



GRUPO -GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

EMPREGO DA ANÁLISE COMPUTACIONAL NO DIAGNÓSTICO DA CAUSA RAIZ DA FALHA DOS MANCAIS DO ANEL DE REGULAÇÃO – ESTUDO DE CASO DA UHE SÃO SALVADOR

HAIN, F. L. (*)	CIBULSKI, L. J.	MARIANO, M. T.	ILHA, E. K.
ENGIE BRASIL ENERGIA S.A	ENGIE BRASIL ENERGIA S.A	ANDRITZ HYDRO	ANDRITZ HYDRO

RESUMO

Em 2011, durante inspeção de 8.000h da Unidade Geradora 01 (UG01), constatou-se visualmente significativa quantidade de particulados provenientes dos mancais do anel de regulação, indicando o desgaste excessivo dos segmentos autolubrificantes. Esta indicação foi confirmada após desmontagem parcial e inspeção detalhada, onde se constatou a ruptura dos parafusos de fixação dos segmentos radiais e axiais, e o roçamento entre na tampa da turbina e anel de regulação. Posteriormente a mesma situação foi constatada na UG02. Imediatamente o fabricante, Andritz Hydro, providenciou a recuperação dos danos e posteriormente iniciou estudos detalhados para avaliação estrutural dos componentes envolvidos, utilizando análises computacionais.

PALAVRAS-CHAVE

Análise computacional, causa raiz, anel de regulação, baixa rigidez.

1.0 - INTRODUÇÃO

A ENGIE Brasil Energia, pertencente ao Grupo ENGIE, está entre as maiores empresas privadas de geração de energia elétrica no Brasil, operando uma capacidade instalada de 11.954 MW em 29 unidades, sendo que destes, 85% são provenientes de fontes limpas, renováveis e com baixas emissões de gases de efeito estufa. A Usina Hidrelétrica São Salvador (UHSA), objeto deste informe técnico, esta localizada no Rio Tocantins, e tem 243 MW (2 x 121,5 MW) de potência instalada. As turbinas são do tipo Kaplan de 5 Pás com Ø 8,3 metros, consideradas de grande porte.

No ano de 2011, durante as inspeções contratuais de 8.000h realizadas na Unidade Geradora 01, foi constatado visualmente significativa quantidade de particulados provenientes dos mancais radiais e de escora do anel de regulação, que aciona as palhetas móveis, indicando o desgaste excessivo dos segmentos autolubrificantes originalmente de composição de base polimérica. Esta indicação foi confirmada após desmontagem do bielismo e elevação do anel de regulação para inspeção detalhada, onde se constatou a ruptura dos parafusos de fixação dos segmentos radiais e axiais, e o roçamento entre as superfícies de fixação dos segmentos na tampa da turbina e anel. Posteriormente a mesma condição também foi constatada na Unidade Geradora 02. Diante desta situação de urgência, foi imediatamente realizado pelo fabricante da máquina a recuperação manual das superfícies comprometidas, a substituição de todos dos segmentos autolubrificantes e o reforço da fixação dos segmentos com a utilização de chapas travas, nas duas Unidades Geradoras.

Tais ações não impediram o desgaste prematuro dos segmentos autolubrificantes, e diante deste histórico e dos fatos observados, a engenharia do fabricante iniciou, no final de 2015, estudos detalhados para avaliação estrutural e do comportamento dinâmico, em condições operacionais, da tampa da turbina, bielismo, servomotores e anel de regulação, utilizando ferramentas de modelamento 3D e elementos finitos.

2.0 - HISTÓRICO DE INTERVENÇÕES

Os anéis de regulação das unidades geradoras da UHSA já vinham apresentando anormalidades em sua operação desde o ano de 2011, quando foram observados sinais de desgaste excessivo dos mancais auto-lubrificantes radiais e axiais, ocasionando elevada folga e operação não linear durante a movimentação do mesmo. Iniciou-se, por parte do fabricante, com acompanhamento da ENGIE, um trabalho de investigação e estudo para identificar a causa raiz.

2.1 Problemas identificados em 2011

Evidência: Ao realizar-se o levantamento do anel de regulação da UG01, durante a parada programada de 8000 horas, constatou-se que haviam segmentos danificados e alguns parafusos (material: latão) de fixação dos mesmos estavam com as cabeças cisalhadas. Alguns segmentos do mancal radial e axial estavam danificados e fora de posição. Também, foi constatado arrancamento de material na região radial da tampa intermediária (segmentos 01 e 06) e no anel de regulação, conforme observado nas figuras abaixo.



