



## **Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH**

### **Considerações sobre o ensaio de ciclo térmico segundo a norma IEEE 1310-2012**

**Tamy K. AOKI; João F. CORDEIRO; Egidio J. FARIA; Thomas HILDINGER(\*);  
Tomás E. LAMAS; Fernando PEREIRA; Marcelo J. SILVA; Camila G. SANTOS**

**VOITH HYDRO Ltda.**

#### RESUMO

O presente estudo analisou a adequação do método de ensaio da norma IEEE 1310-2012 para a simulação dos possíveis mecanismos de envelhecimento do isolamento de um gerador operando sob condições cíclicas de partidas e paradas. Barras reais de estatores envelhecidas ao longo de cerca de 10.000 ciclos de partidas e paradas em operação real foram caracterizadas em laboratório e então, para fins de comparação, submetidas a um limitado número de ciclos térmicos em conformidade com o método da IEEE 1310-2012. Os resultados sugerem que um reduzido número de ciclos térmicos em laboratório foi suficiente para gerar defeitos que não existiam nas barras envelhecidas unicamente sob condições reais de operação. Verificou-se também que os ciclos de laboratório tendem a propagar os poucos defeitos existentes para regiões onde eles não existiam nas condições originais, como por exemplo a parte interna do núcleo do estator. Portanto, dependendo da forma específica como são interpretados os resultados dos ensaios realizados em conformidade com o método da IEEE 1310-2012, é necessário considerar o risco de tais artefatos de ensaios influenciarem na avaliação final de qualquer conjunto de barras/bobinas ensaiado.

#### PALAVRAS-CHAVE

Isolamento de alta tensão, ciclos de partidas e paradas, usinas hidrelétricas reversíveis, ciclagem térmica

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O método da norma IEEE 1310-2012 [1] é um procedimento de ensaio elaborado para simular os mecanismos de envelhecimento associados a um regime de operação em que máquinas rotativas de grande porte são submetidas a repetidos ciclos de partidas e paradas. Embora esse método de ensaio procure reproduzir um ambiente real de operação, ele também recorre à potencialização de fatores de envelhecimento que ultrapassam os típicos níveis operacionais com o objetivo de produzir efeitos relevantes em um curto espaço de tempo. De fato, esse é o conceito subjacente a qualquer teste acelerado de envelhecimento.

Entretanto, o procedimento também deve prever o risco de se introduzirem artefatos de ensaio – seja pelo aumento de um fator de aceleração além de um limite realista ou até mesmo pela imprecisão da representação do ambiente operacional da máquina. Nesse contexto, o presente trabalho é uma investigação sobre a adequação do método da norma IEEE 1310 como uma ferramenta realista de comparação ao envelhecimento produzido por condições reais de operação. Para realizar essa análise, um conjunto de barras Roebel foi removido de uma máquina de usina hidrelétrica reversível de 20.5 kV com refrigeração a ar após cerca de 10.000 ciclos de partidas e paradas e disponibilizado para ensaios em laboratório.

As barras foram inicialmente caracterizadas por métodos elétricos e morfológicos com o objetivo de identificar os tipos de características ou defeitos do isolamento gerados exclusivamente sob as condições reais de operação. Foram realizados ensaios não destrutivos em laboratório, incluindo o teste de “percussão” (tap), o fator de dissipação ( $\tan \delta$ ) e tip-up do fator de dissipação, em todas as barras do conjunto. Também foram realizados ensaios destrutivos, como o ensaio de envelhecimento elétrico acelerado (VET), e dissecções em algumas das barras.

Tanto os ensaios destrutivos como os não destrutivos permitiram realizar uma caracterização abrangente do isolamento na condição “inicial”. Ao longo deste trabalho, o termo “10.000 PARADAS E PARTIDAS” será usado para designar as barras que foram caracterizadas ou ensaiadas sem a aplicação de nenhum ciclo térmico em laboratório em conformidade com o método IEEE. Esse termo foi escolhido como um lembrete de que o que está sendo chamado de “condição inicial” é, na verdade, um isolamento pré-envelhecido em uma operação real, em que foi submetido a cerca de 10.000 ciclos de partidas e paradas.

