



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

CB/GGH/22

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

METODOLOGIA E RESULTADOS DA REFORMA DO GERADOR DA UG#1 DA UHE GBM (FOZ DO AREIA)

Marcos V. da Silva (*)
GE Renewable Energy

José Roberto P. da Silva
COPEL GeT

Marco A. Pinhoti Santos
GE Renewable Energy

RESUMO

Durante a sua operação, a unidade 1 da UHE GBM foi submetida a severas solicitações eletromecânicas. Em 2016, após 35 anos de operação, essa unidade foi comprometida por quatro curtos-circuitos, em intervalos de aproximadamente um mês, o que exigiu a substituição do seu enrolamento estático. O artigo aborda o processo de substituição desse enrolamento, com aplicação de novas tecnologias e melhorias de projeto, materiais e estratégias, com destaque para proteção contra efeito Corona, isolamento entre fios elementares, sistema de amarrações, sistema de conexões série entre barras, correção dos danos nos polos do rotor, na desmontagem e montagem da unidade.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador, Enrolamento estático, Reparo emergencial, Projeto de enrolamentos estáticos, Montagem de geradores

1.0 - INTRODUÇÃO

Com base na última revisão dos índices de disponibilidade da grande maioria das plantas que fazem parte do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE), é importante, para os Agentes de Geração, reduzir o número de paradas de máquinas. Por outro lado, os riscos de falhas intempestivas aumentam com o tempo de operação das máquinas, como na UHE Governador Bento Munhoz (antiga UHE Foz do Areia), com quatro unidades de 465MVA, que operam a trinta e cinco anos, tempo muito próximo do tempo estimado de vida útil para uma máquina de grande porte.

No caso dessas paradas intempestivas, estratégias e ações que impliquem em uma reforma emergencial devem considerar a aplicação de novas tecnologias, visando o aumento de confiabilidade do novo projeto, a rápida execução dos serviços e o retorno no menor tempo possível. E esse foi o cenário ocorrido na unidade 1 da UHE GBM. Após uma vida operacional severamente solicitada elétrica e mecanicamente, essa unidade 1 teve uma parada intempestiva que exigiu a troca de seu enrolamento estático, depois de sofrer quatro curtos-circuitos sucessivos em um intervalo de aproximadamente um mês.

Essa substituição obrigou a Copel GeT fazer uma contratação de emergência, que exigiu cuidados na escolha da empresa contratada e na elaboração do contrato.

Cuidado na escolha da empresa contratada para que essa oferecesse uma garantia segura de que faria a substituição do enrolamento no prazo legal máximo estipulado, atendendo integralmente a Especificação Técnica

e com um preço razoável. E o cuidado na elaboração do contrato de engenharia e serviço, para não haver qualquer violação dos rigorosos e detalhados itens da Legislação a que as empresas de economia mista de energia elétrica, como a Copel GeT, estão submetidas.

2.0 - HISTÓRICO DA UG#1 DA UHE GBM (FOZ DO AREIA)

A usina Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto (UHE GBM) é composta por quatro unidades geradoras de 465 MVA / 418,5 MW, 16,5 kV, 56 polos, e tem uma idade média de 35 anos de operação, com um índice de disponibilidade anual em torno de 93%.

São máquinas robustas e que sempre tiveram um papel determinante na qualidade de operação do sistema Sul, bem como na operação da interligação Sul/Sudeste 500/750 kV, tanto em regime permanente como em regime dinâmico. Devido a sua característica geo-elétrica, ao longo da sua vida essas máquinas têm sido fortemente solicitadas em termos de geração de potência ativa e reativa, de controle de tensão e como auxiliar na recuperação e controle da frequência do Sistema Interligado Nacional – SIN. Essas máquinas foram submetidas a inúmeras perturbações eletromecânicas, especialmente nos anos iniciais de operação do sistema de 500kV e 750kV adjacentes a essa usina. Também por requisitos do SIN, foram submetidas a constantes e praticamente diárias reversões - operação compensador síncrono/operação gerador – manobras que submetem o enrolamento estatórico a um importante degrau de temperatura e por isso um esforço igualmente importante na união entre a isolamento das barras estatóricas e o cobre dessas barras.

