

Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

DEFEITO NOS MANCAIS DO ANEL DE REGULAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA GOV. JOSÉ RICA E CORREÇÃO ATRAVÉS DA ALTERAÇÃO DO PROJETO ORIGINAL

DIEGO ORLANDO DE BORTOLI(1); MARCELO FINATTO(1); JOSUÉ CARLO BETEMPS VAZ DA SILVA(1);
ADRIANO MARQUES AFONSO(1);

Copel GET(1);

RESUMO

Apresentar a análise das falhas estruturais identificadas nos mancais do anel de regulação da turbina da unidade 02 da UHE GJR, durante a reforma do distribuidor da turbina ocorrida em 2015. Para identificar as causas dos defeitos foi realizada a revisão completa dos cálculos de projeto, sendo que para solucionar o problema houve a necessidade de alteração do material do composto autolubrificante, e alteração de projeto referente a área de cobertura dos mancais do anel de regulação para aumentar a uniformidade da distribuição de pressão.

A adoção das soluções apresentadas permitiu adequar o equipamento aos novos cálculos de engenharia, e assim bloquear as causas dos defeitos normalizando a função da unidade geradora.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuidor, Anel de Regulação, Autolubrificante bimetalico, Usina Hidrelétrica Governador José Richa.

1.0 – INTRODUÇÃO

Entende-se por distribuidor da turbina o conjunto de equipamentos mecânicos que controlam a passagem (quantidade) de água pressurizada da caixa espiral para o Rotor Francis (Turbina), regulando desta forma a velocidade e potência da unidade geradora.

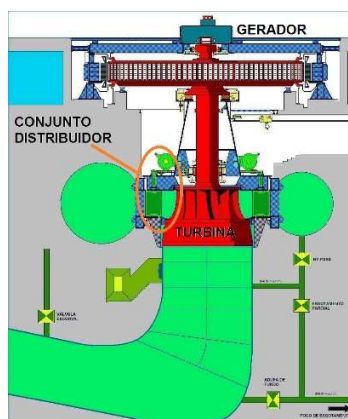


Figura 1 – Vista geral da unidade geradora da UHE GJR. Em destaque, a localização do conjunto distribuidor da turbina.

O funcionamento deste equipamento deve ocorrer sem vibrações, e com vedação adequada da energia Usina Hidrelétrica Gov. José Richa – PR-592 km 22 – CEP 85.790-000 Capitão Leônidas Marques – PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3327-7743 – Fax: (+55 45) 3327-7710 – Email: diego.bortoli@copel.com

hidráulica disposta na caixa espiral (ausência de vazamentos de água). Trata-se de um equipamento vital ao perfeito funcionamento das turbinas hidráulicas, e consequentemente de uma usina hidrelétrica.

O distribuidor da turbina da UHE GJR foi projetado para operar com componentes mecânicos autolubrificantes. Como o próprio nome diz, tais componentes não necessitam de intervenções para aplicação de lubrificantes como graxa ou óleo, no entanto, possuem vida útil limitada pois apresentam desgaste em relação ao fator tempo de operação.

Após 17 anos de operação comercial, devido ao desgaste acentuado, houve a necessidade de substituir tais componentes autolubrificantes dando origem ao projeto de reforma do distribuidor da turbina.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 – Conjunto distribuidor da turbina

O conjunto distribuidor transfere, de forma proporcional, os movimentos recebidos dos servomotores para mecanismos que determinam o posicionamento angular das pás diretrizes móveis, regulando desta forma a velocidade e potência da unidade geradora.



Figura 2 – Nesta ilustração o distribuidor da turbina encontra-se fechado. Em detalhe a esquerda, o anel de regulação encontra-se na cor cinza.



Figura 3 – Nesta ilustração o distribuidor da turbina encontra-se aberto.

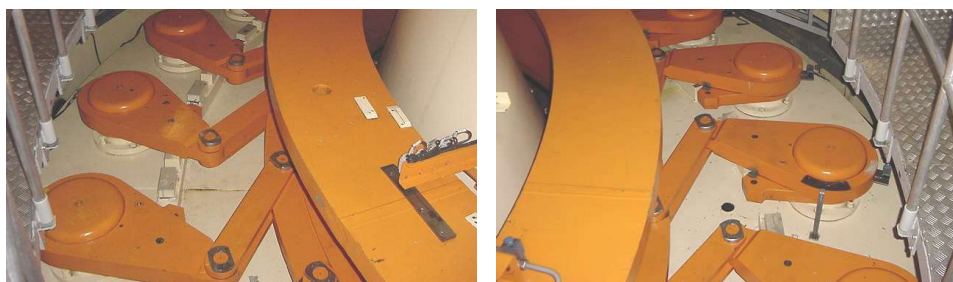


Figura 4 – Vista geral do poço da turbina da UHE GJR. Cada alavanca é acoplada ao anel de regulação que recebe os movimentos dos servomotores.