FIGURA 1 – Resíduos de segmentos danificados



FIGURA 2 - Segmento radial danificado.

Causa atribuída: A investigação apontou que a causa havia sido uma discrepância no ajuste das taxas de amortecimento de fim de curso dos servomotores que provocavam a distribuição desproporcional das forças atuantes sobre o anel de regulação e, por consequência, sobre seus mancais de deslizamento.

Ações tomadas: Como procedimento de normalização foi alterado o material dos parafusos de fixação dos segmentos (de latão para aço inoxidável) e soldados batentes nas suas extremidades, além da normalização da folga entre tampa e anel. Os danos observados foram reparados com a recuperação das áreas afetadas através de preenchimento com solda, lixamento e correção das folgas por adição de calços.



FIGURA 3 - Recuperação da superfície das áreas afetadas



FIGURA 4 - Calços para travar a movimentação tangencial dos mancais

Após a recuperação das superfícies foram montados novos segmentos tipo TXM Marine, Fabricante Orkot Marine Bearings, mantendo-se a folga original de projeto, entre 0,16mm e 0,48mm no raio. Também foram ajustadas as válvulas de controle do amortecimento interno dos servomotores, para evitar a desproporcionalidade entre os mesmos. Adicionalmente foram efetuados diversos testes em água morta e também com a UG em operação para certificar-se da correta operacionalidade do sistema distribuidor da UG. Foi definido que seriam efetuadas inspeções periódica durante as paradas programadas para certificar-se do desempenho dos mancais após a intervenção e ajustes.

2.2 Inspeções de acompanhamento em 2012

As modificações e ajustes foram aplicadas em ambas as UG's, sendo efetuadas inspeções de acompanhamento com as UG's em operação durante 2012. As inspeções apontaram que o problema de desgaste não havia sido resolvido, bem como o cisalhamento dos parafusos de fixação continuava ocorrendo em alguns segmentos. A avaliação apontou que o cisalhamento ocorria devido ao fato de que os segmentos ORKOT apresentam ambas as faces com baixo coeficiente de atrito. A solução imediata foi adicionar adesivo entre as faces de contato fixas, melhorando assim a fixação, sendo acordado entre as engenharias a substituição dos segmentos da UG01 por outro modelo/fabricante.

2.3 Modificação de projeto na UG01

Em 2013 foram instalados segmentos DEVA BM modelo 362/9P apenas na UG01. Durante o ajuste das folgas foi observado que as mesmas variavam em função do deslocamento axial da tampa da turbina, que provocava um efeito de pinçamento, conforme o carregamento sobre a mesma. Para tanto foram efetuadas medições em 4 condições diferentes, conforme citado abaixo. A TABELA 1 apresenta os valores de folga obtidos no segmento de mancal 5, para cada condição.

TABELA 1 - Leituras das folgas obtidas em diferentes condições de carregamento na tampa da turbina da UG.

Comparação dos Valores Obtidos nas 4 Condições para o Mancal 5 (mm)					
Mancal	Ponto	Leituras Condição 1	Leituras Condição 2	Leituras Condição 3	Leituras Condição 4
5	1	3,28	2,91	2,47	2,23
	2	3,26	2,94	2,48	2,26
	3	3,26	2,93	2,46	2,26
	4	3,26	2,88	2,52	2,34
	5	3,32	2,93	2,56	2,34

Nota:

- Condição 1: UG apoiada sobre o ME e com sucção vazio;
- Condição 2: UG apoiada sobre os macacos de freio e com sucção vazio;
- Condição 3: UG apoiada sobre o ME, comporta de jusante fechada, sucção cheio e pressão de montante;
- Condição 4: UG apoiada sobre os macacos de freio, comporta de jusante fechada, sucção cheio e pressão de montante.

De acordo com o observado, concluiu-se que o valor das folgas originais não atendiam o projeto, mesmo que as leituras obtidas fossem a partir de condições não operacionais, sendo que as mesmas foram alteradas para 0,8mm. A UG02 permaneceu com os segmentos e folgas do projeto original.

