



STC/ 01

17 à 22 de outubro de 1999  
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

SESSÃO TÉCNICA ESPECIAL  
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA GERAÇÃO (STC)

**AUMENTO DA EFICIÊNCIA DE USINAS HIDRÁULICAS  
CASO UHE LUIZ GONZAGA**

Luiz Fernando Ferreira Ribas – **CHESF\***  
Carlos Roberto S. Mussoi – **CEPEL**

Sidney Letichevsky – **ELETRORÁS/PROCEL**

**RESUMO**

As perdas de geração na UHE Luiz Gonzaga, decorrentes de problemas nos sistemas de resfriamento das unidades geradoras, vinham se tornando cada vez mais freqüentes, afetando fortemente sua disponibilidade operacional, trazendo um maior comprometimento ao sistema operacional da CHESF. Na busca da identificação das falhas e de soluções para as mesmas, foi implantado um programa baseado em: medições de vazões, levantamento de histórico (vazamentos e altas temperaturas), coleta de amostras de tubos para ensaios metalográficos, análise da água de resfriamento e dos depósitos no interior dos tubos dos trocadores de calor, diagnóstico das causas do problema, estudo de alternativas para solução, testes e coleta de resultados.

**PALAVRAS-CHAVE**

Eficiência energética, trocador de calor, sistema de resfriamento, corrosão, biofouling.

**1.0 – INTRODUÇÃO**

A COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF), subsidiária da ELETRORÁS, é responsável pela geração e distribuição de energia elétrica na região dos estados do Nordeste do Brasil, à exceção do Maranhão que integra a área de concessão da ELETRONORTE.

O parque de geração da CHESF é na quase totalidade de origem hidráulica (~97%), com capacidade nominal instalada de 10.270 MW (97% no Rio São Francisco),

com 54 unidades hidrogeradoras distribuídas em 14 usinas. Estudos da demanda associada ao desenvolvimento econômico-financeiro da região Nordeste, apontam o ano de 2001 como limite para disponibilidade da geração hidráulica hoje instalada.

Diante do exposto e considerando o esgotamento do potencial hidráulico da região, faz-se necessário ações no sentido de eliminar ao máximo as perdas de geração, implicando em maior disponibilidade de MWh para a oferta, aumentando assim a confiabilidade operacional do sistema elétrico.

O conceito de desperdício de energia elétrica está relacionado a todo excedente do nível ótimo de perdas relacionadas com o processo de geração. A questão da conservação de energia elétrica ultrapassou a fase da discussão da sua necessidade ou não. Sua necessidade é um consenso universal. A conservação na área da geração é uma forma enfática do setor elétrico compor com outros segmentos da sociedade brasileira, o combate ao desperdício de energia elétrica.

A conservação na geração está alinhada com parâmetros que vão desde a operação das unidades hidrogeradoras na faixa de melhor rendimento global (volume de água turbinada por MWh gerado), descendo até a detalhes do comportamento operacional de cada componente das unidades hidrogeradoras (UG's). O foco da conservação visto pela geração, não está restrito, exclusivamente, ao fator disponibilidade operacional de hoje, mas abrange também o estado físico de seus componentes que potencializará para o futuro, sensíveis efeitos na disponibilidade e custos da manutenção do sistema físico.

A CHESF vivenciou nos últimos anos, ocorrências de falhas nos sistemas de resfriamento das unidades

geradoras, provocando interdições freqüentes para normalização, gerando indisponibilidade e perda de geração. As conseqüências de maior monta se apresentaram na usina Luiz Gonzaga, onde se verificaram problemas nos sistemas de resfriamento de todas as seis UG's.

Em junho/97, a CHESF iniciou entendimentos com o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia), visando estabelecer parceria para eliminação das perdas de geração provocadas pelas ocorrências de falhas nos citados sistemas e implantação do Projeto de Conservação de Energia na Geração da CHESF, alinhado aos propósitos do PROCEL. O projeto, parte integrante das ações prioritárias do PROCEL, objetiva a identificação das causas das falhas e a proposição das devidas soluções. O projeto conta ainda com a participação do CEPREL não só na fase de identificação das causas dos problemas, mas também na função de auditor para garantir que nenhum efeito deletério, decorrente do tratamento proposto, ocorra nos componentes metálicos dos sistemas de resfriamento.

