivas que requerem manutenção, os procedimentos que devem ser adotados para manutenção durante a armazenagem, bem como os cuidados antes da colocação em operação de motores de indução, motores e geradores síncronos, motores e geradores de corrente contínua, nas construções horizontal e vertical, utilizadas nas mais diversas aplicações.

Todas as inspeções e procedimentos devem ser realizados por pessoas experientes e com profundo conhecimento em máquinas elétricas girantes.



2 PARTES CONSTRUTIVAS

A Figura 1 mostra o exemplo de um motor de indução em corte enumerando as principais peças que normalmente fazem parte de uma máquina elétrica girante, conforme segue:

1. Carcaça
2. Estator
3. Rotor
4. Mancal
5. Eixo
6. Ventiladores
7. Trocador de calor ar-ar



Figura 1: Peças de um motor de indução

3 ARMAZENAGEM PROLONGADA

Quando armazenada por um longo período antes da colocação em operação, a máquina fica exposta a influências externas, como flutuações de temperatura, umidade, agentes agressivos, etc. As partes externas usinadas como eixo, flanges e os espaços vazios no interior da máquina, como os dos mancais, da caixa de ligação e dos enrolamentos, ficam expostos a estes agentes. Como consequência, após períodos prolongados de armazenagem, a resistência de isolamento dos enrolamentos pode diminuir, os mancais e as partes usinadas podem oxidar e as propriedades do lubrificante dos mancais podem ser alteradas. Todas estas influências aumentam o risco de falhas no funcionamento ou danos na máquina durante a colocação em operação.

4 LOCAL DE ARMAZENAGEM

Preferencialmente as máquinas elétricas girantes devem ser armazenadas em local fechado, coberto, limpo, ventilado, isento de umidade e agentes corrosivos, assim como, isentos de vibração e variações bruscas de temperatura. É necessário também que o local de armazenagem possua rede elétrica para alimentação das resistências de aquecimento. O espaço ao redor de cada máquina armazenada

deve ser suficiente para que o operador de manutenção possa ter acesso fácil para realizar as inspeções e testes periódicos necessários.

5 ARMAZENAGEM EXTERNA

Não é recomendado que as máquinas elétricas girantes sejam armazenadas em ambientes abertos e sem cobertura, pois a ação do tempo ocasiona sérios danos nestes equipamentos. Se esta situação não puder ser evitada, algumas medidas de proteção devem ser tomadas, tais como, colocar a embalagem sobre estrados ou fundações para evitar que se afunde no solo, cobrir completamente a embalagem com uma lona ou plástico resistente e providenciar uma cobertura (telhado) para evitar a ação direta da chuva, sol, neve, poeira, maresia ou outro agente nocivo à máquina.

6 INSPEÇÕES

Para que sejam mantidas as características originais e para evitar problemas durante a colocação em operação, as máquinas armazenadas devem ser inspecionadas periodicamente e os registros das inspeções devem ser arquivados.

6.1 INSPEÇÃO DA PINTURA

Além da função estética, a pintura serve também como proteção contra corrosão. A inspeção da pintura deve ser feita periodicamente durante o período de armazenagem das máquinas e reparada quando necessário.

6.2 INSPEÇÃO DAS PARTES USINADAS

As superfícies usinadas expostas das máquinas devem ser revestidas com um agente anticorrosivo.

Este agente deve permanecer nestas superfícies até a instalação da máquina e, repostado sempre que for necessário.

Para remoção desta proteção durante a instalação da máquina, utiliza-se um diluente alquídico específico.



Figura 2: Anti-corrosivo nas partes usinadas

6.3 INSPEÇÃO DAS CAIXAS DE LIGAÇÃO

Durante as inspeções periódicas das máquinas armazenadas, as caixas de ligação precisam ser inspecionadas com o objetivo de detectar quaisquer sinais de umidade, corrosão ou falhas na vedação.

A vedação da tampa não devem permitir a passagem de umidade ou sujeira para o interior da máquina.

Inspecionar os isoladores, conectores e barras de ligação dos condutores e substituir os que apresentarem sinais de trincas, pedaços quebrados ou outros danos físicos.

As caixas de ligação que apresentarem sinais de corrosão devem ser recuperadas ou substituídas antes de efetuar qualquer ligação elétrica.



Figura 3: Caixas de ligação

6.4 INSPEÇÃO DAS ESCOVAS

Quando a máquina possuir escovas elétricas, estas devem ser levantadas no porta-escovas ou retiradas da máquina durante o período em que ficar armazenada, evitando assim marcações ou corrosão dos anéis coletores ou comutador.

Os anéis coletores devem ser cobertos com parafina ou um fino filme de óleo. É importante lembrar-se de remover completamente esta proteção antes de colocar a máquina em operação.



Figura 4: Escovas retiradas dos porta-escovas

7 PRESERVAÇÃO DOS MANCAIS

Os mancais possuem peças de contato metálico deslizante que requerem condições excepcionais para o seu bom funcionamento e por consequência o da máquina. Por isso, é um dos itens de manutenção mais importantes durante a armazenagem.

A condição ideal de conservação do mancal é quando está em funcionamento, girando e lubrificando seus componentes.

Na condição estática, se não forem seguidos os procedimentos de manutenção e conservação, a ação do tempo pode causar danos aos mancais que serão identificados por falha de funcionamento quando a máquina entrar em operação.

Neste capítulo, são relacionados os principais tipos de mancais, posições de montagem e os cuidados requeridos durante o período de armazenagem ou parada da máquina.

