

Diagnóstico e manutenção de Máquinas Eléctricas Rotativas Equipamentos de média e/ou alta tensão (*)



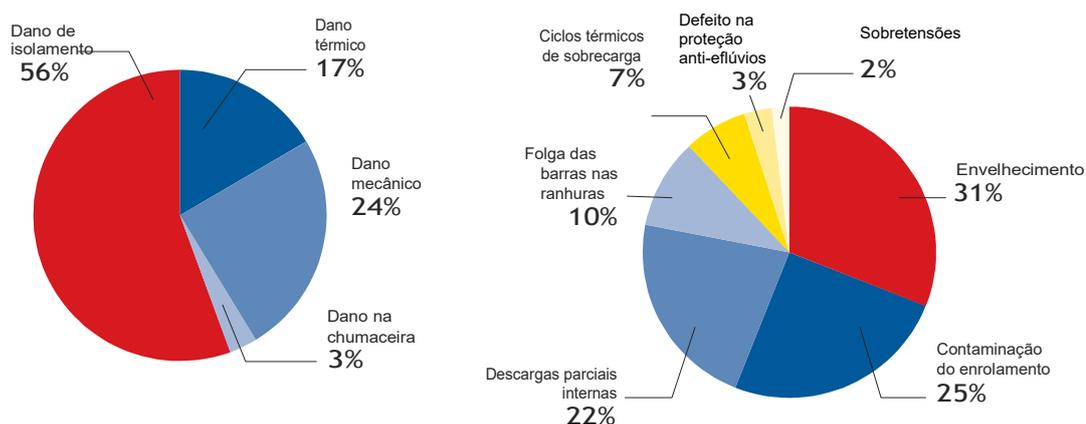
1. Preâmbulo

As Máquinas Eléctricas Rotativas, tais como os motores e alternadores, são equipamentos críticos em sistemas industriais e na Produção de Energia. A sua fiabilidade e disponibilidade são muito importantes. As falhas e avarias prematuras podem causar paragens inesperadas e danos graves nas máquinas, daí resultando perdas económicas significativas.

2. Porque é que uma máquina eléctrica rotativa avaria?

Um inquérito sobre avarias em geradores hidráulicos, realizado pelo grupo de trabalho A1.10 CIGRÉ, a 16 operadores com um total de 1.199 geradores hidráulicos localizados por todo o mundo, é apresentado na Figura 1a (à esquerda). A causa mais comum de avaria da máquina reportada foi o dano de isolamento.

O dano de isolamento pode ter causas raízes específicas, e que são indicadas no Figura 1b (à direita).



Fonte: Bruetsch et al. "Insulation Failure Mechanisms of PowerGenerators", DEIS July / August 2008

2.1 Solicitações no isolamento

As Máquinas Eléctricas Rotativas estão sujeitas durante a sua vida a um conjunto de solicitações e de factores inesperados, periódicas e/ou contínuas, tais como térmicas, eléctricas, ambientais e mecânicas.

- Solicitação térmica: Muitas alterações de temperatura provocam um envelhecimento prematuro do isolamento.
- Solicitação eléctrica: A tensão eléctrica e a actividade de descargas parciais (PD) durante a operação estão constantemente a solicitar o isolamento.
- Solicitação ambiental: Inclui a humidade, produtos químicos agressivos e reactivos (gás, ácidos, etc) e as partículas estranhas (metálicas, cinzas, carvão, lubrificantes).
- Solicitação mecânica: Forças electromagnéticas na ranhura e na zona das testas, bem como níveis diferentes de expansão térmica.

2.2 Constituição do isolamento

O isolamento de Máquinas Eléctricas Rotativas de média e/ou alta tensão enfrenta o compromisso de suportar a força do campo eléctrico, para assegurar a estabilidade mecânica, e de conduzir o calor do cobre para o sistema de arrefecimento da máquina. Os fabricantes aplicam frequentemente sistemas de isolamento, como o apresentado na Figura 2. O isolamento principal é composto por uma combinação de mica com resina epoxi. Esta é a zona onde a maior parte da solicitação eléctrica ocorre. Adicionalmente, o sistema de isolamento tem algumas camadas de fita condutora ou semi-condutora para assegurar determinados potenciais nos interfaces entre os diferentes materiais. É o caso da protecção corona (anti-eflúvios) para assegurar um potencial suave na superfície do isolamento. As máquinas mais potentes e de tensão elevada podem também ter uma zona de transição de potencial nas extremidades, e frequentemente, uma protecção corona no interior.

