



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/10

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**ANÁLISES E PROCEDIMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DE DANOS EXTENSOS EM NÚCLEO ESTATÓRICO
DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE GRANDE PORTE – UM CASO PARTICULAR**

**Thiago C. D. Cuyabano (*)
ANDRITZ Hydro**

**Paulo H. S. Feitosa
ENGIE**

**Laís M. Ferraz
ANDRITZ Hydro**

**Hikaro B. Moura
ENGIE**

RESUMO

A ocorrência de falta bifásica em um hidrogerador síncrono de 120 MW causou dano severo ao núcleo do estator, ocorrendo fusão de material. Originalmente empilhado de forma contínua, o núcleo não permitiria simples substituição das lâminas danificadas, e as técnicas de reparo tradicionais não lograriam recuperar o equipamento sem trazer limitações operacionais.

Buscando evitar extensos prazos de indisponibilidade, foi adotada uma solução inovadora que consistiu na remoção de um bloco completo do núcleo, com posterior reposição de lâminas e reinstalação do enrolamento. O núcleo ficou parcialmente segmentado na área recuperada e foi ensaiado para comprovar a efetividade do trabalho executado.

PALAVRAS-CHAVE

Núcleo, Recuperação, Curto-circuito, Estator, Ensaio.

1.0 - INTRODUÇÃO

No dia 14-dez-2015 ocorreu desligamento intempestivo de uma unidade geradora de 120 MW, por atuação do relé de proteção diferencial 87G do gerador, sendo registrado um curto-circuito bifásico de grande intensidade.

Quatro dias depois, foi realizada uma inspeção conjunta na unidade, pela ENGIE e ANDRITZ, na qual foram constatados danos ao núcleo e ao enrolamento do estator, ocorrendo fusão de materiais de ambos componentes em uma região compreendida entre 10 ranhuras dos últimos 5 pacotes inferiores de lâminas. A falta foi causada pelo desprendimento de duas chavetas do rotor, que provavelmente atingiram o estator na região afetada.

Outros danos de menor gravidade ocorreram em ligações dos polos do rotor, sendo mais simples seu reparo e substituição.

Em função do aspecto construtivo do núcleo, da localização e extensão do dano, as técnicas de reparo tradicionalmente adotadas, como eletro-erosão (ataque químico), inserção de papel de mica, esmerilhamento superficial, aplicação de resina de alta capilaridade ou instalação de insertos isolantes em alguns dentes do núcleo ("false tooth"), não seriam capazes de recuperar o equipamento sem trazer limitações operacionais ou desvios na forma de onda induzida da tensão.

2.0 - ESTRATÉGIA DE REPARO DO NÚCLEO

Buscando evitar um desmontagem completa do núcleo, que resultaria em prazos extensos de parada devido à necessidade de remoção completa do enrolamento e fabricação de um novo lote completo de lâminas magnéticas e barras de reposição, foi analisada uma solução não usual, até então não identificada sua aplicação para máquinas síncronas de grande porte (>100 MW).

Tal solução consistiria na remoção de um bloco completo do núcleo danificado em toda a sua extensão radial, de aproximadamente 270 kg, com posterior reposição das lâminas removidas por novas peças e reinstalação do enrolamento, como ilustrado na Figura 1. Desta forma, o núcleo recuperado passaria a ter uma segmentação parcial na área onde houvesse reposição de lâminas de aço silício.

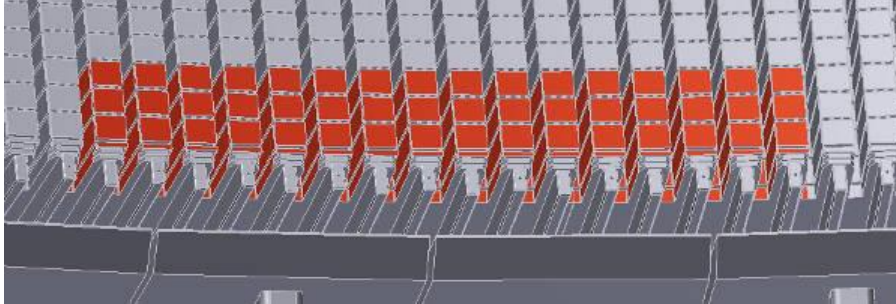


FIGURA 1 – Estudo inicial do bloco de núcleo a ser completamente substituído

Para avaliar e comprovar a efetividade do trabalho de recuperação adotado, o núcleo seria posteriormente ensaiado por completo, com foco na região do reparo.