## 2.0 - UHE LUIZ GONZAGA

A UHE Luiz Gonzaga está localizada em Pernambuco, no Rio São Francisco, e suas unidades geradoras entraram em operação comercial entre junho/88 e fevereiro/90, tratando-se portanto de uma usina relativamente nova. Apesar de nova, como a seguir apresentado, a CHESF está efetuando a substituição total dos tubos dos trocadores de calor dos geradores em decorrência de corrosão localizada. A vida útil esperada para estes tubos, nas condições normais de operação, é acima de trinta anos.

### 2.1 - Características da UHE Luiz Gonzaga.

Área inundada: 615 km<sup>2</sup>

Volume total: 10,8 . 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>

Volume útil: 3,7 . 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>

Turbinas tipo : Francis

Fabricantes das turbinas: Voith e Gie/Coemsa

Fabricantes dos geradores: Siemens e Ansaldo

Número de unidades: 6 (3 + 3)

Capacidade nominal: 250 MW/unidade

Queda líquida: 46,3 a 50,8 m

Engolimento nominal: 457,3m<sup>3</sup>/s

## 3.0 - SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

Os sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas, que operam com máquinas rotativas e equipamentos elétricos, têm como finalidade dissipar o calor gerado nos mesmos, sendo os mais importantes: gerador, óleos

dos mancais e de acionamentos, compressores de ar e transformadores elétricos.

A dissipação do calor pode ser diretamente através de ar, como no caso da maioria dos transformadores elétricos, ou indiretamente quando o sistema que remove calor do equipamento, transfere-o para outro sistema (de resfriamento) que finalmente libera este calor para o meio ambiente.

A remoção do calor é fundamental para que as unidades geradoras possam operar com confiabilidade, pois os equipamentos eletromecânicos têm limitações térmicas operacionais, cuja não observância, pode provocar:

- ⚡ Desligamento automático da unidade se a temperatura do ferro do estator do gerador elétrico, ou outro equipamento, ultrapassar o valor limite de projeto;
- ⚡ Necessidade da redução da geração para manter a temperatura dos equipamentos abaixo do valor máximo permitido em projeto;
- ⚡ Desgaste prematuro dos equipamentos que operam por longos períodos na região de temperatura máxima permitida;
- ⚡ Redução dos intervalos das manutenções periódicas, com prazos de parada cada vez mais longos, em função do maior desgaste de componentes.

Os equipamentos das unidades geradoras de grande porte necessitam de sistemas sofisticados, pois a quantidade de calor a ser removida é função da potência gerada. Os sistemas possuem trocadores de calor operando em um dos lados com circuito fechado (óleo ou ar), que cede para a água, em circuito aberto de uma só passagem, o calor decorrente das perdas inerentes aos processos de transformação.

### 3.1 - Dados do sistema de resfriamento dos geradores

A água utilizada no sistema de resfriamento é proveniente do reservatório da usina e é captada na caixa espiral e conduzida ao filtro auto-limpante, sendo que cada unidade tem seu próprio filtro. A vazão, nominal de cada filtro é de 2000 m<sup>3</sup>/h com capacidade de reter partículas maiores que 1 mm. O circuito de resfriamento é aberto, de uma só passagem. Após passar pelos trocadores de calor, a água é descarregada no canal de fuga.

Cada gerador é resfriado por um conjunto de doze trocadores de calor ar/água, constituído cada um de 196 (máquinas Siemens) e 240 (máquinas Ansaldo) tubos horizontais aletados, por onde o ar quente proveniente do núcleo do gerador, é forçado a passar

para retirada de calor, sendo então resfriado e retornando novamente ao núcleo do gerador.

### 3.2 - Dados dos trocadores de calor ar/água dos geradores da UHE Luiz Gonzaga

Número de tubos: 196 / 240  
 Dimensões do tubo: (Ø14 X ø12,22 X 2.925) mm / (Ø19 X ø 16 X 2340) mm  
 Aletas de cobre: (27 x 52) mm / 38 mm  
 Material dos tubos: ASTM D111 - 687  
 Material dos espelhos: Latão naval  
 Área de troca térmica: 320 m<sup>2</sup> / 200 m<sup>2</sup>  
 Vazão de ar: 14 m<sup>3</sup>/s  
 Vazão de água: 87 m<sup>3</sup>/h / 83 m<sup>3</sup>/h  
 Nº de passes da água: 4 / 3  
 Velocidade do ar: 3 m/s / 3,6 m/s  
 Velocidade da água: 2,18 m/s / 1,5 m/s  
 Temperatura do ar na entrada: 68 °C / 66 °C  
 Temperatura do ar na saída: 54 °C / 40 °C  
 Temperatura da água na entrada: 30°C  
 Temperatura da água na saída: 34 °C

### 4.0 - IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS NA UHE LUIZ GONZAGA

A UHE Luiz Gonzaga foi a primeira a ter as causas de perda prematura da integridade mecânica de tubos dos trocadores de calor identificadas através de ensaios metalográficos efetuados no CEPEL.

