

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

Soluções diferenciadas para reparo de núcleo e enrolamento de grandes máquinas síncronas, após uma falta com significativo dano

**MAURO UEMORI(1); EDSON ALVES(1); MICHEL SPIRIDON(1);
GE(1);**

RESUMO

Este artigo analisa diferentes alternativas utilizadas para o reparo do núcleo e do enrolamento do estator quando um dano localizado ocorre, devido a uma falha ou acidente. As alternativas analisadas incluem: (1) A substituição total do núcleo e enrolamento; (2) O reparo destas partes com desmontagem parcial; (3) O reparo localizado destas partes sem a desmontagem e (4) Em alguns casos o reparo cosmético. O artigo também aborda alguns exemplos onde algumas destas alternativas foram utilizadas, bem como recomendações técnicas que foram adotadas para estes reparos.

PALAVRAS-CHAVE

Acidente, Reparo, Enrolamento, Núcleo, Testes

1. INTRODUÇÃO

Um estudo feito pelo SINTEF mostra que dentre os componentes de uma usina hidroelétrica, o componente com maior probabilidade de falhas é o Gerador [1]. Um segundo estudo feito pelo ENEL em 250 máquinas, mostra que as falhas no estator, embora menos frequentes que outras falhas, são as responsáveis pelos períodos mais longos de parada [2]. Outros estudos feitos sobre este tópico tem obtido conclusões semelhantes.

A solução convencional para estes casos envolve a substituição do núcleo e do enrolamento do estator. Esta solução tem muitos benefícios, mas é uma solução de alto custo e também envolve um longo período de parada da máquina.

Em alguns casos a solução convencional não é a mais prática já que limitações de custo e/ou tempo de parada requerem uma solução alternativa, que ao menos permita a operação provisória do gerador até que um novo estator esteja pronto para substituição do que foi danificado. Desenvolver um método de reparo eficiente para estes casos, reduzindo o custo e o tempo de indisponibilidade da máquina é essencial, especialmente se houver um dano localizado que afetou o núcleo e o enrolamento do estator, por exemplo devido a um curto circuito e/ou dano provocado por uma peça que se rompeu no rotor.

Segue uma comparação dos diversos métodos utilizados para o reparo quando um destes acidentes ocorre, avaliando os benefícios e impactos de cada solução.

(*) Mauro Uemori, Av. Charles Schneider, S/N - CEP 12040-001 Taubaté, SP – Brasil
Tel: (+55 12) 3608-3871 – Fax: (+55 XX) XXXX-XXXX – Email: Mauro.Uemori@GE.com

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



2. METODOS DE REPARO DEVIDO A DANOS NO NUCLEO E ENROLAMENTO

2.1 Substituição Total do Núcleo e Enrolamento

A solução convencional para o reparo do núcleo e enrolamento do estator, após um acidente, envolve a substituição total do núcleo e do enrolamento. Esta solução é utilizada quando o dano gerado pelo acidente afetou uma área significativa tornando o reparo muito difícil ou quando o reparo possível é apenas provisório, não permitindo ter confiabilidade no equipamento ou limitando a sua utilização. Também é utilizada quando os componentes estão no fim de sua vida útil e/ou melhorias no projeto são necessárias.

2.2 Substituição Parcial do Núcleo e Enrolamento

Nesta solução, tanto o núcleo quanto o enrolamento são reparados. O núcleo é parcialmente desmontado e as laminas danificadas são substituídas. Para fazer esta substituição, o enrolamento na área afetada também é removido e as partes afetadas são substituídas. Partes não afetadas são reparadas.

Esta solução é utilizada quando o dano gerado pelo acidente afetou uma área localizada tornando o reparo uma solução atrativa e confiável. Para este caso, este artigo apresenta um exemplo de uma unidade com um dano significativo, mas onde foi utilizada esta opção que permitiu a substituição das laminas do estator danificadas e a reinstalação do enrolamento do estator num prazo muito pequeno (Ver seção 5).

2.3 Reparo Localizado do Núcleo e Enrolamento Sem Desmontagem

Nesta solução, o núcleo é reparado sem desmontagem; já o enrolamento pode ser parcialmente desmontado e/ou reparado.

Esta solução é utilizada quando o dano gerado pelo acidente afetou uma área localizada, ou significativa, mas levando-se em conta fatores econômicos, tempo de falta de geração e confiabilidade do reparo, tornam esta uma solução atrativa. Para esta alternativa de solução, este artigo apresenta um caso onde um dano significativo permitiu o reparo (substituição de peças danificadas) do núcleo sinistrado e um reparo localizado do enrolamento do estator. Detalhes adicionais estão incluídos na seção 4 e referencia [3].

