



GGH/020

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

## GRUPO I GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

### MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÕES E AVALIAÇÃO DE TENSÕES EM PÁS DE ROTORES FRANCIS

Luís Tadeu Lopes de Freitas(\*)  
CESP

José Carlos Zanutto  
IPT

#### RESUMO

Como parte dos estudos para determinação da nova potência máxima de operação das unidades geradoras da UHE Ilha Solteira foram realizadas, em 1998, medições das deformações e o cálculo das tensões dinâmicas em pás do rotor Francis da turbina da Unidade Geradora 14.

O objetivo do trabalho consistia na medição de deformações em três pás do rotor através de extensômetros elétricos, com a unidade em funcionamento. Para tanto, durante a parada da unidade geradora, foi feita a instrumentação com rosetas (“strain gauges”) nas faces de algumas pás.

Com a turbina em funcionamento, foram registradas as deformações medidas pelos extensômetros, para diversas condições de carga, inclusive acima da potência máxima definida pelo fabricante, e em teste de rejeição de carga, entre 0 e 170MW.

As tensões de cisalhamento parecem não ser críticas numa seção metálica cheia. Já as tensões  $\sigma_c$ , na direção normal à superfície de engastamento, dão idéia da tração simples e da flexão ocorrendo nessa superfície, em cada local da leitura.

As tensões medidas seguem, em linhas gerais, uma relação aproximadamente linear com a potência exigida da máquina. As variações dinâmicas observadas, durante os registros feitos, parecem não mostrar resultados inesperados.

Dada a consistência geral dos resultados, parece razoável aceitar que os valores medidos sejam representativos do comportamento das pás nas condições dos ensaios

Os valores medidos foram comparados com as especificações e memoriais do projeto, mostrando que os valores medidos são em geral inferiores aos calculados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Turbina, Extensometria, Deformações, Medições, Sobrecarga.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Nos projetos eletromecânicos complexos, particularmente aqueles anteriores a década de 70, o dimensionamento mecânico requeria a adoção de hipóteses simplificadoras devido, principalmente, aos conceitos e métodos numéricos ainda em desenvolvimento e à falta de acesso aos recursos informatizados para modelamento, aliados a processos de fabricação com controles que ainda não permitiam uma garantia total da qualidade.

Assim, para os sistemas de maior complexidade, com número de funções estratégicas, ou num estágio mais baixo de desenvolvimento tecnológico, de uma forma geral, os projetistas destes sistemas possuíam uma certa tendência ao superdimensionamento de seus componentes, frente às condições reais de funcionamento exigidas no regime de operação. Desta forma, os limites estabelecidos pelos fabricantes eram de caráter teórico e, normalmente, podiam ser excedidos.

No caso de turbina hidráulica para usina hidrelétrica, sua potência nominal é fixada contratualmente com um rendimento máximo, para condições em regime contínuo, sob condições específicas de queda.

Nas condições reais de funcionamento, as unidades hidrogeradoras podem produzir uma potência diferente daquela especificada pelo fornecedor, com algum

CESP – Companhia Energética de São Paulo

End: Rua da Consolação 1875, 9º andar - São Paulo – SP, CEP: 01301-100  
Tel: (0xx11)234-6166 , Fax: (0XX11)234-6924, e-mail: luis.freitas@cec.cesp.com.br:

prejuízo no rendimento, mas sem comprometer sua integridade ou vida útil, devido, principalmente, aos seguintes fatores:

- Alterações nas condições da queda bruta, devido às mudanças nos níveis montante ou jusante, provenientes de eventos posteriores à construção da usina, à formação do reservatório, ou condições ambientais;
- Diferenças entre o comportamento teórico e do modelo com relação ao protótipo;
- Sistemas de monitoramento de condição, situação e desempenho, permitindo uma operação mais segura e em regimes adequados em outras faixas;
- Aperfeiçoamentos do projeto, com introdução de alterações nos componentes, executadas pela manutenção;
- Substituição de peças com projetos e materiais mais adequados em processos de modernização;
- Maior conhecimento técnico dos equipamentos, adquirido ao longo de sua operação, permitindo que se enfrente riscos maiores.

