



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

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO I**

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

**RECUPERAÇÃO DO GERADOR DA UNIDADE GERADORA G3 DA USINA PAULO AFONSO III DA CHESF:  
SOLUÇÃO TECNOLÓGICA IMPLEMENTADA**

**José Lucena (\*) / Socrates Pitta**  
Andritz Hydro Inepar do Brasil S.A. - AHI

**Josinaldo de França / Maurício Maia**  
Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF

**RESUMO**

A reforma de geradores de unidades de hidrogeração, quer seja devido ao envelhecimento do parque gerador, quer seja em decorrência de danos causados por falhas técnicas, é atividade cada vez mais frequente no Brasil. Considerando a grande variedade de fabricantes e tecnologias existentes nos geradores instalados, a reforma pode implicar na utilização de soluções tecnológicas diversas do projeto original. Este trabalho relata a ocorrência e a forma como foi tratado do ponto de vista do edital de licitação e do projeto o caso da recuperação do gerador 3 da UHE Paulo Afonso III da Chesf.

**PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogerador, Reforma, Solução tecnológica, Enrolamento do estator, Núcleo do estator.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar a ocorrência no gerador 3 da UHE Paulo Afonso III, o processo de contratação dos serviços e as soluções adotadas, com detalhamento do novo projeto, montagem e ensaios.

O aproveitamento hidrelétrico Paulo Afonso III localiza-se na cidade de Paulo Afonso, estado da Bahia. A Usina possui 4 unidades geradoras, acionadas por turbinas Francis, com potência unitária de 198.550 kW, totalizando 794.200 kW.

O gerador foi seriamente danificado durante a ocorrência, onde houve a fusão do núcleo, barras do enrolamento estatórico e enrolamento de amortecimento do gerador.

Para a contratação dos serviços de recuperação, foi elaborada uma Especificação Técnica (1) para um processo licitatório, onde participaram os fabricantes de grandes geradores sediados no Brasil.

O serviço de reforma foi contratado da empresa GE Hydro Inepar do Brasil S/A (\*) em 13/12/2006, com retorno da unidade em operação comercial em 28/04/2008.

(\*) Atualmente Andritz Hydro Inepar do Brasil S/A (AHI)

**2.0 - DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA**

No dia 20/05/2005, após o fechamento da chave seccionadora associada ao gerador 3 da UHE de Paulo Afonso III, ocorreu uma série de desligamentos no sistema, além do comportamento anormal do próprio gerador, concorrendo para curto-circuito no mesmo e no seu trafo.

Com a unidade girando em vazio e excitada, após o comando remoto de fechamento da chave seccionadora, houve uma conexão acidental do gerador ao sistema através da fase C do pólo do disjuntor, que apesar de sinalizar aberto encontrava-se fisicamente fechado, devido a um rompimento da sua haste comando. Essa falha gerou valores superiores a 3 vezes a corrente nominal do gerador nas fases A e C e na fase C do trafo elevador, levando-os a um sobreaquecimento que motivou um curto-circuito nas fases no gerador, com grandes danos, e em seguida um curto-circuito e incêndio no trafo elevador correspondente à fase C.

Os danos no gerador atingiram principalmente o enrolamento e núcleo estatórico e os pólos do rotor, ver Figura 1.

(\*) Rua Gapuruvu, n° 177 – Alphaville – CEP 13098-322 – Campinas, SP – Brasil  
Tel: (+55 19) 4009-6432 – Fax: (+55 19) 4009-6400 – Email: jose.lucena@andritz.com



Figura 1

### 3.0 - CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS DO GERADOR

- Fabricante:	Siemens
- Potência nominal contínua:	209 MVA
- Tensão nominal:	13,8 kV
- Fator de potência nominal:	0,95
- Frequência nominal:	60 Hz
- Número de pólos:	52
- Velocidade de rotação nominal:	138,4 rpm
- Número de ranhuras:	468
- Tipo de enrolamento:	Ondulado
- Classe de isolamento do estator:	F
- Altura do núcleo:	1.864 mm
- Diâmetro interno do núcleo:	10.600 mm
- Diâmetro externo do núcleo:	11.320 mm

