



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO – 1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

CONSEQUÊNCIAS DE UM CURTO-CIRCUITO SIMULTÂNEO EM DIVERSOS POLOS DO ROTOR – O CASO DA USINA DE L.C. BARRETO DE CARVALHO

Fabrizio de Souza Henriques(*)
ELETROBRAS FURNAS

Antonio Boulanger Uchoa Ribeiro
ELETROBRAS FURNAS

Evandro Freire
ELETROBRAS FURNAS

RESUMO

Este trabalho apresenta a ocorrência de um curto-circuito simultâneo em diversos polos do rotor da UG5 da Usina de L.C. Barreto de Carvalho. A falha é analisada sob o aspecto dos esforços magnéticos e mecânicos, bem como suas causas, consequências e as medidas tomadas para normalização do gerador.

PALAVRAS-CHAVE

Curto-circuito, polos, desbalanço magnético, colisão

1.0 - INTRODUÇÃO

Após quarenta anos de operação, a Usina Hidroelétrica de Luiz Carlos Barreto de Carvalho (antiga Usina de Estreito) está passando por um processo de modernização de suas seis unidades geradoras, dentre as quais, quatro já foram modernizadas.

Ao longo do tempo, a Usina apresentou alguns problemas crônicos, surgidos logo nos primeiros anos de operação, notadamente, a elevada ocorrência de falhas para terra no enrolamento do estator das unidades geradoras 1 a 4, onde de 1975 até 2007, ocorreram 42 falhas. Além destas falhas, há também um elevado número de ocorrência de falhas nos polos do rotor.

A unidade geradora 5, na iminência de ser modernizada, sofreu uma falha com graves consequências aos seus principais componentes. Em julho de 2009, um desbalanço magnético no circuito de campo desta unidade, provocado por um curto-circuito simultâneo para terra em diversos polos, resultou em um choque do rotor contra o estator.

A literatura nos mostra que curtos-circuitos como este trazem consequências desastrosas para os geradores. Sem sombra de dúvidas, esta foi o maior acidente ocorrido no parque gerador de FURNAS.

Neste trabalho serão apresentadas análises dos esforços magnéticos, dos esforços mecânicos, das perdas nos polos, bem como os ensaios mecânicos e outros serviços realizados.

2.0 - DESCRIÇÃO DA FALHA

(*) Rua Real Grandeza, n° 219 – sala 701 - Bloco A – CEP 22281-900 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3092 – Fax: (+55 21) 2528-4057 – Email: fsouzah@furnas.com.br

A falha ocorreu em 7 de julho de 2009, durante a execução de ensaios no regulador de tensão da UG5, que estava retornando de uma manutenção. A máquina foi desligada por um operador e não houve atuação de proteção.

Neste dia, a equipe de manutenção estava realizando alguns ensaios no regulador de tensão a fim de fazer algumas medições. Durante este processo, o regulador de tensão foi transferido para o modo automático. Neste momento, a tensão, que estava em 13,8kV, oscilou entre 10 e 14,5kV, depois estabilizando em 13,8kV. Em razão das observações feitas, verificou-se a necessidade de substituir um cartão eletrônico painel do regulador de tensão. Em seguida, os ensaios foram retomados.

Quando o regulador de tensão foi transferido para o modo automático, a tensão terminal da máquina se reduziu a zero e, em seguida, foi observada uma grande quantidade de fumaça saindo do *housing* do anel coletor. Não houve atuação de proteção. Então, a parada da unidade geradora foi acionada imediatamente pelo operador da usina.

Não há oscilógrafo nas unidades geradoras antigas, deste modo, há apenas os relatos da equipe de manutenção e de operação da Usina.

3.0 - DANOS NA UNIDADE GERADORA

Os principais danos foram causados pelo atrito entre as partes rotativas e as partes estacionárias: gerador de ímã permanente (PMG), Excitatriz Piloto, Excitatriz Principal, Estator/Rotor.