A determinação dos limites reais de potência do conjunto hidrogerador e do transformador elevador, requer a identificação e análise dos parâmetros e condições restritivas, que limitam o seu funcionamento.

Estas restrições do conjunto hidrogerador e transformador elevador, podem ser, resumidamente, subdivididas em: restrições operativas da turbina, do gerador, do transformador elevador e das instalações.

A identificação de parâmetros restritivos permite que sejam estabelecidos patamares e critérios de severidade, baseados em normas internacionais, limites estabelecidos pelos fabricantes, características de funcionamento decorrentes dos dados monitorados ao longo do período de operação dos equipamentos, cálculos dos esforços sobre os componentes eletromecânicos mais críticos através de métodos mais precisos etc.

Devido as dificuldades do sistema elétrico da sudeste-sul nos meados da década de 90, as concessionárias foram estimuladas pelas autoridades energéticas a melhor aproveitar seus recursos visando um aumento da capacidade de ponta do sistema. A CESP de imediato iniciou um programa de estudos e ensaios que resultaram num aumento da potência máxima de algumas de suas usinas, que na UHE Ilha Solteira foi de 3230 para 3444 MW, a partir de 1996.

As grandezas de controle monitoradas foram as seguintes:

- Medição de grandezas operacionais: níveis de montante e jusante; potências ativa e reativa; tensão e corrente de armadura; tensão e corrente de excitação; rotação da unidade geradora; abertura do distribuidor; abertura das pás do rotor (para turbinas Kaplan); temperaturas dos mancais da unidade hidrogeradora, do gerador, do transformador elevador, das escovas de carvão do anel coletor, no disjuntor de campo e nos barramentos de excitação; medição do consumo de óleo do sistema de regulação.
- Medição do comportamento dinâmico: vibração nos mancais, no gerador e nas estruturas e fundações; oscilação de eixo do conjunto girante; oscilação de pressão na adução, descarga e caixa espiral; oscilação de potência; ruídos.
- Análise no desempenho do transformador elevador: análise físico-química do óleo; cromatografia gasosa; cromatografia líquida.

Nos trabalhos executados pela CESP, ficou evidenciada a necessidade de medições das tensões dinâmicas nos rotores das turbinas, de modo a dissipar eventuais dúvidas quanto a segurança estrutural nas novas condições. Para efetuar este serviço foi contratado o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., que realizou os ensaios, com o apoio da CESP, em 1998.

## 2.0 INSTRUMENTAÇÃO DA TURBINA

O rotor da turbina tem 12 pás e suas rotações nominal e de disparo são 85,7 e 179,2 rpm, respectivamente. Pelo projeto original, temos os seguintes dados nominais:

- Queda: 42m;
- Potência: 161,5MW;
- Descarga: 400m<sup>3</sup>/s;
- Rendimento máximo: 92,4%.

A partir de 1996, a nova potência da unidade geradora ficou estabelecida em 174MW.

O objetivo do trabalho consistia na medição de deformações em três pás do rotor através de rosetas, com a unidade em funcionamento. Para tanto, durante a parada da unidade geradora, as partes superiores (próximas ao engastamento) das duas faces das pás 2, 3 e 8 foram instrumentadas com rosetas retangulares, isto é, com dois extensômetros "strain gauges" formando um ângulo reto e o terceiro extensômetro na bissetriz (45°). As pás 2 e 8 foram instrumentadas com 10 rosetas, 5 em cada face, da seguinte maneira:

- o 1° par aproximadamente 100mm do bordo de ataque;

- o 2º par aproximadamente 300mm do bordo de ataque;
- o 3º par aproximadamente 300mm do bordo de fuga;
- o 4º par aproximadamente 300mm do bordo de fuga;
- o 5º par aproximadamente 100mm do bordo de fuga.

A pá 3 foi instrumentada com 4 rosetas, duas em cada face da seguinte maneira:

- o 1º par, tal que o 4º par das pás 2 e 8, aproximadamente 300mm do bordo de fuga;
- o 2º par, tal que o 5º par das pás 2 e 8, aproximadamente 100mm do bordo de fuga.

