



**XXIII SNPTTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/36  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH**

**REFORMA PROVISÓRIA DO ESTATOR DO GERADOR 03 DA CENTRAL HIDRELÉTRICA DE ALTO ANCHICAYA: SOLUÇÃO IMEDIATA PARA ATENDIMENTO AO CLIENTE**

**Costa, L.L.H. (\*)**  
**Andritz Hydro do Brasil**

**Amaral, S.D.**  
**Andritz Hydro do Brasil**

**Mateus, R.D.J.**  
**EPSA**

**Konatu, A.T.**  
**Andritz Hydro Canada**

**Alves A.A.**  
**Andritz Hydro do Brasil**

**Certo, F.H.**  
**Andritz Hydro Canada**

**Polo, F.J.M.**  
**EPSA**

**Bastidas, D.F.R.**  
**EPSA**

**RESUMO**

Danos causados em hidrogeradores, em razão de diversos fatores, ocasionam paradas não programadas aos fornecedores de energia elétrica as quais acarretam ônus consideráveis cuja magnitude varia em função dos contratos de fornecimento das usinas hidrelétricas. Este trabalho apresentará a solução adotada, conjuntamente entre EPSA e Andritz Hydro, a fim de minimizar o ônus devido aos danos causados no gerador da unidade 03 da Central Hidrelétrica Alto Anchicayá. Este trabalho relatará o acidente ocorrido no gerador, bem como apresentará os trabalhos desenvolvidos a fim de recolocar o gerador danificado novamente em operação, mesmo que sujeito a limites operacionais inferiores aos originais, através de uma solução paliativa.

**PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogerador; Reforma; Enrolamento do estator; Núcleo do estator.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Este trabalho tem o objetivo descrever brevemente a ocorrência no gerador da unidade 03 da Central Hidrelétrica Alto Anchicayá, Colômbia, além de apresentar a metodologia utilizada pela Andritz para recuperação do estator e do rotor do gerador como solução paliativa.

A solução provisória adotada em conjunto entre a Andritz Hydro e a EPSA tinha como objetivo reestabelecer a geração, mesmo que com capacidade reduzida de operação, diminuindo o tempo de máquina parada e atenuando o ônus causado pelo acidente.

A solução adotada não buscava a recuperação do estator a ponto de restaurar suas características originais, mas sim obter-se um estado onde o gerador pudesse operar em condições estáveis, dentro de uma capacidade limitada de operação. Os limites operacionais foram estabelecidos baseados nos resultados dos ensaios realizados durante os trabalhos de reforma do estator.

Assim, ao final dos trabalhos de reparo, o gerador passou a operar com uma carga limitada em função da temperatura do núcleo do estator.

O gerador do grupo três da Central Hidrelétrica de Alto Anchicayá será substituído por um novo gerador a ser fornecido pela Andritz Hydro.

## 2.0 - OCORRÊNCIA NO GERADOR

A central hidrelétrica de Alto Anchicayá está localizada a 85 km a oeste de Calí, na Colômbia, a qual iniciou suas operações em 1974 estando atualmente sob a responsabilidade da empresa EPSA. A usina possui uma casa de máquinas com três unidades geradoras. Cada gerador da casa de força (em caverna) possui uma potência nominal de 126 MVA, dimensionados para operar nominalmente a 13800 V, em 60 Hz, e fator de potência 0,90, com uma rotação de 450 rpm.

Em meados de fevereiro de 2013, as três unidades geradoras da central estavam operando com potência ativa próxima à potência máxima de suas turbinas. Naquela ocasião, a unidade geradora três apresentou um ruído o qual foi seguido pela atuação da proteção que iniciou o procedimento de parada de emergência. Com a unidade geradora devidamente parada, foram realizados os bloqueios dos equipamentos da subestação e válvula de entrada para que houvesse uma inspeção.

### 2.1 Danos No Gerador

A inspeção da unidade geradora iniciou-se pelo cubículo de neutro, o qual apresentava indícios de chama. Além disso, o cabo que conecta o fechamento da estrela do enrolamento do estator ao transformador de aterramento encontrava-se rompido e com sinais de aquecimento. É possível observar-se os danos no cubículo de neutro na Figura 1.



