



**GRUPO I
GRUPO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DOS HIDROGERADORES DA USINA DE FURNAS

Sergio Ferreira Campos*

Ulisses Miguel de Souza

FURNAS – Engenharia de Manutenção

FURNAS - Usina de Furnas

RESUMO

Este trabalho descreve as principais ocorrências de defeito detectadas nos hidrogeradores da Usina de Furnas, com mais de 40 anos de operação e que levaram à decisão pela sua modernização.

Dentre elas as principais são: falhas para a terra no estator, aberturas de circuito de campo em operação, falhas nas excitatrizes rotativas, fuga superficial nos TC, falhas nos equipamentos auxiliares e na proteção.

Como conseqüência foi verificada a evolução dos índices de falhas ligadas aos geradores e equipamentos associados nos últimos anos, que culminaram na indisponibilidade de unidades geradoras.

Atentou-se também para o nível e a disponibilidade dos sobressalentes para que a manutenção pudesse ser efetuada de forma eficaz e produtiva.

PALAVRAS-CHAVE:

Hidrogerador, modernização, usina hidrelétrica, FURNAS.

1.0 - INTRODUÇÃO

Na década de 50 a Usina de Furnas foi criada para sanar uma grave crise energética que ameaçava de colapso os principais centros socioeconômicos brasileiros. Além de constituir um marco na instalação de grandes hidrelétricas no País, possibilitou a regularização do Rio Grande e a construção de mais oito usinas, aproveitando integralmente um potencial de mais de 6.000 MW instalados.

Sua posição geográfica é privilegiada. Localizada no Rio Grande, dista 300 km de Belo Horizonte, 400 km de São Paulo e 500 km do Rio de Janeiro. Foi a primeira hidrelétrica de grande porte do Brasil (1.216 MW) e quando entrou em operação em 1964 era a terceira maior do mundo. A potência prevista no início de sua construção correspondia a 1/3 do total instalado no Brasil.

São oito unidades geradoras operando, sendo que seis estavam com mais de 310 mil horas trabalhadas até 30/06/2004, e entraram em operação comercial em 1963. Outras duas unidades geradoras estão, atualmente, com mais de 230 mil horas de operação e estão operando desde 1974.

Com o passar dos anos tornou-se premente a modernização desta Usina ocasionada pelo grande número de horas trabalhadas, que culminaram em várias ocorrências de defeitos, aumentando consideravelmente a indisponibilidade de geração e reduzindo a confiabilidade dos equipamentos envolvidos. O estoque de peças de reposição também passou a ser item importante a ser considerado.

*CENTRO TÉCNICO DE ENSAIOS E MEDIÇÕES – CTE.O
Rua Carmo do Rio Claro, 80 – São José da Barra - MG - BRASIL
*35-3523-4498 / 3523-4409 (fax) sergiof@furnas.com.br
35-3523-4275 / 3523-4441 (fax) ulissesm@furnas.com.br

2.0 - ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE

Para o cálculo de disponibilidade consideraram-se dados dos últimos dez anos. Entretanto é importante salientar que a análise anterior a esse tempo não condiz com a realidade atual da manutenção. Nessa época a manutenção programada era efetuada desmontando-se quase que completamente toda unidade geradora, influenciando diretamente nos dados obtidos.

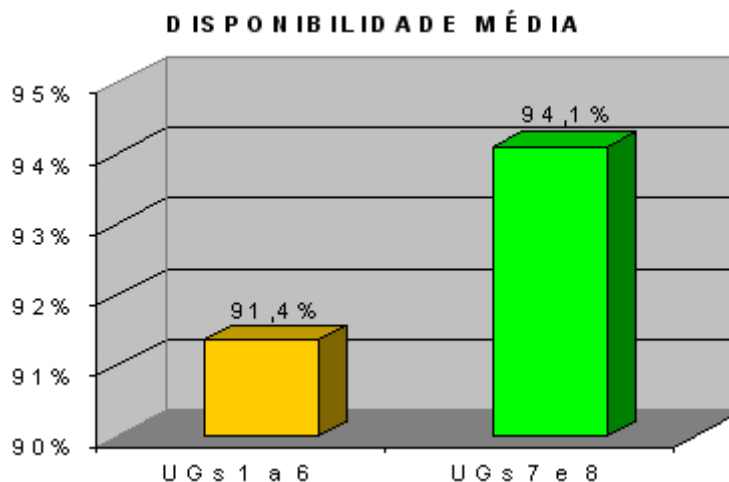


Gráfico 1 – Disponibilidade média das unidades geradoras.