2.4 Inspeções em 2014 e 2015

As inspeções efetuadas em 2014 novamente indicaram desgaste acentuado em ambas as UG's, sendo que para a UG01 foi necessária a substituição de 3 segmentos radiais (DEVA), e para a UG02 (ORKOT) foi concluído que o desgaste ainda não comprometia a condição operacional, sendo apenas protocolado a quantidade desgastada.

Em 2015 novamente houve a necessidade de substituição de alguns segmentos DEVA (2 radiais e 2 axiais) na UG01. Na UG02 a estimativa de vida útil apontou duração de mais 2 anos. Em ambas as UG's foi observado que o desgaste é desproporcional entre os segmentos, tanto para os mancais radiais quanto para os axiais. A Fig. 6 apresenta as medidas de espessura total obtidas nos segmentos DEVA da UG01 enquanto a Fig. 7 representa as leituras obtidas na UG02, para os segmentos ORKOT, sendo que os valores correspondem à espessura útil (distância entre a face do segmento autolubrificante e o topo da cabeça do parafuso).

Como pode ser observado nas figuras, os valores obtidos nas inspeções evidenciam a distribuição não uniforme das forças sobre os mancais, provocando desgaste mais acelerado em alguns pontos, enquanto outros praticamente não sofrem carregamento. Isso levou a concluir que o anel está sofrendo deformações estruturais durante a operação. Para entender melhor o que acontece nas condições operacionais mais exigentes, foi desenvolvido pelo fabricante do equipamento, um modelo matemático, aplicando ferramentas de simulação numérica, conforme será descrito no próximo capítulo.

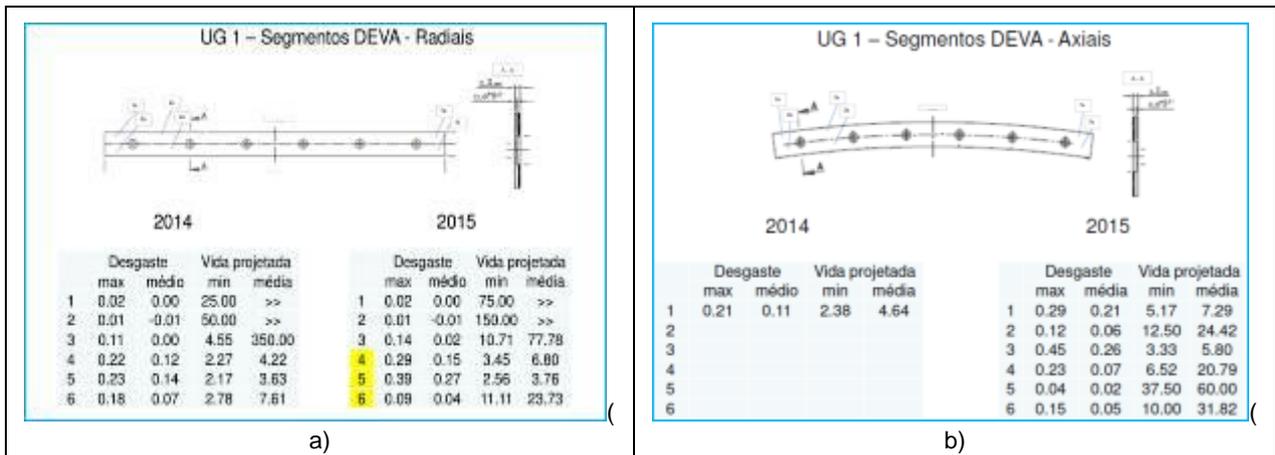


FIGURA 5 - a) Espessura medida nos segmentos radiais da UG01. b) Espessura dos segmentos axiais



FIGURA 6 - Espessura útil restante nos segmentos ORKOT da UG02.

3.0 - ANÁLISE COMPUTACIONAL

Para o estudo da origem sobre o desgaste excessivo nas guias do anel de Regulação foi utilizado o método de elementos finitos, através do software ANSYS WB 16.0. O modelo consiste de elementos 3-D tetraédricos estruturais de 10 nós do tipo SOLID 187 (O elemento SOLID 187 tem o comportamento quadrático de deformação e é bem adaptado para modelar malhas irregulares. O elemento é definido por dez nós tendo três graus de liberdade em cada nó: translação nas direções nodais x,y e z), além de elementos de contato para simular a interface dos mancais e demais condições de contorno, para vários carregamentos correspondentes às condições operacionais típicas, como descrito mais adiante.