2.2 – Tecnologia autolubrificante bimetálica com grafite

As partes móveis do distribuidor da turbina da UHE GJR foram projetadas para operarem com mancais autolubrificantes. Trata-se de estrutura bimetálica contendo um suporte (substrato) em aço inoxidável, e uma camada de deslizamento autolubrificante. Tal camada autolubrificante é constituída de liga especial a base de bronze, produzida por meio do processo de sinterização ou metalurgia do pó, com lubrificante sólido de grafite impregnado sob a forma de partículas minúsculas homogeneamente distribuídas.



Figura 5 – Aspecto geral de buchas e placas autolubrificantes produzidas pelo processo de sinterização. Trata-se da tecnologia empregada no projeto do distribuidor da UHE GJR.

O princípio de funcionamento desta tecnologia é basicamente obtido pelo próprio desgaste do material, o qual libera o lubrificante sólido composto de grafite.

2.3 – Anel de regulação do distribuidor da turbina

O anel de regulação da UHE GJR possui 6,3 metros de diâmetro e pesa 21 TON. Em 2015, durante a reforma do conjunto distribuidor da turbina da Unidade 02 foi programada a substituição das placas autolubrificantes dos seus mancais.

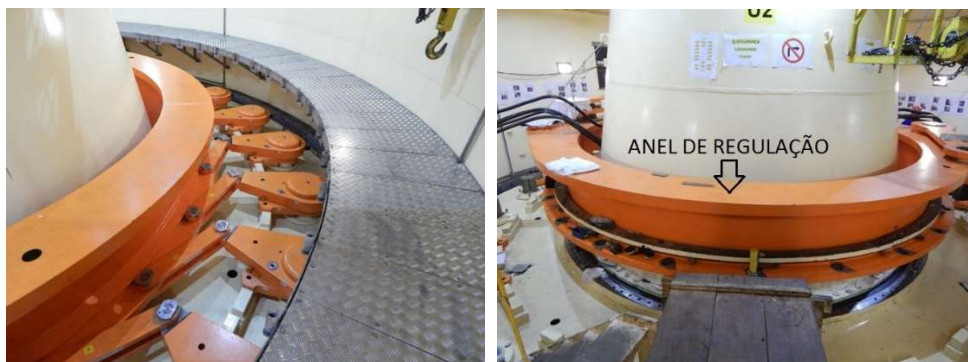


Figura 6 – Visão geral do anel de regulação durante reforma do distribuidor da turbina da U2.

2.4 – Mancais do anel de regulação

O anel de regulação recebe os movimentos lineares dos servomotores e desloca-se em movimento circular movimentando de forma simultânea todo o bielismo e suas respectivas pás diretrizes móveis. Para que esta movimentação ocorra adequadamente, o anel de regulação conta com 3 mancais formados por placas autolubrificantes. São eles:

- 1) Mancal inferior axial: Sustenta o próprio peso do anel de regulação, além dos esforços decorrentes de operação no sentido de cima para baixo.
- 2) Mancal radial: Sustenta os esforços laterais decorrentes de operação.

3) Mancal superior axial: Sustenta os esforços decorrentes de operação no sentido de baixo para cima.

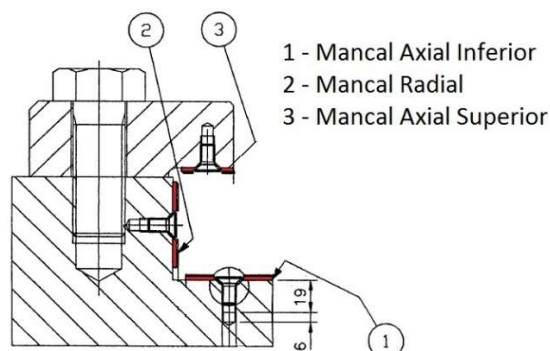


Figura 7 – Desenho em corte dos 3 mancais do anel de regulação.