A estratégia descrita foi dividida em etapas, para uma análise mais aprofundada das alternativas e eventuais consequências oriundas de cada atividade. Essas etapas estão detalhadas nos subitens a seguir, nos quais são evidenciados os principais desafios impostos pelo incidente e pelas técnicas exigidas para análise e execução dos serviços.

2.1 Identificação, delimitação e acesso à área afetada

A extensão dos danos, decorrentes da forte descarga elétrica ocorrida, somente pôde ser devidamente avaliada, *in loco*, após desmontagem da máquina com retirada do rotor e das barras das ranhuras afetadas. Essa etapa foi a primeira e mais importante para avaliação do gerador, pois foi a partir daí que se puderam vislumbrar adequadamente todas as atividades subsequentes requeridas.

Na inspeção foi possível observar a ocorrência de fusão significativa de aço silício do núcleo e de cobre do enrolamento devida ao curto-circuito, como se observa nas Figuras 2 e 3 a seguir.



FIGURA 2 – Fusão de material observada na inspeção do estator

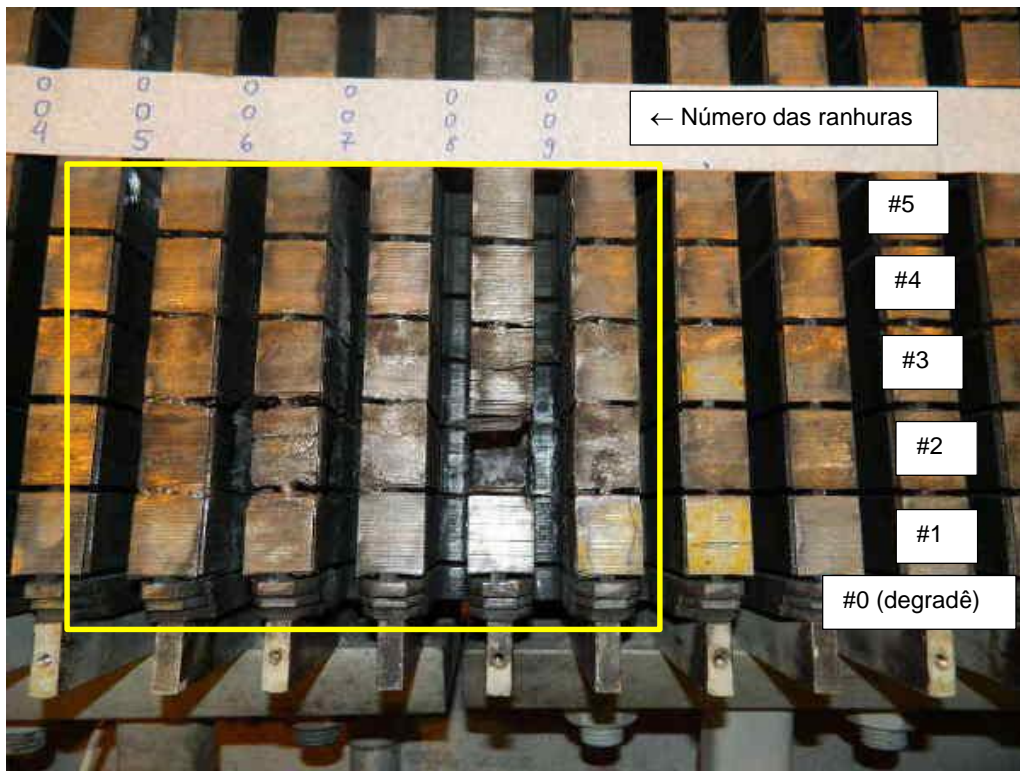


FIGURA 3 – Mapeamento da área danificada após remoção local do enrolamento

Na inspeção ficaram constatados, portanto, danos profundos em uma região relativamente extensa, compreendendo pelo menos 25 dentes, dos 4 pacotes normais do núcleo mais os 5 pacotes “degradê” sob esses mesmos dentes.