2.4 Reparo Cosmético

Como último caso considerado, temos o reparo cosmético onde se elimina a(s) parte(s) danificada(s) do núcleo (segmentos de laminas em curto-circuito), que podem causar aquecimento localizado. O reparo cosmético é utilizado quando o dano é localizado e de pequena extensão. O reparo é necessário para se evitar que o aquecimento localizado progressivamente afete o enrolamento e núcleo, gerando uma falha significativa.

O processo consiste em remover a área afetada, por se cortar as laminas. Um lixamento localizado e alinhamento das laminas também é feito. Se realiza um teste de El Cid, para determinar que não existe curto entre laminas e se houver um curto, um procedimento de eletro-erosão é usado para remover curto. Aplica-se uma resina de alta capilaridade e adiciona-se um inserto que age como componente cosmético (Ver Figura 1)

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Figura 1 – Reparo Cosmético

2.5 Comparação dos Métodos de Reparo do Núcleo e Enrolamento

Tabela 1 – Métodos de Reparo

MÉTODO	DURAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Substituição Total	Tipicamente 1 ano ou mais; Excepcionalmente menos de 1 ano	Novos componentes (impacto na vida útil) Repotenciação (quando possível)	Alto custo Longo período de parada

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Substituição Parcial	1 mês ou mais	Curto período de parada Eliminação dos danos decorrentes da falha	Requer disponibilidade de peças sobressalentes
Reparo localizado	1 mês ou mais	Curto período de parada Reparo dos danos decorrentes da falha	Requer disponibilidade de peças sobressalentes
Reparo cosmético	1 Semana ou mais	Curto período de parada	Causa se não resolvida, pode produzir novas falhas

3. TESTES DURANTE O REPARO

Os principais testes envolvidos neste tipo de reparo são básicos e similares aos testes feitos para avaliação da condição da unidade [4]. Dentre estes testes, os principais testes estão alistados abaixo:

3.1 Avaliação e/ou reparo do núcleo

Usa-se o El Cid, que é um ensaio com fluxo magnético reduzido [5]. Como teste final (após o reparo ter sido efetuado), pode-se realizar um ensaio de magnetização do núcleo para detecção de pontos quentes no empilhamento. Nos casos em que o enrolamento está instalado e um teste de magnetização será executado, é recomendável adotar uma densidade de fluxo na coroa menor do que a densidade de fluxo nominal. Normalmente se recomenda uma densidade de fluxo de 1,0 T ou menos. Este nível de densidade de fluxo, contribui para um menor nível de vibração evitando danos no enrolamento, mas permite ter um resultado significativo [6].

3.2 Enrolamento usando bobinas

Os principais testes envolvem teste de continuidade e curto-circuito entre condutores, Curto-circuito entre espiras, Resistência de isolamento, Ensaio de tensão aplicada (DC), e como teste final tensão aplicada em rampa (com nível de tensão similar ao utilizado durante as manutenções).

3.3 Enrolamento usando barras

Resistência de isolamento, Ensaio de tensão aplicada (DC), e como teste final tensão aplicada em rampa (com nível de tensão similar ao utilizado durante as manutenções).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



4. REPARO LOCALIZADO DO NÚCLEO SEM DESMONTAGEM (EXEMPLO 1)

4.1 Descrição do Acidente - Motor/Gerador 390 MVA, 18 kV, 20 polos

Dois suportes interpolares (em alumínio) se soltaram e provocaram contato rotor/estator. O núcleo foi fortemente contaminado por detritos de alumínio principalmente nos primeiros e últimos pacotes (superior e inferior). Aproximadamente 25% do núcleo foi danificado (~130 m², Ver Figura 2).



Figura 2 - Núcleo do estator: Inspeção visual e lixamento

67 barras superiores também foram atingidas, com vários graus de dano (Ver Figura 3). Danos também ocorreram no rotor e defletores de ar.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Figura 3 – Barras do estator: Inspeção visual e danos nos Condutores

4.2 Reparo executado

O primeiro passo foi fazer uma inspeção visual detalhada registrando os pontos danificados. Logo após o núcleo e enrolamento foram limpos e foram realizados testes preliminares para verificar a extensão do dano. Estes testes incluíram Resistência de isolamento e Tensão aplicada (DC em rampa), resistência ôhmica do enrolamento e El Cid completo do núcleo. Com estes testes, foi determinada a extensão do dano do estator (Por exemplo, no teste de El Cid 25% da superfície do núcleo teve uma corrente medida acima de 100 mA) bem como mostrou que apesar da área significativa, o dano era superficial (Ver Figura 4).