7.1 TRAVA PARA TRANSPORTE

Para evitar danos nos mancais durante o manuseio e transporte das máquinas, deve ser utilizada uma trava no eixo, conforme exemplo mostrado na Figura 5, mantendo-a durante o período de armazenagem e retirando-a para os procedimentos de manutenção dos mancais.

Após o procedimento preditivo ter sido finalizado, se a máquina permanecer armazenada, o dispositivo de trava do eixo deve ser instalado novamente e retirado quando a máquina for instalada.



Figura 5: Trava do eixo

7.2 MANCAIS DE MÁQUINAS HORIZONTAIS

7.2.1 MANCAIS DE ROLAMENTO

A Figura 6 mostra um mancal de rolamento com lubrificação à graxa e a Figura 7 mostra um mancal de rolamento com lubrificação a óleo. Os mancais de rolamentos são lubrificados na fábrica para realização dos ensaios na máquina e o lubrificante deve permanecer nos mancais durante todo o período de armazenagem. Caso os mancais de rolamento a óleo tenham sido transportados sem óleo, estes devem ser preenchidos com o tipo e nível de óleo especificado pelo fabricante para manter a máquina armazenada.

Para lubrificar e conservar as partes internas dos mancais é recomendável que o eixo da máquina seja girado de 10 a 15 rotações a cada 2 meses. Para isso, é necessário retirar a trava do eixo. Após 6 meses de armazenagem, os mancais precisam ser relubrificados e após 2 anos recomenda-se desmontar, lavar e inspecionar e relubrificar os mancais.

Os fabricantes de rolamentos recomendam que rolamentos blindados, que não permitem relubrificação, sejam substituídos após 2 anos de armazenagem.



Figura 6: Mancal de rolamento a graxa



Figura 7: Mancal de rolamento a óleo

7.2.2 MANCAIS HIDRODINÂMICOS

Os mancais hidrodinâmicos, também conhecidos como mancais de deslizamento ou mancais de bucha, são lubrificados na fábrica para realização dos ensaios na máquina e o lubrificante deve permanecer nos mancais durante todo o período de armazenagem.

Caso os mancais tenham sido transportados sem óleo, devem ser preenchidos com o tipo e nível de óleo especificado pelo fabricante para manter a máquina armazenada.

O procedimento de conservação do mancal hidrodinâmico durante o período de armazenagem pode variar de acordo com o tipo de mancal. Para o tipo mais comum, com depósito de óleo e anel pescador, o procedimento recomendado é girar o eixo de 10 a 15 rotações com velocidade de no mínimo 30rpm a cada 2 meses.

Os mancais hidrodinâmicos com cárter seco e sem anel pescador necessitam de lubrificação forçada para seu funcionamento, assim como, para que seja efetuado o giro do eixo recomendado durante a armazenagem, o sistema de lubrificação externa ou o sistema de óleo de alta pressão (jacking), quando houver, precisa estar ligado.

Se não for possível girar o eixo da máquina, recomenda-se desmontar os mancais, limpá-los e aplicar um composto anticorrosivo, nos casquilhos, superfície de contato do eixo e partes internas do mancal. Também é recomendado colocar bolsas de desumidificadores (sílica-gel) no seu interior para absorver a umidade.

Montar novamente o mancal e, para evitar a penetração de umidade e impurezas, é necessário selar completamente o mancal, fechando os furos roscados e selando os interstícios entre eixo e mancal com fita adesiva a prova d'água.

Para conservar as partes internas do mancal, este procedimento deve ser repetido a cada 6 meses de armazenagem e após 2 anos recomenda-se desmontar o mancal e preservar as peças.

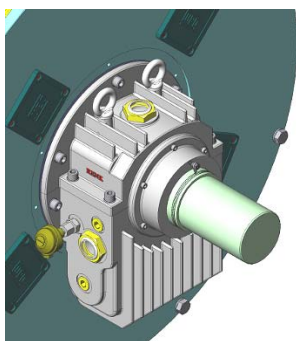


Figura 8: Mancal hidrodinâmico

7.2.3 MÁQUINAS COM MANCAL ÚNICO

Para algumas aplicações específicas, as máquinas elétricas podem ter mancal somente na parte traseira, sendo o acoplamento feito pelos eixos e flanges das máquinas acopladas.

Devido ao fato de a máquina não possuir mancal dianteiro, o eixo permanece travado durante o período de armazenagem e a trava somente é retirada no momento da instalação.

Se o mancal traseiro for de rolamento, este precisa ser relubricado a cada 6 meses e antes da entrada em operação, é necessária também uma avaliação das condições do rolamento antes de colocar a máquina em funcionamento.

Se o mancal traseiro for do tipo hidrodinâmico, a conservação do mancal baseia-se na proteção dos casquilhos, da superfície de contato do eixo e das partes internas do mancal com a aplicação de anticorrosivo, assim como a utilização de desumidificadores e selagem do mancal, conforme procedimento descrito no item 7.2.2. Antes da entrada em operação, o mancal hidrodinâmico precisa ser desmontado para avaliar as condições do mancal e principalmente do casquilho inferior, que esteve sujeito ao peso do rotor da máquina.



Figura 9: Máquina com mancal único

7.3 MANCAIS DE MÁQUINAS VERTICAIS

Os tipos de mancais utilizados em máquinas elétricas girantes com montagem vertical dependem do tamanho, das características da máquina elétrica e das características da máquina acoplada a ela. A velocidade da máquina, o empuxo axial imposto pela carga e o sentido da carga são os fatores preponderantes para esta definição.