Como as lâminas desse estator possuem 16 ranhuras cada, foi decidido que o bloco a ser removido teria essa mesma extensão tangencial, de forma a se otimizar a fixação do novo conjunto de lâminas nas caudas de andorinha da carcaça. A área total a substituir englobava, portanto, as ranhuras 648 até 016 e os pacotes #0 até #4, segundo Figura 4.

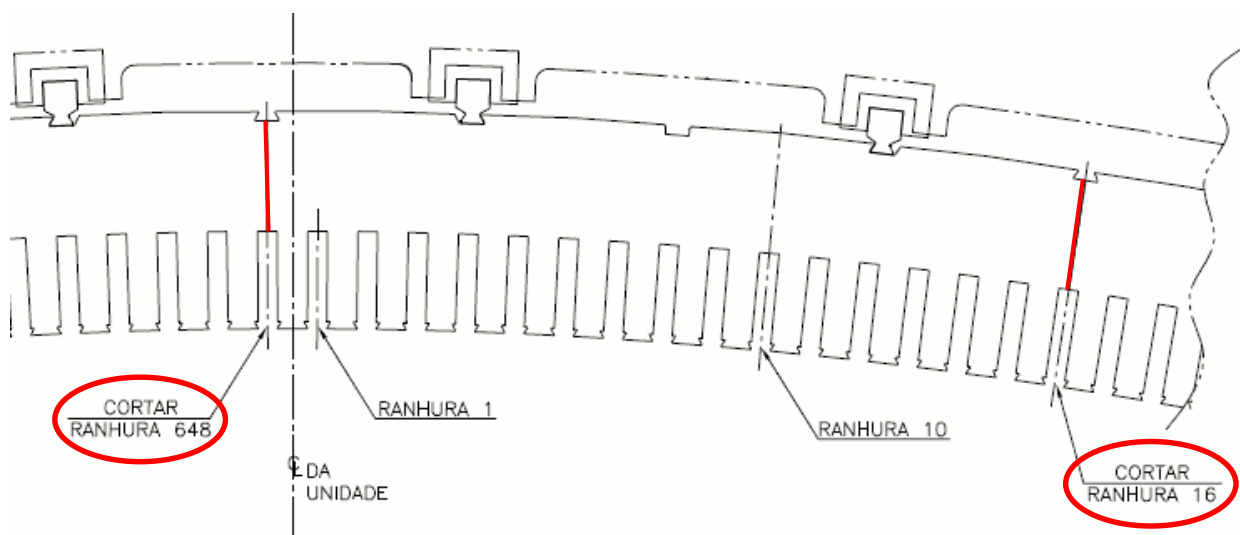


FIGURA 4 – Locais de corte do bloco de núcleo

2.2 Método de corte e remoção do material danificado

Após análise conjunta pela ENGIE e pela Engenharia de Geradores e Supervisão de Campo da ANDRITZ, foi decidida que a remoção de lâminas de núcleo seria realizada com uso de máquina lixadeira (“Makita”) com disco de corte para aço inox, em passos incrementais, até a completa remoção de todas as lâminas danificadas.

O corte deveria ocorrer na coroa do núcleo (vide indicações da Figura 4) e esse processo seria combinado com lixamento, tratamento e acabamento superficial, visando minimizar as folgas laterais que invariavelmente seriam introduzidas entre as lâminas originais e o novo pacote compacto.

2.3 Limpeza, tratamento superficial e preparação do núcleo

O ajuste, limpeza e isolamento das faces recortadas, que permaneceram no núcleo, precisaram ser minuciosamente executados para evitar curto-circuito interlaminar. Após a conclusão da remoção de todas as lâminas danificadas, houve uma limpeza e acabamento das bordas recortadas, com lixamento e aplicação de resina epóxi isolante. Notar, na Figura 5, uma fotografia dessa etapa, onde também se pode observar claramente o vão resultante da remoção do núcleo danificado.