Figura 1 – Danos no cubículo de neutro

Foi então realizada a desconexão dos terminais de saída do gerador com o transformador elevador, assim como houve também a abertura das conexões dos terminais do fechamento em estrela. O resultado do ensaio da resistência de isolamento, realizado logo a seguir, indicava problemas no enrolamento do estator.

Para realizar a inspeção do gerador, foram desmontados os fechamentos superiores e inferiores do gerador. Durante a desmontagem do fechamento inferior, foram identificados fragmentos das cunhas interpolares e do parafuso que a sustenta montada. Na Figura 2 observa-se a cunha interpolar danificada.



Figura 2 – Cunha interpolar danificada

O gerador foi desmontado a fim de realizar-se uma inspeção mais adequada.

Foi constatado que um dos suportes das bobinas interpolares do rotor soltou-se e foi chocar com o estator. Partes das peças da cunha interpolar que se soltou ficaram presas no entreferro e proporcionando danos ao estator. Isso ocasionou diversos pontos de choques mecânicos, de forma que alguns desses impactos danificaram algumas barras do estator e assim levaram a um curto circuito entre as fases e o núcleo do estator.

A fabricação do material das cunhas interpolares se dá por meio de telas de fibra com resina, prensadas e curadas

simultaneamente em uma prensa a quente formando uma placa espessa e maciça.

Devido ao de envelhecimento dessas peças, principalmente devido aos efeitos da temperatura e esforços mecânicos, a adesão entre camadas das telas vai se perdendo devido à degradação da resina. A consequência desse envelhecimento é a delaminação entre camadas de telas e resina, e consequentemente a perda de sua resistência mecânica principalmente no sentido longitudinal às camadas.

A inspeção no gerador desmontado pode constatar os danos causados devido ao desprendimento da cunha interpolar do rotor, cujos principais danos estão explicitados a seguir.



Figura 3 – Rotor do gerador desmontado com marcas devido à falta no gerador

Observa-se na Figura 3 que em toda a circunferência do rotor há marcas devido à falta ocorrida no gerador, principalmente na região em que ocorreu a abertura do arco elétrico entre as barras do enrolamento do estator e o núcleo.

Foram observados danos em alguns dos braços das barras do enrolamento do estator, bem como nas amarrações e capas isolantes proveniente de partes das peças da cunha interpolar solta do rotor, como pode ser observado na Figura 4.



Figura 4 – Barras do estator danificadas na região das cabeças de bobina

Além disso, as barras do estator apresentavam danos na região do sistema *grading* além dos danos mecânicos devido aos fragmentos presentes no entreferro. Algumas barras do estator foram fortemente afetadas pelo sobreaquecimento proporcionado pelas altas correntes que circularam no enrolamento do estator.

A falta ocorrida no gerador levou a perfurações em diversos pontos do pacote de lâminas do núcleo, além de derreter o cobre de diversas barras do enrolamento do estator, devido às correntes elevadas que circularam entre as fases do gerador.



Figura 5 – Núcleo do estator danificado

### 3.0 - TRABALHOS REALIZADOS

Os engenheiros da Andritz Hydro foram mobilizados para a usina a fim de verificar os danos no gerador ocorridos em razão do suporte da bobina do polo que se soltou do rotor.

A partir da visita técnica, Andritz Hydro e EPSA uniram forças para reestabelecer o grupo gerador 03, de maneira provisória, a fim de possibilitar uma sobrevida à unidade. A reforma provisória tinha como objetivo reestabelecer a geração, mesmo que com capacidade reduzida de operação. De forma a alcançar-se uma solução economicamente mais vantajosa do que a espera com máquina parada até a fabricação dos novos componentes para a solução definitiva, mesmo que com uma geração limitada de energia elétrica.

#### 3.1 Trabalhos No Estator

O primeiro passo adotado foi de identificação das barras do estator que apresentavam o isolamento comprometido. Para isso, o procedimento adotado foi de dividir o enrolamento em seções, seguindo o diagrama de enrolamento da máquina. Uma vez dividido, foram identificadas, através de ensaios, as seções que apresentavam curto circuito. As seções do enrolamento que apresentavam indícios de curto circuito eram então subdivididas e repetidamente ensaiadas a fim de identificar a subdivisão que apresentava falha no isolamento. Essas ações foram repetidas até a identificação de todas as barras do estator que apresentavam falhas no isolamento, de modo a retirá-las do núcleo do estator para serem substituídas.