Figura 8 – Visão geral dos mancais, do anel de regulação, montados.

2.5 – Avarias identificadas nos mancais do anel de regulação - 2015

Em 2015, durante a reforma geral e do processo de substituição dos mancais superiores e inferiores do distribuidor, Ao levantar o anel de regulação foi constada avaria total no mancal axial inferior, bem como, avarias significativas no mancal radial.



Figura 9 – Avarias encontradas no mancal axial inferior e mancal radial do anel de regulação.

A foto acima foi retirada imediatamente após o levantamento do anel de regulação, ainda antes da limpeza. Esta região, por não ter escoamento e ser de difícil acesso, acumula vazamentos de óleo e impurezas geradas ao longo dos 17 anos de operação da unidade geradora.



Figura 10 – Placas autolubrificantes radiais e completamente avariadas (a esquerda) e deformações nas placas autolubrificantes além do rompimento dos elementos de fixação (a direita).

Cabe destacar que mesmo com as avarias encontradas nos mancais do anel de regulação, o distribuidor da turbina U2 operava, aparentemente, dentro da normalidade, sem apresentar consequências visíveis relacionadas a tal problema. Isso se deve ao fato da elevada capacidade de força dos servomotores, na ordem máxima de 270 TON lado direito e 184 TON lado esquerdo, totalizando 454 TON de força rotacional sobre o anel de regulação. No entanto, com as placas autolubrificantes avariadas, as movimentações danificaram severamente as superfícies de deslizamento inoxidáveis do anel de regulação.



Figura 11 – Sulcos e arrastamento de material na superfície de deslizamento do anel de regulação.

Durante a reforma do distribuidor da turbina da U2 foram desenvolvidas ações para reparar a originalidade dos mancais do anel de regulação, porém sem qualquer incremento de melhoria ou alteração de projeto.

2.6 Identificação da causa fundamental e introdução de melhorias através de alteração de projeto

Após revisar completamente os cálculos estruturais para os mancais do anel de regulação, e ainda analisando o memorial de cálculo original do equipamento, conforme documento GJR 50042-18233-029, é possível concluir que o anel de regulação possui pouco momento de inércia (resistência) para as cargas aplicadas através dos servomotores e bielas. Analisando-se os resultados, é possível concluir que o mancal axial inferior e o mancal radial do anel de regulação encontram-se subdimensionados.

Uma possível elevação na rigidez do anel de regulação tornou-se inviável tecnicamente, pois exigiria a desmontagem parcial da unidade geradora, incluindo a retirada do rotor do gerador. Esta solução envolveria custos elevados, além de indisponibilidade prolongada das unidades geradoras.

O mancal axial inferior possuía, originalmente, placas autolubrificantes distribuídas em 4 segmentos que totalizavam 135° de cobertura do diâmetro, sendo que o valor limite de pressão operacional deste material é de,

no máximo, 30 MPa. A revisão dos cálculos estruturais revelou elevadas pressões nestas placas autolubrificantes, chegando ao valor de 59,2 MPa.

Para corrigir este problema foi elevada a área de cobertura do mancal axial inferior de 135° para 360°. O aumento da área das placas autolubrificantes restringe a deformação do anel de regulação na região de deslizamento, o que é benéfico pois reduzirá as tensões de borda na periferia das placas. Com a elevação da área de cobertura a pressão operacional foi reduzida de 59,2 MPa para 22,2 MPa.

Com relação ao mancal radial, o mesmo possuía, originalmente, placas autolubrificantes distribuídas, simetricamente, que totalizavam 180° de cobertura do diâmetro, sendo que o valor limite de pressão operacional deste material também é de, no máximo, 30 MPa. A revisão dos cálculos estruturais revelou elevadas pressões nestas placas, chegando ao valor de 21,3 MPa

A correção estrutural para este caso também envolveu a elevação da área de cobertura do mancal radial, passando de 180° para 360°. Com a elevação da área de cobertura, a pressão operacional foi reduzida de 21,3 MPa para 9,1 MPa.

Quanto ao mancal axial superior, o mesmo possuía, originalmente, placas autolubrificantes distribuídas em 4 segmentos que totalizam 215° de cobertura do diâmetro. Os cálculos estruturais apontaram que este mancal está corretamente dimensionado.