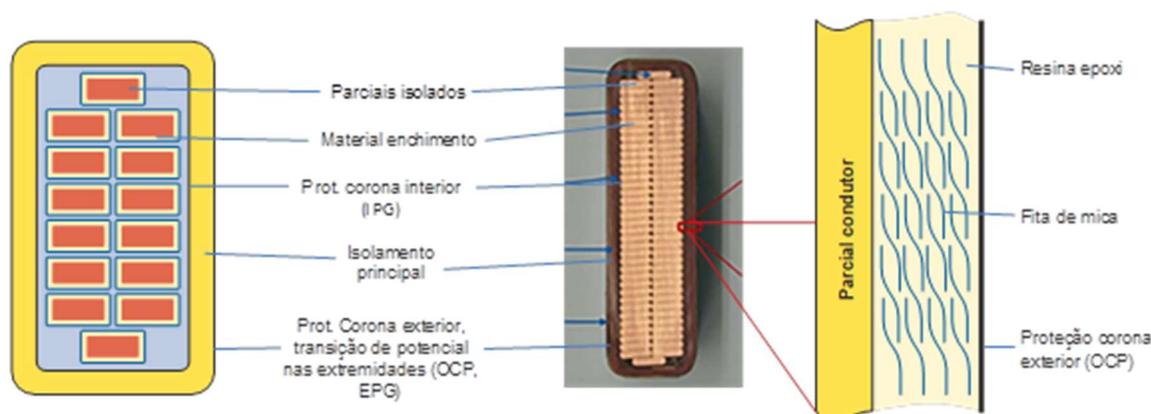


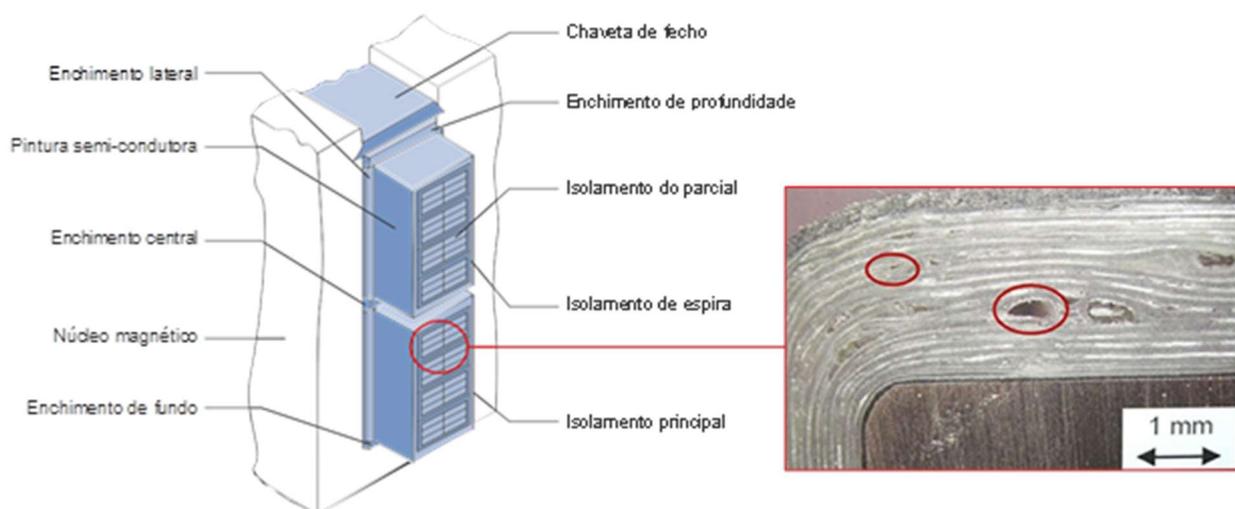
Figura 2: Isolamento de uma máquina de alta tensão

