

## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

### MELHORIAS IMPLEMENTADAS NO MANCAL DE ESCORA DA UG03 DA UHE TAQUARUÇU

**RICARDO LUIZ ANTONIOLLI PASSALACQUA(1);MARCELO DE CASTRO MACEDO(2);TIAGO DOS SANTOS(3);ALEXANDER RIBEIRO DAQUIA(4)  
CTG BRASIL(1);RIO PARANAPANEMA ENERGIA S.A.(2);RIO PARANA ENERGIA S.A(3);RIO PARANAPANEMA ENERGIA(4)**

#### RESUMO

Historicamente a UG03 da UHE Taquaruçu apresentava condições dinâmicas piores em comparação as outras UGs da usina, verticalidade acima da tolerância e oscilação no limite do aceitável, conforme norma. Após análise minuciosa do projeto e da montagem em campo, foi verificado que os ajustes feitos na cruzeta inferior afetavam o comportamento, este foi mapeado e durante uma manutenção de substituição dos discos elásticos do mancal de escora, foram colocados calços nos suportes da cruzeta inferior com o cone suporte de modo a eliminar a influência. O resultado encontrado foi excelente, apresentando verticalidade dentro da tolerância e oscilação em condições de máquina nova.

#### PALAVRAS-CHAVE

Manutenção, Mancal, Medições.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

A UHE Taquaruçu iniciou a sua operação comercial em 11/12/1992, inicialmente apenas com a UG01, tendo finalizado a montagem de todas as unidades geradoras em 22/01/1997, com potência nominal do gerador por UG de 112 MVA, totalizando com as 5 (cinco) unidades geradoras 560 MVA.

Para simplificar toda a apresentação e discussão, segue na Figura 1 o corte geral das UGs da UHE Taquaruçu.

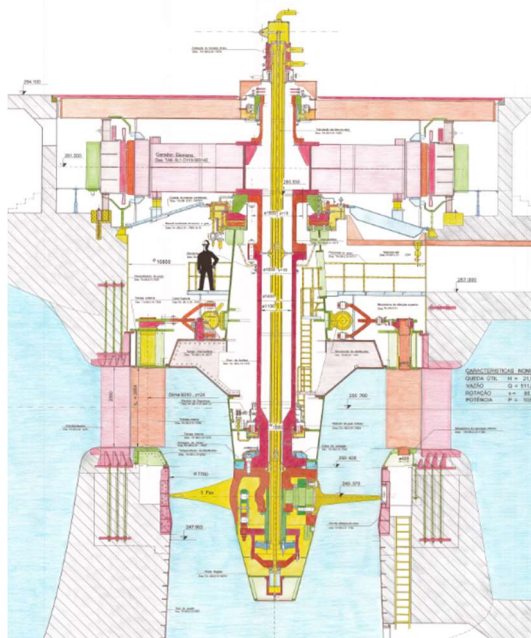


Figura1 – Corte geral da UG.

A UG03 da UHE Taquaruçu, foco desta análise, iniciou a sua operação comercial em 15/10/1994, desde o início esta UG apresentou condições dinâmicas (oscilação, vibração e verticalidade) diferentes das demais UGs, apresentando

piores condições. Foram feitas várias análises e tentativas de solucionar o problema, porém sem sucesso. Com estas análises foram levantadas algumas hipóteses, que ainda não haviam sido consideradas, seguem abaixo:

A cruzeta inferior possui apoios no cone da turbina onde fica posicionado o mancal de escora, transferindo carga não inicialmente considerada para o suporte do mancal de escora (cone da turbina);

A tampa da cuba do mancal que interliga a cruzeta ao cone também transfere carga não inicialmente considerada para o suporte do mancal de escora (cone da turbina);

Montagem do cone da turbina fora da planicidade;

Usinagem inadequada da chapa de ajuste.

Para facilitar o entendimento informado acima, na Figura 2, pode-se observar o corte do mancal combinado (guia e escora) da UG chamando a atenção destes itens.