Após essa caracterização preliminar, um subgrupo das barras de ensaio foi então instalado em uma bancada de teste de ciclagem térmica em conformidade com os requisitos do método da IEEE 1310-2012 e submetido a uma série de ciclos térmicos de 40°C -155°C em laboratório. Os ensaios não destrutivos de “percussão”, do fator de dissipação e do tip-up do fator de dissipação foram mais uma vez utilizados como uma caracterização diagnóstica e realizados após 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 e 30 ciclos térmicos em laboratório. Ao longo de todo o texto, o termo “+n CICLOS IEEE” designará a uma condição em que o ensaio apresentado foi realizado após “n” ciclos térmicos em conformidade com o método da IEEE 1310-2012 – além das 10.000 partidas e paradas preexistentes da operação real.

Métodos de ensaios destrutivos, como dissecções e ensaios de envelhecimento elétrico acelerado, também foram aplicados nas barras “+n CICLOS IEEE” com a finalidade de oferecer uma compreensão mais profunda dos resultados. Essa metodologia permite comparar a condição do isolamento após 10.000 “ciclos térmicos” com o isolamento em uma condição levemente diferente, como após 10.005 ciclos, por exemplo, onde apenas os últimos 5 ciclos foram, de fato, realizados conforme o método IEEE 1310.

Usando comparações entre barras com essas condições (10.000 vs. 10.005, 10.010, etc.), o presente trabalho confrontará as duas hipóteses alternativas a seguir:

(1) O método da IEEE 1310-2012 é confiável para simular o regime de operação desejado, e a inclusão de um número tão reduzido de ciclos em laboratório aos 10.000 ciclos preexistentes da operação não produzirá mudanças significativas no isolamento pré-envelhecido,

ou

(2) o método da IEEE 1310 -2012 não é confiável para simular o regime de operação desejado, e a inclusão até mesmo de pouquíssimos ciclos laboratoriais já é suficiente para gerar defeitos que não existiam no isolamento ou que não poderiam ter sido formados pelo envelhecimento da operação no longo prazo.

Embora o uso do método da IEEE 1310-2012 normalmente envolva até 500 [2] ciclos térmicos em laboratório, o estudo destinado a confrontar as duas hipóteses mencionadas precisa concentrar-se em um número muito menor de ciclos. O objetivo disso é evitar confusões na tentativa de diferenciar entre possíveis artefatos de ensaio e características “normais” esperadas para o isolamento, que são causadas pelo envelhecimento acelerado pretendido.

No contexto do presente trabalho, o termo “artefato de ensaio” deverá ser entendido como um resultado de ensaio que muda drasticamente a condição inicial do isolamento de maneira virtualmente imediata ou dentro de um baixíssimo número de ciclos em comparação com o que o método da IEEE 1310 prescreve. Isso significa que apenas modificações excepcionais ao isolamento após um baixíssimo número de ciclos em laboratório serão assumidas como evidência em favor da hipótese (2). Características que surgem no volume de isolamento de maneira mais “suave”, progredindo ao longo de centenas de ciclos de ensaio, dificilmente poderiam ser usadas para diferenciar artefatos de ensaio de fenômenos de envelhecimento propriamente ditos e, portanto, sua eventual ocorrência será considerada como evidência em favor da hipótese (1).

## 2.0 - OBJETOS DE ENSAIO

Os objetos de ensaio investigados no presente estudo são barras estatóricas Roebel completas removidas de uma máquina de usina hidrelétrica reversível de 20.5 kV com resfriamento a ar. No momento da sua remoção, essas barras haviam sido submetidas a cerca de 10.000 ciclos de partida e parada durante a operação normal da usina. Seu isolamento de alta tensão é feito de um sistema de epóxi-mica fabricado no final dos anos 80, e utiliza a chamada fita de “mica splittings” (ou “mica em escamas”) para o isolamento com 5 mm de espessura nominal na parte da ranhura. Para os fins do presente estudo, a remoção das barras do núcleo do estator foi realizada de maneira muito cuidadosa com o intuito de minimizar possíveis danos criados durante o processo de remoção. Ao

chegarem ao laboratório, as barras foram visualmente inspecionadas e todos os defeitos encontrados na superfície do sistema anticorona da ranhura foram corrigidos para proceder-se à preparação dos objetos para a realização dos ensaios elétricos.

## 2.1 Métodos de ensaio

### 2.2.1. Teste de "percussão" ("tap test")

O chamado teste de "percussão" é uma avaliação qualitativa e não destrutiva em que uma moeda, um pequeno martelo ou algum outro objeto metálico sólido é utilizado para percutir a superfície da barra ao longo do seu comprimento com o objetivo de se detectarem eventuais regiões com um som "oco", ou amortecido, que possam ser indicativos de defeitos no isolamento, como delaminações da fita de mica. Apesar de sua natureza relativamente subjetiva, a experiência mostrou que esse método pode ser eficaz para a localização de áreas suspeitas que possam conter defeitos morfológicos internos.