As recomendações para conservação dos mancais de máquinas verticais durante a armazenagem variam de acordo com o tipo de mancal, conforme segue:



Figura 10: Exemplo de máquina elétrica girante vertical

7.3.1 MANCAIS VERTICAIS DE ROLAMENTO LUBRIFICADOS A GRAXA

A conservação dos mancais de rolamento a graxa com montagem vertical, baseia-se na lubrificação de suas partes internas, girando o eixo da máquina de 10 a 15 rotações a cada 2 meses e efetuando a relubrificação a cada 6 meses de armazenagem. Após 2 anos de armazenagem os rolamentos relubrificáveis devem ser desmontados, lavados e relubricados e, se os rolamentos forem do tipo blindados, devem ser substituídos.

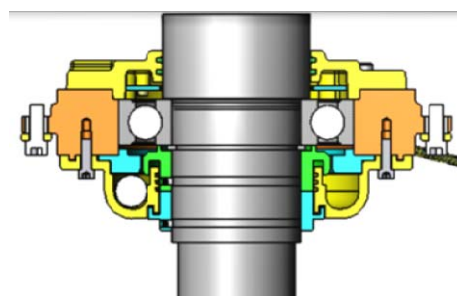


Figura 11: Mancal lubrificado a graxa - superior

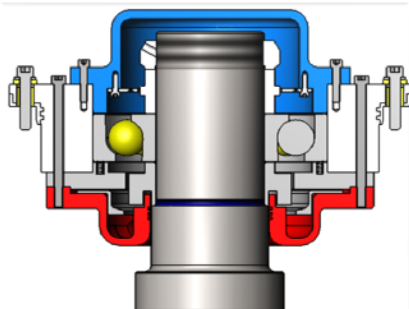


Figura 12: Mancal lubrificado a graxa - inferior

7.3.2 MANCAIS VERTICAIS DE ROLAMENTO LUBRIFICADOS A ÓLEO

Em máquinas com mancais de rolamento submerso em óleo, é permitido fazer o giro do eixo fazendo circular o óleo pelas partes de contato. Os mancais de rolamento não submerso em óleo precisam que as partes de contato sejam lubrificadas antes de efetuar o giro do eixo. Quando os mancais possuem auto-bombeamento de óleo, a rotação mínima para bombeamento de óleo deve ser respeitada, por isso, é recomendado que a máquina seja acionada na rotação nominal para que o óleo seja bombeado para os mancais e lubrificá-los.

Os mancais com rolamento não submerso podem ainda ter lubrificação forçada através de uma bomba de óleo externa ou sistema de névoa de óleo (oil mist). Para estes casos o sistema de lubrificação dos mancais precisa ser acionado antes de efetuar o giro do eixo da máquina para manter lubrificadas as partes internas do mancal.

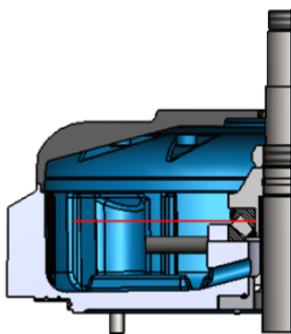


Figura 13: Mancal de rolamento vertical lubrificado a óleo - submerso

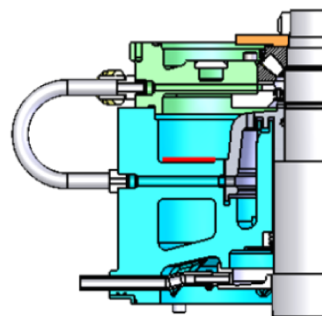


Figura 14: Mancal de rolamento vertical lubrificado por bombeamento de óleo

7.3.3 MANCAIS HIDRODINÂMICOS VERTICAIS

Máquinas verticais com mancais hidrodinâmicos normalmente são compostas com um dos mancais do tipo guia/escora e outro mancal guia. O peso do rotor e o empuxo da carga são suportados pelas sapatas do mancal escora e guia. Durante o período de armazenagem, para que seja efetuado o giro do eixo recomendado para conservação dos mancais, é necessário que o rotor seja suspenso alguns milímetros com uma alavanca ou macaco hidráulico para criar o filme de óleo entre as sapatas e o runner do mancal, possibilitando assim o giro do eixo que deve ser feito a cada 2 meses.

Caso não seja possível girar o eixo da máquina, recomenda-se desmontar os mancais, limpá-los e aplicar um composto anticorrosivo. Recomenda-se também a aplicação de bolsas de desumidificador (sílica gel) no interior do mancal para absorver a umidade.

Montar o mancal novamente, fechando os furos roscados e selando os interstícios entre o eixo e o mancal através de fita adesiva à prova d'água para não haver penetração de impurezas e umidade.

Todos os flanges (ex.: entrada e saída de óleo) devem ser selados.

Repetir este procedimento a cada 6 meses, substituindo também os desumidificadores.

Se o período de armazenagem for superior a 2 anos, recomenda-se desmontar o mancal e preservar as peças.