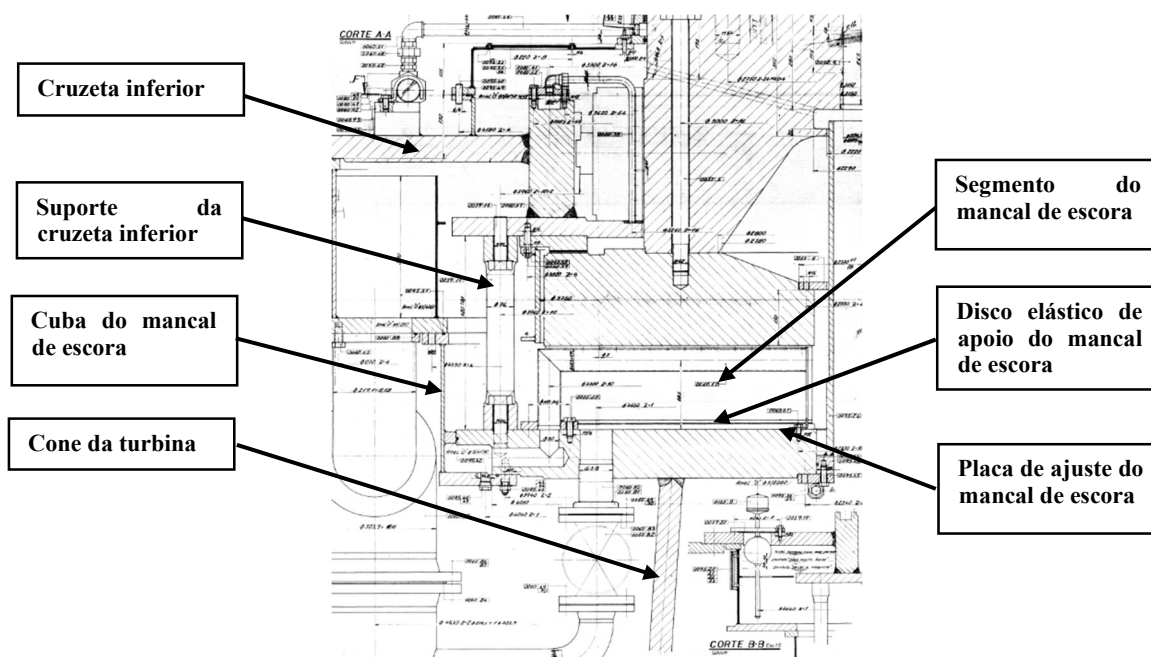


Figura 2 – Corte do mancal combinado.

Verificando a Figura 2, o projeto do mancal combinado das UGs da UHE Taquaruçu, conta com 10 (dez) segmentos de escora, cada segmento possui 80 (oitenta) discos elásticos apoiados nas respectivas placas de ajuste, cada disco elástico possui 70,0 mm de diâmetro e 10,0 mm de espessura, feitos para suportar uma carga de 22,5 kN, com carregamento de 700 N/cm<sup>2</sup>, e uma deformação de 1,13 mm, resultando em uma rigidez de 20 kN/mm. Estes discos elásticos são feitos de uma chapa de aço na parte inferior e revestido com borracha. De acordo com as orientações do fabricante estes discos elásticos devem ser substituídos a cada 20 anos ou 180.000 horas de operação.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A Engenharia da CTG Brasil faz a gestão técnica e administrativa das grandes manutenções nas unidades geradoras. Para a solução deste problema, como já estava no planejamento a execução de uma grande manutenção nesta unidade geradora, este serviço foi incluído como uma das frentes e considerado como uma melhoria no equipamento. Foram feitas as reuniões de planejamento, conforme procedimento padrão da Engenharia e foi desenvolvido um material em conjunto, Engenharia e técnicos especialistas da usina, como uma orientação para todo o time de manutenção que faria a execução do serviço.