No presente trabalho, o teste de "percussão" foi aplicado para verificar a presença de regiões suspeitas no conjunto de barras para as duas condições relevantes:

- a) conforme retirada do gerador (uma condição aqui designada como "10.000 PARTIDAS E PARADAS")
- b) após um número limitado de "n" ciclos térmicos em conformidade com a IEEE 1310 ("+n IEEE CYCLES").

Para aumentar a precisão na delimitação das áreas, a parte reta de cada barra foi previamente marcada com 62 segmentos de 50 mm ao longo de todo o seu comprimento, resultando em um mapeamento com um total de 3.100 mm. Ao longo do perímetro, as duas faces mais largas da barra foram rotuladas com duas divisões empilhadas. Assim, 4 delas foram utilizadas para cobrir a área em volta do perímetro de cada barra (duas em cada um de ambos os lados mais largos). Dessa forma, a superfície da parte reta de cada barra foi mapeada com um total de 248 quadrados, sendo cada um deles submetido a um teste de percussão toda vez em que esse método foi utilizado como diagnóstico. Embora esse teste possa ser usado de maneira comparativa para indicar as possíveis áreas de defeitos, seu máximo valor diagnóstico só é atingido quando seguido de uma análise detalhada das seções transversais analisadas ao microscópio.

### 2.2.2. Dissecção

Os defeitos dos isolamentos de alta tensão baseados em mica – como delaminações, rachaduras ou vazios – costumam ter dimensões da ordem de micrômetros, o que permite sua detecção por microscópios ópticos padrão. Esse método foi amplamente utilizado neste estudo para caracterizar as amostras de isolamento removidas das barras envelhecidas em operação para identificar a morfologia "original" de suas paredes externas antes da realização de qualquer ciclo térmico de envelhecimento em laboratório, assim como para monitorar suas mudanças ao longo de um crescente número de ciclos em laboratório realizados em conformidade com o método IEEE.

Locais próximos ao feixe de condutores – aqueles ao redor da superfície da barra e do volume de isolamento intermediário – foram totalmente caracterizados em algumas barras selecionadas utilizando cortes transversais de 30 mm de largura. A experiência mostrou que, antes de realizar os cortes, a estrutura do isolamento pode ser melhor preservada por meio do encapsulamento dos objetos de teste por uma matriz de resina, que proporciona maior resistência mecânica às seções transversais. Esse método foi utilizado em todas as análises microscópicas apresentadas neste estudo.

### 2.2.3. Medidas de dimensões

As eventuais mudanças de tamanho das barras provocadas pelos ciclos térmicos em laboratório foram controladas pela medição de suas dimensões logo após a sua remoção da operação (condição "10.000 PARTIDAS E PARADAS") e a comparação desses resultados com aqueles obtidos ao longo dos ciclos térmicos em laboratório. Em alguns casos, esse tipo de medição ajuda a detectar possíveis modificações na consolidação da fita de mica dentro do isolamento da parede externa em função do crescente número de ciclos em laboratório.

### 2.2.4. Força de cisalhamento e de flexão

Embora os 3 métodos de ensaio mencionados acima possam ser utilizados como métodos de diagnóstico para caracterizar barras submetidas a ciclos térmicos, o mais comum para essa finalidade é a aplicação de ensaios elétricos. No entanto, também é possível investigar as eventuais alterações na estrutura do isolamento da parede externa provocadas pelo envelhecimento cíclico por meio da análise de alguns de seus parâmetros mecânicos, como a resistência ao cisalhamento e à flexão [3].

O presente estudo realizou o ensaio de resistência ao cisalhamento em seções transversais de 30 mm de largura

das barras. Esse ensaio aplica uma crescente força no sentido perpendicular ao plano da sua secção transversal até ocorrer o descolamento do feixe de cobre do volume de isolamento. A resistência ao cisalhamento é definida como sendo a força necessária para provocar esse descolamento. Curvas de tensão-deformação foram então utilizadas para identificar a exata força desse descolamento. O ensaio de flexão é realizado em segmentos de 30 mm de largura e 55 mm de comprimento do isolamento da parede externa previamente separados da barra de cobre interna. O presente estudo utilizou o método de 3 pontos e a resistência à flexão foi definida como sendo a força necessária para produzir a falha por flexão, conforme indicado nas respectivas curvas de tensão-deformação levantadas.