Inicialmente foram realizados cálculos separados dos componentes e os resultados não evidenciaram o comportamento que levasse à causa raiz do problema. Então foram realizados cálculos com montagens mais complexas, considerando as tampas, acoplamento entre tampas e pré-distribuidor, anel de regulação, servomotor e bielismo. Assim, obteve-se resultados mais consistentes em relação às análises iniciais, mostrando um comportamento similar ao que é observado nas unidades geradoras conforme será descrito a seguir.

3.1 Modelo final com todos os componentes montados

3.1.1 Modelo CAD

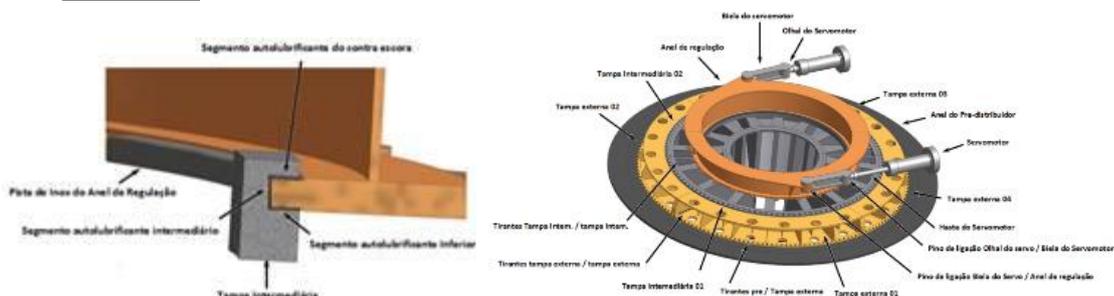


FIGURA 7: Descrição dos Componentes.

3.1.2 Modelo Ansys

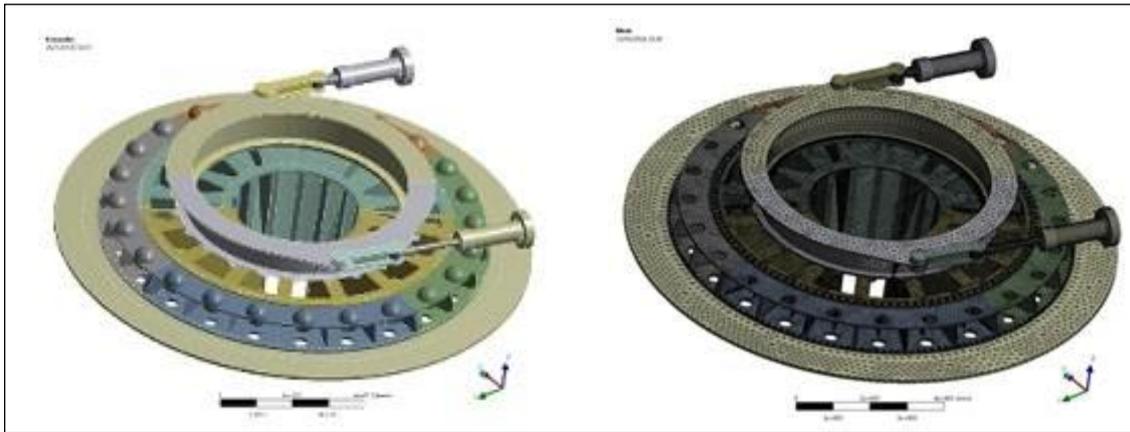


FIGURA 8: Modelo e Malha Ansys.

3.1.3 Condições de Contorno

Foram consideradas as seguintes condições de contorno:

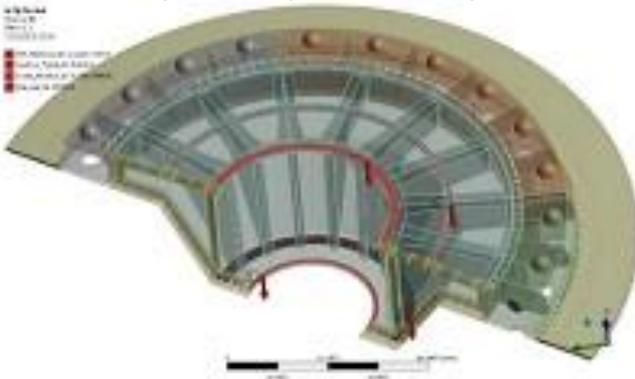
- Pressões nas tampas:
 - o Tampa Externa
 - Pressão P1 – Pressão hidráulica entre o círculo das palhetas diretrizes até a vedação junção com a tampa intermediária.
 - Pressão P2 – Pressão hidráulica entre a junção com o pré-distribuidor e o círculo das palhetas diretrizes.
 - o Tampa Intermediária
 - Pressão P3 – Pressão hidráulica em toda a passagem de água.