FIGURA 5 – Finalização do corte e acabamento da superfície

2.4 Limpeza geral e demais reparos

Além da região principal danificada do núcleo, houve uma limpeza geral da carcaça e de toda superfície interna do núcleo com recuperação pontual de pequenas marcas de impacto causadas por detritos oriundos do incidente. Nesses reparos pontuais do núcleo efetuou-se um lixamento superficial e aplicação de resina isolante de alta capilaridade, da maneira tradicional.

2.5 Ensaio de alta indução intermediários

Após o tratamento das laterais da região cortada com a resina de isolamento e cimentação, antes mesmo de efetuar a instalação das novas lâminas, foi realizado ensaio de magnetização do núcleo sob densidade de fluxo de 1,0 Tesla, objetivando verificar a integridade da isolamento interlaminar após os reparos pontuais ao redor no núcleo e da região onde foram retiradas as lâminas danificadas. Com esse ensaio, qualquer dano remanescente poderia ser facilmente identificado e receber as ações corretivas apropriadas.

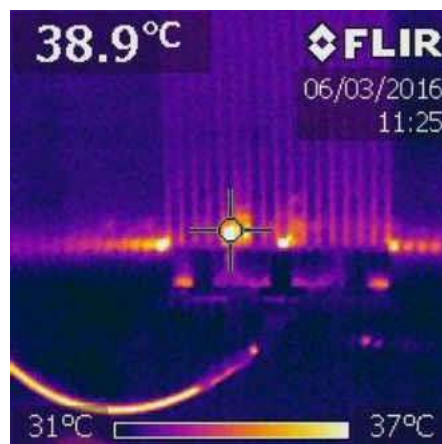


FIGURA 6 – Ensaio de indução intermediário

Como pode ser observado na Figura 6, durante o ensaio foram detectados diversos pontos quentes na região central acima do pacote de lâminas retirado. Estes pontos foram corrigidos, após o ensaio, com reaplicação de resina epóxi de alta capilaridade. Nas laterais da região cortada, concluiu-se que o aquecimento, com perfil graduado, é resultado de fluxo disperso, como será comentado em detalhes na seção 3.0 adiante.

2.6 Remontagem do núcleo

O conjunto de novas lâminas de reposição – pacote composto por lâminas do “degradê”, lâminas espaçadoras de dutos, lâminas normais e resina de cimentação – foi inserido pela parte inferior do estator e fixado radialmente pelas caudas de andorinha e axialmente suportado pelos flanges do estator. Lateralmente, este pacote compacto foi calçado e isolado com papel “Nomex” e resina epóxi.

Durante a inserção de lâminas foram utilizados, temporariamente, calços calibradores finos, para manter a folga radial entre a parte externa do núcleo e as caudas de andorinha da carcaça, conforme realizado no empilhamento original.

Neste novo bloco do núcleo, que pode ser visualizado na Figura 7, foram instalados DTRs adicionais, para monitoramento específico da área recuperada durante a operação do gerador.



FIGURA 7 – Núcleo sendo montado e finalizado com novo bloco de lâminas

2.7 Ensaios de alta indução finais

Após a conclusão da remontagem do núcleo, foram aplicados novos ensaios de indução sob 1,0 Tesla para validação final, por período de tempo suficiente para a estabilização das temperaturas do núcleo.

Durante esses ensaios ainda era observado um perfil de aquecimento não uniforme em função da segmentação local que foi criada ao se substituir um bloco lâminas, porém os pontos quentes não ultrapassaram mais que 15°C da temperatura média do núcleo. A Figura 8 mostra um dos resultados capturados pelo termovisor durante o ensaio.