No Gráfico 1, acima, verifica-se que a disponibilidade operacional média das unidades geradoras da Usina de Furnas é aproximadamente 92%. Entretanto, deve-se analisar esses dados de duas formas. Uma delas para as unidades geradoras 1 a 6, com 318 mil horas de operação, em média. As outras duas unidades, 7 e 8, mais novas, tem um tempo médio de operação de 240 mil horas. De acordo com a Figura 1 a disponibilidade média traduz o tempo de operação.

Observando o Gráfico 2, abaixo, nota-se que as unidades 03 e 04 tiveram um desempenho inferior em relação às demais. Isto se deve principalmente às ocorrências de falhas nos transformadores elevadores 15/345kV. A UG 03 ficou indisponível por quase nove meses nos últimos cinco anos. Na UG 04, além das falhas nos transformadores elevadores em 2004, contribuiu para indisponibilidade as substituições dos tubos dos trocadores de calor do gerador em 1996 e a ocorrência de defeito nos pólos sistema de excitação neste mesmo ano. Cabe ressaltar que os transformadores reservas encontravam-se danificados, aguardando reparo.

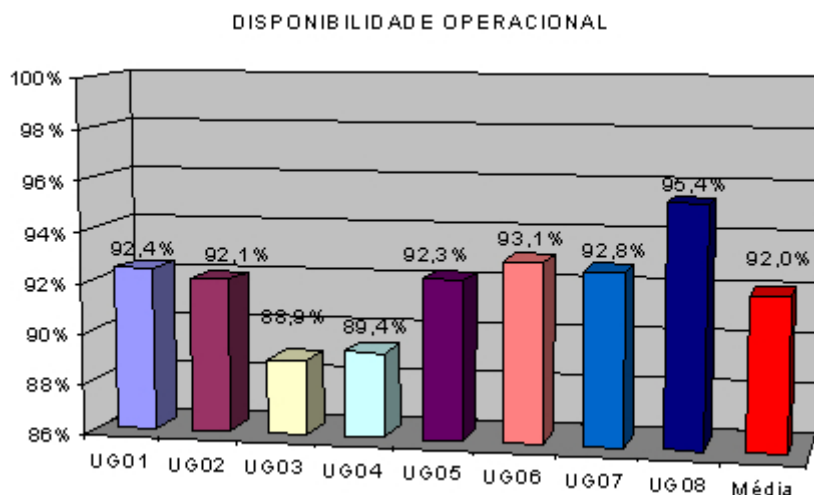


Gráfico 2 – Disponibilidade individual das UG, de 1996 até 2004.

Verificando qualitativamente as ocorrências oriundas das paradas em emergência detectadas através dos relés de proteção das unidades 1 a 6, observa-se que 17 delas aconteceram no sistema de excitação e no gerador nos últimos 10 anos. Dentre elas citam-se as ocorrências em barras estáticas, conexões dos pólos e excitatrizes rotativas. Nas unidades 7 e 8, que possuem disponibilidade maior, existe um problema de baixa isolamento nos enrolamentos do estator, causada pela presença de pó de escova misturada com vapor de óleo proveniente do mancal conjugado do gerador.

Em razão do longo tempo de operação, a substituição de alguns componentes danificados ficaram comprometidos devido à obsolescência dos mesmos. Observa-se ainda que algumas vezes, por causa desta contingência, houve necessidade de 'canibalizar' certos equipamentos para recuperar um outro.

3.0 - PESQUISA DA VIDA ÚTIL DOS GERADORES 1 A 6

Como aconteceram muitas ocorrências nos geradores, desejou-se avaliar a suas causas e abrangência. Três itens foram tomados como principais: dissecação de bobinas da armadura, inspeções em conexões de pólos e estudo dos resultados de ensaios de avaliação periódica de dielétricos, dos últimos 15 anos.