Os relatórios do CEPEL permitem destacar os seguintes pontos:

- ⇨ A inspeção visual após o corte longitudinal dos tubos, revelou que o interior dos mesmos estava coberto por um depósito de material fracamente aderido, de cor bege e com espessura inferior a 0,5mm
- ⇨ Verificou-se também que o interior dos tubos apresentava várias regiões cobertas com formações filiformes, provavelmente de origem vegetal.
- ⇨ Após a determinação da matéria volátil, 22%, a 600 °C, o resíduo foi enviado para análise qualitativa por dispersão de raios-x que revelou a presença de alumínio, silício e ferro.
- ⇨ Após a limpeza mecânica verificou-se que os tubos, por baixo da lama seca, estavam bastante atacados com vários locais apresentando tubérculos (depósitos) aderidos à sua superfície interna. Em todos os casos, sob estes tubérculos, foram observados pites, alguns já tendo perfurado a parede dos tubos. Estes tubérculos, de um modo geral, tinham coloração verde.
- ⇨ Os tubos dos trocadores de calor ar/água analisados, estavam bastante atacados,

apresentando grande quantidade de pites, alguns já tendo perfurado a parede dos tubos

- ⇨ Considerando-se o estado, quanto à corrosão, dos tubos analisados, se eles são representativos dos feixes de tubos, pode-se prever que os trocadores de calor da UHE Luiz Gonzaga deverão sofrer vazamentos em tempo não muito longo.
- ⇨ A corrosão sob depósito constatada nos tubos examinados não teria ocorrido se a formação de depósitos (tubérculos) fosse impedida.

De posse desta constatação o PROCEL em conjunto com a CHESF iniciaram estudos para viabilizar a eliminação das causas dos depósitos. A natureza dos depósitos, matéria orgânica com altos teores de ferro, caracteriza o “biofouling”. O reservatório da UHE Luiz Gonzaga também apresenta uma proliferação excessiva de Egeria densa que possivelmente facilita, junto com algas filamentosas, a ocorrência de depósitos com formações filiformes.

### 5.0 - QUALIDADE DA ÁGUA DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO

As análises foram efetuadas em laboratório da própria CHESF. A água do sistema de resfriamento da UHE Luiz Gonzaga, caracteriza-se, no período até o momento analisado, por ser levemente alcalina, pela baixa condutividade elétrica, baixas concentrações de silte e argilas em suspensão. A caracterização completa da água só será possível após um mínimo de doze meses de análises consecutivas de modo a acompanhar todas as variações hidrológicas.

### 6.0 - INVESTIGAÇÃO DA NATUREZA DOS DEPÓSITOS NO INTERIOR DOS TUBOS

O CEPEL indicou que a composição dos depósitos era orgânica com teores de ferro, alumínio e silício, sendo estes dois últimos, provavelmente, da deposição de silte, normal em águas naturais.

A presença de matéria orgânica associada ao ferro em depósitos em tubos de trocadores de calor sempre associado as inspeções visuais, indicaram um caso de biofouling com provável participação de bactérias que precipitam ferro.

Este fenômeno é freqüente em sistemas de troca térmica, sem tratamento, operando com águas naturais. Os sistemas de resfriamento críticos, como os de unidades térmicas, desde a fase de projeto são contemplados com facilidades de limpeza, mecânica ou química. Entretanto, as UHEs no Brasil não tem esta tradição, apesar do histórico de problemas.