### 2.1 Procedimento de medição da verticalidade

Neste item é descrito o método aplicado pela Engenharia da CTG Brasil na medição e correção da verticalidade nas unidades geradoras do tipo vertical. Para esta medição são utilizados fio de prumo, micrômetro, nível de bolha, um balde com óleo e dois braços, a montagem é feita com o fio de prumo, com uma massa metálica na extremidade amortizada por óleo, o instrumento de medição é um sensor de proximidade de altíssima sensibilidade, um amplificador, um conversor de sinal e um módulo de aquisição de dados. O sensor é fixado na cuba de óleo a uma distância  $\epsilon$  da massa do prumo e na direção radial de giro, sendo  $\epsilon$  a escala média de linearidade do sensor, conforme Figura 3. O suporte superior fica o mais próximo possível do mancal combinado e o suporte inferior o mais baixo possível, próximo ao mancal de guia da turbina.

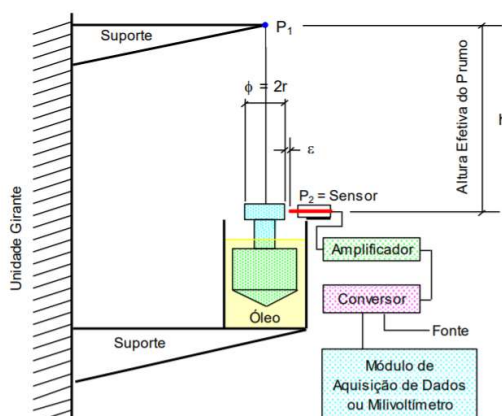


Figura 3 – Dispositivo de verticalização.

Após o dispositivo da Figura 3 completamente montado e ajustado, a unidade geradora é girada para a tomada de 4 (quatro) leituras (90° em 90°) e são feitos dois giros, para o cálculo da inclinação e o mapeamento da correção se necessário.

Tabela 1 – Exemplo de tabela de medição da verticalidade.

Posição	Giro 1 [μm]	Giro 2 [μm]
0° (Montante)	A1	B1
90° (Esquerda Hidráulica)	A2	B2
180° (Jusante)	A3	B3
270° (Direita Hidráulica)	A4	B4
Verticalização [mm/m]	$\sqrt{\left(\frac{A1 - A3}{2 * h}\right)^2 + \left(\frac{A2 - A4}{2 * h}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{B1 - B3}{2 * h}\right)^2 + \left(\frac{B2 - B4}{2 * h}\right)^2}$
Ângulo [°]	$arco\ tangente\left(\frac{A2 - A4}{A1 - A3}\right)$	$arco\ tangente\left(\frac{B2 - B4}{B1 - B3}\right)$

Para a confiabilidade da medição a variação entre o giro 1 e o 2 deve estar dentro de 10% na verticalização e no ângulo e para a consideração dos valores aprovados a verticalidade deve ser menor que 0,020 mm/m, conforme norma NEMA 5.2.13 de 1972.

## 2.2 Procedimento de medição da planicidade

Neste item será apresentado o método criado pela Engenharia em parceria com os técnicos da usina, para fazer a medição da planicidade do suporte e do espelho do mancal de escora. Para a mesa foram considerados 4 pontos, dois mais próximos a cada um dos segmentos lateralmente e para o espelho, devido às limitações de espaço foram considerados apenas 3 pontos, dois mais próximos lateralmente aos segmentos e um no meio. Para serem considerados planos em toda a circunferência a variação não pode ser maior que 0,05 mm/m.