2.3 Principais defeitos no isolamento principal dos enrolamentos estáticos

2.3.1 Vazios (cavidades)

A existência, até certos limites, de vazios ou cavidades em isolamentos mica/epoxi resulta do processo de fabricação e é uma ocorrência normal. Como cada fabricante tem o seu processo de fabricação o nível de pequenos defeitos varia. Adicionalmente, algumas cavidades irão desenvolver-se ao longo do tempo devido às diferentes solicitações mencionadas antes.

Para os sistemas de isolamento de qualidade as pequenas cavidades, ao longo do tempo, não são um problema. Não obstante, estas pequenas cavidades são uma fonte de descargas parciais (PD), que podem resultar em defeitos de isolamento maior. O desenvolvimento de tais defeitos é lento, o que permite que



o estado destas descargas parciais sejam controladas ao longo do tempo.

Figura 3: Construção do isolamento e vista microscópica de cavidades/vazio grandes no isolamento principal

Fonte: Vogelsang et al. "Performance testing of high voltage generator and motor insulation", Dec 2005

2.3.2 Delaminação

A delaminação dentro do isolamento, também conhecida como descolamento, traduz-se pelo aparecimento de grandes cavidades entre as camadas de isolamento. A delaminação pode também ocorrer entre o cobre e o isolamento principal.

A delaminação tem como resultado uma actividade PD mais elevada se comparada com a actividade PD relacionada com os micro vazios. As razões principais para este facto são as solicitações mecânicas causadas pelos diferentes materiais, e/ou pelos ciclos de temperatura, durante a operação.

2.3.3 Bobinas ou barras soltas

As forças electromagnéticas estão constantemente interagindo com o enrolamento. Se o sistema de amarração do enrolamento ficar defeituoso ao longo do tempo, ou se não foi executado correctamente, o enrolamento fica solto. Então, a proteção anti-eflúvios (corona) exterior é desgastada. Se o defeito não for detectado a tempo, a vibração começa também a deteriorar o isolamento principal, o que pode originar uma avaria grave da máquina. O defeito tem um registo PD característico e pode ser identificado com medições PD.

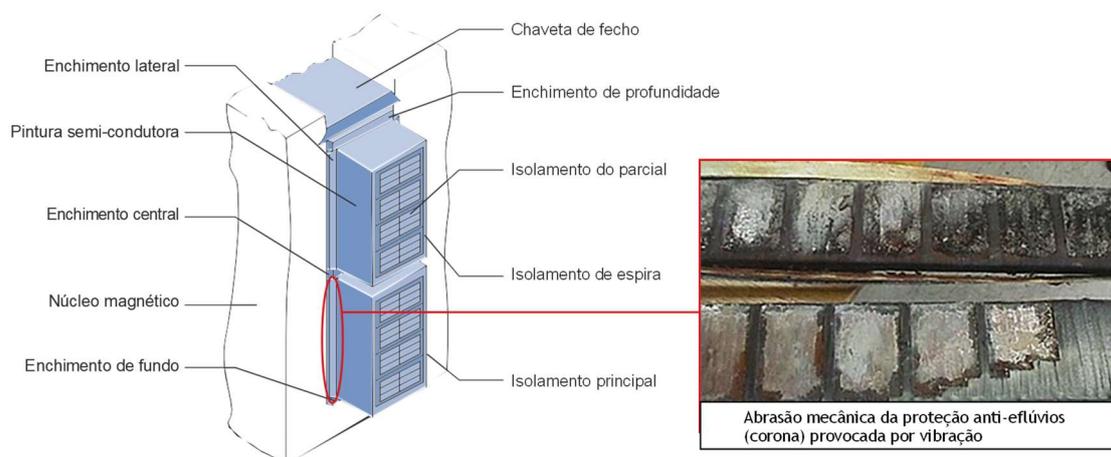


Figura 4: Constituição do isolamento e sintomas típicos de uma barra com vibração

2.3.4 Contaminação e distâncias incorrectas na zona das testas do enrolamento

Os problemas construtivos, tais como distâncias incorrectas (separação de fases) ou a contaminação do enrolamento podem conduzir ao aparecimento de actividade PD na zona das testas das bobinas. Uma outra questão comum nesta zona do enrolamento é a transição deficiente entre a proteção anti-eflúvios (corona) exterior e a transição de potencial nas extremidades das barras (bobinas). A Figura 5 apresenta um exemplo de contaminação e a actividade PD.