#### 2.2.5. Fator de dissipação ( $\tan \delta$ ) e tip-up

Ensaio padrão de fator de dissipação e de tip-up [4] foram usados como um dos métodos de ensaio para a caracterização elétrica. As medições foram realizadas após uma segmentação do revestimento da proteção anticorona da ranhura para evitar artefatos de ensaio derivados dos sistemas de classificação. As tensões de ensaio variaram entre 2 kV e 14 kV, e foram aplicadas em degraus de 2 kV. Os tip-ups do fator de dissipação foram calculados como sendo as diferenças dos valores medidos a cada duas medições consecutivas de 2 kV até 14 kV. O máximo dessas diferenças (tip-up máximo) foi usado como parâmetro de quantificação de cada barra.

#### 2.2.6. Ensaio de envelhecimento elétrico acelerado (VET)

Foram utilizados ensaios de envelhecimento elétrico acelerado, realizados a 44,5 kV e à temperatura ambiente, para comparar os possíveis impactos na vida útil das barras após a aplicação do reduzido número de ciclos térmicos em laboratório pelo método da IEEE 1310-2012, com a condição original em que os fatores de tensão do isolamento eram exclusivamente aqueles produzidos pelas condições normais de operação. Para minimizar o risco de o ensaio ser influenciado por possíveis danos criados durante a remoção das barras, os ensaios de envelhecimento elétrico acelerado foram limitados a segmentos de 2 m de comprimento na região da ranhura das barras, que foram cuidadosamente inspecionados antes dos ensaios.

### 3.0 - RESULTADOS

O uso de um teste de "percussão" ("tap test") como primeiro método de caracterização do conjunto de barras revelou que o isolamento estava essencialmente livre de áreas de delaminação quando ele foi removido do núcleo do estator após os cerca de 10.000 ciclos de partidas e paradas a que havia sido submetido durante a sua operação na usina. O "mapeamento da percussão" da parte superior, representado na Fig. 1, ilustra esse fato para uma das barras estudadas. Nesse caso particular, apenas 6 dos 248 "locais do ensaio de percussão" apresentaram algum indício de defeitos. Além disso, também é possível notar que os poucos locais suspeitos estavam quase sempre localizados imediatamente após a saída do núcleo do estator.

Embora a Fig. 1 mostre os resultados obtidos para uma barra específica, o mesmo padrão foi encontrado na avaliação da condição inicial de todas as barras do conjunto: pouquíssimos locais de delaminação, majoritariamente localizados após a área de saída da ranhura. Quando as barras com essa condição inicial foram montadas na bancada de ensaio prescrita pelo método da IEEE 1310-2012 e submetidas a ciclos térmicos de 40°C -155°C em laboratório, uma tendência diferente foi observada. A realização do teste de "percussão" após cada ciclo em laboratório até n=5 e, posteriormente, após 10, 20 e 30 ciclos, permitiu mapear a evolução completa dos locais de "percussão", conforme ilustrado de cima para baixo na Fig. 1.

A representação gráfica mostra claramente que, com o aumento do número de ciclos em laboratório, os locais iniciais do teste de "percussão" em torno das áreas da saída da ranhura se propagaram ao longo de todo o comprimento da barra em direção à região da barra que, em operação, corresponderia à área do núcleo do estator.

Além dessa propagação da delaminação, em alguns casos, os ciclos em laboratório de fato criaram novas "ilhas de percussão" na área do núcleo do estator onde não havia sido detectado nada inicialmente. Chamou a atenção o fato de essa tendência de propagação de uma delaminação existente ou da nucleação de novos locais isolados de "percussão" terem sido encontrados após a realização de um baixíssimo número de ciclos em laboratório em conformidade com o método IEEE (2 ou 3).

Quando o número de ciclos se aproxima de 30, a maior parte do comprimento da barra já apresenta algum tipo de indício pelo teste de "percussão". Ao controlar a dimensão das barras a cada ciclo, nota-se que a criação e progressão dessas áreas de delaminação são acompanhadas por um sistemático aumento da espessura do isolamento como um todo, conforme ilustrado pela Fig. 2, que compara a largura da barra nas condições inicial ("10.000 PARTIDAS E PARADAS ") e final (" +30 CICLOS IEEE").