## 2.3 Procedimento de medição do runout

Neste item é descrito o método aplicado pela Engenharia da CTG Brasil na medição e correção de runout das unidades geradoras, segue abaixo as etapas:

- Abrir a folga dos mancais de guia do gerador e da turbina, no mancal guia intermediário (mancal guia do combinado), deixar a folga radial em 0,05 mm;
- Colocar 02 (dois) relógios comparadores em cada um dos 03 (três) mancais de guia, um na montante e outro na esquerda hidráulica;
- Fazer marcações no eixo, em regiões próximas aos mancais de guia a cada 45°, que serão os pontos de medição;
- Colocar a unidade geradora em giro fazendo 02 (dois) giros e coletando as medições;
- Montar uma tabela com os dados conforme Tabela 2;
- Analisar os dados;
- Considerar como tolerância 8% de  $\frac{L}{D}$ , conforme Norma ABNT NBR 13224-1994, sendo L a distância entre a superfície do mancal de escora até a linha de centro do mancal de guia em análise e D o diâmetro da superfície de deslizamento.

Tabela 2 – Exemplo de tabela com medição de runout.

Mancal	Posição	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
--------	---------	----	-----	-----	------	------	------	------	------	------

MGG	EH									
	MO									
MGC	EH									
	MO									
MGT	EH									
	MO									

## 2.4 Procedimento da manutenção

Para fazer esta correção foi desenvolvido, com uma parceria entre a Engenharia da CTG Brasil e a equipe da usina, algumas etapas para definir corretamente as influências negativas ou não dos equipamentos acoplados a mesa do mancal de escora além de realizado um planejamento da realização do trabalho, que está descrito abaixo:

Como existe a necessidade da confirmação das influências na condição dinâmica da unidade geradora, antes de iniciar a manutenção, realizar uma medição de verticalidade;

Fazer a desmontagem da cuba do mancal combinado;

Para identificar o nível de influência negativa da cuba do mancal, deve-se repetir a medição de verticalidade e fazer a comparação com a primeira medição, verificando inclusive se ocorre qualquer alteração desde o valor da verticalidade até o seu ângulo;

Desmontar os pedestais de apoio da cruzeta inferior na mesa de apoio dos segmentos de escora;

Também para identificar a sua influência negativa na verticalização da unidade geradora, repete-se a medição de verticalidade e faz novamente a comparação dos valores;

Mapear a geometria dos pedestais de apoio da cruzeta inferior para definir a quantidade e dimensões dos calços para eliminar a influência, se for o caso;

Mapear as folgas da cuba do mancal de escora para confecção de calço para eliminar a sua influência, se for o caso;

Fazer medição da planicidade da mesa de apoio dos segmentos de escora com topógrafo;

Fazer a medição da planicidade do espelho do mancal de escora com topógrafo;

Fazer a retirada de cada um dos segmentos para a substituição dos discos elásticos. Todos os novos discos elásticos foram cuidadosamente medidos e mapeados para considerar a menor variação possível da sua espessura;

Inspeccionar as placas de ajuste quanto a espessura, empenamento, corrosão ou outros defeitos;

Fazer o reposicionamento dos segmentos com os novos discos elásticos;

Repetir a medição de verticalidade e mapear os locais para correção;

Medir o runout dos mancais;

Aplicar calços se necessário até que a tolerância de verticalidade seja atingida;

Aplicar calços nos pedestais de apoio da cruzeta inferior na mesa de apoio dos segmentos de escora e fazer a montagem do pedestal;

Repetir a medição de verticalidade para garantir que a interferência tenha sido eliminada;

Fazer a montagem da cuba do mancal de escora junto com a nova vedação de borracha, para eliminar a folga existente;

Repetir a medição de verticalidade para garantir que a interferência tenha sido eliminada;

Fim do procedimento.

## 3.0 RESULTADOS

Antes de iniciar o trabalho, será gerado um gráfico demonstrando a oscilação do eixo em diferentes potências para que se possa fazer uma comparação antes e após a intervenção. As potências que serão analisadas são 60, 80 e 100 MW, como pode ser observado na Figura 4.