Todas as rosetas foram instaladas com a mesma orientação, com o vértice da roseta na parte superior e mais próximo do bordo de ataque. Um dos extensômetros de cada roseta ficou, tanto quanto possível, paralelo à linha de solda.

As rosetas das faces de pressão e de sucção, correspondentes a um mesmo par, foram instaladas de maneira que mantivessem dentro do possível a mesma orientação e os pontos centrais coincidentes em planta. O requisito de coincidência em planta fez com que algumas rosetas ficassem significativamente longe da linha de solda, devido ao formato da pá.

Os extensômetros de cada roseta receberam denominação que incluía o número da pá, seguido pelo número da roseta e pela letra correspondente à sua orientação, ou seja:

- número da pá (2,3, ou 8);
- número da roseta (rosetas ímpares instaladas no lado de pressão, rosetas pares no lado de sucção);
- uma letra correspondente à direção do extensômetro (a: paralelo a linha de solda, b: formando 45º com a linha de solda, c: formando 90º com a linha de solda).

Cada um dos extensômetros elétricos que compõem cada roseta foi conectado, usando o método dos 3 fios, ao respectivo condicionador de sinais com filtro passa-baixas “anti-aliasing” e conversor analógico-digital, onde o sinal foi transformado da forma analógica para a forma digital, segundo uma taxa de amostragem pré-definida (500 leituras por segundo por extensômetro) e enviado para um microcomputador para armazenamento para posterior tratamento.

O conjunto de 30 canais correspondentes às 10 rosetas da pá foram armazenados em um microcomputador, em tempo real, durante as medições. O conjunto de canais correspondentes às rosetas das pás 3 e 8 foram

armazenados simultaneamente, em outro microcomputador, também em tempo real.

Todo o conjunto de condicionadores / conversores e os dois microcomputadores foi instalado na extremidade superior do eixo e girou solidariamente com o eixo, durante as medições.

Para cada roseta foi utilizado um cabo flexível, com condutores agrupados em pares trançados e blindados em conjunto, pelo fato do ambiente estar sujeito a interferências eletromagnéticas, devido a proximidade do gerador e da excitação do rotor. No interior da turbina as rosetas e fios das pás 2 e 3 foram protegidos com o produto Devcon WR2 e as rosetas e fios da pá 8 com resina Epoxi.

Foram utilizadas rosetas modelo KFM-5-D17-11L100, de fabricação Kyowa.

### 3.0 MEDIÇÕES

Com a turbina em funcionamento, foram registradas as deformações medidas pelos extensômetros, para diversas condições de carga, inclusive acima da potência máxima definida pelo fabricante, e em teste de rejeição de carga, entre 0 e 170MW.

As medições com a máquina no sistema foram iniciadas por volta das 7h do dia 30/06/98 e finalizadas por volta das 7h do dia 01/07/98.

Foram realizados 3 conjuntos de medições de deformação. Para cada medição foi gerado um arquivo contendo as séries temporais correspondentes a cada um dos extensômetros monitorados.

A taxa de amostragem dos sinais foi de 500 amostras por segundo por extensômetro. A frequência de corte superior dos filtros (“anti-aliasing”) é 100 Hz. Antes do início de cada conjunto de medições, com a máquina parada foi realizado o ajuste de zero e calibração dos extensômetros elétricos. Apesar da grande atenção à vedação e proteção dos extensômetros, parte dos sensores foi danificada.

### 4.0 TRATAMENTO DOS SINAIS

As deformações lidas pelos extensômetros foram assim denominadas:

- $\epsilon_a$ : deformação lida pelo extensômetro paralelo à linha de solda;
- $\epsilon_b$ : deformação lida pelo extensômetro formando 45º com a linha de solda;
- $\epsilon_c$ : deformação lida pelo extensômetro formando 90º com a linha de solda.

Os valores das deformações medidas estão expressos em micron/metro ( $\mu\text{m/m}$ ) ou “microstrain”, segundo a

convenção de que sinais positivos correspondem à tração e sinais negativos à compressão.