### 6.1 - Mecanismo básico de formação de depósitos com a participação de microrganismos

O mecanismo básico do processo e suas condições pode ser simplificado por:

- ⇨ Algumas bactérias, como as da espécie *Leptothirix*, são facultativas de ferro, podem obter energia oxidando o íon ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) a íon férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ). Como o íon ferroso pode ser oxidado pelo oxigênio dissolvido estas bactérias competem com o mesmo e portanto estão restritas à locais com grandes variações de potencial de oxi-redução.
- ⇨ Estes locais são tipicamente as interfaces sólido – água que na natureza podem ser tipificados como rochas e solos alagados. Nas usinas hidrelétricas o local ideal é a superfície dos trocadores de calor que além da fundamental interface oferece:
  - Temperatura ideal para o desenvolvimento de microrganismo;
  - Fluxo contínuo de água com os nutrientes necessários, principalmente o íon ferroso;
  - Escoamento laminar na superfície interna dos tubos.

A eficiência deste metabolismo, oxidação do ferro, é baixa. Para produzir 0,5g de carbono celular são necessárias 220g de íon ferroso. Esta condição resulta em enorme deposição de compostos férricos insolúveis.

Outros grupos de bactérias envolvidas neste processo depositam produtos metabólicos (íon férrico e matéria orgânica), sobre a própria estrutura celular, aumentando ainda mais o volume do material depositado.

Apesar de não ter sido efetuada a identificação destas bactérias nos depósitos dos trocadores de calor na UHE Luiz Gonzaga, pode-se, com relativa segurança, suspeitar que os mesmos participaram do processo.

A deposição com ativa participação de microrganismos é um fenômeno bastante conhecido em sistemas de troca térmica.

## 7.0 - DECISÕES ADOTADAS

### 7.1 – Substituição dos trocadores de calor

A equipe CHESF/PROCEL, utilizando um boroscópio, inspecionou diversos tubos de trocadores de calor e esta inspeção indicou que todos os tubos apresentavam a mesma situação identificada pelo CEPEL, como anteriormente descrito, quanto à corrosão. A decisão adotada pela CHESF foi a aquisição de jogos de

trocadores de calor para os geradores de duas unidades e retubagem dos trocadores de calor dos demais geradores.

### 7.2 - Tratamento químico

Visando eliminar a ocorrência de depósito no interior dos tubos dos trocadores de calor, optou-se por um tratamento químico da água de resfriamento utilizando solução a base de hipoclorito de cálcio com uma concentração máxima do residual de cloro em 1 ppm (partes por milhão ou  $10^{-4}$  %), tal concentração de cloro é a mesma da água potável, além disso no momento em que a água chega ao canal de fuga esta é diluída em cerca de 1370 vezes, de modo que não há qualquer possibilidade de ocorrência de impactos ambientais.

Como auxiliar de cloração, esta sendo utilizado um dispersante biodegradável.

Foi definido uma periodicidade de três vezes por semana durante trinta minutos, como valor inicial, até que as características locais de deposição seja melhor conhecida com relação as variações temporais da qualidade da água.

Coube ao PROCEL a especificação do tratamento químico, baseado em dois casos de aumento da eficiência na geração implantado nas UHEs Samuel e Balbina. O PROCEL permanece como consultor até a obtenção de dados concretos, cerca de doze meses após a implantação das rotinas operacionais.

A CHESF foi a responsável pelas alterações de projeto da UHE Luiz Gonzaga para viabilizar o sistema de tratamento químico, intermitente, composto de suportes, bombas dosadoras, agitadores, painéis de controle, injetores, etc.

### 7.3 - Paradas prolongadas de manutenção

Foi elaborado instrução técnica para as equipes de manutenção, recomendando que durante as paradas prolongadas, sejam executadas as seguintes ações: drenar os trocadores de calor, efetuar a lavagem dos tubos com água limpa e permitir a sua aeração (abertura das tampas), utilizando ventilação forçada até a secagem.

### 7.4 – Controle das velocidades da água no interior dos tubos

A velocidade da água no interior dos tubos dos trocadores de calor tem uma relação direta com o desgaste dos tubos. A baixa velocidade afeta negativamente a troca térmica e contribui para o

processo de deposição, na superfície do tubo, de micro-organismos presentes na água de resfriamento. A alta velocidade também é prejudicial a troca térmica e induz o desgaste do tubo pela ação da erosão, o que redundará, tal como no caso do depósito, no surgimento de furos. Diante do exposto, a CHESF contemplou em suas ações, a medição de vazões nos diversos sistemas de resfriamento das unidades geradoras, visando com isso, ter sob controle as velocidades da água nos tubos dos diversos trocadores de calor.

## 8.0 - OPERACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO DE CLORAÇÃO

A partir de abril/99 foi iniciada a cloração do sistema de resfriamento da UG 01.