Uma das áreas danificadas foi escolhida para validar e determinar o melhor o processo de reparo para este caso. Foram usadas escovas, lupas, lixadeiras de fita e lixadeiras rotativas para uma limpeza localizada (Ver Figura 4) ponto a ponto.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

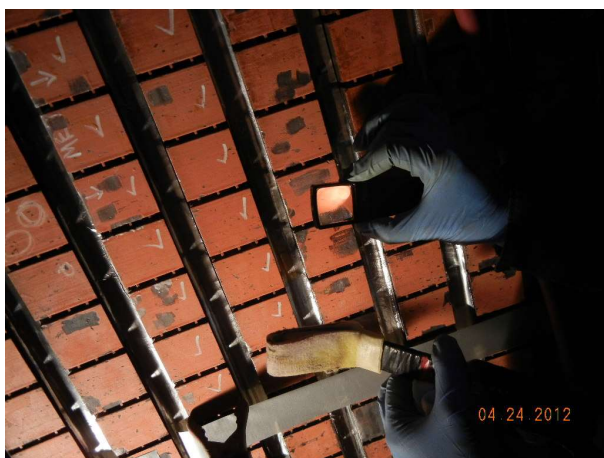
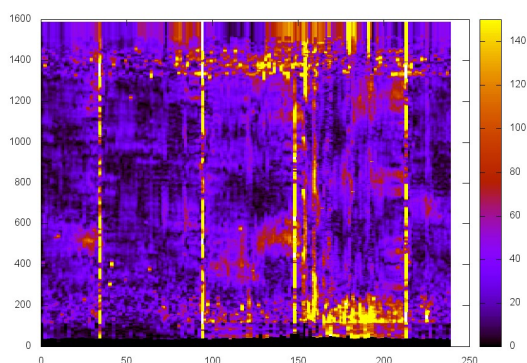


Figura 4 – El Cid inicial e Reparo do Núcleo do estator

Após o lixamento um teste de El Cid foi feito na área selecionada e eletro-erosão foi usada para remover curto entre laminas. Outro El Cid foi executado e o processo foi repetido até se eliminar o curto entre laminas e confirmar que o processo funcionava.

Uma vez definido o método, iniciou-se o reparo completo do núcleo. Após o retrabalho, foi feito um ensaio de magnetização e constatou-se pontos quentes. Reparos localizados e El Cid foram realizados nestes locais e ensaios de magnetização foram repetidos. Este processo foi refeito até não ter mais pontos quentes (ponto onde a temperatura foi acima de 10 °C quando comparada com a área adjacente).

As danos das barras foram também reparados, sendo que 7 barras foram substituídas. Todas as cunhas de fixação do enrolamento foram substituídas. O período total de parada da unidade para reparos foi de 5 meses. A unidade está em operação desde 2012.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



5. REPARO LOCALIZADO DO NÚCLEO SEM DESMONTAGEM (CASO 2)

5.1 Descrição do Acidente - Gerador 133 MVA, 16.5 kV, 40 polos

Houve um curto para terra numa barra próximo do fim do núcleo do estator. Este curto rapidamente se tornou um curto para o neutro devido a uma falha no cabo entre o cubículo de aterramento e o neutro do gerador. Esta falha resultou em 2 descargas de alta intensidade separadas e prolongadas com significativo dano ao núcleo e ao enrolamento (Ver Figura 5). Além do núcleo, 4 barras do estator tiveram danos nos condutores e várias barras com danos na isolação. Danos nas conexões de grupo, anéis de circuito, terminais de neutro e CT's.



Figura 5 – Núcleo do estator: Inspeção visual e danos ao primeiro pacote

5.2 Reparo executado

Como no caso 1, o primeiro passo foi fazer uma inspeção visual detalhada registrando os pontos danificados. Logo após, foi feita uma limpeza do núcleo e enrolamento e foram realizados testes preliminares para verificar a extensão do dano. Estes testes incluíram Resistência de isolação e Hi-pot (DC ramp test) e resistência ôhmica do enrolamento.

O reparo consistiu na substituição das laminas, dedos de pressão e placas de pressão danificadas, substituição de 39 barras superiores e 34 barras inferiores, conexões de grupo, parte dos anéis de circuito danificados, terminais de neutro e TC's.