Outros aspectos consideráveis na vida operacional dessas máquinas foram as falhas nos transformadores elevadores da usina e os índices elevados de descargas parciais na unidade 1. A engenharia da COPEL GeT monitora e analisa regularmente esse nível de descargas, e o risco de falha mais de uma vez foi identificado com base nesse acompanhamento. Durante o trabalho que a COPEL desenvolveu para identificar a causa dos defeitos nas barras estatóricas, todos esses fatores foram considerados, sobretudo na decisão final sobre as ações a serem tomadas. Porém, decorridos 35 anos dessa tumultuada vida operativa, em 19/12/2015, a unidade geradora 1 da UHE GBM saiu de operação devido a uma falta fase-terra no estator. Em 19/01/2016, ocorreu nova falta fase-terra no estator do mesmo gerador. Em 10/02/2016, mais uma falta fase-terra no mesmo estator. Em 24/03/2016, o mesmo gerador 1 sofreu três defeitos simultâneos no estator, sendo duas faltas fase/fase e danos na parte inferior de centenas de barras de topo, assim como na face inferior de todas as bobinas polares. A quantidade de polos danificados e a grande quantidade de barras de topo danificadas mecanicamente impediu a adoção de um reparo, tendo-se então definido pela substituição de todo o enrolamento estatórico da unidade 1 da UHE GBM. Tal evento foi apresentado pela COPEL em publicação anterior, e.g. [1]

3.0 - OBJETIVOS E DESAFIOS DO REPARO

Com base no exposto na seção anterior, uma vez que a unidade #1 apresentou falha definitiva no seu enrolamento estatórico e de caráter irreparável, a COPEL deu início a um processo de aquisição de serviços de reparo em caráter emergencial. O grande objetivo era a substituição integral do enrolamento estatórico danificado, baseado no fato de que o mesmo já encontrava-se no fim de sua vida útil e também para atualizar a tecnologia de isolamento e embutimento originalmente empregados. Todos estes requisitos ainda tinham como complemento o prazo reduzido de retorno da unidade à operação comercial, já que tal indisponibilidade trazia penalidades severas em termos financeiros.

Explorando mais detalhadamente os requisitos técnicos, é importante ressaltar as preocupações levantadas na investigação realizada pela COPEL sobre a falha intempestiva da unidade #1, conforme relatado nas seções anteriores, além de outros aspectos que converteram-se em requisitos para o enrolamento do estator na especificação técnica, tais como:

- Não utilização de calços laterais planos no sistema de embutimento das barras, mas sim um sistema que promova adequado contato entre a barra e a ranhura
- Cunhas com material de tecido de fibra de vidro e resina epóxi
- Adequada faixa de resistência superficial da barra estatórica, na proteção condutiva de ranhura
- Isolação reforçada entre fios nas regiões de transposição Roebel ao longo da barra estatórica
- Solicitação dielétrica de 2,5 kV/mm na isolamento principal à massa da barra estatórica
- Manutenção das dimensões principais do projeto existente, garantindo adequada interface com sistemas existentes (guias de ar, conexões estatóricas existentes)
- Realização de ensaios de ciclos térmicos e posterior realização de ensaio de envelhecimento acelerado, bem como tensão de ruptura de amostras de barras.

Adicionalmente aos temas relacionados ao enrolamento do estator, conforme mencionado acima, outros requisitos da especificação técnica envolviam outros componentes da unidade geradora que deveriam ser inspecionados e reparados, ou seja, não seriam substituídos, tais como:

- Realização de uma limpeza adequada do núcleo estatórico, com posterior avaliação do seu estado e reparos pontuais, onde necessário, e;
- Verificação do estado dos polos do rotor do gerador quanto à curto-circuitos entre espiras, integridade da isolamento à terra, com reparos pontuais nas aletas de ventilação de algumas espiras danificadas

Aliado a todos os requisitos apresentados acima, o caráter da reforma era emergencial e todo o trabalho técnico e diligente deveria ser executado considerando estratégias de redução de prazo, para garantir um rápido retorno da unidade à operação. Para tanto, a cooperação entre todas as áreas de ambas empresas, tais como engenharia, planejamento e gestão de projeto, montagem e instalação de campo, deveria ser um fator preponderante durante todo o projeto.

Este informe abordará sobretudo os aspectos técnicos de engenharia, de planejamento e de desmontagem/montagem em campo, o que será explorado em maiores detalhes nas seções subsequentes.