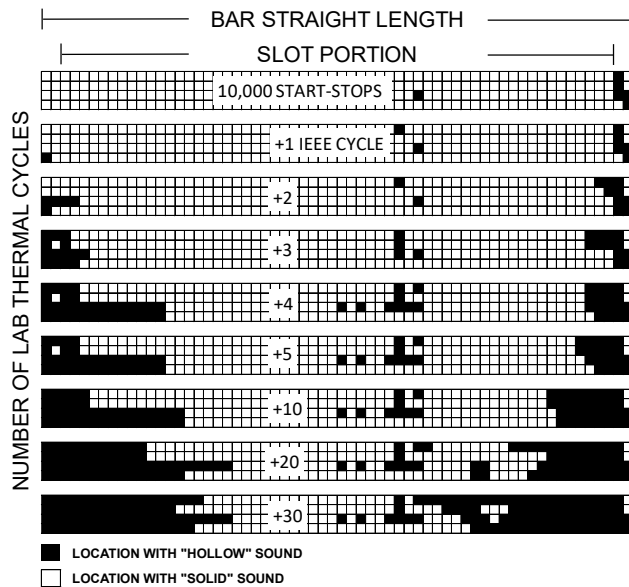


Fig. 1. Ilustração de 9 mapeamentos de teste de "percussão" realizados para diferentes condições de uma mesma barra. Para fins de identificação, foram delimitados 248 quadrados ao longo de todo o comprimento da barra. Cada quadrado representa uma área em que o teste de "percussão" foi realizado. Os quadrados "em branco" indicam que o resultado do ensaio foi negativo e que o local não apresentou indícios claros de defeitos sob essa condição específica. Um quadrado "escuro" indica um local onde o teste de "percussão" foi positivo e um possível defeito foi encontrado naquele momento. Os mapas foram dispostos em ordem crescente do envelhecimento do isolamento. O mapa superior representa a barra na condição "10.000 PARTIDAS E PARADAS", isto é, a condição "inicial". Imediatamente abaixo dele está a condição após um primeiro ciclo térmico pelo método IEEE; depois disso, após 2 ciclos; e assim sucessivamente, até chegar à

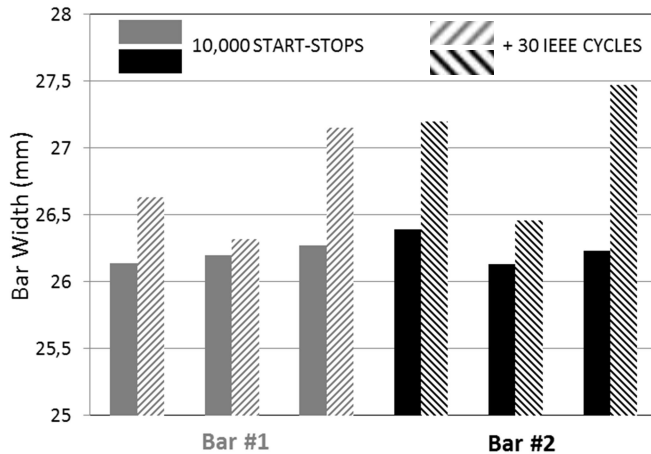


Fig. 2. Aumento da largura da barra medida para dois objetos de teste em três diferentes locais nas condições "10.000 PARTIDAS E PARADAS" e "+30 CICLOS

Embora a Fig. 2 mostre os resultados de duas barras ilustrativas medidas em três locais fixos, a mesma tendência foi encontrada em todos os objetos ensaiados. Em alguns casos extremos, verificou-se um aumento de cerca de 1 mm na largura da barra após os ciclos em laboratório pelo método IEEE em comparação com a condição inicial.

Tanto o teste de "percussão" quanto o controle dimensional sugerem que um baixíssimo número de ciclos em laboratório já é suficiente para causar modificações relevantes na estrutura interna do isolamento. Isso também foi confirmado pelos ensaios de caracterização mecânica, que mostraram que após 30 ciclos em laboratório a resistência à flexão e ao cisalhamento do volume do isolamento caiu por um fator de 3 (flexão) e 10 (cisalhamento).

As consequências desse aparente colapso da estrutura do isolamento também foram confirmadas por mudanças em suas propriedades elétricas, como ilustram os dados registrados na Fig. 3. O fator de dissipação em função da tensão aplicada para a condição de "10.000 PARTIDAS E PARADAS" apresenta curvas muito planas (linhas tracejadas na Fig. 3), o que indica baixos tip-ups do fator de dissipação, conforme esperado para um volume de isolamento com pouca delaminação ou locais vazios.