5.3 Remoção de laminas do núcleo do estator

O primeiro passo foi remover as barras, placas e dedos de pressão entre as ranhuras 34 e 74 (área do acidente, Ver Figura 6)

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

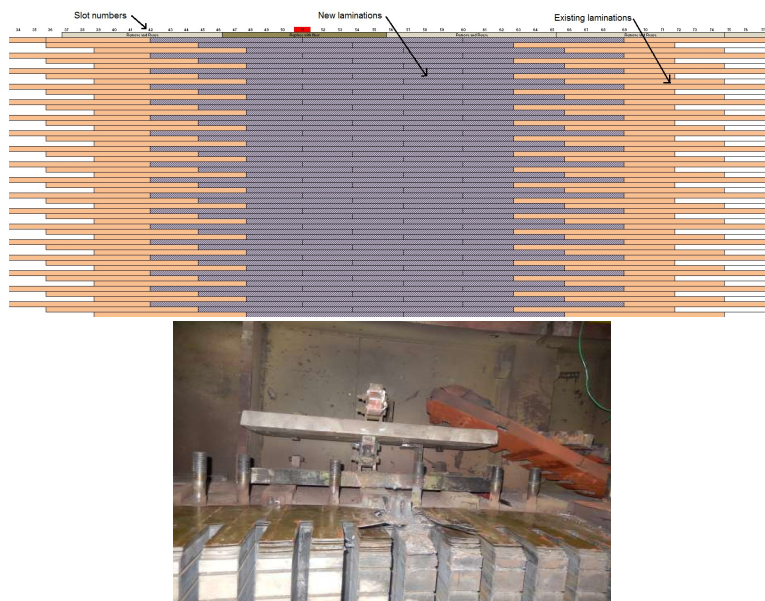


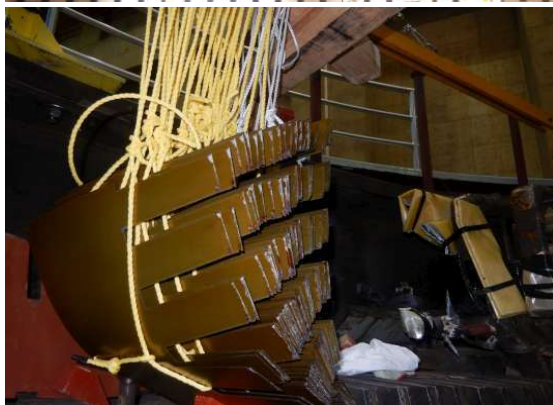
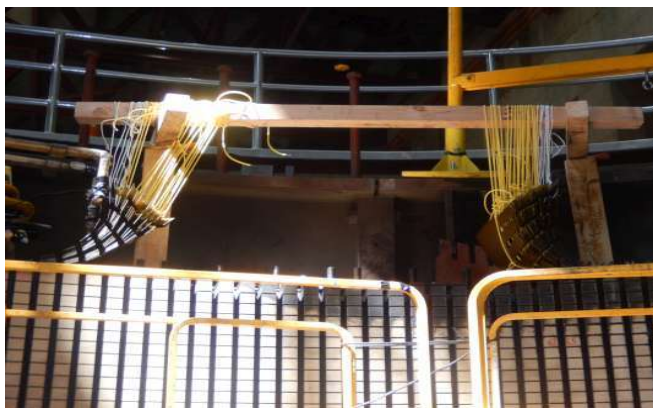
Figura 6 – Digrama da área onde as laminas foram removidas

Para remover as laminas danificadas, foi instalado um suporte e as laminas na extremidade foram içadas, permitindo a remoção da lamina sobreposta. Este processo prosseguiu até que todas as laminas danificadas foram removidas e substituídas por novas laminas (Ver Figura 7)

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

3345
GGH/14

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Figura 7 – Remoção e substituição das laminas danificadas

Para verificar e validar o reparo um ensaio de magnetização do núcleo foi executado e nenhum ponto quente foi detectado (o teste poderia ter sido feito também por meio de El-Cid).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