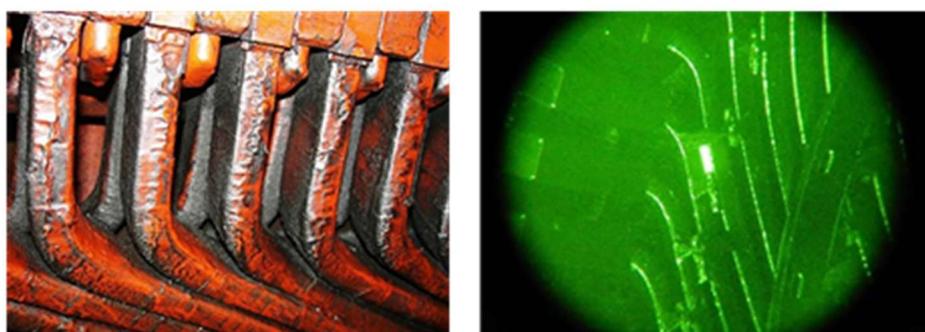


Figura 5: Exemplos de contaminação e actividade PD na zona das testas do enrolamento

As questões anteriores dizem respeito ao isolamento principal. Há, no entanto, outros problemas eléctricos de que são exemplo:

- Curto-circuitos entre espiras
- Problemas nas ligações (contacto)
- Condutores interrompidos
- Más soldaduras de contactos

3. Extensão do tempo de vida esperado

As Máquinas Eléctricas Rotativas, como qualquer outro activo, tem um certo tempo de vida esperado. Entretanto, as influências negativas tais como das solicitações térmicas, ambientais, mecânicas e eléctricas, provocam uma redução do seu tempo de vida.

Para se evitarem as avarias e a indisponibilidade das máquinas rotativas é vital a realização de uma manutenção regular e periódica. A realização de vários diagnósticos diferentes permitem avaliar o risco, para assim se planear correctamente uma manutenção baseada na condição da máquina.

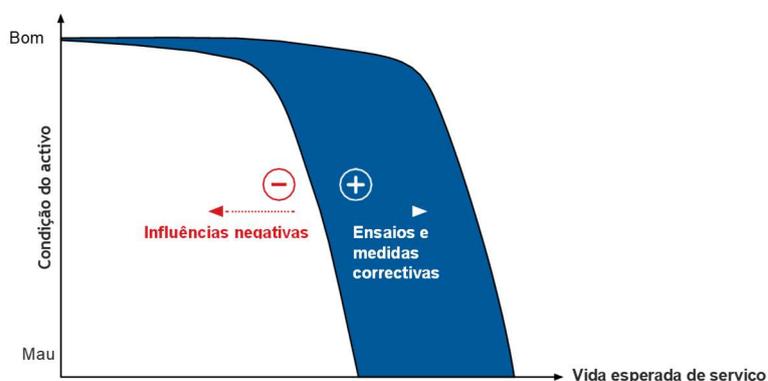


Figura 6: Modelo ideal para prolongar o tempo de vida, com o recurso à manutenção baseada na condição

4. Ensaio eléctrico de diagnóstico

Os ensaios de diagnóstico eléctrico ajudam a avaliar a condição de um motor ou de um gerador. Estes ensaios devem ser executados após fabricação da máquina para obtenção de referências para o futuro, após instalação no local da operação, e periodicamente para acompanhamento da condição durante a sua vida.

Os resultados destes ensaios permitem um mais correcto planeamento da manutenção e eventual substituição de componentes, antes de que a falha ocorra, evitando indisponibilidades indesejadas e/ou prolongadas.