4.0 - O PROJETO ORIGINAL E O NOVO PROJETO

O projeto original da unidade geradora #1 da UHE GBM é datado de 1978, cujo fabricante original foi a Brown Boveri Company (BBC) e cujo acerto técnico faz parte da GE Renewable Energy atualmente. As características principais do gerador e do enrolamento são:

- Potência: 465000 kVA
- Tensão (Un): 16,5 kV +5% / -7%
- Rotação: 128,57 rpm
- Número de pólos: 56
- Frequência: 60 Hz
- Classe térmica de isolamento:
 - o Estator: F
 - o Rotor: F
- Elevações de temperatura (acima de 40°C do ar ambiente):
 - o Estator: 85°C
 - o Rotor: 85°C
- Número de ranhuras do estator: 360
- Tipo de enrolamento estatórico: Ondulado, de dupla camada
- Transposição Roebel: 540°
- Diâmetro interno do núcleo estatórico: 11.600 mm
- Comprimento do núcleo estatórico: 3.020 mm

Outras peculiaridades do projeto original contavam com sistema de embutimento com sistema de calços laterais condutivos e planos, bem como o sistema de cunhagem sem mola ondulada com travamento por cunha de travamento, como pode ser observado nas Figuras 1 e 2.

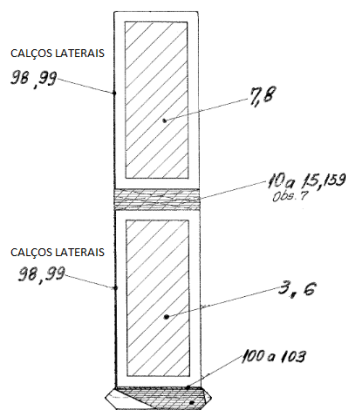


Figura 1 Embutimento da barra original

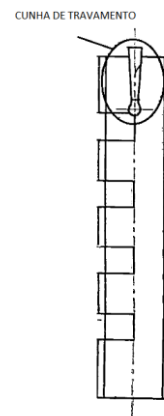


Figura 2 Cunha original

Como este projeto faz parte do acervo técnico da GE Renewable Energy, todas as informações do projeto original estavam disponíveis, adicionando riqueza técnica ao conteúdo disponibilizado pela COPEL juntamente com as especificações técnicas. Isto possibilitou o adequado modelamento matemático do gerador original na ferramenta de cálculo eletromagnético atualmente utilizada pela GE, seguindo a abordagem adotada pela GE nas reformas de geradores, conforme publicação promovida pela GE, e.g. [2].

O modelamento eletromagnético e a estratégia de reforma também levou em conta questões de planejamento, logística e montagem em campo, já que o ganho de tempo e as facilidades na realização dos trabalhos em campo eram aspectos fundamentais para cumprir com o caráter emergencial da reforma. Assim sendo, o novo projeto considerou o reaproveitamento de todas as conexões do estator, bem como dos suportes. Para tanto, a nova barra estatórica deveria ser concebida com a mesma geometria da barra original, ou pelo menos com os menores desvios possíveis, a fim de possibilitar o máximo reaproveitamento de todos os componentes de interface existentes.

Para garantir total compatibilidade, mesmo possuindo o desenho original, foram solicitadas amostras das barras originais que foram enviadas para a fábrica da GE, que realizou a engenharia reversa da geometria das barras originais, confirmando todos os valores relevantes para o projeto e fabricação de barras geometricamente compatíveis. A etapa de engenharia reversa é importante para garantir o adequado projeto de novos componentes, cujas técnicas de medição variam de acordo com o componente e condições do ambiente de medição, conforme apresentado em outra publicação promovida pela GE, e.g. [3]. Tais dimensões foram devidamente verificadas e adaptadas no desenho das novas barras, que foram concebidas dentro do último padrão tecnológico de fabricação, através de máquinas de dobra robotizadas de alta precisão e repetibilidade.