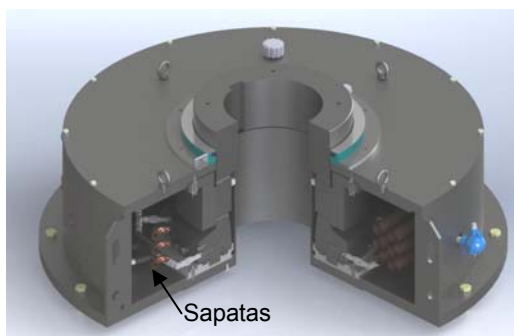


Figura 15: Mancal hidrodinâmico vertical (escora e guia)

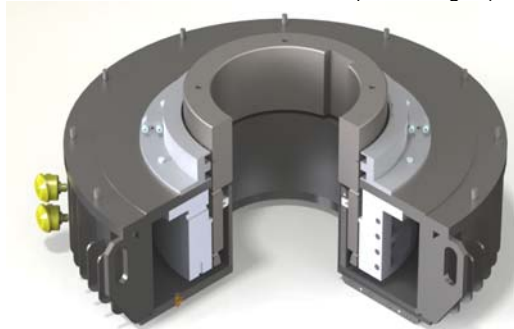


Figura 16: Mancal hidrodinâmico vertical (guia)

8 PRESERVAÇÃO DO ISOLAMENTO

8.1 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Quando um material isolante separa dois condutores sob influência de uma diferença de potencial, aparecem correntes de fuga. A resistência de isolamento corresponde à resistência que o material isolante oferece à passagem dessa corrente de fuga, a qual pode circular através da massa isolante ou pela sua superfície.

8.2 EFEITO DA UMIDADE NO ISOLAMENTO

Independentemente do estado de limpeza da superfície do enrolamento, se a temperatura do enrolamento estiver abaixo do ponto de condensação do ar ambiente, uma película de umidade pode se formar sobre a superfície de isolamento, o que pode reduzir a resistência de isolamento ou índice de polarização. O efeito é mais evidente se a superfície está também contaminada, ou se houver fissuras no isolamento. Durante o período de armazenagem, principalmente em ambientes com rápidas mudanças de temperatura, o interior da máquina deve ser mantido com temperatura de 2 a 3°C acima da temperatura ambiente para evitar a condensação de água no interior da máquina. Isto pode ser conseguido ligando a resistência de aquecimento que normalmente é fornecida como acessório da máquina.

Se a máquina não possuir resistência de aquecimento, podem ser utilizadas lâmpadas incandescentes ou outro tipo de aquecedor no interior da máquina.

O dreno, normalmente localizado na parte inferior da máquina, deve ser aberto periodicamente para a remoção da possível água condensada.

8.3 CONTROLE DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

A resistência de isolamento dos enrolamentos deve ser medida regularmente durante a armazenagem das máquinas para garantir que os níveis de umidade e outros fatores ambientais não estão provocando danos ao isolamento dos enrolamentos.

O objetivo do controle da resistência de isolamento durante o período de armazenagem e antes da entrada em operação é a obtenção de um alerta quando esta resistência reduzir para um nível em que uma falha no isolamento pode ocorrer quando o enrolamento for energizado com sua tensão nominal.

Constantes reduções nos valores da resistência de isolamento indicam presença de umidade e/ou sujeira nos enrolamentos e devem ser eliminadas.

8.4 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

A medição da resistência de isolamento é feita com um equipamento específico (megômetro) para medição de alta resistência em MΩ. A alta tensão CC imposta pelo equipamento causará um pequeno fluxo de corrente (micro-ampères) através do enrolamento e da isolação. A intensidade da corrente elétrica depende da tensão aplicada, da capacitância do sistema, da resistência elétrica total e da temperatura do material.

Para uma tensão fixa, quanto maior a corrente, menor a resistência ($U=I.R$, $R=U/I$). A resistência total é a soma da resistência interna do condutor (valor pequeno) mais a resistência da isolação em MΩ.

O valor da resistência de isolamento varia inversamente, em base exponencial, à temperatura do enrolamento, por isso, durante o teste de resistência de isolamento, a temperatura do enrolamento deve ser registrada e o valor da resistência de isolamento medido deve ser referido para 40°C, conforme curva da Figura 17, fornecida pela norma NBR 5383 / IEEE-43.

As tensões de teste para os enrolamentos, recomendadas pela norma IEEE-43, estão mostradas na Tabela 1:



Tabela 1: Tensões de teste

Tensão nominal do enrolamento (V)	Teste de resistência de isolamento - tensão contínua (V)
< 1000	500
1000 - 2500	500 - 1000
2501 - 5000	1000 - 2500
5001 - 12000	2500 - 5000
> 12000	5000 - 10000

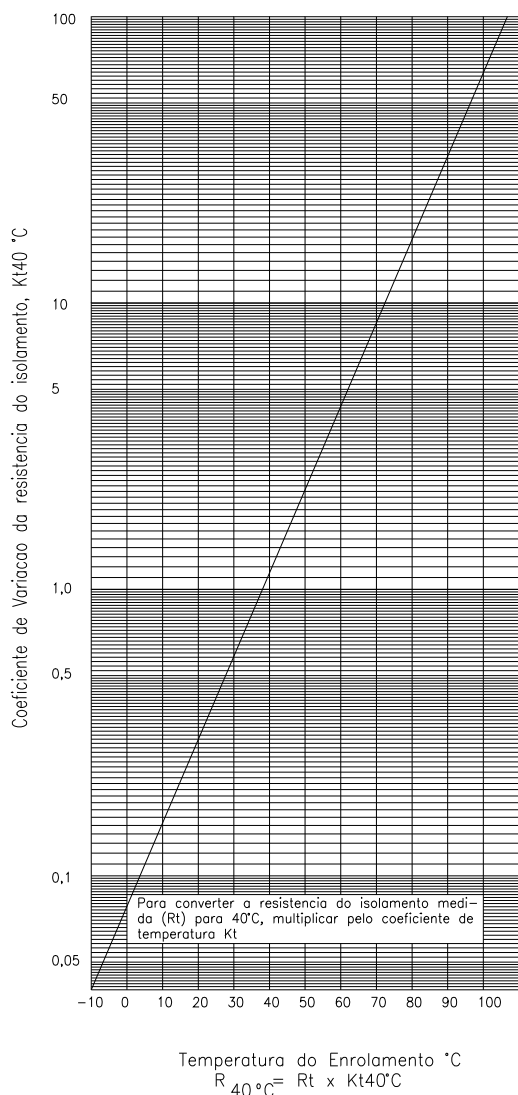


Figura 17: Coeficiente de variação da resistência de isolamento em função da temperatura