Figura 6 – Barras do estator deterioradas

Todas as barras retiradas as quais não apresentavam falhas no isolamento, foram limpas e preparadas para a recuperação do sistema de proteção contra corona como pode ser visto na Figura 7.

Todas as barras identificadas com problemas no isolamento foram substituídas por barras sobressalentes disponíveis na usina. Assim, tanto as barras sobressalentes que foram utilizadas como as barras retiradas foram submetidas ao ensaio de tensão aplicada antes de serem instaladas no núcleo do estator.





Figura 7 – Preparação das barras do estator retiradas para recuperação

Uma vez preparadas, as barras do estator que foram retiradas as quais seriam novamente inseridas no núcleo do estator tiveram tanto o *grading* recuperado bem como a tinta condutiva na parte reta das barras. Além disso, as barras do estator que não foram retiradas do núcleo foram recuperadas localmente. O resultado pode ser observado na Figura 8.



Figura 8 – Barras do estator recuperadas

O trabalho realizado no núcleo do estator foi o mais crítico, em razão da gravidade dos danos. Inicialmente, foram abertos novamente os dutos de ventilação os quais se fecharam devido ao atrito das peças soltas no entreferro do gerador.

Foram também cortados os segmentos dos pacotes de lâminas que apresentavam cobre fundido ao aço silício, em decorrência do curto circuito no enrolamento do estator. O resultado pode ser observado na Figura 9.



Figura 9 – Detalhe do núcleo do estator – Segmentos dos pacotes de lâminas retirados

Após trabalhos realizados nos pontos visualmente mais críticos, foi realizado um ensaio de indução a fim de identificar os pontos que apresentavam maiores temperaturas, os quais deveriam ser retrabalhados.

Os pontos no núcleo do estator que apresentavam maiores temperaturas foram retrabalhados manualmente bem como com a utilização de retífica, visando à eliminação ou a diminuição do curto circuito entre as lâminas. Uma vez que o curto circuito entre as lâminas do estator eram os responsáveis pelas altas temperaturas nesses pontos críticos.

Uma vez finalizados os trabalhos manuais e com a retífica nos pontos críticos do núcleo, foi aplicada resina de alta capilaridade, como pode ser visto na Figura 10. A resina isolante visava proporcionar melhorar o isolamento entre as lâminas nos pontos retrabalhados do núcleo.



Figura 10 – Aplicação da resina isolante no núcleo do estator

O ensaio de indução foi repetido diversas vezes, buscando observar a evolução dos níveis de temperatura nos pontos retrabalhados. Os locais danificados no núcleo do estator foram submetidos aos trabalhos de recuperação até que se atingissem níveis de temperatura relativamente baixos e, principalmente, estáveis.

No momento que foram atingidos níveis de temperatura estáveis e relativamente baixos, foram montados sensores de temperatura fixados com resina nos pontos que apresentavam maior criticidade e níveis mais altos de temperatura, com a finalidade de manter um monitoramento durante a operação da máquina (Ver Figura 11).



Figura 11 – Sensores de temperatura

Assim que foi finalizada a instalação dos sensores de temperatura nos pontos críticos do núcleo do estator, os espaços onde foram retirados segmentos do pacote foram preenchidos por segmentos de fibra e resina. Esses segmentos de fibra e resina foram manufaturados para ocupar os espaços vazios e assim atenuar as alterações na compactação do núcleo do estator.



Figura 12 – Segmentos de fibra e resina instalados no local dos segmentos do pacote do núcleo do estator



Após finalizar os trabalhos no núcleo, foi realizado um último ensaio de indução magnética e verificaram-se os níveis de temperatura em que o núcleo estabilizava para então iniciar os trabalhos de montagem do estator completo, a fim de preparar a máquina para retornar à operação.



Figura 13 – Detalhes do estator montado

### 3.2 Trabalhos No Rotor

Os polos do rotor do gerador foram reisolados e recuperados em um fornecedor local, sob a supervisão parcial da Andritz Hydro.

A Andritz forneceu novas cunhas interpolares para a instalação no rotor do gerador. As novas cunhas interpolares tiveram seu desenho aprimorado, mantendo-se a concepção de projeto original. O rotor do gerador completamente montado pode observado na Figura 14, juntamente com o detalhe da instalação da cunha interpolar.