### 4.0 - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO SERVIÇO

O escopo desse fornecimento abrangeu projeto, materiais, recuperação de componentes, serviço e supervisão de desmontagem/montagem, ensaios, desenhos, documentos, embalagem, transporte e seguro para a recuperação do gerador conforme detalhamento a seguir:

#### ENROLAMENTO ESTATÓRICO

- Projeto e fornecimento de novo enrolamento estatórico completo;
- Um conjunto de todos os materiais necessários para a montagem e interligação do enrolamento estatórico do gerador;
- Todos os componentes necessários para a interligação das fases do gerador aos cabos de saída que conecta a máquina ao transformador elevador;

#### NÚCLEO ESTATÓRICO

- Projeto, fornecimento e montagem de um núcleo estatórico novo;
- Adequação e/ou fornecimento de tirantes e sistema de aperto, com todos seus componentes, inclusive sistema de travamento;

## ROTOR

- Recuperação de 52 pólos, constando da substituição completa da isolação e substituição do enrolamento de amortecimento;
- Fornecimento de novas conexões do enrolamento de campo e de amortecimento, bem como suportes de fixação das mesmas;

## RECUPERAÇÃO DA CARÇAÇA

- Recuperação da carcaça existente;
- Projeto e adaptação da estrutura, se necessário, para adequar ao novo sistema de fixação do núcleo, incluindo todo material e serviços;

## SERVIÇOS DE CAMPO

Fizeram parte do escopo de fornecimento a supervisão e mão-de-obra para os serviços descritos a seguir:

- Desmontagem dos pólos do rotor;
- Desmontagem do enrolamento estatórico;
- Desmontagem do núcleo estatórico;
- Adaptação da carcaça para o novo núcleo;
- Adaptação do dispositivo de circularidade;
- Centragem da carcaça no poço do gerador e nivelamento
- Montagem do núcleo novo, no poço do gerador;
- Ensaio de indução magnética, incluindo equipamentos e cabos;
- Montagem completa do novo enrolamento do estator;
- Montagem dos pólos no rotor, com as respectivas conexões;
- Ensaio no enrolamento e pólos;
- Pintura de todos os componentes do gerador;
- Remontagem do gerador (rotor, cruzeta, tampas, cobertura, radiadores, mancais, defletores de ar, etc.);
- Ensaio de montagem e comissionamento, incluindo a instrumentação;
- Carga, transporte e descarga dos materiais inservíveis retirados do gerador.