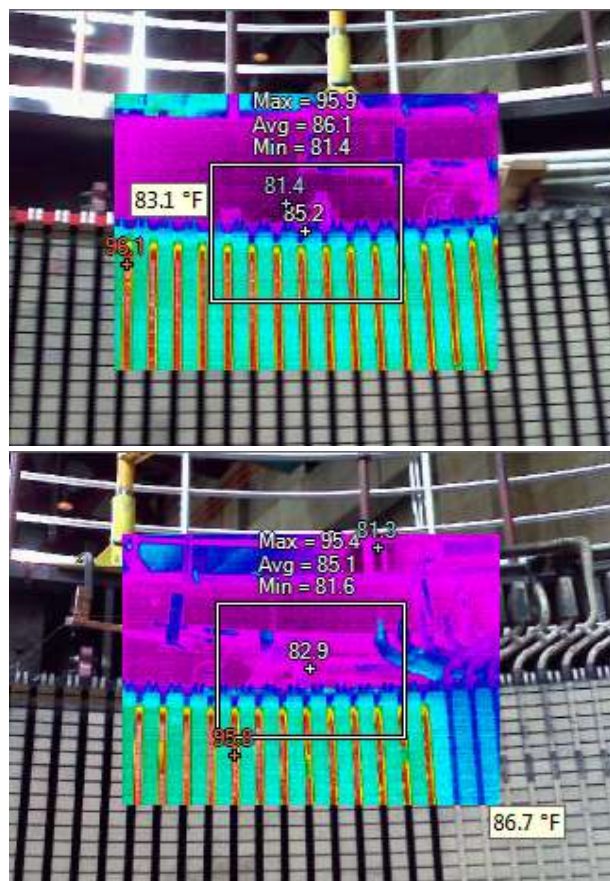


Figura 8 – Resultados do ensaio de magnetização do núcleo do estator

Após a instalação das barras, conexões de grupo e reparos nos anéis de circuito (ver Figura 9), os testes finais foram realizados (Resistência de isolamento, Hi-pot, resistência ôhmica) e a máquina retornou com sucesso em operação.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Figura 9 – Instalação do enrolamento do estator

O período total de parada da unidade para reparos foi de 1 mês. A unidade está em operação desde 2015.

6. CONCLUSÃO

Este artigo mostra que embora a solução convencional pela substituição do núcleo e do enrolamento do estator tenha muitos benefícios, algumas vezes não é a mais adequada para um caso específico, onde limitações de custo e/ou tempo de parada requerem uma solução alternativa.

Soluções alternativas como reparo localizado do núcleo com substituição parcial de laminas, ou reparo sem substituição de laminas devem ser alternativas a serem estudadas já que reduzem o custo e o tempo de indisponibilidade da máquina, especialmente se houve um dano localizado que afetou o núcleo e o enrolamento do estator, por exemplo devido a um curto circuito e/ou dano provocado por uma peça que se rompeu no rotor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Start and stop costs for hydropower plants [in Norwegian], Bakken, B.H.; Bjoerkvoll, T.; Belsnes, M.M.; Skaare, P.E., Report #TR A5351, 2001-02-02
- (2) New developments in diagnostic and monitoring techniques for hydro-generators, G. Galasso, M. Märke, 1995 Waterpower and Dams conference, Barcelona, Spain
- (3) Stator core and winding repairs after extensive damage, N. Dehlinger, J. Figueroa, D. De-la-Garza, Hydrovision 2013
- (4) Generator condition assessment, an efficient tool to prevent unscheduled outages & minimize their duration, N. Dehlinger, E. Alves, C. Messier, Hydrovision 2015
- (5) Electrical Machine core imperfection detection, C. Rickson, IEE Proceedings, Vol 133, Pt B, N 3, May 1986
- (6) IEEE 62.2-2004, item 7.2.3.1, page 53.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



8. DADOS BIOGRÁFICOS



Mauro Uemori graduou-se como Engenheiro Eletricista pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), com especialização em máquinas Elétricas (1978). Ele trabalha na GE desde 1979. A partir de 2016, ele atua como Engenheiro Consultor pela GE em Taubaté, São Paulo, Brasil. Ele tem uma grande experiência no projeto eletromagnético e térmico de máquinas síncronas, aplicando seu conhecimento e experiência no mundo todo, respondendo por demandas tanto internas como externas.



Edson Leite Alves graduou-se como Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com especialização em Eletrônica e Eletrotécnica (1988). Ele trabalha na GE desde 1988. A partir de 2012, ele atua como Engenheiro Sênior pela GE em Denver, Colorado EUA. Ele tem uma grande experiência no projeto eletromagnético e térmico de máquinas síncronas, aplicando seu conhecimento e experiência no mundo todo, respondendo por demandas tanto internas como externas.



Michel Spiridon graduou-se como Engenheiro Mecânico (1986) e Mestrado (1996) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e também MBA (2006) pela Universidade de São Paulo (USP). Ele trabalha na GE desde 1987 em diversas funções, como Cálculo e Projeto Mecânico, R & D, Gerente de Engenharia, Diretor de Engenharia (China), Gerente de R & D e atualmente como Engenheiro Chefe no Centro Tecnológico da GE em Birr, Suíça.