Figura 14 – Rotor do gerador montado com as cunhas interpolares

Antes de iniciar a montagem final do rotor novamente no gerador, foram realizados os devidos ensaios elétricos. Após os ensaios realizados no rotor, o gerador foi novamente completamente montado, valendo-se dos trabalhos de recuperação realizados tanto no núcleo do estator quanto no rotor, e estava pronto para retornar a operação.

## 4.0 - OPERAÇÃO

### 4.1 Limites Operacionais

Dos reparos executados pela Andritz no gerador da unidade 03 da Central Hidrelétrica Alto Anchicayá foi identificado como ponto mais crítico o reparo no núcleo do estator.

Dessa forma, foi recomendado que, após os reparos, o limite operacional da unidade geradora se desse em função da temperatura do núcleo do estator.

Os reparos realizados no núcleo do estator danificado eliminaram os pontos mais críticos, no entanto os pontos reparados ainda apresentaram elevações de temperatura sensivelmente maiores que os demais pontos do núcleo onde não houve danos.

Uma vez que esses pontos reparados apresentam condições de operação diferentes daquelas observadas no restante do núcleo, foram adotados limites de temperatura em operação inferiores àqueles praticados atualmente pela Andritz, segundo os critérios internos de projeto de hidrogeradores.

Baseado nos critérios internos e nos resultados obtidos em campo, a Andritz Hydro recomendou à EPSA os seguintes limites de operação para o gerador da unidade 03:

- Máxima elevação de temperatura do núcleo do estator acima da média do ar frio: ..... 60,00 K
- Máxima temperatura do núcleo do estator (incluindo os pontos críticos): ..... 90,00°C

Assim, a carga do gerador foi ajustada de forma que os limites recomendados para a temperatura do núcleo do estator fossem respeitados.

Recomendou-se também que as temperaturas do núcleo do estator, em especial dos pontos críticos com os respectivos sensores de temperatura instalados, fossem continuamente monitorados, e na ocorrência de uma abrupta elevação de temperatura em qualquer um desses pontos, a unidade deveria ser imediatamente retirada de operação.

Foi recomendado também que houvesse a manutenção da tensão terminal em valores o mais próximo possíveis do nominal (13,8kV) do gerador. Uma vez que, quanto mais alta a tensão maior será a exigência de magnetização do núcleo e, portanto maior seu aquecimento. Além disso, recomendou-se também que o gerador operasse evitando-se grandes variações de carga e/ou partidas e paradas frequentes, e consequentemente, grandes variações na temperatura de operação.

#### 4.2 Condições De Operação

O gerador da unidade geradora 03 da Central Hidrelétrica Alto Anchicayá realizou o primeiro teste operacional com carga no dia 29 de setembro de 2013. E a partir desta data, a máquina foi recolocada em operação, respeitando os limites operacionais recomendados descritos na seção 7 deste trabalho.

Tabela 1 – Dados Operacionais da Unidade Geradora 03 Após a Reforma

Data [-]	Hora [h:min]	Potência Ativa [MW]	Potência Reativa [MVar]	Tensão [kV]	T.P.C. 01 [°C]	T.P.C. 02 [°C]	T.P.C. 03 [°C]	T.P.C. 04 [°C]	T.P.C. 05 [°C]
29/09/2013	22:50	1	2	12,9	40,2	40,3	43,0	38,4	38,2
29/09/2013	05:00	80	0	13,0	45,2	67,3	72,0	81,7	64,4
14/12/2014	18:00	100	0	13,6	48,0	72,7	63,0	88,7	73,2

#### OBSERVAÇÃO:

- **T.P.C.:** ..... Temperatura do ponto crítico.

Na Tabela 1 está apresentado um conjunto de dados de determinados pontos de operação do gerador da unidade geradora 03, de forma a demonstrar os níveis de carga atendidos pela máquina reformada e as temperaturas atingidas nos pontos mais críticos do núcleo do estator.

#### 5.0 - CONCLUSÕES

Através das informações apresentadas neste trabalho, é possível admitir soluções paliativas em núcleos e/ou enrolamentos do estator danificados decorrentes de falhas e/ou acidentes, de modo a atenuar os ônus de paradas não programadas.

Porém, vale ressaltar que a possibilidade de soluções provisórias, a fim de recolocar a máquina em operação mesmo que sujeita a limites operacionais, dependerá da gravidade dos danos no gerador.