## 5.0 - SOLUÇÃO ADOTADA

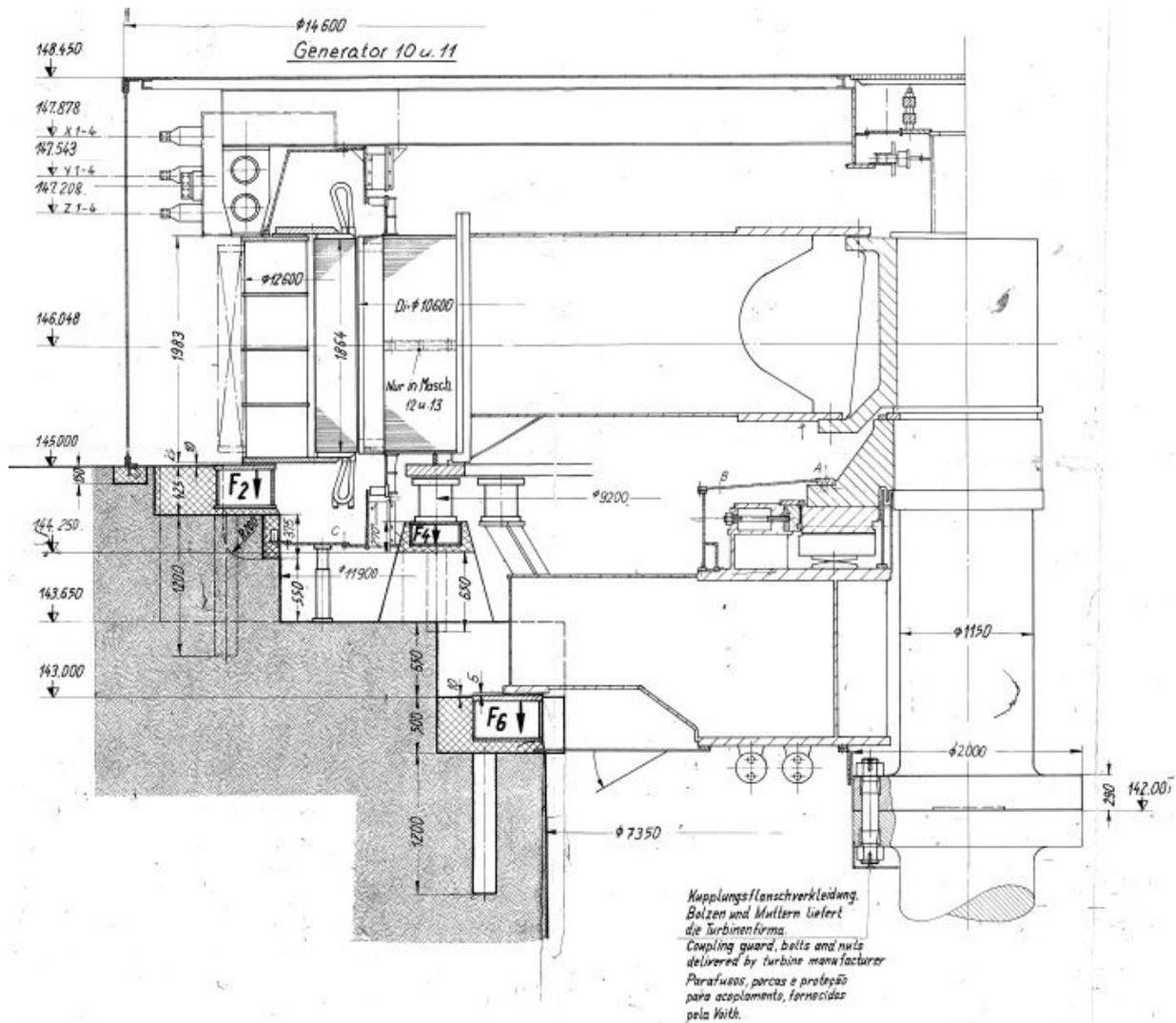


Figura 2 – Arranjo Geral do Gerador 3 da UHE Paulo Afonso III  
(Excerto do des. ASEA 0D1.0110-199580 Rev. 0)

### 5.1 Projeto eletromagnético

O projeto original do gerador 3 de Paulo Afonso III possuía um número inteiro de ranhuras por pólo por fase  $q = 3$  (468 ranhuras, 52 pólos e 3 fases) e o enrolamento era ligado em estrela. O fornecedor da reforma (AHI) procura não utilizar um número inteiro de ranhuras por pólo por fase para evitar a presença de harmônicas e reprojeteu o gerador alterando o número de ranhuras para 456 obtendo assim um  $q = 2 \frac{12}{13}$  ranh/pólos/fase. A utilização de um número fracionário de ranhuras por pólo por fase atenua as harmônicas de ordem mais alta, resultando em um menor fator de influência telefônica.