TABELA 2 – Pressões na Tampa.

Condição de Operação		Tampa Externa				Tampa Intermediária	
		Pressão P2 (mca)		Pressão P1 (mca)		Pressão P3 (mca)	
1	Squeeze	Pm	29,5	PJ	17,5	PJ	17,5
2	Op, Normal – Folga Radial 1,0 mm	Pm	29,5	Pm	29,5	Pvariável	29,5 a 31,2

Sendo: Pm – Pressão de Montante / PJ – Pressão de Jusante / Pvariavel – Pressão combinada montante-jusante

- Pesos dos componentes aplicados nas tampas:



Componente	Massa (kg)
Eixo	45700
Rotor	183450
Empuxo	1120 ton
Anel de Regulação	15282
Alav, e Bielas (24)	27985
Vedação do Eixo	2000
Tampa Interna	8565
Mancal de guia	5200
Cone Suporte	22000
Mancal de Escora	16000

FIGURA 9: Localização dos carregamentos na Tampa

- Todos os tirantes foram carregados de acordo com a pré-tensão de projeto, conferindo condições realistas ao modelo.
- As forças no anel de regulação devido ao torque hidráulico na palheta foram obtidas a partir dos cálculos de CFD para as palhetas diretrizes individualmente, mostrando uma grande variação de direção e intensidade entre elas (Figura 10).

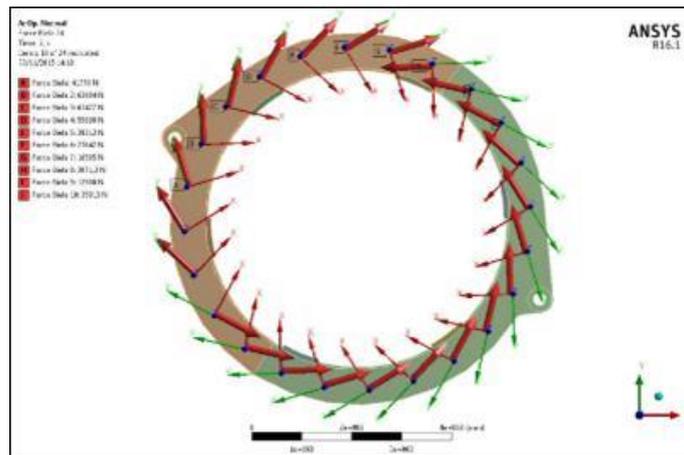


FIGURA 10: Forças no anel de regulação

- Contatos de deslizamento onde existem mancais autolubrificantes e contato frictional nas uniões entre componentes.

3.1.4 Resultados das simulações

Os resultados abaixo mostram dois casos de carga mais críticos:

- Squeeze

A Figura 11 apresenta a deformação total do conjunto, onde pode-se observar um deslocamento simétrico nas tampas e não simétrico no anel de regulação (torção e ovalização da estrutura).

A Figura 12 apresenta em mais detalhes as deformações do anel de regulação na direção axial e radial.

A Figura 13 apresenta as deformações radiais na região dos mancais do anel de regulação, onde observa-se uma variação de aprox. 0,2 mm na tampa da turbina e aprox. 3,0 mm no anel de regulação.