3.1 Dissecação de bobina da armadura

No final de 2002 apresentou-se um estudo sobre o grave estado de envelhecimento dos geradores 1 a 6 da Usina de Furnas, já com 40 anos e 308 mil horas de funcionamento. O foco foi a situação de deterioração que a isolamento dos enrolamentos dos estatores chegou.

Tomou-se uma barra que havia falhado em setembro de 2002, após 307,5 mil horas trabalhadas. A carga afetada na ocasião foi de 130 MW, -27 MVAR; falha fase-terra. Ver Figura 1.



FIGURA 1 – Barra da armadura, classe B, nos laboratórios de FURNAS.

3.1.1 Aspecto geral

Externamente a barra não revelou nada de excepcional levando-se em conta seu tempo de funcionamento. No entanto, apurou-se os seguintes sinais de envelhecimento: Falhas de compactação, tinta semicondutora ressecada. Ver Figura 2 e Figura 3.



FIGURA 2 – Compactação deficiente



FIGURA 3 – Tinta semicondutora ressecada

Por outro lado, a barra apresentou bom aspecto no que concerne a: corona externo, sobreaquecimento, bolhas e vibração

- Tinta Gradiente - Aspecto de tinta já anteriormente reparada. Bastante ressecada, de fácil remoção, porém sem sinais aparentes de corona. Ver Figura 4.

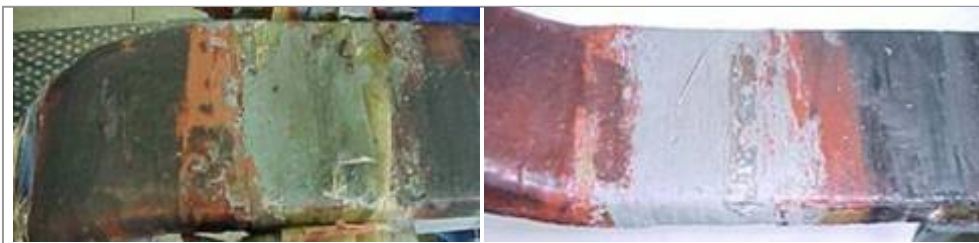


FIGURA 4 – Região da tinta gradiente

3.1.2 Avaliação Interna

Foi na avaliação interna que a barra revelou-se em final de vida útil. À medida que avançou-se na dissecação o sinal de envelhecimento trouxe grandes preocupações.

- **Região da tinta gradiente** – sob esta região, a isolamento apresentou falha na compactação (bolhas) em todo o perímetro da barra. A partir da metade da espessura do isolamento os sinais de sobreaquecimento foram

mais visíveis, culminando com a região das primeiras camadas de mica onde temperaturas elevadas ocorreram. Ver Figura 5, a seguir.

As marcas de atividade de corona internas eram significativas em toda a interface do cobre com a mica. Nesta parte da isolamento, não existia mais resina aglomerante. A mica se desprendia com grande facilidade.



FIGURA 5 – Região interna, sob pintura gradiente.

- **Cabeça da barra** – Progressivamente, a partir da região interna da barra (interior da ranhura) até a sua extremidade (cabeça), os sinais de aquecimento e curto-circuito entre lâminas desapareciam. Foi classificado o estado da isolamento, próxima à extremidade da barra como de ótimo estado, como se nova fosse. Ver Figura 6.



FIGURA 6 – Região da cabeça da bobina, fora do núcleo.

- **Região do surto** – Nas primeiras camadas (de 30% a 40% do isolamento) a resina já se apresentou carbonizada. As camadas de mica desagregavam facilmente. O surto deu-se na barra de cobre elementar (*strands*), frontal, na sua transposição. Nesta região a isolamento entre os *strands* estava totalmente carbonizada, como de resto em toda a barra, na região da ranhura. Ver Figura 7.



FIGURA 7 – Desagregação da mica e ponto da falha para a terra.

- **Regiões vizinhas ao surto** – Avaliaram-se duas outras regiões ao longo da barra. Estas também apresentaram aspectos semelhantes à região do surto, com sinais de aquecimento excessivo e presença de muito material proveniente de corona interno. Ver Figura 8.