4.1 Aspectos relacionados às novas tecnologias aplicadas

Abaixo são destacados os principais aspectos tecnológicos modificados na reforma do enrolamento da UG#1 da UHE GBM:

- Sistema de embutimento das barras/bobinas. O sistema empregado pela GE, é conhecido como *Round Packing**: um papel semicondutivo, próprio para este fim, e uma massa vulcanizada a temperatura ambiente, aplicada no meio da fita de papel semicondutivo dobrada longitudinalmente. Em seguida, e imediatamente antes de introduzir as barras nas ranhuras, cada barra será envolvida pelo combinado massa-papel, que permite que o condutor se adapte facilmente à ranhura, agilizando também os processos de montagem. Este sistema assegura um embutimento perfeito com folga tendendo a zero, mesmo considerando-se variações dimensionais da barra ou da ranhura, conforme pode ser observado na Figura 3.
- Sistema de mola ondulada entre cunha de ranhura e barra. O sistema de mola ondulada, ou *ripple spring*, consiste em um elemento isolante em formato ondulado que é instalado entre a cunha de ranhura e a semi-bobina ou barra de topo da ranhura. Ela promove uma pressão na barra para garantir o seu adequado engastamento na ranhura. Por consistir em uma mola, o sistema mantém a pressão sobre as barras de topo e fundo mesmo ao longo da vida útil da unidade, evitando afrouxamento das mesmas dentro da ranhura, reduzindo as intervenções de manutenção e futuras falhas por atrito entre isolamento e ranhura e demais danos consequentes, conforme pode ser observado na Figura 4.

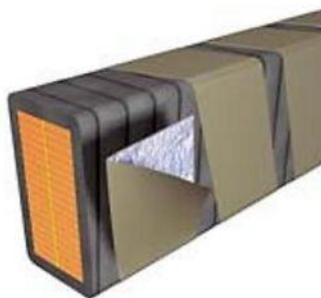


Figura 3 Sistema de embutimento *Round Packing**

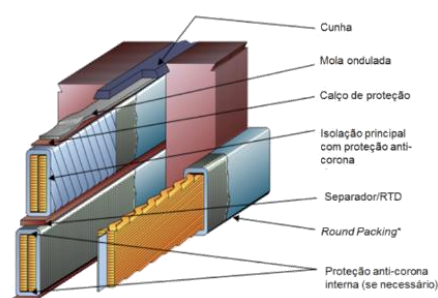


Figura 4 Sistema completo de embutimento com mola

Cabe ressaltar que o sistema de impregnação VPI *Micadur** possui excelente desempenho térmico, aliado ao sistema de embutimento com *Round Packing**, possibilitam melhor transferência térmica entre barra e núcleo, melhorando o aspecto de dissipação de calor das barras estatóricas. Todos estes casos e outros são apresentados de forma detalhada em alguns artigos promovidos pela GE, e.g., [2], [4] e [5].

4.2 Resumo comparativo dos projetos e considerações

* *Trademark of General Electric Company*

Na Tabela 1 podem ser encontrados os principais aspectos do escopo do enrolamento do estator reaproveitados ou reformados:

Tabela 1 Comparativo entre os projetos antes e após a reforma

Projeto original do enrolamento do Estator	Novo Projeto do enrolamento do estator
Enrolamento Ondulado, dupla camada	Enrolamento Ondulado, dupla camada
Conexões de grupo e conexões paralelas originais	Aproveitamento das conexões originais, com reisolação completa das mesmas
Sistema de conexões série com isolação de fita e resina	Novo sistema de capas isolantes com massa de preenchimento
Sistema de embutimento das barras com calço lateral	Sistema de embutimento da barra com <i>Round Packing*</i>
Isolação dos fios com isolante em lado único	Isolação dos fios com fibra mista de vidro em todo o perímetro (Daglas)
Transposição Roebel em 540°	Transposição Roebel em 540°
Capas isolantes simples nas transposições Roebel	Capas isolantes duplas nas transposições Roebel
Processo de impregnação VPI com materiais com tecnologia padrão da década de 1970	Processo de impregnação VPI Micadur*, utilizando isolantes e resinas de última geração tecnológica
Sistema de travamento das cunhas com cunha de travamento	Sistema de travamento das cunhas com amarração das cunhas de extremidade
Sistema de proteção semicondutiva e condutiva com pintura	Sistema de proteção semicondutiva e condutiva com fita (região condutiva com valores entre 1,0 e 8,0 kOhms)
Seção de cobre da barra original 1185 mm ²	Conforme seção de cobre da barra original

5.0 - AÇÕES APLICADAS E RESULTADOS OBTIDOS

No contexto de reforma emergencial, várias ações conjuntas foram tomadas a fim de garantir o atendimento aos requisitos, sendo eles: a qualidade do novo conjunto de barras e itens de embutimento e cunhagem propostos; a máxima otimização dos prazos de fornecimento e execução dos serviços em campo, bem como o rápido retorno da unidade #1 à sua operação comercial. Tais ações foram embasadas nas estratégias definidas já na concepção do projeto da reforma e abrangeram:

- Potenciais de ganho de prazo durante a fase de fabricação e testes, sem ferir nenhum requisito de qualidade do projeto, bem como de Saúde, Segurança e Meio Ambiente;
- Métodos e processos de desmontagem em campo, a fim de simplificar e agilizar as atividades;
- Gestão de antecipação de problemas, com o uso da metodologia *Last Planner*, com foco na garantia da disponibilização de todos os recursos necessários para a execução dos trabalhos em campo, além de possibilitar a gestão de imprevistos, caso ocorram;

Todos os aspectos foram discutidos e abordados entre a COPEL e a GE desde o início até a entrega da unidade #1 à sua operação, com envolvimento constante das equipes de engenharia, de gestão e de campo.

5.1 Estratégias e ações aplicadas durante a desmontagem e montagem da unidade

Para a desmontagem da unidade #1, o principal fator de impacto positivo no cronograma foi a estratégia de desmontagem e retirada da parte estática do gerador do poço da unidade. Originalmente, o conjunto rotativo seria removido, demandando também a desmontagem do mancal combinado, linha de eixo e demais componentes relacionados. Ao desmontar a linha de eixo, um grande impacto seria transferido para as atividades de montagem, visto que todos os ajustes da linha de eixo precisariam ser refeitos. Com o conhecimento das peculiaridades do projeto original, a GE definiu a remoção do estator completo do poço, mantendo o rotor apoiado sobre os freios e com a linha de eixo principal e mancal combinado completamente montados. Adicionalmente, como o conjunto de trocadores de calor estava apoiado em bases fixadas no piso do poço, foi realizado apenas o desacoplamento da carcaça, sem necessidade de desmontagem da tubulação de água de resfriamento. Com isso, o estator completo da unidade foi transferido para a área de montagem da casa de força, eliminando também a necessidade de instalação de plataformas provisórias e possibilitando fácil acesso para a realização das tarefas de desmontagem, inspeção, montagem do enrolamento. De forma simplificada, a Figuras 5 resume a sequência:

* *Trademark of General Electric Company*

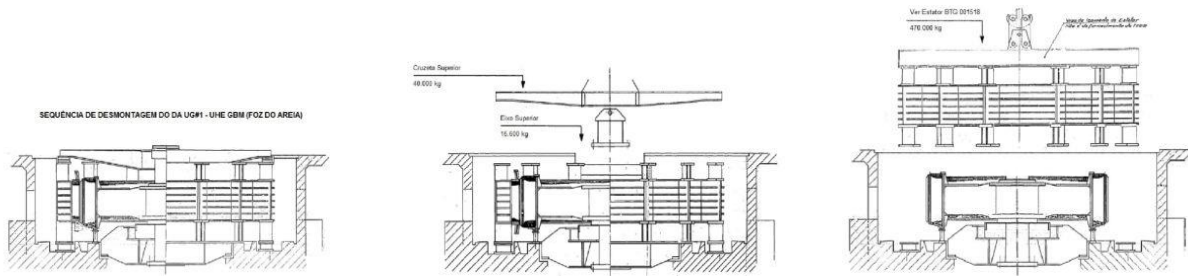


Figura 5 Sequência de desmontagem da unidade #1 com remoção do estator completo

Outras ações adotadas foram a criação de dispositivos de uso específico, após avaliação crítica das tarefas *in-loco*, tais como: guincho elétrico para desmontagem e montagem das barras estatóricas (que possuem peso aproximado de 70 kg cada), agilizando as tarefas, liberando a ponte rolante da casa de força para outras atividades e sobretudo melhorando as condições de saúde e segurança da equipe; confecção, em campo, de pequenos dispositivos para facilidades de desmontagem usados, por exemplo, com a porca hidráulica de desacoplamento do estator das bases; uso de serra tipo sabre para corte rápido e preciso das barras originais, bem como para os reparos de maior impacto no núcleo, sendo este último demandando acabamento com retífica, com resultado comprovado pelo *El Cid* [6]; além de outras ações e boas práticas que visaram a otimização das atividades.