Por outro lado, em apenas 30 ciclos térmicos pelo método IEEE (linhas sólidas), os tip-ups do fator de dissipação aumentam até atingir valores da ordem de 0.4% - 0.6%, o que evidencia uma correspondência elétrica dos defeitos morfológicos anteriormente previstos.

Em seguida, foi investigada ao microscópio essa indicação indireta – embora clara – de que, mesmo após um baixíssimo número de ciclos em laboratório pelo método IEEE, as barras saíram de uma condição inicial relativamente boa e estável após o envelhecimento em operação para uma nova condição marcada por diversos defeitos.

Uma série de análises de seções transversais corroborou os resultados anteriores, confirmando que a maior parte do volume de isolamento na condição inicial estava isenta de delaminações ou vazios dentro do volume do isolamento e também na interface isolante-cobre, como ilustram as Figuras 4 (a) e (c). No entanto, após os 30 ciclos térmicos em laboratório conforme o método IEEE, foi possível identificar diversas delaminações distribuídas ao longo de toda a espessura do isolamento.

Um exame mais detalhado das áreas críticas revelou que uma delaminação representa uma separação da camada de mica na direção paralela ao feixe de cobre (Fig. 4 (b)). Notou-se a presença de delaminações típicas pontuais estendendo-se por alguns milímetros ao longo do comprimento da barra. Estruturas semelhantes na interface do cobre parecem ter se formado ainda antes, com apenas cerca de 5 ciclos em laboratório (Fig. 4 (d)).

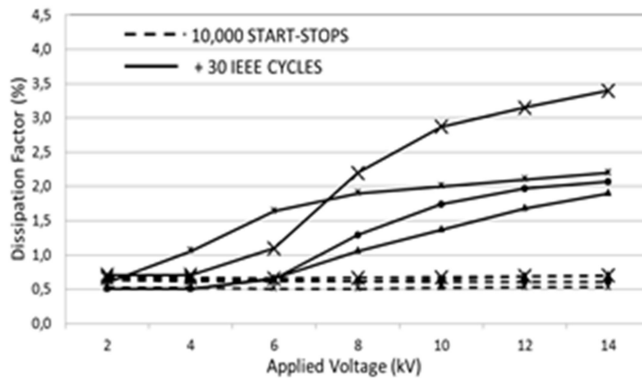


Fig. 3. Fator de dissipação em função da tensão aplicada. As linhas tracejadas representam as barras medidas na condição inicial de “10.000 PARTIDAS E PARADAS”, ao passo que as linhas sólidas representam as mesmas barras após 30 CICLOS IEEE.

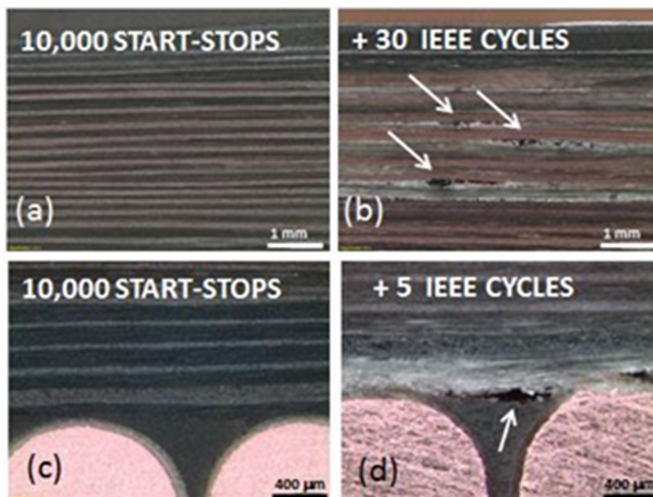


Fig. 4. Microscopias ópticas obtidas de amostras de seções transversais extraídas das barras após “10.000 PARTIDAS E PARADAS” (a e c), também provenientes de barras submetidas a poucos ciclos térmicos em laboratório (30 ciclos em b e 5 ciclos em d). As delaminações locais (indicadas pelas setas) são abundantes apenas no grupo de ciclos térmicos em

Para esclarecer os possíveis efeitos dessa degradação morfológica na “vida útil elétrica” do isolamento, um conjunto de 4 segmentos de barras retas de 2 m de comprimento e que foi submetido aos 30 ciclos térmicos em laboratório pelo método IEEE foi testado em um ensaio de envelhecimento elétrico acelerado à temperatura ambiente e 44.5 kV ao lado de outro conjunto de 3 segmentos de barras que representavam a “condição inicial” (apenas os ciclos de operação).