8.4.1 ENROLAMENTOS DO ESTATOR

Para medir a resistência de isolamento dos enrolamentos do estator da máquina, o medidor (megôhmetro) deve ser conectado entre a carcaça da máquina e os terminais do estator, conforme exemplo da Figura 18, sendo que a carcaça tem que estar aterrada. Esta medição normalmente é feita diretamente na caixa de ligação da máquina.

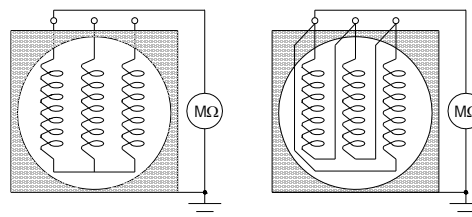


Figura 18: Conexão do megôhmetro

Este teste não avalia a integridade da isolação entre espiras ou entres as fases do enrolamento e sim as condições da isolação do enrolamento em relação à parte aterrada da máquina.

8.4.2 ENROLAMENTOS DO ROTOR

Para medição da resistência de isolamento do enrolamento do rotor de máquinas síncronas brushless (motores e geradores) é necessário que a máquina possua acesso à excitatriz. A medição é feita entre os cabos de ligação do rotor e o eixo da máquina. Para isso é necessário soltar os cabos do rotor ligados à roda de diodos do rotor da excitatriz.

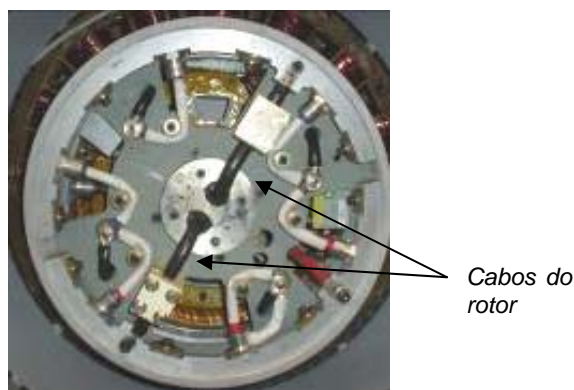


Figura 19: Exemplo de roda de diodos de uma máquina síncrona brushless

Em máquinas que possuem anéis coletores (motores síncronos, geradores síncronos e motores assíncronos de anéis), a medição é feita entre os anéis coletores e o eixo da máquina. Para isso é necessário levantar ou retirar todas as escovas.

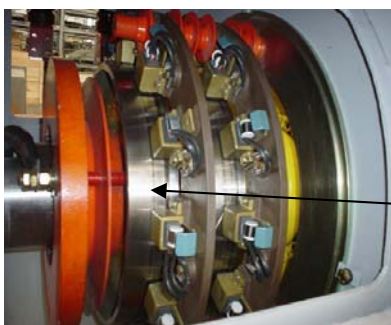
Anéis
coletores

Figura 20: Exemplo de anéis coletores e escovas de uma máquina síncrona

Em máquinas de corrente contínua, a medição é feita entre o comutador e o eixo do motor, com as escovas levantadas ou retiradas da máquina.



Comutador

Figura 21: Comutador de um motor CC

8.4.3 ENROLAMENTOS DAS EXCITATRIZES DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Em máquinas síncronas brushless, a medição da resistência de isolamento dos enrolamentos do estator da excitatriz principal e excitatriz auxiliar (PMG) pode ser feita diretamente na caixa de ligação entre os terminais de ligação e a carcaça. Para medição no rotor da excitatriz principal, é necessário desconectar os cabos do enrolamento do rotor principal ligados aos diodos. Soltar também as ligações do enrolamento do rotor da excitatriz na roda de diodos. A medição é feita entre os fios ou cabos do enrolamento do rotor da excitatriz e a carcaça.

8.4.4 COMPONENTES ISOLADOS

Assim como os enrolamentos são isolados eletricamente da parte estrutural da máquina, outros componentes, como isoladores, porta-escovas e acessórios (resistência de aquecimento, sensores de temperatura, etc.) também são isolados e necessitam ser inspecionados durante a armazenagem para assegurar que a resistência de isolamento esteja dentro dos valores recomendados.

As tensões de teste utilizadas normalmente para estes componentes são de 500V para resistências de aquecimento e porta-escovas e 100V para os demais acessórios. O teste de resistência de isolamento com aplicação de tensão não é recomendado para os sensores de temperatura.

8.4.5 MANCAIS ISOLADOS

Algumas máquinas podem ter um dos mancais isolado ou ambos. Um bom isolamento no mancal é necessário para eliminar a possibilidade de circulação de corrente no mancal, que pode ser induzida por tensões do eixo em máquinas grandes.

A verificação da resistência de isolamento do mancal é uma operação feita na fábrica durante a montagem final e testes da máquina. Durante a armazenagem da máquina montada, a medição da isolação do mancal somente pode ser feita quando ambos os mancais forem isolados. A medição é feita diretamente de cada mancal para o eixo, tomando-se o cuidado de retirar a escova de aterramento do eixo (se houver).