5.2 Principais inspeções e serviços realizados em campo

Durante o processo de desmontagem da unidade, a medida que cada componente fosse desmontado, a condição visual era verificada pelas equipes da GE e COPEL, com devida comunicação às suas engenharias. O escopo dos trabalhos de reforma se limitaria, além do enrolamento, aos reparos pontuais no enrolamento de campo dos polos do rotor e no núcleo do estator. Entretanto, como boa prática de engenharia, após cada inspeção a GE apresentou sugestões de ações de manutenção para a COPEL, que pode aproveitar a oportunidade da parada para a resolução de outros pontos tais como: reparos superficiais no espelho do eixo superior, reparos no metal patente dos segmentos do mancal de guia bem como da isolamento deste mancal, danos ocasionados por descargas elétricas neste mancal.

A desmontagem do enrolamento demandou cuidado, pois o cobre das conexões foi posteriormente reaproveitado, através da limpeza e reisolação. Uma vez que todas as barras originais encontravam-se removidas, procedeu-se com o teste de *El Cid* [6] para a verificação da isolamento interlaminar do núcleo estatórico. Foram encontrados pontos de curto circuito, seja por dano mecânico ou elétrico, já identificados nas inspeções visuais, como pode ser observado nas Figuras 6 e 7, obtidas antes dos reparos.



Figura 6 Pacote fundido na ranhura 60 antes do reparo



Figura 7 Dedo de pressão derretido na ranhura 204 por curto fase-fase

Com a realização do *El Cid*, estes e outros pontos danificados foram identificados e reparados, exceto o indicado na ranhura 60, conforme Figura 6. Por tratar-se de um dano severo, GE e COPEL acordaram tecnicamente o procedimento de reparo que foi realizado com posterior repetição do ensaio de *El Cid* até o atingimento de um patamar aceitável de corrente interlaminar. Tal reparo demandou a remoção da parte danificada do núcleo, sendo que o mesmo não foi recomposto, mas sim devidamente recoberto com verniz isolante de alta capilaridade. Os reparos ficaram conforme indicado nas Figuras 8 e 9.

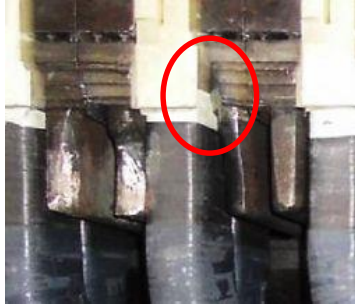


Figura 8 Pacote fundido removido e recoberto com verniz na ranhura 60



Figura 9 Remoção dos resíduos derretidos sobre a laminação na ranhura 204

No caso do reparo a ranhura 60, o valor medido no *El Cid* ainda permaneceu acima do considerado ideais para uma máquina nova, entretanto aceitável para uma máquina com 35 anos de operação. GE e COPEL decidiram instalar sondas termopares fixadas em dois pontos do núcleo: um no ponto reparado, e; outro em um ponto em condições ideais. Tal medição teve o objetivo de confirmar a eficácia do reparo nas condições nominais de indução durante a operação, cujos valores são apresentados na Tabela 2. A diferença de 0,4 graus Celsius foi considerada desprezível, não comprometendo a operação e a vida útil da unidade, demonstrando também a confiabilidade do sistema *El Cid*.

Tabela 2 Temperaturas pontuais do núcleo do estator

Temperatura média no ponto reparado – Ranhura 60 [°C]	Temperatura em ponto íntegro diametralmente oposto – Ranhura 240 [°C]
58,4	58,0

Complementarmente, foram realizados reparos nas aletas de ventilação dos polos para a correção de danos mecânicos ocasionados por um corpo estranho solto durante as falhas que ocasionaram o dano definitivo na unidade geradora #1. Todos os reparos tiveram eficácia comprovada através dos testes elétricos realizados tanto nos pólos, como o uso de *Megger* e *Baker* (*surge test* para verificação de curto entre espiras), como no enrolamento do estator (tensão aplicada) e núcleo do estator (conforme visto, *El Cid*).

5.3 Atividades em fábrica e oportunidades de otimização de cronogramas

Devido ao caráter emergencial do reparo, ações focadas na redução do prazo de execução também foram levantadas na fase de projeto. Por exemplo, os testes de ciclos térmicos e envelhecimento acelerado solicitados (*VET*) encontravam-se no caminho crítico da fabricação, neste sentido foram discutidas oportunidades de redução destes tempos. A GE propôs a redução da quantidade de ciclos térmicos e a comprovação da homologação do sistema de isolamento com a apresentação de ensaio de *VET* realizado em barras similares que haviam sido realizados com sucesso poucas semanas antes do início da fabricação das barras da UHE GBM. A COPEL avaliou os resultados apresentados, bem como inspecionou o processo de produção e testes na fábrica de barras, o que possibilitou o aceite da proposta. Não obstante, a produção das barras estatóricas teve severo acompanhamento por parte da engenharia da COPEL. Tais oportunidades de redução do tempo de fabricação e testes, conduziram a um ganho no cronograma, o que possibilitou uma antecipação de 16 dias na entrega da unidade #1 em comparação ao cronograma de contrato, que já mostrava-se bastante curto.