Apresenta-se de seguida uma visão geral das questões/problemas mais comuns, e dos métodos de ensaio eléctrico utilizados para os detectar.

- em **enrolamentos estatóricos**:
 - **Medição da capacitância (C), factor de dissipação (DF/tan δ) / factor de potência (PF)**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Descargas parciais
 - Contaminação
 - Degradação do isolamento
 - Nota: Os dados de tendência ajudam a determinar a velocidade de envelhecimento do isolamento e a identificar alterações críticas que podem exigir uma inspeção mais profunda.
 - **Medição das descargas parciais**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Descargas parciais
 - Contaminação
 - Degradação do isolamento
 - Nota: Permite que os pontos fracos do isolamento sejam claramente identificados, e as suas causas (contaminação, vazios, fissuras ou deterioração geral).
 - **Ensaio dieléctrico (tensão aplicada)**
 - Para verificar:
 - Tensão admissível / resistência à tensão
 - Integridade do isolamento
 - Nota: Permite que os pontos fracos do isolamento sejam claramente identificados. A falha durante o ensaio indica que a qualidade do isolamento era inadequado para o serviço.

- **Medição da resistência de isolamento, índice de polarização e relação de absorção dieléctrica**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Contaminação
 - Humidade
 - Degradação do isolamento
 - Integridade do isolamento
 - Nota: O índice de polarização dá uma indicação geral aproximada sobre o estado do isolamento.
- **Medição da resistência óhmica (CC)**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Problemas nas ligações entre bobinas
 - Problemas de contactos
- **Análise de resposta em frequência de varredura (SFRA)**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Falhas entre espiras
 - Nota: Qualquer defeito no enrolamento resulta numa mudança da resposta em frequência correspondente.
- **Análise da resposta dieléctrica**
 - Para verificar a eventual existência de:
 - Contaminação
 - Humidade
 - Degradação do isolamento
 - Integridade do isolamento
 - Nota: As descargas parciais costumam causar carbonização antes de ocorrer uma ruptura do isolamento principal. Essas áreas carbonizadas podem ser detectadas através de medições de resposta dieléctrica.

- em **enrolamentos rotóricos:**

- **Medição da resistência de contacto**

- Para verificar a eventual existência de:
 - Alta resistência de contacto
- Nota: Detecta ligações soltas e superfícies de contacto oxidadas ou danificadas.

- **Ensaio de queda de tensão CC nos polos**

- Para verificar a eventual existência de:
 - Falhas entre espiras
- Nota: Detecta curto-circuitos entre espiras

- **Análise de resposta em frequência de varredura (SFRA)**

- Para verificar a eventual existência de:
 - Falhas entre espiras
- Nota: Qualquer defeito no enrolamento resulta numa mudança da resposta em frequência correspondente.

- e em **núcleos magnéticos do estator:**

- **Ensaio de anel**

- Para verificar a eventual existência de:
 - Imperfeições entre chapas do núcleo
- Nota: Detecta curto-circuitos entre chapas que potenciam a origem de pontos quentes.

5. Considerações sobre a Manutenção de uma Máquina Eléctrica Rotativa (Exemplo: Alternador)

A manutenção sistemática de uma máquina rotativa depende de vários factores, tais como:

- Número de horas de funcionamento;
- Número de arranques e paragens;
- Número de perturbações graves nos sistemas;
- Resultado de inspecções e manutenções anteriores;
- Características de arrefecimento;
- Projecto;
- Idade, etc.

Uma vez que cada componente de uma máquina desempenha uma função específica e está sujeito a condições distintas de funcionamento, é desejável uma observação periódica do seu funcionamento para detecção de qualquer alteração de "performances", ruídos, temperatura ou deformações.

Para o efeito, torna-se vantajoso conhecer o tipo de construção da máquina e o seu histórico, tal como a ocorrência de avarias ou de qualquer anomalia, relacionando-as com o número de horas de funcionamento.

Para se planear de forma eficiente a manutenção é essencial ter informação, o mais precisa possível, da condição dos componentes da máquina, para assim poder antecipar a necessidade de reparação ou substituição de componentes.