Em máquinas em que somente um dos mancais é isolado, não é possível fazer a medição da resistência de isolamento do mancal isolado sem que outro mancal seja desmontado e isolado. Nestes casos a medição é recomendada somente quando a máquina for desmontada para manutenção.

A resistência de isolamento mínima recomendada para mancais isolados é de 10kΩ.

8.5 ÍNDICE DE POLARIZAÇÃO

Outro método para determinar a qualidade da isolação de uma máquina elétrica é o teste de índice de polarização (IP).

O índice de polarização é a proporção de duas leituras de tempo-resistência: uma é tomada depois de 1 minuto e a outra depois de 10 minutos do início do teste.

Os resultados do índice de polarização são obtidos dividindo-se o valor de teste de 10 minutos pelo valor de teste de 1 minuto. Um valor baixo de índice de polarização indica problemas com a isolação. O item 8.7 mostra o valor mínimo recomendado para IP, segundo a norma IEEE-43.



8.6 TESTE DE ABSORÇÃO DIELÉTRICA

O teste de tempo-resistência pode ser feito em máquinas elétricas, independente do tamanho e da temperatura. A tensão de teste é aplicada em um período de 10 minutos, com os dados registrados a cada 10 segundos do primeiro ao último minuto. A interpretação da curva da resistência de isolamento em função do tempo determina a condição da isolação.

Quando a isolação está boa, a resistência de isolamento começa baixa e cresce à medida que a corrente de fuga capacitiva diminui, conforme curva mostrada na Figura 22. Este teste é particularmente valioso para determinar o grau de umidade e entrada de óleo que geram correntes de fuga e eventualmente circuitos em curto-circuito, causando um efeito de achatamento na curva de absorção dielétrica mostrada na Figura 22.

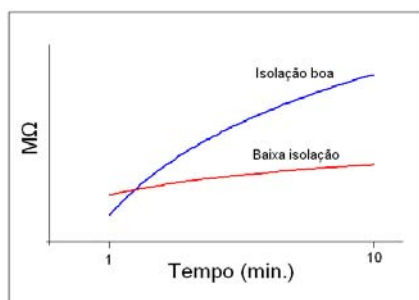


Figura 22: Absorção dielétrica

8.7 AVALIAÇÃO DO ISOLAMENTO

De acordo com a norma IEEE-43, o valor mínimo recomendado para resistência de isolamento e índice de polarização em máquinas elétricas girantes, referido para 40°C, deve ser considerado conforme Tabela 2:

Tabela 2: Valores mínimos de RI e IP

Enrolamento testado	RI1min
Fabricado antes de 1970	kV + 1
Fabricado após 1970	100MΩ
Enrolamentos em geral com kV < 1.	5MΩ
Índice de polarização (IP) mínimo = 2	

8.8 MÉTODOS DE SECAGEM DOS ENROLAMENTOS

8.8.1 PREMISSAS

Se a resistência de isolamento medida for menor do que os valores recomendados na Tabela 2 e a causa determinante para isso for umidade, os enrolamentos devem ser submetidos a um procedimento de secagem.

A temperatura final recomendada para secagem

de enrolamentos isolados é de 120°C.

Em todos os procedimentos de secagem, a resistência de isolamento e a temperatura dos enrolamentos devem ser monitoradas durante todo o processo. A temperatura do enrolamento não deve ultrapassar a temperatura máxima da classe de isolamento e o procedimento pode ser finalizado quando os valores de resistência de isolamento se tornarem constantes.

8.8.2 SECAGEM EM ESTUFA

A secagem do enrolamento em estufa exige que a máquina seja desmontada e somente a parte onde o enrolamento (rotor, estator, etc.) se encontra deve ser submetida ao processo de secagem. A temperatura deve ser aumentada gradativamente até atingir o valor desejado e o incremento de temperatura recomendado é de no máximo 30°C por hora. Para evitar a formação de vapor no interior do enrolamento, recomenda-se manter a temperatura de 80°C por aproximadamente 6 horas antes de atingir a temperatura máxima de secagem (120°C).

8.8.3 SECAGEM COM AQUECEDORES ELÉTRICOS INTERNOS

O processo constitui em aplicar calor dentro da carcaça da máquina, sem a necessidade de desmontá-la, através de lâmpadas incandescentes ou aquecedores elétricos e direcionar um ventilador ou exaustor no enrolamento para retirada da umidade.

Aquecedores radiantes, que geram calor através de ondas infravermelhas, não são recomendados para este processo, pois algumas partes do enrolamento podem aquecer demais e queimar antes que outras partes do enrolamento atinjam a temperatura desejada.

8.8.4 SECAGEM COM AR QUENTE FORÇADO

Para utilizar o processo de secagem do enrolamento utilizando ar quente forçado é necessário construir um sistema com duto e aquecedores elétricos.

Este dispositivo é instalado em uma das entradas de ar da máquina (máquinas abertas) ou através de uma das aberturas para inspeção (máquinas fechadas), sendo que o lado oposto deve ter uma abertura para saída do ar.

O ar quente é soprado para o interior da máquina que passa através dos enrolamentos secando-os e retirando a umidade.

Neste processo não é necessário desmontar a máquina.



8.8.5 SECAGEM POR CIRCULAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA

Um dos meios mais eficazes de secagem dos enrolamentos de uma máquina elétrica é pela circulação de corrente através destes enrolamentos.