As equipes de operação e de manutenção foram treinadas a manusear o hipoclorito de cálcio, preparar a solução a ser injetada e a controlar a concentração de cloro residual na saída do sistema de resfriamento.

A expectativa de gastos com esse processo, é da ordem de R\$ 120,00 por unidade por mês, o que é insignificante frente aos resultados esperados.

## 9.0 - RESULTADOS ESPERADOS

O objetivo básico do tratamento é o aumento da eficiência das unidades geradoras, ou seja, o tratamento deverá ser eficiente na prevenção de formação de depósitos, de modo a manter a integridade da camada de óxidos passiva dos tubos, ou, em caso de perda a sua recuperação.

Outros benefícios esperados:

- ☞ Nenhuma indisponibilização de unidades geradoras para limpeza de trocadores de calor;
- ☞ Eliminação do trabalho penoso e dos custos com homem-hora e material para limpeza dos trocadores de calor;
- ☞ Temperaturas estáveis dos equipamentos resfriados (pressupõe aumento da vida útil dos mesmos);
- ☞ Bloqueio da causa da corrosão sob depósito nos tubos dos trocadores de calor dos sistemas de resfriamento, advindo daí maior vida útil de seus componentes e, conseqüentemente, redução dos gastos com suas reposições;
- ☞ Redução da frequência de desligamento das unidades;
- ☞ Aumento da confiabilidade operacional das unidades geradoras.

## 10.0 - CONCLUSÃO

Considerando que a grande quantidade de UHEs no Brasil apresenta problemas semelhantes, os autores acreditam que é viável estudar a implantação de tratamentos químicos para solução dos mesmos. O tratamento deverá ser específico para cada UHE em função das suas peculiaridades.

## 11.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1)VIDELA, A. V. & SALVAREZZA, R. Introducción a la Corrosion Microbiológica. Buenos Aires, Agro Pecuária. (1983).

(2)UHLIG, H.H. Corrosion and Corrosion control. 3ª Ed. New York, Wiley Interscience. (1987).

(3)WHITE, G.C. Handbook, of chlorination. New York, Van Nostrand Reinhold, (1973).

(4)TCHOBANOGLOUS, G. e SCHOEDER. Water Quality, E.U.A. , Addison-Wesley Publishing Company, 2ª edition, (1987).

(5)PINTADO, J. L. e MONTEIRO, F. Corrosion Microbiológica en Centrales Hidroeléctricas, Ver. Iber. Corro. y protec. Vol XVII-Núm. 5 (1985).

(6)LETICHEVSKY S e HASSELMANN L. Avaliação de corrosão em Usinas Hidrelétricas no Rio Paraíba do Sul. (I Encontro de Corrosão e Proteção Argentino-Brasileiro – 1988).

(7)LETICHEVSKY S, HASSELMANN L., MAINIER B. Considerações sobre o desempenho operacional de Trocadores de Calor em Usinas Hidrelétricas no Brasil. (3º Congresso Ibero-Americano de Corrosão e Proteção. Congresso Brasileiro de Corrosão – 1989).

(8)KREITH, FRANK. Princípios da transmissão de calor. Ed. Edgard Blücher Ltda. Trad.. 3ª Ed. Americana. (1977).

(9)LETICHEVSKY, S. Os Impactos Ambientais e a Taxas de Corrosão em UHE's. (16º Seminário de Corrosão - R J - 1991).

(10)LETICHEVSKY, S. Corrosão em Trocadores de Calor Cupro-Níquel, Caso da UHE Samuel. (19º CONSBACORR – R J - 1999).

(11)RIBAS, L.F.F. Perdas de Geração nas UHE's da CHESF Decorrentes dos Sistemas de Resfriamento. (Seminário Internacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica - R J - 1998)

## 12.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

**Nome:** Luiz Fernando Ferreira Ribas. # **Nascimento:** Recife/Pe–1951. # **Graduação:** UFPE–Recife/Pe–1974 (Eng. Mecânica). # **Pós-graduação:** EFEI–Itajubá/MG–1982 (Máquinas de Fluxos). # **Extensão:** CIT-Inglaterra-1990(Vibrações e Ruídos em Máquinas Rotativas). # **Experiência Profissional:** Funcionário CHESF desde 1975, → pré-operacional e comissionamento de novas UHE's, manutenção mecânica de UHE's, END e ensaios mecânicos em UHE's, UTE's e SE's, normatização e coordenação da manutenção.