No caso em questão, os principais efeitos foram: o deslocamento da cruzeta inferior com ruptura de toda sua fixação ao concreto, deformação da caixa do mancal combinado, mossas em toda a circunferência do núcleo do estator, na excitatriz rotativa e também no núcleo de grande parte dos polos (polos de número 1 a 3 e 20 a 64), polos com curto-circuito entre espiras e para a terra.

4.0 - CÁLCULO DOS ESFORÇOS ELETROMAGNÉTICOS

O cálculo dos esforços magnéticos foram feitos no intuito de descobrirmos a resultante da força eletromagnética desbalanceada que causou o cisalhamento dos parafusos de fixação da cruzeta inferior e atrito entre o rotor e o estator. Foram testados 11 casos, variando-se diversos grupos de polos em curto-circuito.

Para os cálculos dos esforços eletromagnéticos, as seguintes premissas foram adotadas:

- Densidade de fluxo relativa à tensão nominal em vazio (0,9469 T);
- Aumento da densidade de fluxo em função do aumento da corrente provocada pelo curto-circuito para a massa (limitado pela saturação do ferro);
- Redução da densidade de fluxo nos polos onde houve curto-circuito entre espiras;
- Região danificada no rotor: polos 20 a 64 e 1 a 3;
- Região não danificada: polos 4 a 19;
- Polos em curto-circuito para a terra: 10, 17, 34, 45 e 50;
- Polos com espiras curto-circuitadas: 13, 14, 19, 21, 42, 52, 58 e 62.

A força eletromagnética foi calculada por meio da seguinte fórmula:

$$F = K_1 \cdot \frac{B^2}{8\pi} \cdot 10^7 \cdot L \cdot W_c$$

$$B = B_{m\acute{a}x} \cdot \frac{g_{m\acute{i}n}}{g}$$

F = força radial por polo (t)

L = comprimento do núcleo (m)

B = densidade de fluxo no entreferro (tesla)

B_{máx} = densidade de fluxo máxima no entreferro (tesla)

g_{mín} = folga mínima de entreferro (m)

g = folga de entreferro real (m)

$K = \text{constante}$

Foram testados 11 casos, variando-se diversos grupos de polos em curto-circuito. O valor de entreferro adotado nos cálculos é um valor medido em 2002 por FURNAS.

A redução da densidade de fluxo em função do curto-circuito entre espiras não exerceu influência considerável, portanto, foi desprezada.

Resultado dos cálculos para as possibilidades avaliadas:

- Curto-circuito entre os polos 10 e 34: 1000 toneladas na direção do polo 54;
- Curto-circuito entre os polos 17 e 34: 590 toneladas na direção do polo 58;
- Curto-circuito entre os polos 10 e 17: 194 toneladas na direção do polo 46;
- Curto-circuito entre os polos 10 e 45: 1121 toneladas na direção do polo 60;
- Curto-circuito entre os polos 10 e 50: 1034 toneladas na direção do polo 62;
- Curto-circuito entre os polos 17 e 45: 1134 toneladas na direção do polo 63;
- Curto-circuito entre os polos 17 e 50: 1144 toneladas na direção do polo 2;
- Curto-circuito entre os polos 10 a 17 e 34 a 45: 270 toneladas na direção do polo 64;
- Curto-circuito entre os polos 10 a 17 e 45 a 50: 67 toneladas na direção do polo 40;
- Curto-circuito entre os polos 10 a 17 e 34 a 50: 435 toneladas na direção do polo 7;
- Curto-circuito entre os polos 17 a 34 e 45 a 50: 668 toneladas na direção do polo 62;

A figura 1 mostra a resultante da força para o caso entre os polos 10 e 34:

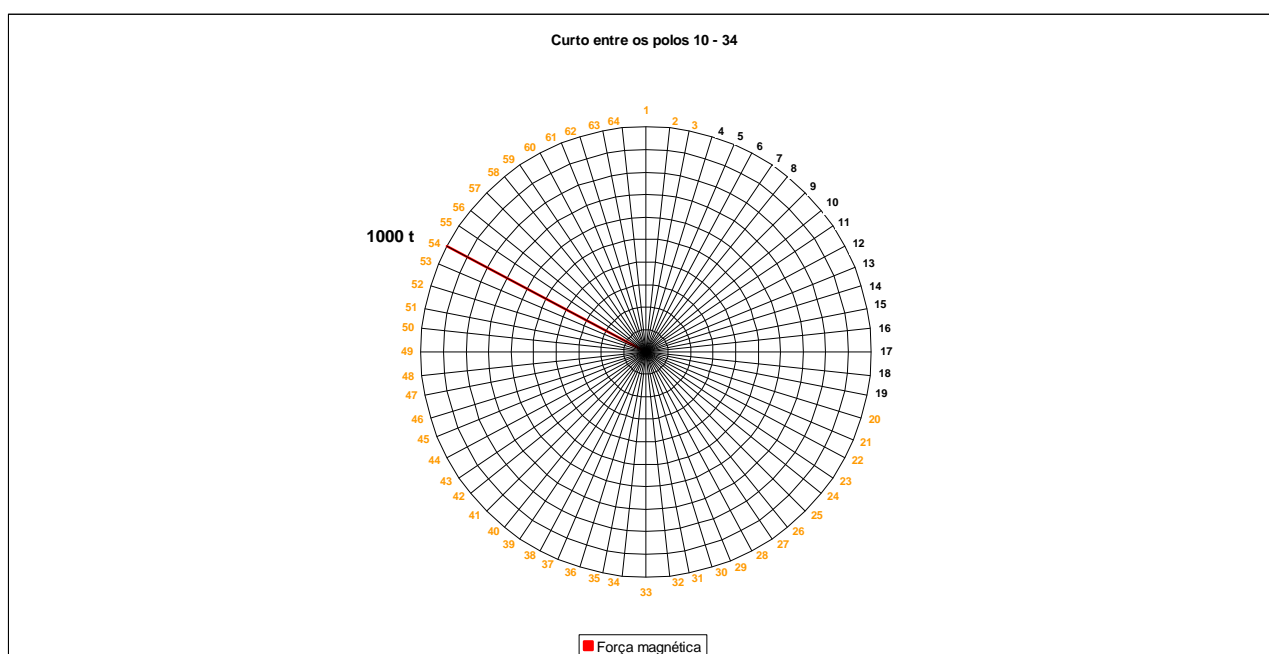


FIGURA 1 - Resultante da força magnética.

A hipótese mais provável é que o curto-circuito tenha ocorrido entre os polos 10 e 34, resultando em uma força magnética desbalanceada de aproximadamente 1000 toneladas. A força resultante na direção oposta a estes polos coincide com a região mais danificada.

5.0 - ANÁLISE MECÂNICA

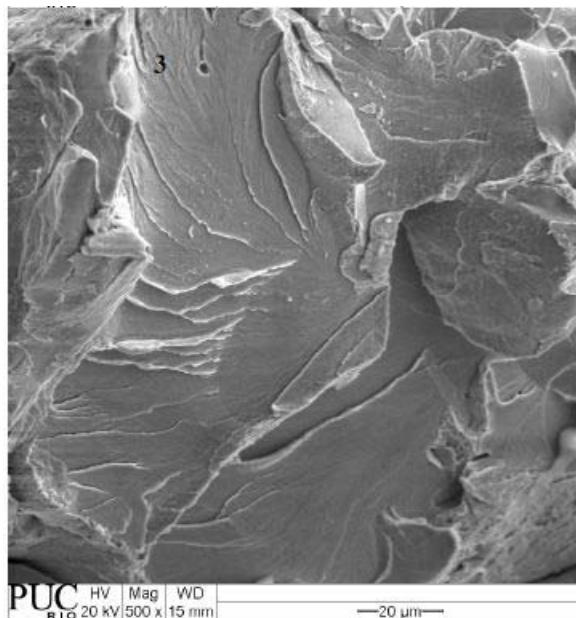
Os parafusos fraturados da cruzeta inferior foram analisados metalurgicamente e fractograficamente por um laboratório de metalurgia (1). A seguir destacamos os principais pontos do relatório:

A caracterização metalúrgica permitiu identificar o material original dos parafusos como sendo um aço 1050 normalizado.