Dentre os métodos recomendados está a aplicação de tensão nos terminais do enrolamento através de uma fonte de tensão contínua (12 ou 24 Vcc) com capacidade para alta corrente e possibilidade de ajuste de tensão (normalmente são utilizadas máquinas de solda). Fontes de corrente alternada também podem ser utilizadas, porém, somente quando houver a possibilidade de remoção do rotor do interior da máquina para impedir seu aquecimento excessivo. Em geradores e motores síncronos a circulação de corrente pode ser feita com a máquina funcionando como gerador e os terminais do enrolamento do estator ligados em curto-circuito.

8.8.5.1 SECAGEM DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR

O procedimento de secagem dos enrolamentos do estator de máquinas elétricas girantes em geral (motores e geradores) pode ser feito com a máquina parada e sem desmontá-la.

Os enrolamentos devem ser ligados em série para que a mesma corrente circule através de todos os enrolamentos.

A tensão CC deve ser aplicada nos enrolamentos e elevada lentamente até atingir em torno de 15% a 25% da corrente nominal do enrolamento. Manter a tensão neste nível e acompanhar a elevação da temperatura através dos sensores de temperatura. Quando a temperatura do enrolamento estabilizar, aumentar a tensão gradativamente, de tal forma que o incremento de temperatura fique na ordem de 30°C por hora. Ao atingir 80°C, manter essa temperatura do enrolamento por aproximadamente 6 horas e posteriormente aumentá-la até atingir a temperatura máxima de secagem (120°C), permanecendo por mais 2 ou 3 horas até que o enrolamento esteja totalmente seco.

Em enrolamentos trifásicos com somente 3 terminais acessíveis, a aplicação da corrente deve ser feita entre uma das fases e as outras duas ligadas em paralelo, alternando a ligação das fases a cada hora. A fase conectada sozinha terá o dobro da corrente das demais e sua temperatura deverá ser preferencialmente monitorada e controlada.

8.8.5.2 SECAGEM PELO MÉTODO DE CURTO-CIRCUITO

Especificamente para máquinas síncronas (motores e geradores) pode ser utilizada uma das formas mais simples e econômicas de secagem dos enrolamentos.

Para isso a máquina deve ser acionada pela máquina primária (turbina, motor diesel, etc.), girando nas condições de funcionamento normais de rotação, lubrificação dos mancais e refrigeração, porém sem carga.

Os terminais do estator são conectados em curto-circuito e a excitação (campo) é acionada gradualmente no modo manual, de tal forma que a corrente do estator também aumente de forma gradual.

Da mesma forma que os outros procedimentos, o incremento de temperatura ideal para secagem do enrolamento é de 30°C por hora e, para isso, o procedimento deve começar com corrente do estator na ordem de 15% a 25% da corrente nominal do enrolamento, e aumentando gradativamente.

A temperatura do enrolamento deve ser monitorada através dos sensores de temperatura e não deve ultrapassar a 120°C no final do processo.

Este método se mostra bastante eficaz, pois permite secar tanto o estator como o rotor da máquina. Com o giro do rotor, o ar circula internamente e ajuda a expulsar a umidade para fora da máquina.

8.8.5.3 SECAGEM DOS ENROLAMENTOS DE ROTORES

Para executar a secagem por circulação de corrente em enrolamentos de rotores de geradores e motores síncronos, os quais não possuem sensores para monitoramento da temperatura, é necessário calcular a temperatura do enrolamento durante o procedimento de secagem.

Fazendo um registro preciso da resistência ôhmica do enrolamento e da temperatura antes de iniciar o procedimento, é possível calcular a temperatura média do enrolamento através de uma medição precisa, em intervalos de tempo regulares, da corrente elétrica e da tensão contínua aplicada durante o procedimento de secagem, conforme segue:

- Cálculo da resistência ôhmica do enrolamento:

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

Onde

R_e = Resistência do enrolamento em Ω

V_{cc} = Tensão aplicada em V

I_{cc} = Corrente contínua medida em A



- Cálculo da temperatura média do enrolamento:
$$T_e = [(R_e - R_1) / R_1] \cdot (235 + t_1) + t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Onde:

T_e = temperatura média do enrolamento [$^\circ\text{C}$];

t_1 = temperatura do enrolamento antes do procedimento (praticamente igual a do meio refrigerante) [$^\circ\text{C}$];

R_1 = resistência ôhmica do enrolamento medida antes do procedimento [Ω];

R_e = resistência ôhmica do enrolamento medida durante o procedimento [Ω].

Medir a resistência de isolamento no final do procedimento de secagem, certificando-se de que está dentro dos valores recomendados pela norma IEEE-43.

A tensão não deve ser aplicada através dos anéis coletores, mas diretamente nos cabos do enrolamento do rotor.

Este procedimento não é aplicado para rotores bobinados de motores de indução (motores de anéis) e motores de corrente contínua.

8.8.5.4 CUIDADOS NA SECAGEM DE ENROLAMENTOS POR CIRCULAÇÃO DE CORRENTE

Muita atenção deve ser dada aos seguintes aspectos do procedimento de secagem por circulação de corrente:

- Cada máquina possui características específicas, portanto, antes de iniciar o procedimento de secagem, o fabricante da máquina deve ser sempre consultado a fim de definir os critérios para execução do procedimento (tensão, corrente, temperatura), etc.
- O processo deve ser feito somente quando for constatado que a umidade nos enrolamentos é a causa da baixa isolamento da máquina.
- Quando o enrolamento estiver muito úmido, primeiramente deve ser feito uma pré-secagem com ar quente forçado.
- Em nenhuma fase do processo a temperatura nos enrolamentos poderá ultrapassar a temperatura máxima processo (120°C).
- O incremento temperatura no enrolamento não deve ultrapassar a 30° por hora.
- Ao atingir 80°C , manter essa temperatura do enrolamento por aproximadamente 6 horas e posteriormente aumentá-la até atingir a temperatura máxima de secagem (120°C),

permanecendo por mais 2 ou 3 horas até que o enrolamento esteja totalmente seco.