FIGURA 8 – Estado geral do interior da barra dissecada.

3.1.3 Conclusão da dissecação

- **Correntes parasitas** – Observando-se as regiões onde se abriu a isolação (em quatro pontos diferentes) viu-se que o primeiro terço da barra (cobre), na secção frontal mais perto dos pólos é o que sofre maior efeito de sobreaquecimento. Tal fato se deve às correntes parasitas que ocorrem no interior da barra pela falta de isolação entre os *strands* de cobre.

Como a densidade de campo é muito maior nesta região (Ver Figura 9), a corrente que circula ali é maior e, por conseguinte, maiores temperaturas ocorrem aí.

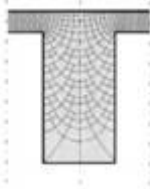


FIGURA 9 – Distribuição de fluxo na ranhura. *

* As linhas sólidas da figura acima são linhas de fluxo; as linhas tracejadas são lugares geométricos de potencial magnético constante.

- **Ponto fraco** – A degradação na seção frontal da barra foi acelerada, certamente pelos “strands” em curto, agravada por intensa atividade de descargas parciais associada.

Dentre todas as regiões exploradas da barra, ficou claro o local passível de rompimento do dielétrico. A aresta frontal da barra (cobre) é onde se apresentava maior degradação. Como em outras barras que falharam, é neste local que sempre se rompe a isolação.

Pode-se testemunhar o estado da mica, severamente degradada, ressecada e com vazios provocados por atividades de descargas parciais. O cobre apresentou estado de cobre recozido, indicando temperaturas superiores à 350° C no local. Ver Figura 10.

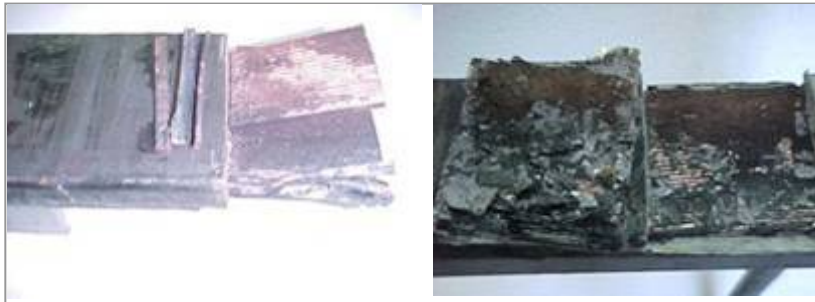


FIGURA 10 – Cobre recozido no terço frontal da barra.

- **Vida útil das barras** – Em inspeções anteriores, em outras unidades, a característica foi sempre muito parecida a esta. São evidências do fim da vida útil do enrolamento estatórico dos geradores 1 a 6 da Usina de Furnas. O mesmo tempo de funcionamento, mesmo regime de carga e o índice de falhas atualmente são também indicativos do final da vida útil do enrolamento do estator.

3.2 Avaliação das conexões dos pólos

3.2.1 Falha no rotor da UG 4 em 2003.

Após falha em pólos do gerador 4, suspeitou-se de uma possível degradação nos enrolamentos do campo. Naquele momento esta era uma suspeita, já que esta falha poderia ser uma ocorrência casual.

Houve o rompimento de uma conexão de pólo, provocando um distúrbio no gerador, inclusive com falha em bobina do estator, em decorrência do surto no campo. Ver Figura 11, na página seguinte.



FIGURA 11 – Rompimento da conexão de pólo.

3.2.2 Falha no rotor da UG 5 em 2004

Se a falha de 2003, na unidade 4, causou apreensão, uma nova ocorrência em 2004 confirmou a preocupação, pois era similar àquela ocorrida no ano anterior.

A partir desta falha, investigou-se o estado do enrolamento de campo na U.G. 4, que rompeu em 2003 e o atual, da U.G. 5 (2004). Na falha primeira investigou-se o pólo 27, danificado, e seu vizinho, aparentemente sem indícios de falhas ou iminência dela.