Os ensaios foram executados até cada uma das barras se degradar a ponto de impedir uma comparação adequada dos resultados. As 3 barras testadas na condição inicial (“10.000 PARTIDAS E PARADAS”) falharam após 214 h, 271 h e 410 h. Os 4 objetos representando o conjunto que sofreu os 30 ciclos adicionais do ensaio do

IEEE falharam após 54 h, 87 h, 168 h e 252 h. Embora se possa assumir alguma sobreposição entre as duas distribuições de vida útil, os resultados sugerem que o tempo de vida útil elétrica também sofreu mudanças detectáveis após o baixíssimo número de ciclos em laboratório.

#### 4.0 - DISCUSSAO

O conjunto de resultados apresentados aqui é pode ser resumido da seguinte forma:

- Não foram encontradas evidências claras de danos relevantes ao isolamento nas barras Roebel que foram submetidas a milhares de ciclos de partidas e paradas em operação em uma usina hidrelétrica reversível de grande porte;
- Os poucos defeitos encontrados após o envelhecimento apenas em operação apareceram na forma de pequenas delaminações pontuais, localizadas principalmente após a parte da barra que, em operação, corresponderia à saída do núcleo do estator;
- Quando as barras foram submetidas a um baixíssimo número de ciclos térmicos em laboratório conforme o método da IEEE 1310-2012, o volume de isolamento que anteriormente se encontrava em boas condições começou a apresentar uma degradação detectável e relevante;
- Os poucos ciclos em laboratório imediatamente propagaram os locais de delaminação já existentes no sentido da parte interna do núcleo das barras, um local que originalmente estava livre desses defeitos. Além disso, os poucos ciclos de ensaio realizados pelo método da IEEE 1310 mostraram uma tendência de criar novos defeitos em áreas atípicas;
- As súbitas mudanças na morfologia do isolamento causadas pelos primeiros ciclos em laboratório foram suficientes para causar impactos notáveis nas propriedades mecânicas e elétricas do isolamento.

Se assumirmos que o objetivo de um ensaio de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica é revelar informações sobre mecanismos realistas de envelhecimento que ao menos se aproximem daqueles passíveis de ocorrer em operação, os resultados aqui apresentados sugerem que o atual método da IEEE 1310- 2012 não atende a esse objetivo, já que gera defeitos atípicos e de forma excepcionalmente rápida, levantando a suspeita de que as características criadas podem, de fato, ser decorrentes de artefatos de ensaio – o que coincide com o enunciado da hipótese (2) deste estudo.

Embora o autor desconheça trabalhos anteriores que tenham abordado este assunto da forma apresentada aqui, a literatura [5] inclui algumas indicações que parecem corroborar o fato de que os ciclos térmicos em laboratório realizados em conformidade com o método da IEEE 1310 podem, de fato, provocar alterações muito rápidas na estrutura do isolamento.

Entretanto, é possível que os resultados encontrados neste estudo sejam diferentes dos obtidos em análises semelhantes e que utilizem diferentes tecnologias de isolamento. Isso se deve ao fato de que a forma e o grau do dano causado pelos artefatos de ensaio podem variar entre as diferentes tecnologias de isolamento. Embora o escopo do presente trabalho não contemple a investigação de possíveis melhorias ao método da IEEE 1310-2012 com vistas à eliminação de artefatos de ensaio, é razoável supor que qualquer esforço nesse sentido necessariamente passaria pela compreensão de ao menos dois aspectos:

(a) a diferença entre os parâmetros de ensaio obtidos e aqueles que são tipicamente gerados pelos ciclos de partidas e paradas em operação;

(b) o grau de semelhança necessário entre o ambiente de ensaio (disposição das barras, fixação, prensagem, etc.) e a operação real.

Em relação aos parâmetros de ensaio, existe uma clara demanda para que o ensaio seja prático e, portanto, para que pelo menos um de seus parâmetros relevantes seja ajustado de forma a ultrapassar o nível desse parâmetro em condições operacionais com o objetivo de provocar o efeito de aceleração desejado. Uma tentativa dessas, no entanto, pode ser uma fonte de resultados duvidosos.