Após a montagem e testes das novas barras estatóricas na unidade geradora #1, a unidade retornou à sua operação, onde outros parâmetros operacionais importantes foram avaliados, tais como a temperatura do núcleo estatórico nos pontos reparados, conforme visto anteriormente, e a temperatura do enrolamento do estator, que será abordada na próxima seção.

5.4 Dados operacionais comparativos antes e após a reforma

Com retorno da unidade #1 à operação, o principal parâmetro de desempenho do enrolamento do estator a ser analisado é a temperatura. Embora a nova barra tenha dimensões praticamente idênticas à barra original, uma redução da temperatura do enrolamento era esperada devido à melhor condutividade térmica da isolamento e do sistema de embutimento. As Figuras 10 e 11 apresentam o comparativo das temperaturas do enrolamento do estator em relação ao quadrado da corrente de armadura, cuja variação é linear. Também são apresentadas as temperaturas das demais unidades, a título de comparação geral. Mas o comparativo entre as temperaturas da unidade #1 antes e após a reforma permite comprovar o novo comportamento térmico do enrolamento.

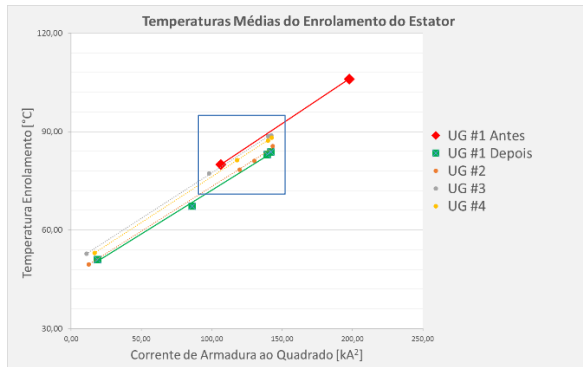


Figura 10 Curvas de temperatura das unidades.
Detalhe ampliado na Figura 10

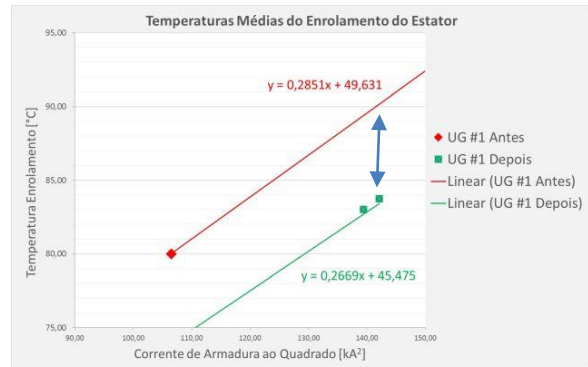


Figura 11 Detalhe ampliado somente das curvas da unidade #1 antes e após a reforma

A partir da análise das medições, conclui-se que a temperatura está 2 a 3 graus Celsius mais baixa se tomarmos como base a condição de 340 MVA e 16,5 kV, e corrigindo-se para o mesmo patamar de ar frio, conforme indicado na dupla seta na Figura 11, por exemplo. Se extrapolarmos para a condição nominal da máquina, ou seja, 465 MVA e 16,5 kV, obtêm-se uma redução de temperatura de 4 a 5 graus Celsius. Ambas condições possuem corrente de campo similar ($\cos\phi$ aproximadamente 1,0), portanto em condições similares de aquecimento do rotor.