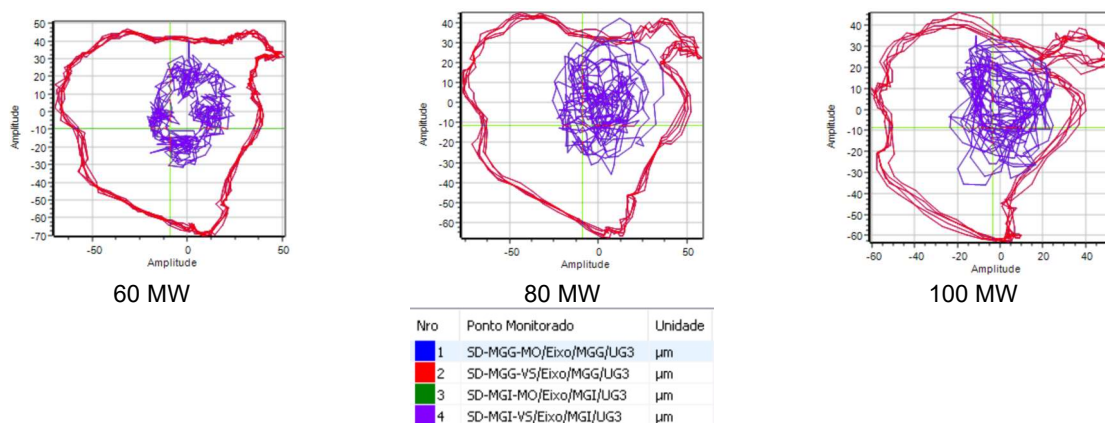


Figura 4 – Órbita dos mancais de guia do gerador e da turbina da UG03 antes da manutenção.

Analisando as vibrações pico-a-pico da UG03 em cada uma das potências temos para 60 MW oscilação de 122,02  $\mu\text{m}$ , para 80 MW oscilação de 136,38  $\mu\text{m}$  e para 100 MW oscilação de 121,58  $\mu\text{m}$ , para todas estas condições utilizando como base a ISO 7919-5 referente a rotação nominal 85,71 rpm para todas estas condições de operação o nível de oscilação é nível A (excelente).

Seguindo o procedimento apresentado, antes de iniciar qualquer desmontagem foi realizada a primeira medição de verticalidade, como pode ser observado na Figura 5.

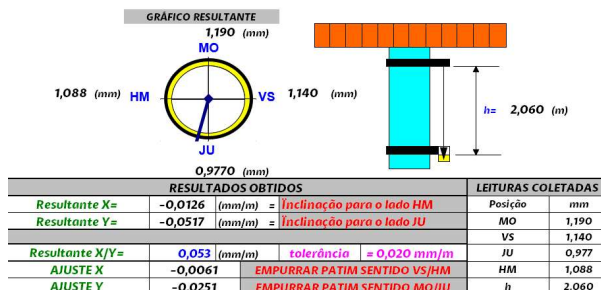


Figura 5 – Medição de verticalidade antes de iniciar a desmontagem.

Com a medição de 0,053 mm/m observou-se que a verticalidade está acima da tolerância (0,020 mm/m), foi feita a desmontagem da cuba e repetiu-se a medição da verticalidade obtendo o resultado conforme Figura 6.

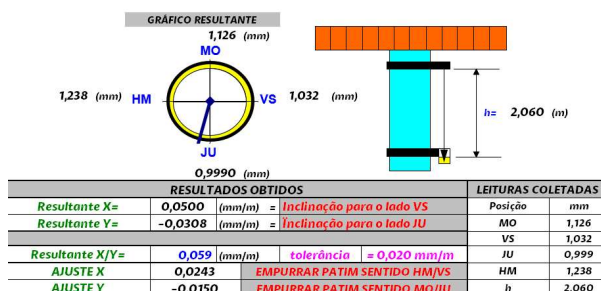


Figura 6 – Medição da verticalidade após a desmontagem da cuba do mancal de escora.