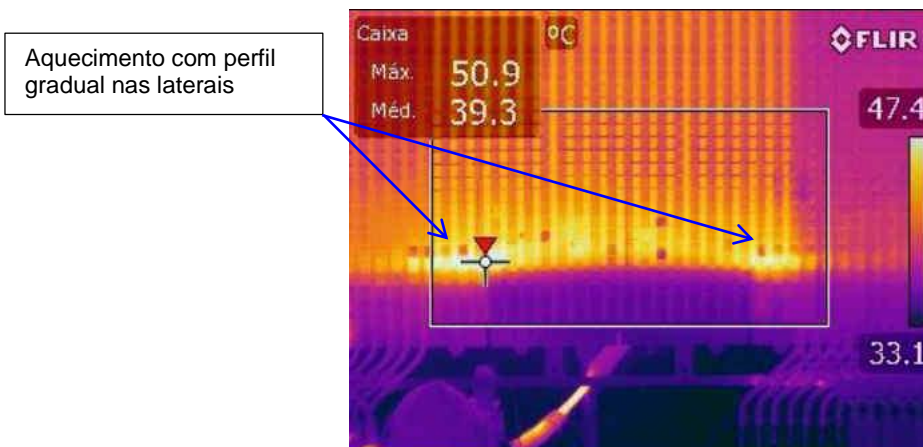


FIGURA 8 – Ensaio de indução final

A conclusão satisfatória do último ensaio, com estabilização das temperaturas limitadas pontualmente em até 15°C da média do núcleo, após 120 minutos, foi o critério de aceitação para liberação da rebobinagem do estator, utilizando barras, conexões e cunhas sobressalentes já disponíveis na usina.

3.0 - ANÁLISE DOS EFEITOS MAGNÉTICOS E TÉRMICOS NO NÚCLEO

Ao longo do processo de recuperação, montagem e ensaios do núcleo, foram desenvolvidas algumas análises entre as engenharias da ENGIE e ANDRITZ, visando certificar-se que o conjunto poderia voltar à operação de maneira segura e sem aquecimentos danosos.

Dentre as técnicas utilizadas para análise dos efeitos magnéticos desse núcleo, localmente segmentado após o reparo, pode-se destacar o método de elementos finitos, com simulações em softwares consolidados de análise numérica. Qualitativamente podem-se comparar os resultados dos ensaios de indução com as simulações computacionais.

3.1 Arranjo dos ensaio de indução

Os ensaios foram conduzidos da maneira tradicional, enrolando um cabo de bitola apropriada à corrente de ensaio calculada de aproximadamente 400 A, formando 9 espiras distribuídas ao redor do estator.

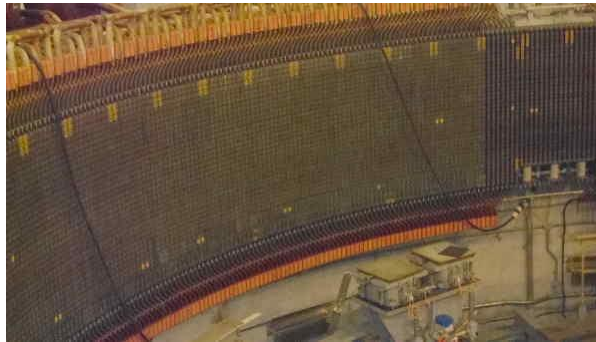


FIGURA 9 – Cabo ao redor do estator para ensaio de indução

Além disso, foram empregados alguns instrumentos para acompanhamento dos ensaios: transformador de potencial (TP), transformado de corrente (TC) e Wattímetro. Havia também algumas espiras de controle (“sonda”) para monitorar a tensão induzida por espira (com multímetro simples) e, com isso, calcular a densidade de fluxo no núcleo magnético, que deveria estar próxima a 1,0 T.

3.2 Simulações por elementos finitos

Devido à disposição das bobinas para a realização do ensaio de indução, o núcleo é submetido a um fluxo magnético puramente tangencial, majoritariamente pela coroa das lâminas. Os efeitos oriundos desse arranjo não são exatamente os mesmos aos quais o gerador está submetido quando em operação normal, pois os polos magnetizam o núcleo radialmente pelos dentes ao longo de todo seu comprimento axial.

Em função disso, durante os ensaios de alta indução, foi observado um sobreaquecimento do circuito magnético nas regiões de fronteira do reparo no núcleo, causados, principalmente, pelos efeitos de fluxo disperso na direção axial no entorno dessa fronteira. A segmentação das lâminas nesta região criou uma descontinuidade e fez com que na fronteira fosse criada uma área de maior relutância.