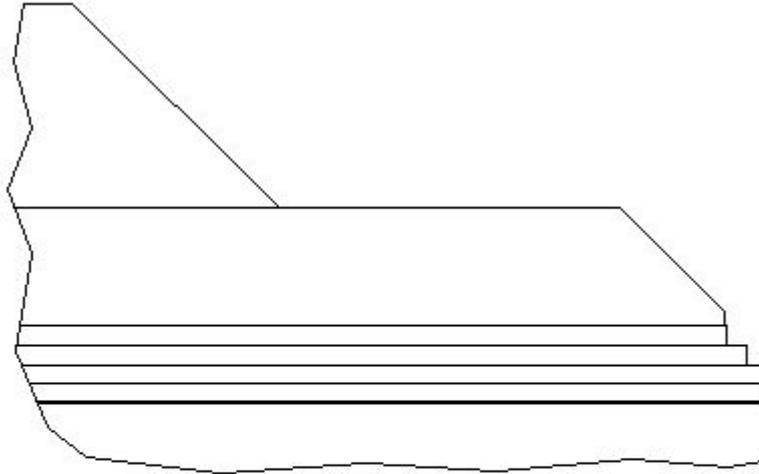
Foi utilizado também um passo de bobina fracionário (91.2 %) para redução da pulsação de fluxo na forma de onda da FEM gerada. A utilização de passo fracionário é outra forma de reduzir as harmônicas, pois o passo utilizado permite reduzir as componentes de 5ª e 7ª harmônicas que são as mais significativas que não são eliminadas pela ligação em estrela.

Para atenuar o efeito de aquecimento devido ao fluxo disperso nas extremidades do núcleo, foram introduzidos escalonamentos em ambas as extremidades do núcleo magnético. Ver Figura 3.

Outra alteração em relação ao projeto original foi a substituição do enrolamento do tipo ondulado por um do tipo imbricado por este ser um procedimento típico da Engenharia do fornecedor (AHI).

Este tipo de enrolamento facilita a manutenção, no caso de substituição de por ex. de uma barra de fundo de ranhura com menor intervenção no gerador.

Com a utilização de enrolamento imbricado tivemos um aumento do número de ligações de grupo na parte superior do núcleo, sendo portanto necessário alterar o circuito de ventilação. Ver item 5.4.



### VISTA TÍPICA DAS EXTREMIDADES DO PACOTE

Figura 3

#### **5.2 Estator sem enrolamento**

No que diz respeito ao projeto do estator sem enrolamento do gerador, compreendendo basicamente a carcaça do estator e o núcleo estatórico, a montagem do núcleo na carcaça é de particular interesse no que diz respeito à solução tecnológica adotada no projeto da reforma do gerador.

Da mesma forma que no projeto original, a montagem do núcleo na carcaça foi feita sobre dedos fixados por solda sobre a prateleira inferior da carcaça, flanges e dedos de aperto segmentados no lado superior do núcleo e barras de caudas de andorinha em V instaladas no diâmetro interno da carcaça passando por rasgos em V no diâmetro externo das lâminas do núcleo.

Uma diferença importante em relação ao projeto original está na quantidade dos flanges superiores, que passaram de trinta e nove segmentos no círculo, com doze dedos por flange, para setenta e seis segmentos no círculo, com seis dedos por flange (\*). Buscou-se desta forma adequar o projeto à tecnologia do fornecedor da reforma que visa promover uma melhor distribuição de pressão ao longo do perímetro do núcleo.

Outra diferença do projeto da reforma em relação ao projeto original está na concepção dos tirantes de aperto do núcleo, consistindo de um prolongamento roscado da barra de cauda de andorinha no projeto original e de tirantes independentes das barras de cauda de andorinha no projeto da reforma. A solução adotada possibilita o aproveitamento integral da flexibilidade longitudinal do comprimento total dos tirantes de aperto do núcleo.

A tecnologia do fornecedor da reforma considera as flexibilidades próprias combinadas dos tirantes, flanges e dedos de aperto suficientes para a manutenção da pressão de aperto do núcleo, porém, por entendimento mútuo com o cliente, foi utilizado um sistema complementar de molas-prato, semelhante ao já existente no projeto original. Ver Figuras 4 & 5.



## 5.4 Ventilação

Em decorrência da adoção de enrolamento estatórico imbricado no projeto de reforma, passaram a existir anéis de circuito e ligações de grupo inexistentes no projeto original, localizados na parte superior do enrolamento acima da prateleira superior da carcaça do estator, com a conseqüente necessidade de resfriamento desses elementos.