Após ser retirada a isolamento do pólo, observou-se uma trinca na raiz da conexão, aparentemente “saudável”. Esta certamente evoluiria para um rompimento, tal qual ocorreu no pólo vizinho. Ver Figura 12 e Figura 13).



FIGURA 12 – Trinca na raiz da conexão



FIGURA 13 – Detalhe da trinca

A figura 13, destaca a trinca que em progresso. O rompimento, com efeitos nocivos tanto no campo como na armadura era só uma questão de tempo. Muito pouco tempo.

A falha ocorrida agora (2004), na unidade 5 seria um alerta muito grave para o estado de pré-colapso que se encontrava o enrolamento de campo, não fosse a modernização destas unidades breve.

3.2.3 Diagnóstico

Fim da vida útil do enrolamento do rotor

As conexões dos pólos das unidades 1 a 6 são rígidas. É muito provável que o cobre atingiu seu limite de resistência mecânica neste ponto e vem rompendo por fadiga, devido às variações de temperatura e vibrações.

3.3 Estudo e interpretação dos ensaios de avaliação de dielétricos dos últimos 15 anos

FURNAS pratica em seus hidrogeradores e compensadores síncronos ensaios periódicos de avaliação da qualidade dos isolantes. Estes ensaios são:

- Resistência de isolamento a 2,5 kV e a 10 kV, ambos em corrente contínua;
- Avaliação da capacidade de armazenamento de energia no isolamento através da medição de carga e descarga do isolamento, a 10 kVcc.
- Medição de capacitância, pela medição da descarga de energia armazenada.
- Ensaios com *Doble*, incluindo perdas e *tip-up*.

Avaliando somente os resultados dos ensaios nas unidades geradoras 1 a 6 da Usina de Furnas nos últimos 15 anos, não foi possível detectar qualquer iminência de falha tal como foi observado pelas inspeções a que trata os

itens 3.1 e 3.2. Os níveis de isolamento sempre estiveram em valores aceitáveis e sem variação significativa. As curvas do Gráfico 3, a seguir, ilustram a evolução do fator de potência e *tip-up* para a unidade 1. No entanto, a unidade continuava falhando a intervalos cada vez menores como ilustra o Gráfico 4.

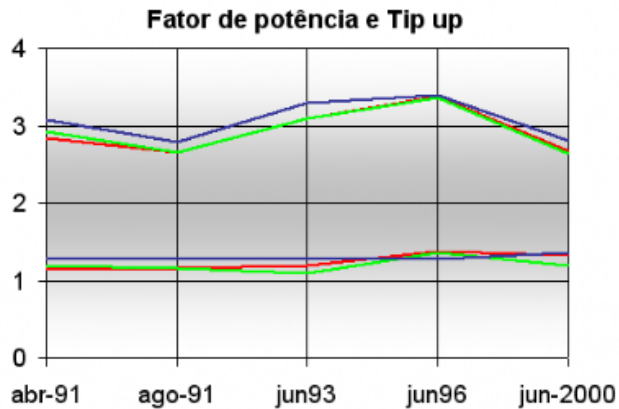


Gráfico 3 – Curvas de fator de potência e *tip-up*.

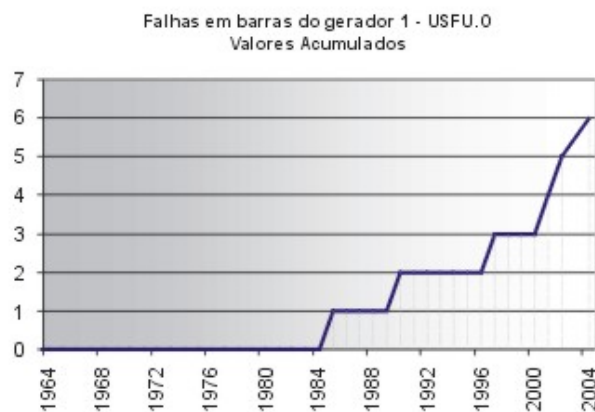


Gráfico 4 – Evolução das falhas.