Foram calculados os valores médios das deformações medidas e as correspondentes tensões médias com o intuito de ilustração e verificação da consistência dos sinais medidos.

Para a verificação da existência de componentes dinâmicas nos sinais, foi calculado o espectro de frequência das séries temporais das tensões. Para isso, foram utilizados trechos com duração de 1 minuto, provenientes de arquivos com as séries temporais das tensões calculadas, segundo o mesmo procedimento de cálculo, porém utilizando os valores instantâneos das deformações da medição 01202 (rejeição de carga).

O espectro de frequência foi calculado entre 0 e 250Hz, com resolução de 0,5Hz, aproximadamente.

As componentes detectadas, praticamente, se concentram na faixa entre 0 e 20Hz. É importante salientar que a componente na frequência de 60Hz corresponde a ruído, na frequência da rede, nas séries temporais de todas as rosetas, devido à proximidade dos condicionadores de sinais ao gerador e, também, à interferência dos demais geradores da usina nos sinais. Note-se que a componente de 0Hz em todos os sinais corresponde ao valor médio da tensão.

## 5.0 RESUMO DOS RESULTADOS

Para melhor apreciação das leituras obtidas, inclusive facilitando um apanhado geral do comportamento das pás da turbina nas condições examinadas, são apresentados valores das tensões  $\sigma_c$  obtidos nos vários pontos onde foram coladas as rosetas.

Foram escolhidas as tensões  $\sigma_c$  como as mais elucidativas, neste caso. As tensões  $\sigma_a$ , cuja direção encontra-se no plano paralelo e vizinho do engastamento das pás no cone, evidentemente exprimem mais o comportamento do conjunto pá-cone. As tensões de cisalhamento parecem não ser críticas numa seção metálica cheia. Já as tensões  $\sigma_c$ , na direção normal à superfície de engastamento, dão idéia da tração simples e da flexão ocorrendo nessa superfície, em cada local da leitura.

Das dez rosetas coladas 10 rosetas numa pá designada como 2, perderam-se apenas as leituras da roseta 6.

A leitura tida como a mais carregada, como de fato foi confirmado pelas leituras, é a do bordo de fuga.

Para comparação, colocaram-se rosetas nos pontos homólogos da pá 3, vizinha, e da pá 8, oposta à pá 2.

A Tabela no final, apresenta esses valores médios de  $\sigma_c$ .

Como é inevitável num ensaio desta natureza, envolvendo vários parâmetros e intervalos de tempo relativamente longos, há variação do zero de referência.

As rosetas foram zeradas na situação máquina parada, anulando assim, basicamente, os efeitos do peso próprio.

A condição máquina sincronizada – potência zero fornece, basicamente, os efeitos das forças centrífugas.

As condições sob potência crescente, atingindo-se o máximo de 170MW, fornecem basicamente as adições devidas às pressões e sucções impostas pela água para vencer as resistências de origem elétrica ao movimento, oriundas do gerador.

No final da seção de medidas, em cada ocasião, foram repetidas as leituras na condição máquina parada e medida a variação do zero (deriva do zero) durante intervalo de tempo gasto nessas operações. Finalmente, foram tiradas as médias entre as leituras feitas com zero inicial e com zero final. Em relação à confiabilidade das leituras, os resultados foram bastante consistentes. As tensões seguem, em linhas gerais, uma relação aproximadamente linear com a potência exigida da máquina. As variações dinâmicas observadas, durante os registros feitos, parecem não mostrar resultados inesperados.

## 6.0 PROJETO DO ROTOR

O rotor tem diâmetro máximo de 7370mm, altura máxima de 3970mm e peso de 148t, sendo fabricado de peças fundidas (cubo, saia e pás) e soldadas.

O material de fabricação é o aço fundido GS19Mn4, com a seguinte composição química:

- C – 0,15 a 0,23;
- Si – 0,20 a 0,35;
- Mn – 0,80 a 1,1;
- P – máx. 0,03;
- S – máx. 0,035.