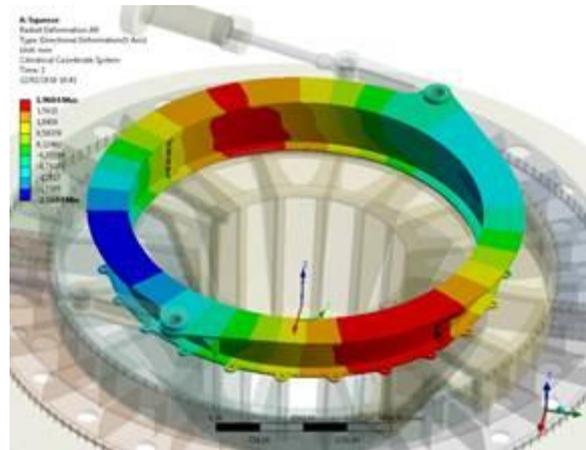


FIGURA 11: Deformação total no caso de squeeze

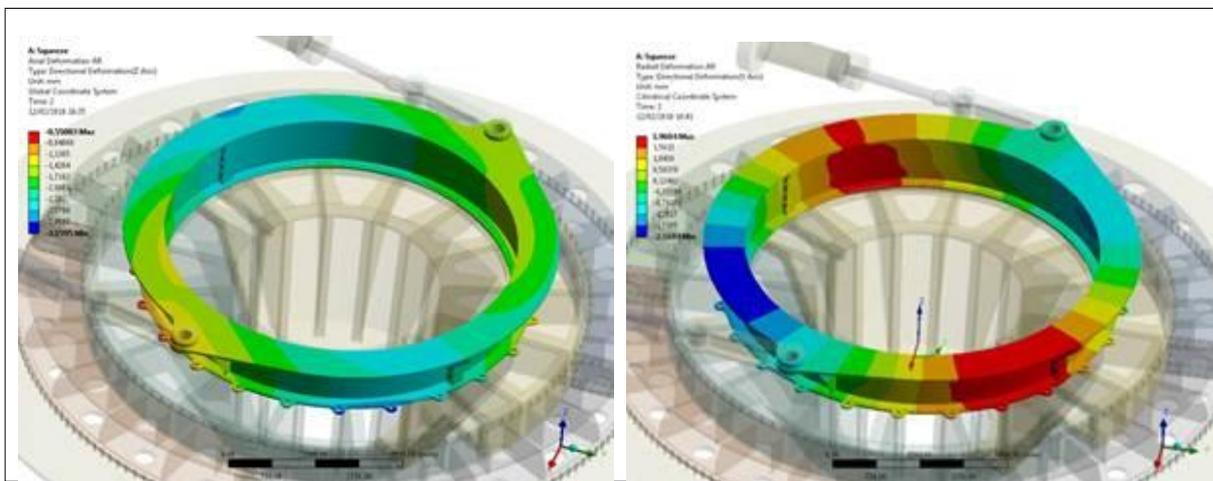


FIGURA 12: Deformação axial e radial no anel de regulação no caso de squeeze

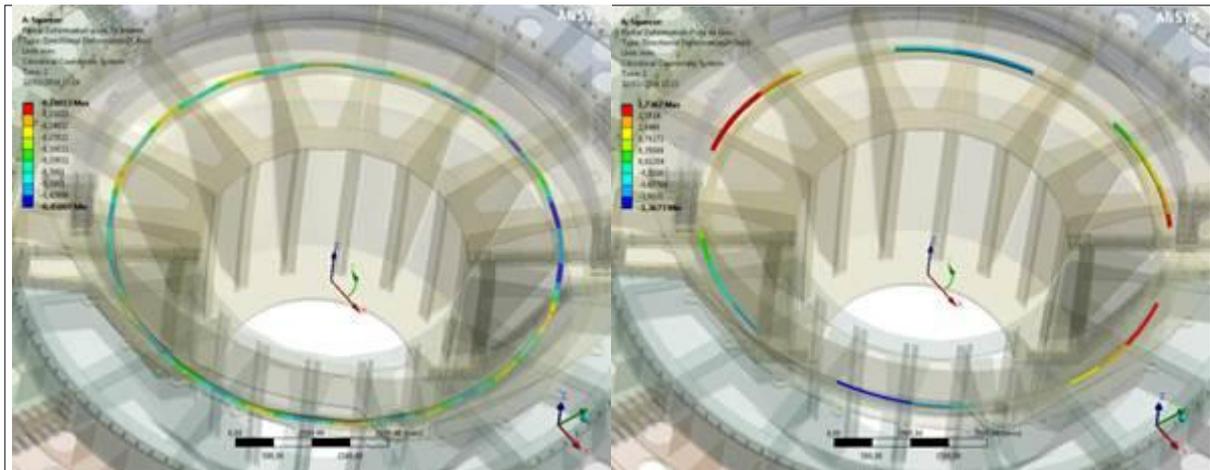


FIGURA 13: Deformação radial na tampa e no anel de regulação na região dos mancais no caso de squeeze.