6.0 - CONCLUSÃO

O projeto de reforma da unidade #1 da UHE GBM teve grande importância devido ao seu caráter emergencial. Neste informe técnico, foram apresentados o histórico dos eventos, as preocupações que estabeleceram os requisitos do projeto dos novos componentes, as novas tecnologias empregadas bem como as estratégias e todo o conjunto de ações de otimização de atividades de fábrica, planejamento e campo. Os bons resultados obtidos no âmbito técnico e gerencial foram impulsionados pelo alto foco e o trabalho interativo e colaborativo da GE e a da COPEL, que através de sua engenharia possibilitou a ágil e adequada tomada de decisões em momentos críticos, com a devida diligência técnica. Tal diligência técnica garantiu a cuidadosa execução das atividades que, mesmo concluídas em tempo recorde, não comprometeram nenhum requisito de saúde, segurança e meio ambiente, cujo resultado foi a não ocorrência de acidentes ou danos materiais, ao meio ambiente e, sobretudo, às pessoas. Desde o retorno da unidade geradora, também não foram relatadas necessidades de ajustes diretamente ligados à operação da unidade e ao seu desempenho, tais como ventilação, ajustes mecânicos em mancais e demais sistemas auxiliares. A operação em patamar mais baixo de temperatura também é um fator que resulta na maior longevidade do enrolamento. Tal fato atesta a confiabilidade da solução implantada e das práticas de projeto e montagem adotadas. O resultado obtido reflete diretamente na disponibilidade plena que a unidade geradora apresenta desde o seu retorno à operação.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. FOGAÇA, J. SILVA e GBM/VPGB, Análise de defeitos recorrentes ocorridos em barras estatóricas de um gerador síncrono, Rio de Janeiro: CIGRÉ VII Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2016.
- [2] M. SILVA, C. FILHO e C. DIAS, Metodologia e resultados da reforma do gerador da UG#1 de Bariri, Rio de Janeiro: CIGRÉ VII Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 22016.
- [3] C. FILHO, R. FILHO, E. SILVA e B. FURLANETO, A importância da engenharia reversa para reformas e modernizações de usinas hidrelétricas e seus equipamentos, Foz do Iguaçu: XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2015.
- [4] F. GALVÃO e M. UEMORI, Premissas adotadas em reforma de hidrogeradores, Curitiba: CIGRÉ IV Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2010.
- [5] C. MESSIER e N. DEHLINGER, Emergency repairs on generator stator windings, Hydrovision International, Portland, OR, EUA, 2015.
- [6] J. ECHEVERRIA, Procedimiento para verificación de imperfecciones en el núcleo magnético del estator, Documento interno da General Electric Renewable Energy, 2014.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Marcos V. D. Silva nasceu em Porto Alegre/RS em 1977. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2001. Ingressou na indústria em 2001, na divisão de geradores elétricos de pequeno e médio porte da ALSTOM. Na ALSTOM, passou por várias posições, desde Engenheiro Calculista, Coordenador da Engenharia de Projeto de geradores e Coordenador Técnico de Integração de Plantas. Também atuou na GE (General Electric) na divisão Bently Nevada, na área de monitoramento de máquinas. Em 2007 retornou para a Alstom Renewable Power. Atualmente, trabalha na divisão de Base Instalada para usinas hidrelétricas na GE Renewable Energy, onde possui a função de Coordenador Técnico da Engenharia de Geradores. Já publicou trabalhos como autor ou co-autor no XXIII SNPTEE, em 2015, e no VII CIGRÉ ENAM, em 2016.</p>
	<p>José Roberto Pinto da Silva. Nascido em Santiago, RS, em 07abr1954. Engenheiro Eletricista, Ênfase Eletrotécnica, pela Universidade Federal do Paraná, 1977. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, 1986. Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, 2014. MBA em Administração de Empresas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná e <i>University of Texas at Austin</i>, 1994. MBA em Economia pela Faculdade de Administração e Economia no Paraná, 1999. Engenheiro da Divisão de Máquinas Rotativas na Copel GeT S.A, desde 1978. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná - UFPR, 1978. Professor Colaborador do Programa de Mestrado e Doutorado da UFPR, desde 2015.</p>
	<p>Marco A. P. Santos nasceu em São José dos Campos/SP em 1982. Formado pelo SENAI em Usinagem, exerceu a função de mecânico de manutenção de Usinas, Subestações e sistemas auxiliares durante 14 anos na CESP CIA Energética de São Paulo. Graduiu-se em Engenharia Mecânica pela UNITAU em 2010 e ingressou na Alstom Renewable em 2011 na função de Supervisor de Montagem externa. Atualmente, trabalha na divisão de serviços para usinas hidrelétricas na GE Renewable Energy, na função de Coordenador de Montagem Externa. Já publicou trabalho como co-autor no XXIII SNPTEE, em 2015.</p>