Com a medição após a desmontagem da cuba obteve-se o resultado de 0,059 mm/m, mantendo a inclinação, porém com valor ainda maior que a tolerância (0,020 mm/m), demonstrando a influência na cuba do mancal, foi feita a desmontagem dos suportes da cruzeta inferior na mesa do mancal e repetiu-se a medição da verticalidade obtendo o resultado conforme Figura 7.

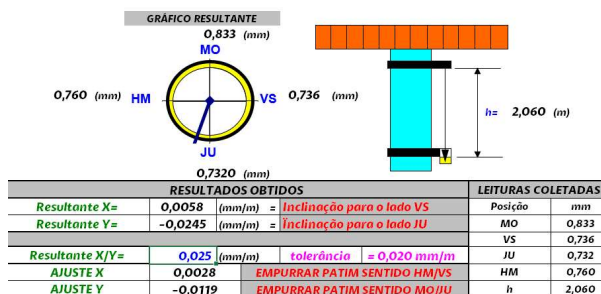


Figura 7 – Medição da verticalidade após a retirada do suporte da cruzeta inferior na mesa do mancal de escora.

Com a medição após a desmontagem do suporte da cruzeta inferior na mesa do mancal de escora obteve-se o resultado de 0,025 mm/m, mantendo a inclinação, com valor maior que a tolerância (0,020 mm/m) mais bem próximo, demonstrando a influência dos suportes na verticalização.

Seguindo o procedimento, foi realizado o mapeamento dos suportes da cruzeta definindo os calços necessário como pode ser observado na Figura 8, contendo uma imagem do pedestal montando. Todos os parafusos de acoplamento foram soltos e para verificar a interferência foi realizada a medição da folga existente e na Tabela 3 a espessura necessária.

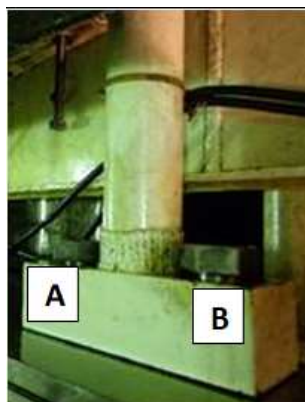


Figura 8 – Pedestal suporte da cruzeta inferior na mesa do mancal de escora.

Tabela 3 – Medições das folgas e calço aplicado.

Pedestal entre segmentos	Medição A [mm]	Medição B [mm]	Espessura do calço [mm]
01 e 02	1,55	1,55	1,5
02 e 03	1,35	1,35	1,0
03 e 04	1,35	1,35	1,0
04 e 05	1,3	1,3	1,0
05 e 06	1,35	1,35	1,0
06 e 07	1,6	1,55	1,5
07 e 08	1,85	1,9	1,5
08 e 09	2,15	2,15	2,0
09 e 10	1,65	1,75	1,5
10 e 01	1,65	1,65	1,5

Seguindo o procedimento foi realizado o mapeamento da folga na montagem da cuba, por se tratar de um fechamento de uma tampa e a necessidade de vedação, o mapeamento chegou a uma variação de folga entre 1,5 mm e 2,0 mm, foi feito um dimensionamento, considerando o aperto dos parafusos e foi desenvolvida uma vedação de borracha (70 shore A) plana acoplada a um oring conforme dimensões informadas na Figura 9.

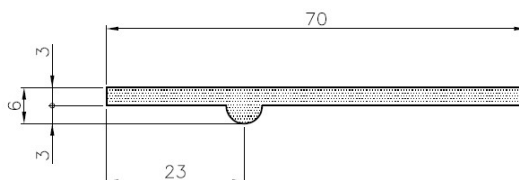


Figura 9 – Dimensões da vedação da cuba de óleo do mancal combinado.

Na etapa seguinte, foi realizada a medição da planicidade da mesa e do espelho do mancal com a utilização de um nível ótico de precisão, chegando a 0,04 mm/m na mesa do mancal de escora e 0,02 mm/m no espelho do mancal, estando ambos dentro da tolerância considerada de 0,05 mm/m.