Um exemplo disso é uma típica unidade hidrelétrica reversível que opera sob o regime cíclico de partidas e paradas, sofrendo inversões de operação algumas vezes dentro de um mesmo dia. Nessa condição, as diversas manobras de operação não oferecem o tempo necessário para que os enrolamentos sejam expostos à maior variação de temperatura possível, já que a unidade pode partir novamente muito antes do tempo necessário para o seu resfriamento completo.

Para um caso como este – ou outras situações semelhantes [6] –, é muito provável que a amplitude de temperaturas tipicamente usada no teste em laboratório seja, de fato, superestimada frente à realidade da

operação. Outro exemplo de incompatibilidade de parâmetros críticos é a temperatura máxima de ensaio em laboratório (155 °C), que também pode ser um parâmetro de teste arriscado, isto é, “propenso a produzir artefatos de ensaio”, uma vez que ele exagera muito a realidade encontrada no ambiente de operação. Nesse contexto, a necessidade de criar efeitos acelerados parece comprometer os resultados dos ensaios realizados conforme o método recomendado.

No que se refere ao ambiente de teste, a falta de aperto, compressão e qualquer outro tipo de sistema que mantenha, mesmo que parcialmente, as barras sob tensão também parecem representar uma diferença crítica em relação à realidade – e que pode muito bem introduzir artefatos de ensaio relevantes. A Fig. 1 sugere fortemente que a rápida propagação de defeitos em direção à parte central das barras pode ser um artefato de ensaio em sua totalidade, isto é, sem correlação com a realidade.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Dizer que “...uma operação com repetidos ciclos de partidas e paradas pode resultar no envelhecimento acelerado ou até mesmo na falha precoce dos sistemas de isolamento de alta tensão...” é quase um lugar-comum na comunidade de grandes máquinas elétricas rotativas. A suposição de que repetidas partidas e paradas podem causar danos aos modernos sistemas de isolamento de alta tensão de enrolamentos de estatores de máquinas rotativas de grande porte pode ser frequentemente encontrada em especificações técnicas, programas de testes e discussões de grupos de trabalho de especialistas

O método da norma IEEE 1310-2012 [1] é um procedimento de ensaio elaborado para simular os mecanismos de envelhecimento associados a um regime de operação em que máquinas rotativas de grande porte são submetidas a repetidos ciclos de partidas e paradas.

Os resultados aqui apresentados indicam que o método da IEEE 1310-2012 é uma prática de ensaio recomendada que, pelo menos em alguns casos, mostra-se propensa a produzir significativos artefatos de ensaio. Em situações em que o julgamento sobre a qualidade de um produto final possa basear-se na correta interpretação dos resultados do ensaio, a presença de artefatos como os discutidos aqui pode representar um sério obstáculo prático.

Atualmente, o método de ensaio da IEEE 1310 tornou-se uma prática mundial para um grande número de projetos, incluindo os casos em que sua aplicação é mais do que questionável, como para as unidades de carga de base e até mesmo unidades refrigeradas a água. Dessa forma, a reavaliação de seu conteúdo, seus resultados e sua aplicação é de extrema relevância. Embora o escopo do presente estudo não inclua a apresentação de uma solução definitiva a essas dificuldades, os fatos e resultados aqui discutidos devem alertar a comunidade para essas limitações do método da IEEE 1310-2012 e, eventualmente, motivar maior cautela em seu uso, além de, possivelmente, oferecer uma base para outras pesquisas e melhorias ao método.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 1310-2012, “IEEE Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Rotating Machines”, 2012.
- [2] H. Zhu and C. Morton, “Quality Evaluation of Stator Coils and Bars under Thermal Cycling Stress”, 2006 IEEE International Symposium of Electrical Insulation, Toronto, Canada, June 2006.
- [3] ASTM D 790-03, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials”.
- [4] IEEE Std 286-2000, “IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery stator Coil Insulation”, 2000.
- [5] H. Zhu and D. Kung, “Acoustic Monitoring of Insulation Delaminations During Thermal Cycling Tests on a Stator Bar”, 2009 IEEE electrical Insulation Conference, Montreal, Canada, May 2009.
- [6] R. F. Weddleton and J. F. Lau, “Description of a Thermal Cycling Test set-up for Large Turbine Generator Armature Coils”, 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, USA, June 1994.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS





Thomas Hildinger – São Paulo, Brasil, 1960.

Graduado em Engenharia Elétrica em 1983 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Graduado em Administração de Empresas em 1989 pela Faculdade de Administração e Economia da Universidade de São Paulo.