Foram adquiridas novas placas autolubrificantes para todos os mancais do anel de regulação. As novas peças fabricadas para o mancal axial inferior e mancal radial receberam canais denominados *cleaning grooves* que proporcionam melhor desempenho em regiões suscetíveis a presença de resíduos.

Para todos os mancais do anel de regulação foi alterado o projeto de fixação das placas autolubrificantes, incluindo a aplicação de adesivo industrial e parafusos mais resistentes. As novas placas foram fabricadas com ligas metálicas mais modernas e resistentes, as quais apresentavam maior resistência mecânica em relação ao fator P.V (relação entre carga e velocidade de deslizamento).

2.7 – Escolha da nova liga autolubrificante bimetálica

Como já informado acima, a nova liga autolubrificante foi escolhida com o intuito de elevar o fator P.V. (relação entre capacidade de carga e velocidade de deslizamento), pois segundo o memorial de cálculo do fabricante e o cálculo estrutural realizado pelo Eng. Adriano Afonso – COPEL, na condição de carga 1 (distribuidor totalmente aberto, fechando, com os 2 servomotores disponíveis), os valores calculados para a velocidade e para a pressão de carregamento por segmento é de:

| Carga 1 | |
|------------------------|-----------------------------|
| Vel. Deslocamento | 0,09m/s |
| PxV Mancais Radiais | 1,5 N.m/mm ² .s |
| PxV Mancais Inferiores | 1,28 N.m/mm ² .s |
| PxV Mancais Superiores | 0,88 N.m/mm ² .s |

Tabela 1 – Dados do anel de regulação na condição de Carga 1 (condição original)

Sendo assim, ao ser verificado os dados da liga original (87% Cobre, 13% Estanho, com 6% do volume de grafite), a mesma possui uma velocidade máxima indicada de 0,1m/s, sendo que a mesma atenderia a solicitação, porém, devido as elevadas pressões de carregamento por segmento, o P.V. resultante nos mancais radiais, inferiores e superiores é muito maior do que a recomendada pelo fabricante, de 0,4 N.m/mm².s.

Como não seria possível alterar a velocidade de deslocamento dos servomotores, e a fim de atender à necessidade, foi elevada a área coberta pelas placas, diminuindo a pressão de carregamento por segmento, alterando os valores de P.V. necessários:

| Carga 1 | |
|------------------------|-----------------------------|
| Vel. Deslocamento | 0,09m/s |
| PxV Mancais Radiais | 0,41 N.m/mm ² .s |
| PxV Mancais Inferiores | 0,48 N.m/mm ² .s |
| PxV Mancais Superiores | 0,33 N.m/mm ² .s |

Tabela 2 – Dados do anel de regulação na condição de Carga 1 (com elevação da área de placas autolubrificantes)

Desta forma, com o intuito de elevar a confiabilidade de todo o sistema, foram estudadas várias ligas, desejando que a selecionada possuísse velocidade máxima e P.V. superiores aos apontados nos novos cálculos.

Após consultas com diversos fabricantes, manuais, dentre outros, optou-se por uma liga formada de 87% Cobre, 13% Estanho, porém com 10% do volume de grafite, esta alteração elevou o P.V para 1,0 N/mm² x m/s.

Devido a criticidade do equipamento e para garantir a correta fabricação da liga escolhida, bem como a homogeneidade da distribuição do grafite pela superfície do material, foram realizados diversos ensaios em fábrica (na Alemanha):

- 1 - Ensaio de composição química.
- 2 - Medição do percentual de grafite
- 3 - Análise metalográfica da distribuição de grafite.
- 4 - Ensaio de composição química II.
- 5 - Ensaio tribológicos.
- 6 - Ensaio de aderência.
- 7 - Ensaio de dureza.

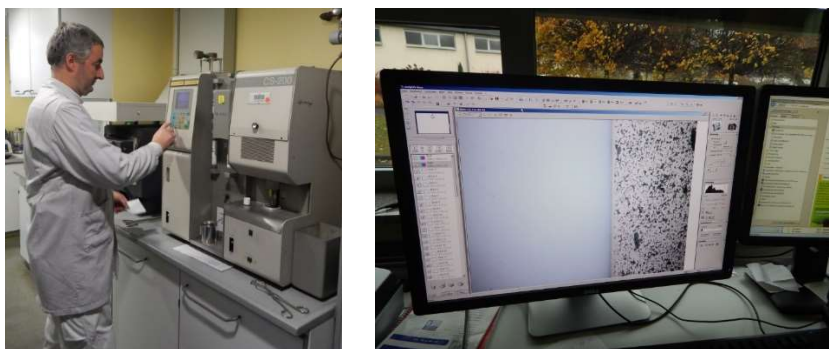


Figura 12 – Ensaio de medição do percentual de grafite (a esquerda) e resultado da análise metalográfica da distribuição de grafite (a direita).