Esses efeitos foram simulados pelo software Maxwell, cujos resultados apontavam claramente a existência do referido campo axial, além de um pequeno efeito de adensamento de fluxo, como mostra a Figura 10. O valor do campo nessas simulações é meramente usado para noções de escala e permitir a visualização do efeito.

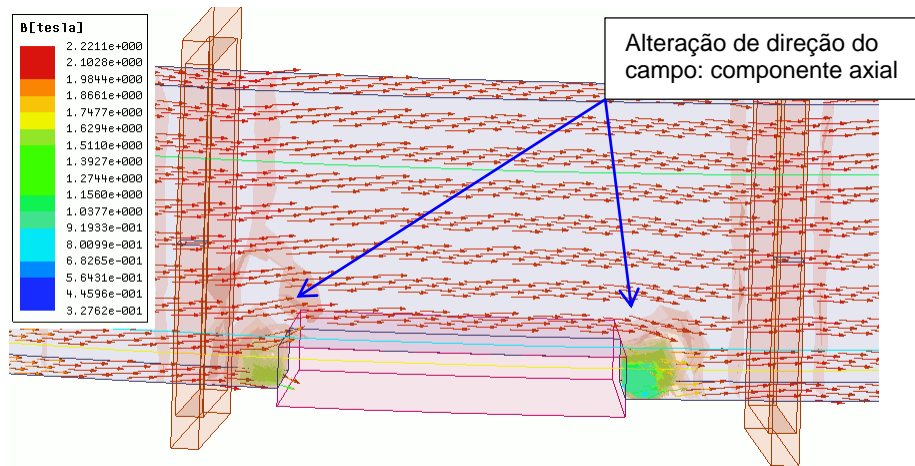


FIGURA 10 – Simulação mostrando efeitos nas linhas de campo na região do bloco substituído

Na Figura 11, seguinte, é possível ver o traço que representa a densidade de fluxo axial (destacado pelas setas): nas regiões laterais do novo bloco do núcleo (ranhuras 648 e 016) há um pequeno entreferro de aproximadamente 1 a 2 mm, e essa descontinuidade local causa o desvio das linhas de fluxo, como visto na Figura 10.

O gráfico da Figura 11 ilustra o valor do fluxo magnético na componente axial, na região “limite”, na direção da altura entre o novo bloco do núcleo e o resto do núcleo estático. Os picos de fluxo, destacados nesse gráfico, são as regiões onde se encontram esse pequeno entreferro, sendo a primeira descontinuidade referente ao fluxo “contornando” o novo bloco e, a segunda, ao fluxo retornando à condição inicial após o térmico do bloco.