Análise fractográfica: foram analisados 2 parafusos instalados a 90°, um do outro, sendo que em ambos o mecanismo predominante de falha foi de fratura frágil, por clivagem

transgranular, conforme Fotografia 1. A região final da fratura ocorreu por nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades de baixa energia.

Face à fratura frágil, que ocorre de modo instável e em tensões inferiores à correspondente ao escoamento generalizado, podemos inferir que a fratura de todos os 16 parafusos ocorreu de forma instantânea e simultaneamente. Por outro lado, a partir da caracterização metalúrgica dos parafusos, podemos calcular a carga de cisalhamento total atuante, quando da ocorrência do evento gerador do sinistro da unidade geradora, foi, no máximo, igual a 1440 toneladas. A título de comparação, informamos que este valor é equivalente ao peso do conjunto girante mais o empuxo hidráulico máximo, no valor total de 1420 toneladas, das unidades geradoras da Usina de L.C. Barreto de Carvalho.



FOTOGRAFIA 1 – Fractografia do parafuso.

6.0 - ENSAIOS REALIZADOS

FURNAS estabeleceu diretivas de medições mecânicas para se avaliar danos eventualmente imputados aos componentes da unidade geradora.

As leituras tomadas mostram que a cruzeta inferior apresentou valores compatíveis com os valores de tolerância usualmente adotados em projeto, daí podemos admitir que ela não sofreu danos resultantes do sinistro. No entanto, o mesmo não podemos dizer da caixa do mancal, a qual se mostrou ovalizada e fora da planicidade usual de projeto. Cabe lembrar que estas duas anormalidades podem, respectivamente, levar a dilatações radiais diferenciadas na caixa do mancal, quando da operação da máquina, favorecendo o surgimento de vibrações na frequência dupla de rotação e, por outro lado, na questão da falta de planicidade da caixa, a espelhamentos e arrastamentos do metal patente das sapatas de escora do mancal. Foi, assim, necessário restabelecer os parâmetros de projeto através de serviços de usinagem da caixa.

Também foram feitas medições de batimento (*run out*) no eixo, que demonstraram que ele permaneceu sem empenamentos. Além disso, foram feitos ensaios não destrutivos (ultrassom e líquido penetrante) em diversas soldas da cruzeta.

7.0 - PERDAS

Passamos agora a analisar a questão sob o ponto de vista das possíveis consequências do curto-circuito entre as lâminas do núcleo dos polos, considerando que a área danificada poderia contribuir para o aumento perdas adicionais (*stray losses*) e, conseqüentemente, para um decréscimo na eficiência do gerador.

As perdas que ocorrem em máquinas elétricas são classificadas da seguinte forma: perdas no cobre, perdas no ferro, perdas mecânicas e perdas adicionais ou suplementares.

As perdas adicionais (stray losses) são as perdas que surgem em consequência da distribuição não uniforme da corrente no cobre e das perdas adicionais no ferro produzidas pela distorção do fluxo magnético devido à corrente de carga.

De acordo com o documento (2) as perdas calculadas para os geradores da Usina de Estreito são as seguintes:

TABELA 1 – Perdas calculadas pelo fabricante

PERDA	Valor (kW)
Núcleo do estator em vazio	386,7
Cobre do estator	517,1
Cobre do rotor	422,075
Adicionais	42,4
Total de perdas	2482

Das perdas adicionais, 5,3 kW são perdas na sapata do polo em carga, que representam apenas 0,2% do total de perdas na máquina.

O total de perdas garantido pelo fabricante no documento é de 2482 kW. Isto significa que o rendimento garantido pelo fabricante é de 98,6%, segundo a fórmula de cálculo da norma IEEE 115:

$$\eta = 100 - \frac{\text{perdas} \cdot 100}{\text{saída} + \text{perdas}}$$

FURNAS exige, em seu Edital de modernização, o valor mínimo de 98,6% de rendimento para os geradores operando em condições nominais.