Foi realizada a inspeção nas placas de ajuste e todas estavam com espessura conforme protocolo de montagem original e não apresentavam qualquer defeito, foram utilizadas as mesmas peças.

Segundo para a etapa de substituição dos discos elásticos, conforme Figura 10.





Figura 10 – Substituição dos discos elásticos.

Após a substituição de todos os discos elásticos, foi repetida a medição de verticalidade, obtendo resultado conforme Figura 11.



Figura 11 – Medição de verticalidade após a substituição dos discos elásticos.

Analisando o resultado obtido na Figura 11, a verticalidade ficou em 0,037 mm/m acima da tolerância (0,020 mm/m), foram feitas algumas análises e cálculos e decidiu-se colocar um calço de 0,1 mm de espessura na placa de ajuste do segmento 6 e um calço de 0,05 mm de espessura na placa de ajuste do segmento 5, como pode ser observado na Figura 12.



Figura 12 – Colocação de calço na placa de ajuste.

Após a colocação dos calços repetiu-se a medição de verticalidade com resultado conforme Figura 13.

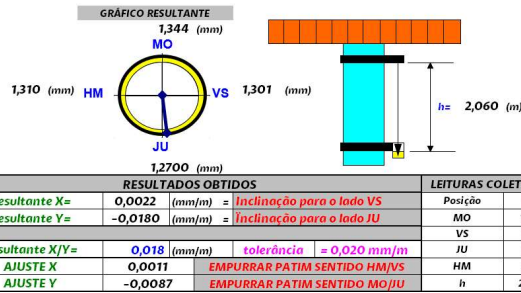


Figura 13 – Medição da verticalidade após a colocação dos calços.

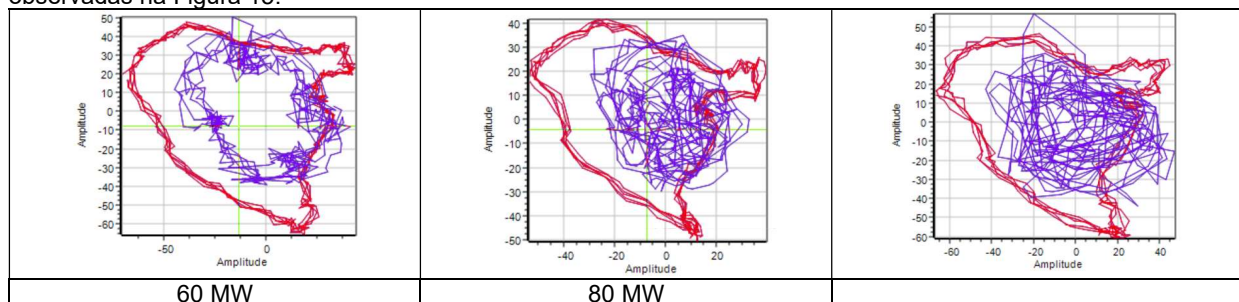
Analisando o resultado obtido na Figura 13, verifica-se uma verticalidade de 0,018 mm/m, dentro da tolerância (0,020 mm/m). Seguindo para a próxima etapa com a medição do runout dos mancais, segue na Figura 14 as medições e os valores de runout.



Figura 14 – Medição de runout.

Analisando o runout da Figura 14, obtendo 97  $\mu\text{m}$  para o mancal de guia do gerador e 182  $\mu\text{m}$  para o mancal de guia da turbina, sendo que o limite para o mancal de guia do gerador  $8\% * \frac{L}{D} = 8\% * \frac{3985\text{mm}}{3730\text{mm}} = 85\mu\text{m}$  e o limite para o mancal de guia da turbina  $8\% * \frac{L}{D} = 8\% * \frac{7615\text{mm}}{3730\text{mm}} = 163,3\mu\text{m}$ , ambos os mancais estão acima da tolerância, porém, de acordo com os cálculos realizados para a solução do problema seria necessário um calço de 0,04 mm, espessura menor que o menor calço disponível para aplicação, sendo considerado o resultado aprovado.