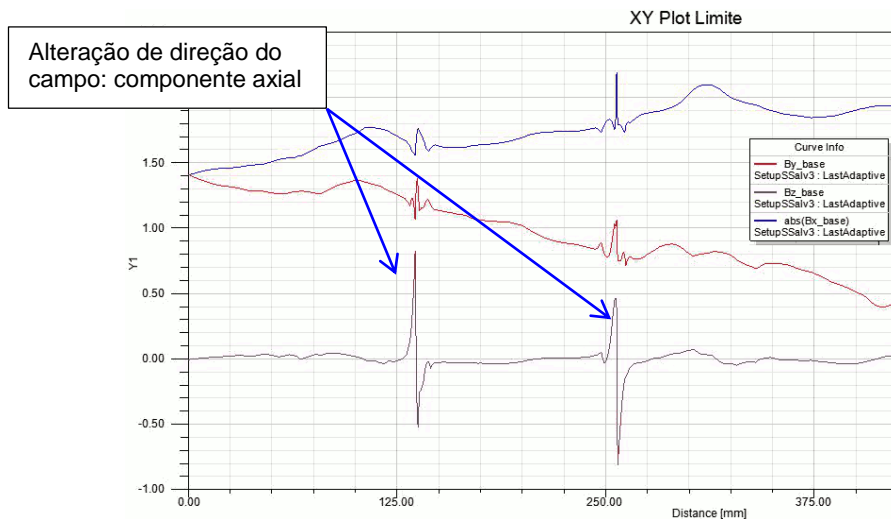


FIGURA 11 – Gráfico com valor das densidades de fluxo simuladas

3.3 Aquecimento sob ensaio e correlação com simulações

Conforme já indicado na seção 3.2, o campo magnético no núcleo do estator, sob o arranjo do ensaio de indução, é perturbado pela descontinuidade parcial criada pelo corte e reposição de lâminas. A simulação das linhas de campo por elementos finitos demonstra que, por causa dessa descontinuidade parcial, bem na região de fronteira do corte, a linha de campo muda de direção e assim surge uma componente axial.

Essa componente axial das linhas de campo (destacadas nas Figuras 10 e 11) é justamente o que induz perdas parasitas mais elevadas no local, evidenciadas também pela temperatura medida nos ensaios de indução (vide Figura 8).

Contudo, quando em operação normal mesmo após muitas horas sob magnetização nominal, o núcleo não apresentou aquecimento na área reparada, pois o fluxo magnético criado pelos polos era predominantemente radial e bem distribuído, não causando as perdas parasitas por campo axial disperso.

4.0 - CONCLUSÃO

Ao término de todos os serviços de reparo e montagem da unidade geradora, com os devidos ajustes mecânicos em verticalidade e centragem, se iniciaram as atividades de re-comissionamento da unidade.

Além dos ensaios básicos de um comissionamento, como estabilização de temperaturas de mancais em giro mecânico; balanceamento mecânico e magnético conforme necessário; aquisição dos sinais de oscilação de eixos e rejeições de carga, foi dado grande destaque ao monitoramento das temperaturas de operação das partes ativas do estator para comprovar que núcleo e enrolamento apresentassem comportamento térmico dentro das especificações.

O ensaio de “heat run” (estabilização de temperaturas) sob carga nominal foi executado por um período de aproximadamente 6 horas, durante o qual as temperaturas das partes ativas foram acompanhadas. Destaca-se que durante a montagem da máquina já haviam sido instalados conjuntos de 8 DTRs extras na área recuperada do núcleo, além de fibras óticas fixadas no entreferro justamente para permitir um monitoramento detalhado dessa região.

Durante o ensaio, tanto o enrolamento como núcleo do estator apresentaram perfis de aquecimento normal, atestando a operação confiável da máquina. Desta forma o retorno para operação comercial da unidade, baseado nas técnicas de reparo do núcleo, empregadas nesta oportunidade, ocorreu conforme as expectativas e sem restrições.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) STONE, G. C., CULBERT, I., BOULTER, E. A., DHIRANI, H., “Electrical Insulation for Rotating Machines”, 2ª edição, Wiley-IEEE Press, 2014

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Thiago Castro Dias Cuyabano

Natural de Campinas-SP (1980). Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP, 1998-2002) com cursos de Extensão em Sistema de Energia (2012) e pós-graduação em Gerenciamento de Projetos (2015-2017). Desde 2003 na ANDRITZ, atuando na área de sistemas de controle para máquinas, e a partir de 2005 atuando como engenheiro de hidrogeradores nos departamentos comercial e de engenharia.

Paulo Henrique do Santos Feitosa

Natural de Passos-MG (1983). Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI, 2001-2006) com especialização em Sistemas Elétricos de Potência (2012). Desde 2008 na ENGIE Brasil Energia, atuando na área de engenharia de manutenção em hidrogeradores e equipamentos associados.

Laís Machado Ferraz

Engenheira Eletricista formada pela Universidade de São Paulo (USP, 2010-2015) com parte dos estudos feitos na University of Toronto (Canadá, 2012). Trabalha na ANDRITZ desde 2014, atuando na área de propostas técnicas, primeiramente com sistemas auxiliares elétricos, atuando posteriormente como engenheira de propostas de geradores.

Hikaro Batista Moura

Natural de Minaçu-GO (1989). Técnico em Eletromecânica e Eletrotécnica formado pela Escola SESI-SENAI/SAMA (2006-2008). Desde 2009 na ENGIE Brasil Energia, atuando na área de manutenção elétrica.