- O trabalho deve ser realizado por pessoas experientes e com profundo conhecimento do processo, pois a aplicação incorreta de corrente ou controle inadequado da temperatura do enrolamento pode causar danos ou até mesmo a queima completa do enrolamento.

9 PREPARAÇÃO PARA ENTRADA EM OPERAÇÃO

Para garantir o bom funcionamento de uma máquina elétrica girante que permaneceu armazenada ou parada durante um longo período, alguns procedimentos devem ser seguidos antes de colocá-la em operação:

- A máquina deve ser retirada da embalagem com cuidado, evitando danos à pintura ou às partes externas usinadas;
- Inspeccionar a máquina externamente, principalmente a pintura, partes usinadas, flanges, eixo;
- Efetuar uma limpeza completa da máquina, e remover a proteção anticorrosão das partes usinadas externas;
- Os mancais devem ser inspecionados e lubrificados antes da entrada em operação;
- A resistência de isolamento dos enrolamentos deve ser medida e atender aos valores mínimos recomendados pela norma IEEE-43;
- Em máquinas com escovas, inspecionar os anéis coletores ou comutador e recolocar as escovas nos porta-escovas certificando-se de sua livre movimentação destas dentro dos alojamentos;
- Verificar o funcionamento de todos os acessórios;
- A trava do eixo deve ser retirada e guardada para ser utilizada quando a máquina necessitar ser transportada.

10 EXEMPLOS DE PROBLEMAS DE MÁQUINAS ARMazenADAS SEM OS DEVIDOS CUIDADOS

Os exemplos a seguir relacionados procuram mostrar alguns problemas ocorridos em máquinas elétricas girantes armazenadas ou paradas por longos períodos sem os devidos cuidados.



Figura 23: Corrosão estática na pista externa do rolamento

A Figura 23 mostra um rolamento com marcações significativas de corrosão. A corrosão no rolamento pode ocorrer devido ao lubrificante não possuir adequados inibidores de ferrugem e corrosão para proteger as superfícies metálicas ou pela falta lubrificação das peças metálicas quando os componentes móveis do rolamento permanecem estáticos por muito tempo (sem girar).



Figura 24: Impressões superficiais (false brinelling)

A Figura 24 mostra a pista interna de um rolamento com marcações superficiais equidistantes. Este tipo de falha é causado pela vibração do rolamento em uma posição estática que faz com que os elementos rolantes vibrem contra a pista em um só lugar e com o passar do tempo pode até mesmo remover pequenos pedaços de superfícies metálicas.



Figura 25: Marcação no casquilho

A Figura 25 mostra a falha no casquilho inferior de um mancal hidrodinâmico causada pelo peso do eixo. Este tipo de falha ocorre quando o eixo permanece durante um longo período estático, sem haver a formação da camada de óleo entre a superfície deslizante do eixo e o casquilho do mancal.



Figura 26: Umidade nos enrolamentos

A Figura 26 mostra os enrolamentos com gotas de umidade formada pela condensação de água no interior da máquina. Este tipo de falha ocorre quando o ambiente de armazenagem sofre variações significativas de temperatura e não são utilizados aquecedores internos para manter a temperatura interna da máquina superior à temperatura ambiente. A umidade causa a redução da resistência de isolamento dos enrolamentos.



Figura 27: Corrosão no eixo

A Figura 27 mostra o eixo com sinais significativos de ferrugem e corrosão. Isto ocorre quando a peça usinada fica exposta em ambiente úmido ou contaminado sem nenhum tipo de proteção anti-corrosiva.

11 RECOMENDAÇÕES

As surpresas desagradáveis causadas por falhas apresentadas durante o comissionamento e colocação em funcionamento de máquinas elétricas girantes podem e devem ser evitadas com procedimentos corretos de inspeção e manutenção durante o período de armazenagem. Um bom plano de manutenção durante a armazenagem deve contemplar inspeções visuais, limpeza, testes de resistência de isolamento e índice de polarização, preservação dos mancais, conexão da resistência de aquecimento, inspeção da pintura e partes usinadas expostas, aplicação de anti-corrosivo, e demais procedimentos informados pelo fabricante da máquina.



12 CONCLUSÃO

Os tipos de máquinas elétricas girantes variam significativamente, conforme seu tamanho, componentes, montagem, aplicação e funcionamento.

Guardadas as devidas proporções e especialidades, todas as máquinas elétricas girantes precisam de cuidados tanto na armazenagem quanto na colocação em operação. Os tópicos apresentados neste artigo oferecem orientações e recomendações para uma correta armazenagem dos principais tipos de máquinas elétricas girantes de médio porte, porém, é necessário também que as características específicas de cada máquina e as instruções dos fabricantes sejam avaliadas e seguidas com atenção.

13 REFERÊNCIAS

- [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] Teste de Resistência de Isolação – Fluke / Vortex.
- [6] Guide to Electric Motor Bearing Lubrication – Exxon Mobil, catalog nr. 02-F2003767, USA, 2002.