O sistema de ventilação do gerador do projeto original consiste de conjuntos de ventiladores axiais montados nas partes superior e inferior do anel magnético ou coroa do rotor. Esses ventiladores insuflam o ar frio proveniente dos resfriadores de ar por entre os pólos do rotor, daí através do núcleo estatórico e, em seguida, através novamente dos resfriadores de ar. Não há no projeto original passagem radial de ar pelas regiões superior e inferior das ligações do enrolamento. Embora existam furos na prateleira inferior da carcaça, que poderiam servir para a passagem de ar, todos eram mantidos fechados com tampas metálicas. Na prateleira superior da carcaça não havia furos que pudessem servir para a passagem de ar.

No projeto de reforma foi basicamente mantido o sistema de ventilação do projeto original, porém foram abertos furos para a passagem do ar de resfriamento na prateleira superior da carcaça e utilizados os furos existentes na prateleira inferior. Através do fechamento controlado de alguns desses furos com tampas metálicas é possível o controle da vazão de ar necessária para o resfriamento das ligações superiores e inferiores do enrolamento. A Figura 8 abaixo mostra esquematicamente o sistema de ventilação do gerador já considerando a passagem radial do ar pela partes superior e inferior do estator.

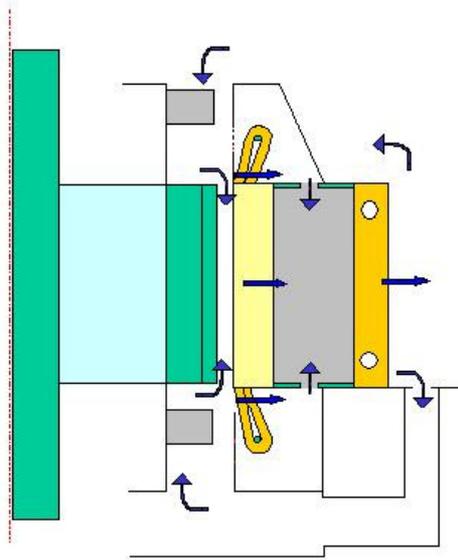


Figura 8

As simulações feitas considerando o circuito de ventilação do projeto original mostraram excelente consistência com as medições de vazão realizadas no passado, validando o modelo de cálculo adotado. As simulações feitas com o mesmo modelo, porém considerando a nova geometria do núcleo e as passagens de ar pelas prateleiras superior e inferior da carcaça, mostraram a adequação do sistema para o resfriamento do projeto da reforma.

## 6.0 - RESULTADOS NO COMISSIONAMENTO / OPERAÇÃO

### 6.1 Comissionamento

#### 6.1.1 Ventilação

A medição realizada no comissionamento mostrou uma vazão total de ar pelos resfriadores de ar do gerador de 158,9 m<sup>3</sup>/s, contra o valor requerido pelo projeto eletromagnético do gerador de 107 m<sup>3</sup>/s.

O valor previsto pelo modelo de cálculo de ventilação foi de 154,3 m<sup>3</sup>/s.

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) CHESF. Projeto Básico DOEG - 003/2005: Recuperação do Gerador da Unidade Geradora G3 da Usina Paulo Afonso III.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

José Artur Pereira de Lucena

Nascido em São Vicente – SP em 18 de julho de 1950;

Graduado em Engenharia Naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1976;

Empresa: Andritz Hydro Inepar do Brasil S/A;

Atua na área de projeto mecânico de hidrogeradores desde 1979.

Socrates Alberto Borges Pitta

Nascido em Araraquara – SP em 08 de junho de 1940

Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie em 1964

Presta serviço a Andritz Hydro Inepar do Brasil S/A

Atua na área de projeto elétrico de motores e geradores desde 1965.

Josinaldo de França

Nascido em Recife – PE em 01 de fevereiro de 1967

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Pernambuco em 1999

Empresa: CHESF

Atua na área de manutenção elétrica de usinas hidrelétrica e termoeletricas

Mauricio do Rego Barros Maia

Nascido em Recife – PE em 27 de outubro de 1955

Graduado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Pernambuco em 1978

Empresa: CHESF

Atua na área de manutenção elétrica de usinas hidrelétrica e termoeletricas