E as seguintes características mecânicas:

- Tensão de escoamento: 275MPa.
- Tensão de ruptura: 480 MPa.

O projeto de rotores Francis de grandes dimensões é o resultado de uma otimização dos pontos de vista hidráulico e mecânico. Atualmente, os cálculos mecânicos da estrutura são executados com o auxílio de programas de análise por elementos finitos, alguns projetistas usam modelo do tipo treliça tridimensional de elementos de placa com seis graus de liberdade por nó.

São consideradas as seguintes cargas sobre o rotor:

- A repartição dos esforços centrífugos devidos à velocidade de rotação do funcionamento estudado;
- A distribuição das pressões sobre pá, saia e cubo.

Esta distribuição é objeto do estudo hidráulico do rotor. Os estudos em modelos reduzidos são combinados com programas numéricos considerando um fluido perfeito e supondo a existência de turbinas elementares, hipótese lícita para as regiões de funcionamento vizinhas ao rendimento ótimo. Cada fabricante tem seus próprios procedimentos e programas, sendo os métodos validados pelo confronto de ensaios experimentais e pelos protótipos construídos.

Como é óbvio, os maiores valores das tensões estão localizados nas áreas de descontinuidade geométrica, na ligação pá com o cubo. Os dados práticos, obtidos em ensaios realizados no campo, mostram que as medições de tensões realizadas com extensômetros (“strain gauges”) são sensivelmente inferiores aos calculados por métodos de elementos finitos.

Usualmente, as tensões máximas admissíveis são ( $Re$  – tensão de escoamento):

- $1/3 Re$  para operação normal;
- $2/3 Re$  em sobrevelocidade.

Para o material usado na UG-14 da UHE Ilha Solteira, temos:

- 91,7 MPa para operação normal;
- 183 MPa em sobrevelocidade.

Portanto, o dimensionamento da rotor da UHE Ilha Solteira ainda está de acordo com as especificações mesmo para a máxima potência ensaiada de 170MW.

## 7.0 CONCLUSÕES

Dada a consistência geral dos resultados, parece razoável aceitar que os valores medidos sejam representativos do comportamento das pás nas condições dos ensaios.

As tensões seguem, em linhas gerais, uma relação aproximadamente linear com a potência exigida da máquina.

As variações dinâmicas observadas, durante os registros feitos, parecem não mostrar resultados inesperados.

Os valores medidos foram comparados com as especificações e memoriais do projeto, mostrando que os valores medidos são em geral inferiores aos calculados.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) CESP, UHE Ilha Solteira: Especificações Técnicas.
- (2) VOITH, UHE Ilha Solteira: Informações Técnicas.
- (3) CESP, UHE Ilha Solteira: Relatórios de Ensaio em Sobrecarga.
- (4) IPT, Relatório Técnico No. 37.033

TABELA

Médias das Tensões Normais nas Pás 2, 3 e 8

Pás/Rosetas	Potência zero (sincronizada)		Potência máxima (170MW)	
	Arq 0102	Arq 3007	Arq 0102	Arq 3007
2-01	-13,0	-8,5	-1,5	0
2-02	9,3	10,0	-8,0	-8,5
2-03	-18,0	-17,5	10,0	11,0
2-04	12,0	17,5	-20,0	-17,5
2-05	-27,0	-24,0	19,0	20,0
2-06	-	-	-	-
2-07	-40,0	-44,0	53,0	56,0
2-08	47,0	46,0	-4,0	-6,0
2-09	-34,0	-38,5	71,0	70,0
2-10	73,0	70,0	28,0	30,0
3-07	-33,0	-33,0	41,5	62,0
3-08	48,0	49,0	41,5	-4,0
3-09	-27,5	-33,5	-6,0	53,0
3-10	-	67,5	57,0	27,0
8-08	56,0	56,0	-	5,0
8-10	76,0	76,0	39	42,0

1 – Tensões normais  $\sigma_c$  (direção normal à seção do engastamento);

2 – Médias de Zero Inicial e Zero Final;

3 – Unidade N/mm<sup>2</sup>.