Isto significa que a possibilidade de reforma do gerador se dará em função da gravidade e natureza dos danos sujeitos a uma avaliação técnica, bem como dependerá da disponibilidade dos materiais necessários para os reparos.

Por fim, é importante salientar a importância da avaliação da engenharia a fim de determinar limites operacionais em situações atípicas, tais como a apresentada neste trabalho. Assim, o atendimento aos limites operacionais permitirá o máximo de tempo de operação da máquina reparada, de forma a alcançar o tempo necessário para a adoção de uma solução definitiva.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) *Compras Logística Y Servicios Petición de Oferta EPSA E.S.P No. PO-139-2013 Anexo No.2 Especificaciones Técnicas*, EPSA, Colômbia, 2013.
- (2) *HYGDP002 Hydro Generator System Definition and Design*, Internal Design Practice, Andritz Hydro.
- (3) *HYGDP006 Hydro Generator Electromagnetics*, Internal Design Practice, Andritz Hydro.



- (4) LUCENA, J. A. P., PITTA, S. A. B., FRANÇA, J., MAIA, M. R. B., *Recuperação Do Gerador Da Unidade Geradora G3 Da Usina Paulo Afonso III Da Chesf: Solução Tecnológica Implementada*, XX SNPTEE, Recife, Brasil, 2009.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Leandro Luiz Húngaro Costa**, nascido em 1987, em Bauru / SP, Brasil. É graduado engenheiro eletricitista (2009) e mestre em engenharia elétrica (2012) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). É engenheiro de propostas técnicas de hidrogeradores na Andritz Hydro Inepar desde 01/2012.



**Alexandre Takeshi Konatu**, nascido em 1984, em Osasco / SP, Brasil. É graduado engenheiro eletricitista (2007) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Trabalhou no departamento de propostas técnicas e comerciais da Andritz Hydro Inepar de 01/2008 até 03/2014. Está trabalhando na Andritz Hydro Canadá no setor de propostas técnicas de geradores desde 04/2014.



**Fábio Henrique Certo**, nascido em 1979 em Campinas / SP, Brasil. É graduado engenheiro químico (2005) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Trabalhou no departamento de engenharia de geradores da Andritz Hydro Inepar de 01/2007 até 09/2014. Está trabalhando na Andritz Hydro Canadá no setor de engenharia de isolamento e controle de qualidade de processo desde 10/2014.



**Sílvio do Amaral**, nascido em 1962, em Araraquara/ SP, Brasil. É técnico em Eletrotécnica e Eletrônica, pela Escola Técnica em Agrimensura (1990). Trabalhou por 7 anos com reformas e rebobinagem de transformadores de alta tensão na Empresa Irmãos Bim, atuou na linha de produção de barras, bobinas estatóricas e miscelâneas para geração durante 18 anos e neste mesmo setor trabalhou como líder de produção durante 7anos na empresa IESA. A partir de 09/2008 exerce a função de supervisor de bobinagem na empresa Andritz Hydro Inepar.

**Antônio Adauto Alves**, nascido em 1957 em Miguelópolis/SP, Brasil. É graduado engenheiro eletricitista (1980) pela Universidade de Brasília (UnB). É engenheiro coordenador de comissionamento na Andritz Hydro Inepar desde 11/2007.

**Francisco Javier Murcia Polo**, nascido em 1961, em Cali / Valle del Cauca, Colômbia. É graduado engenheiro eletricitista (1986) e mestre em engenharia elétrica (1991) pela Universidad del Valle (UNIVALLE, Colômbia). É engenheiro gerente generación na Empresa de Energía del Pacífico (EPSA) desde 05/10/1995.

**Danny Fernando Ramírez Bastidas**, nascido em 1981, em Yumbo / Valle del Cauca, Colômbia. É graduado engenheiro eletricitista (2007) e especialista em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (2011) pela Universidad del Valle (UNIVALLE, Colômbia). É Chefe da Central Hidroeléctrica Alto y Bajo Anchicayá na Empresa de Energía del Pacífico (EPSA) desde 2012.



**Rúben Darío Jaimes Mateus**, nascido em 1963, em Bucaramanga / Santander, Colômbia. É graduado engenheiro eletricitista (1989) e mestre em engenharia elétrica (2011) pela Universidad del Valle (UNIVALLE, Colômbia). É engenheiro Técnico Controle Elétrico na Empresa de Energía del Pacífico (EPSA) desde 05/10/1998.