O "Plano de Manutenção" de uma máquina eléctrica contém intervenções de âmbitos e extensões diferentes, a realizar com periodicidades também distintas.

Para além das rotinas frequentes de inspeção sensorial (existência de ruídos, movimentos, vibrações, temperaturas, cheiros e outras ocorrências anormais), deverão ser realizadas actividades complementares de manutenção condicionada, com registo das principais características de funcionamento da máquina e dos seus sistemas auxiliares, para avaliação do seu estado actual e comparação com os seus valores nominais de funcionamento.

Serão também realizados ensaios de funcionamento da máquina, para verificação de todas as operações normais que ocorrem durante a sua exploração.

Para além destas revisões, realizadas com intervalos previsivelmente anuais, qualquer máquina eléctrica deverá ser sujeita a revisões gerais de âmbito mais alargado. No caso de nada de anormal ter ocorrido durante a sua exploração e dos registos das revisões "anuais" nada indicarem, o intervalo para as revisões

gerais poderá ser de 5 a 10 anos, em função do histórico da máquina.

Numa revisão geral deve ser desmontada grande parte da máquina, nomeadamente, com a remoção do rotor do estator. Seguidamente, deverá ser efectuada uma inspecção e limpeza geral com eventual substituição ou reparação de componentes.

Entretanto, o Cliente é responsável pelo suporte documental técnico específico da máquina e peças de reserva.

Tendo em consideração que as máquinas eléctricas com 30 ou mais anos de exploração foram naturalmente construídas com tecnologias menos desenvolvidas e diferenciadas, a análise destas máquinas constitui um capítulo separado da Manutenção – Reabilitação (Retrofit).

A fim de se determinar o tipo de intervenção a efectuar na máquina eléctrica, dever-se-á realizar o seu diagnóstico, através de um programa exaustivo de inspecção e ensaios, com registo dos parâmetros nominais actuais, registo das temperaturas de funcionamento, análise espectral de vibrações, verificação do estado do alinhamento, termografia, completados pela realização dos ensaios eléctricos de diagnóstico (ver cap. 4.).

É de prever a necessidade de efectuar alguns dos seguintes tipos de intervenção:

- Limpeza, inspecção e beneficiação geral do estator e rotor, com tropicalização dos enrolamentos;
- Limpeza, inspecção e beneficiação geral de todos os componentes da máquina;
- Inspeção e retravamento das testas do enrolamento estatórico, retravamento do núcleo magnético, se necessário;
- Inspeção e retravamento de todas as ligações entre bobinas polares, enrolamento amortecedor e terminais do rotor, se necessário;
- Rectificação dos anéis colectores com substituição de escovas e porta-escovas;
- Beneficiação geral do rotor e do estator da excitatriz, se aplicável;
- Rectificação e rebaixamento de micas do rotor da excitatriz, se aplicável;
- Reabilitação do equipamento de supervisão e controlo do funcionamento, etc.

Em função da tecnologia utilizada na construção da máquina e do seu tempo de vida esperado, tendo em conta a avaliação da condição dos diferentes componentes efectuada durante as revisões gerais, poderá ainda ocorrer a necessidade de intervenções mais alargadas, nomeadamente:

- Reenchavetamento do enrolamento estatórico;
- Rebobinagem completa do estator;
- Reisolamento e reempilhamento do núcleo magnético;
- Fabrico de novo núcleo magnético;
- Substituição do isolamento do núcleo polar (colares e travamentos);
- Reisolamento total do enrolamento dos polos e dos terminais do rotor;
- Reisolamento dos anéis colectores;
- Rectificação do veio na zona das chumaceiras, e reenchimento das chumaceiras;
- Substituição da excitatriz e do regulador de tensão por outro equipamento tecnologicamente mais avançado.

Após a reabilitação de uma máquina eléctrica, esta deverá então enquadrar a sua manutenção no esquema previsto.

(*) Bibliografia:

- Why Rotating Machines Fail – OMICRON (www.omicronenergy.com)
- Diagnostic testing and monitoring of rotating machines - OMICRON