4.0 - OUTRAS FALHAS RECENTES LIGADAS AO ENVELHECIMENTO DAS UNIDADES

4.1 Falhas na proteção das unidades

Nos TC de saída dos geradores a blindagem para equalização de potencial já atingiu o seu limite de isolamento, causando fugas superficiais intermitentes, levando à atuação indevida da proteção. Não existem mais TC reservas confiáveis neste quesito.

4.2 Falhas na fiação da proteção

Falhas constantes também tem ocorrido em toda a fiação do sistema de proteção da unidade, causando também atuação indevida da proteção.

Esta fiação é muito antiga, com isolamento ressecada (ainda de algodão) e o cobre já se apresenta recozido pelo efeito das altas temperaturas provocadas por deficiências nos contatos.

4.3 Falha em disjuntor de conjunto de manobras

Falha no intertravamento e temporização do disjuntor: Ao receber comando de fechamento este não atuou. Após a Operação atuar no disjuntor alternativo, manualmente, o primeiro veio a fechar alguns segundos depois, interligando as barras A e B da subestação, por alí. Por menos de 1 minuto poderia ter havido sérios danos pessoais ao Operador. Ver Figura 16, a seguir.



FIGURA 16 – Disjuntor do conjunto de manobras

5.0 - CONCLUSÃO

Os estudos de avaliação do estado dos geradores da Usina de Furnas ocorreram em uma época em que a privatização de FURNAS era palavra de ordem. Reformas ou modernizações estavam fora de questão. Mas os riscos de um colapso em qualquer uma das unidades 1 a 6 eram iminentes e os custos de uma emergência desta é proibitivo.

O estudo da real situação das barras das unidades 1 a 6 foi então apresentado à ELETROBRAS. Nesta exposição ressaltou-se a urgência de uma modernização nestas unidades, sob o risco de perda total em caso de falha grave na proteção, considerando-se as falhas já vinham ocorrendo. Somente a situação precária do enrolamento do estator já era razão para a modernização dos geradores.

Este trabalho de pesquisa e avaliação das bobinas dos geradores deu os subsídios necessários para que a ELETROBRÁS autorizasse o processo de modernização que ora ocorre na Usina de Furnas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERAÇÃO DA USINA DE FURNAS. Relatório Anual da Operação da Usina de Furnas. 1996 a 2004, Brasil
- (2) MANUTENÇÃO DA USINA DE FURNAS. Relatórios de Ocorrências da Usina de Furnas. 1996 a 2004, Brasil.
- (3) CAMPOS, SERGIO F. – Avaliação de Barra Estatórica – 2002, Brasil.
- (4) CAMPOS, SERGIO F. – Envelhecimento dos Geradores da Usina de Furnas. Nota Técnica – 2004, Brasil.
- (5) CAMPOS, SERGIO F. – Estudo de Avaliação de Dielétricos de Hidrogeradores – 2003, Brasil.
- (6) FRITZGERALD – Electrical Machines

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

nome: Sergio Ferreira Campos

graduação: Engenharia elétrica pela Escola de Engenharia de Lins, 1978.

experiência profissional: Atua na área de manutenção e ensaios especiais desde março de 1979 para FURNAS.

publicações: Avaliação Dinâmica de Máquinas Rotativas, Monitoração – Revista Mundo Elétrico.

trabalhos publicados em anais de eventos: Superaquecimento em TC de geradores – 1982;
Avaliação Dinâmica de Máquinas Rotativas – 1991;
Modernização de Usinas em FURNAS – 2003;
Modernização de Usinas - Ensaio Preliminares – 2004;

área de atuação: Ensaio de avaliação, comissionamento e de desempenho de hidrogeradores.

nome: Ulisses Miguel de Souza

graduação: Engenharia mecânica pela Faculdade de Engenharia Industrial, 1993.

pos graduação: Mestrado em engenharia de materiais na Unicamp, 2001.

experiência profissional: atuou em projetos de caldearia média. Atua na área de manutenção de usina e subestações desde outubro de 2001 para FURNAS Centrais Elétricas S.A.

trabalhos publicados em anais de eventos: Refusão de ligas de alumínio por raio laser, na ABM – 1998;
Análise microestrutural de liga de alumínio, na CBCIMAT – 1999;

área de atuação: Supervisão e planejamento da manutenção da Usina de Furnas.