Na tabela abaixo é possível comparar a liga autolubrificante original (avariada) produzida em 1998 em relação ao novo material produzido em 2016.

| Características | <i>Deva BM 11-6E (Glacier)</i> <i>Ano 1998</i> | <i>Deva BM 392 (Fed. Mogul)</i> <i>Ano 2016</i> |
|------------------------|--|---|
| Resistência a Tração | 500-700 MPa | 500-700 MPa |
| Carga Máxima estática | 250 N/mm ² | 280 N/mm ² |
| Carga Máxima dinâmica | 100 N/mm ² | 100 N/mm ² |
| Máxima velocidade | 0,1 m/s | 0,5 m/s |
| Máximo P. V. | 0,4 N/mm ² x m/s | 1,0 N/mm ² x m/s |

| | | |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Temperatura máxima de operação | 280 °C + | 280 °C + |
| Temperatura mínima de operação | 150 °C - | 150 °C - |
| Coeficiente de Atrito a seco | 0,15 - 0,18 f | 0,10 - 0,16 f |
| Contra face rugosidade | 0,2 - 0,8 µm Ra | 0,2 - 0,8 µm Ra |
| Dureza Contra face | 180HB | 180HB |
| Material Inoxidável do Substrato | Não Informado | DIN 1.4301 |

Tabela 3 – Comparativo entre a liga original (1998) e a nova liga

3.0 - CONCLUSÃO

Durante a reforma do distribuidor da Unidade 02 foram constatadas avarias nos mancais do anel de regulação. Foi realizada uma reparação imediata envolvendo a substituição idêntica de componentes autolubrificantes. Após a entrega da unidade geradora ao SIN (sistema elétrico nacional), foram revisados na íntegra os cálculos estruturais mecânicos dos mancais avariados. Houve a comprovação de subdimensionamento estrutural tanto para o mancal radial quanto para o mancal axial inferior do anel de regulação.

Para solucionar em definitivo o problema, considerando as vertentes de viabilidade técnica e econômica, foram elevadas as áreas de coberturas destes mancais, assim como, especificadas novas placas autolubrificantes produzidas com ligas mais modernas e resistentes, principalmente em relação ao fator P.V (relação entre carga e velocidades). Também foram adotadas melhorias no projeto de fixação das placas, além do incremento de canais de limpeza na fabricação das novas peças.

Todas as unidades geradoras da UHE GJR estão sendo reparadas com base no novo projeto, sendo que neste momento, todas as unidades, exceto a Unidade 02 (agendada para final de 2019), já passaram por esta modernização. Ao término da execução do projeto existe a expectativa que a operação do anel de regulação ocorra livre de manutenções relevantes durante o restante do período de concessão da planta até 2030.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Kvaerner Turbin AB – *Memorial de cálculo 50042-18233-029 - Regulating ring calculation report*, de julho de 1997;
- (2) Betemps, Josué – *Relatório Técnico 062/2013: Histórico de falhas nos distribuidores das turbinas da UHE GJR*, de outubro de 2013;
- (3) Afonso, Adriano – *Cálculo estrutural dos mancais do anel de regulação da UHE GJR e apêndice I, II, III e IV*, de 29 de dezembro de 2015;
- (4) Federal Mogul – *Manual deva.bm sliding bearings Maintenance-free self-lubricating*, de maio de 2012, Rev. 2;
- (5) Glacier Industrial Bearings – *Manual DEVA-BM Maintenance-free bearings*, de maio de 1995.
- (6) Glacier Industrial Bearings – *Manual DEVA-BM Dry bearings*, de julho de 1997.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Diego Orlando de Bortoli

2010 – Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná – Curitiba – PR

2013 – Pós-Graduação em MBA de Liderança e Gestão – Estação Business School – Curitiba – PR

Admissão na Companhia Paranaense de Energia – COPEL em 2010, na função de Engenheiro de Manutenção Mecânica de Usinas, na Usina Hidrelétrica Governador José Richa, sendo nesta usina na qual desempenha atualmente a função de supervisor de serviço de manutenção mecânica.