Em novembro de 2003, durante os estudos para modernização da Usina, FURNAS fez um ensaio na UG1 no intuito de analisar o rendimento da máquina, obtendo os seguintes resultados:

TABELA 2 – Rendimento da UG1, novembro de 2003.

Potência no Gerador [MW]	Rendimento Calculado do Gerador [%]
127,2	98,27
149,3	98,39
160,6	98,45
169,6	98,46
175,0	98,52

A temperatura medida no enrolamento do estator durante este ensaio foi de 92°C, em média. Enquanto que, durante o comissionamento da máquina 3, em agosto de 2009, as temperaturas médias obtidas no ensaio de aquecimento foram: 76° C no estator e 78° C no rotor.

Deste modo, após a modernização, o estator das máquinas ficará 16°C mais frio que o antigo enrolamento estatórico. Com efeito, o rendimento da máquina, que era de 98,52%, será maior, podendo até superar o rendimento exigido por FURNAS.

Numa simples análise, para uma redução do rendimento de 98,6% para 98,5%, seria necessário um aumento de mais de 2000% nas perdas que ocorrem na sapata do polo em carga.

8.0 - CUSTOS

Embora os danos ocasionados pelo curto-circuito na unidade geradora tenham sido bastante significativos, a quase totalidade dos componentes danificados (estator, polos, etc) estava

incluída no escopo da modernização, assim, os custos adicionais foram limitados. Estimamos que tais custos não tenham ultrapassado R\$ 200 mil.

9.0 - ANÁLISE DA CAUSA

O isolamento dos polos das unidades geradoras da Usina foi fabricado originalmente em classe B. Seu isolamento já dera sinais de deterioração no passado, onde falhas entre espiras ocorreram em diversas ocasiões.

Este acidente somente foi possível graças a outro problema que houve no relé de falha para terra no rotor (64R), que não estava funcionando devido a um defeito em um componente de seu circuito. Em razão desta falha, não houve a sinalização da proteção e os curtos-circuitos incipientes em diversos polos puderam evoluir.

Por outro lado, podemos também concluir que o dano no núcleo dos polos do rotor não provocará um aumento significativo nas perdas da máquina.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Certificado de Análise 0195/09 – NMP Núcleo de Análise de Materiais e Produtos, Instituto Tecnológico, PUC – Rio, Rio de Janeiro, agosto de 2009.

(2) Cálculo Eletromagnético do Gerador – Alstom, RGV4909301-12, Modernização da UHE L.C. Barreto de Carvalho.

(3) IEEE std115-1983 - IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines

11.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fabrício de Souza Henriques nasceu em Pirai, Rio de Janeiro, em 28 de abril de 1975. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal Fluminense em março de 2001. Atualmente trabalha em FURNAS, na Divisão Elétrica de Equipamentos Rotativos, onde desenvolve estudos de isolamentos, análises de ensaios dielétricos, análise e estudos de descargas parciais, acompanhamento da modernização de usinas, entre outros.

Antonio Boulanger U. Ribeiro nasceu em Campina Grande, Paraíba, em 18 de maio de 1955. Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-Rio em julho de 1977 e obteve o grau de MSc pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Atualmente trabalha em FURNAS como gerente da Divisão Elétrica de Equipamentos Rotativos.

Evandro Freire nasceu em Teresina, Piauí, em 17 de abril de 1956. Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual do Rio de Janeiro, em 1979, com especialização em análise de falhas, vibrações e monitoramento de hidrogeradores. Atualmente trabalha em FURNAS, na Divisão Mecânica de Equipamentos Rotativos.

ANEXO FOTOGRÁFICO



FOTOGRAFIA 2 – Núcleo do estator



FOTOGRAFIA 3 – Polos



FOTOGRAFIA 4 – Curto na bobina polar



FOTOGRAFIA 5 – Curto no núcleo polar



FOTOGRAFIA 6 – Deslocamento da fixação da cruzeta



FOTOGRAFIA 7 – Centragem da caixa do mancal