Na sequência foi realizada a aplicação dos calços conforme medições na Tabela 3 nos pedestais da cruzeta inferior e repetida a medição da verticalidade, obtendo os mesmos valores, conforme Figura 13, dando sequência na montagem da cuba do mancal de escora, utilizando a vedação conforme Figura 9, após esta montagem foi repetida a medição da verticalidade, obtendo os mesmos valores, conforme Figura 13, finalizando o procedimento. Durante os primeiros giros da unidade geradora foram feitas as medições de oscilação nos mancais, que podem ser observadas na Figura 15.





Nro	Ponto Monitorado	Unidade
1	SD-MGG-MO/Eixo/MGG/UG3	µm
2	SD-MGG-V5/Eixo/MGG/UG3	µm
3	SD-MGI-MO/Eixo/MGI/UG3	µm
4	SD-MGI-V5/Eixo/MGI/UG3	µm

Figura 15 – Oscilação dos mancais após a manutenção.

Analizando as vibrações pico-a-pico da UG03, após a realização da manutenção, em cada uma das potências, da mesma forma que foi realizado antes da manutenção, temos para 60 MW oscilação de 115,28 µm, para 80 MW oscilação de 95,07 µm e para 100 MW oscilação de 114,7 µm, para todas estas condições utilizando como base a ISO 7919-5 referente a rotação nominal 85,71 rpm para todas estas condições de operação o nível de oscilação é nível A (excelente).

#### 4.0 CONCLUSÃO

O objetivo na realização deste trabalho foi identificar os itens que estavam influenciando as condições dinâmicas da unidade geradora, que de acordo com estudos iniciais seria a cuba do mancal de escora e o pilar de apoio da cruzeta inferior, eliminar esta influência, deixar a verticalidade dentro das tolerâncias e melhorar a oscilação dos mancais. As influências foram identificadas e sanadas, a verticalidade atingiu limites de tolerância e a oscilação, que já estava em boas condições, atingiu valores ainda melhores, contribuindo para o sucesso da aplicação desta solução.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Mecânico com Graduação pela Unesp campus de Ilha Solteira e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Unicamp. Possui 14 anos de experiência na área de energia, sendo 10 anos como especialista em dimensionamento de geradores e turbinas e coordenação técnica de projetos de hidrogeradores em projetos como nas UHEs Jirau, Santo Antonio, Belo Monte, entre outras e nos últimos 4 anos como gestor de projetos de manutenção e modernização de hidrogeradores na CTG Brasil.

(2) **MARCELO DE CASTRO MACEDO**  
 Empresa: CTG BrasilCargo atual: Coordenador de Manutenção UHE TaquaruçuTécnico eletrotécnico, Bacharel em Sistemas de Informação, Engenharia Elétrica em andamento (último ano).11 anos de experiência em manutenção e operação de usina hidrelétrica, regulador de velocidade, comporta de emergência, comporta do vertedouro, sistema de automação de unidade geradora, disjuntores de alta tensão isolados a gás SF6, etc.14 anos de experiência como coordenador de usinas hidrelétricas, liderando equipes de operação e manutenção, realizando planejamento de atividades, coordenando grandes manutenções como MPP-2 e reforma de unidades geradoras etc.

(3) **TIAGO DOS SANTOS**  
 Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade Politécnica de Jundiaí - FPJ, Especializado em Método dos Elementos Finitos (MEF) pela ESSS. Já atuou como Engenheiro Projetista em Turbinas e Gerente de Projetos em grandes fornecedores de equipamentos para Usinas Hidrelétricas. Atualmente, atua como Coordenador de Engenharia Mecânica na CTG Brasil nas atividades de manutenção e modernização das 14 UHEs da companhia.

(4) **ALEXANDER RIBEIRO DAQUIA**