- Operação normal

A Figura 14 apresenta a deformação total do conjunto, onde pode-se observar um deslocamento simétrico nas tampas e não simétrico no anel de regulação (torção e ovalização da estrutura).

A Figura 15 apresenta em mais detalhes as deformações do anel de regulação na direção axial e radial.

A Figura 16 apresenta as deformações radiais na região dos mancais do anel de regulação, onde observa-se uma variação de aprox. 0,2 mm na tampa da turbina e aprox. 3,5 mm no anel de regulação.

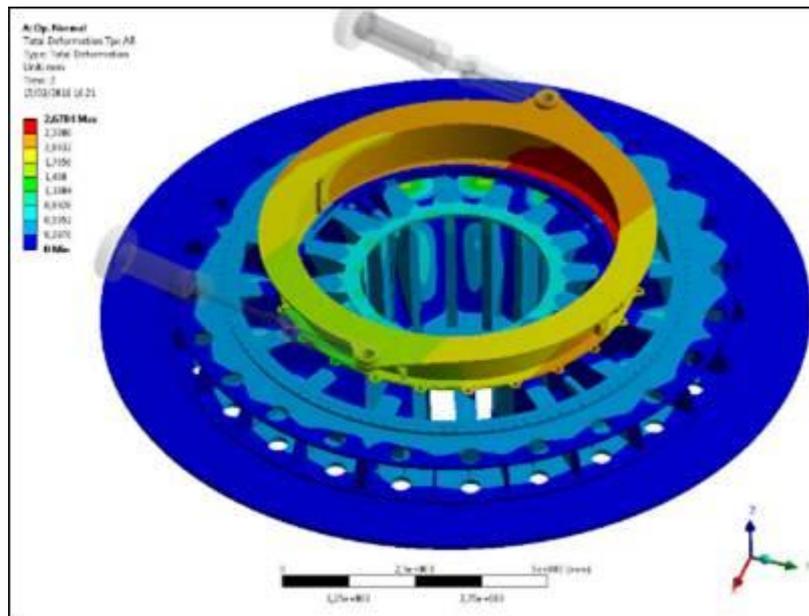


FIGURA 14: Deformação total no caso de operação normal.

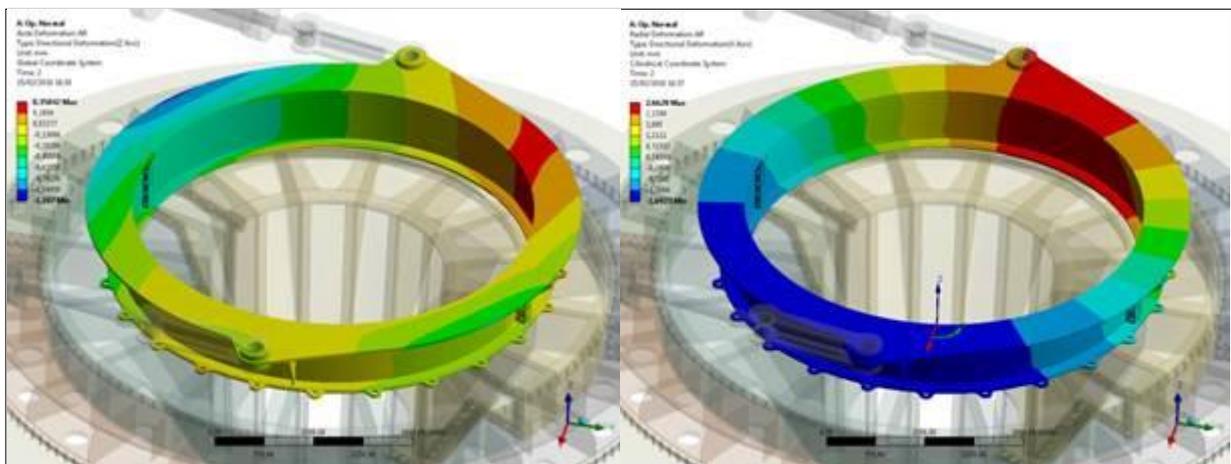


FIGURA 15: Deformação axial e radial no anel de regulação no caso de operação normal

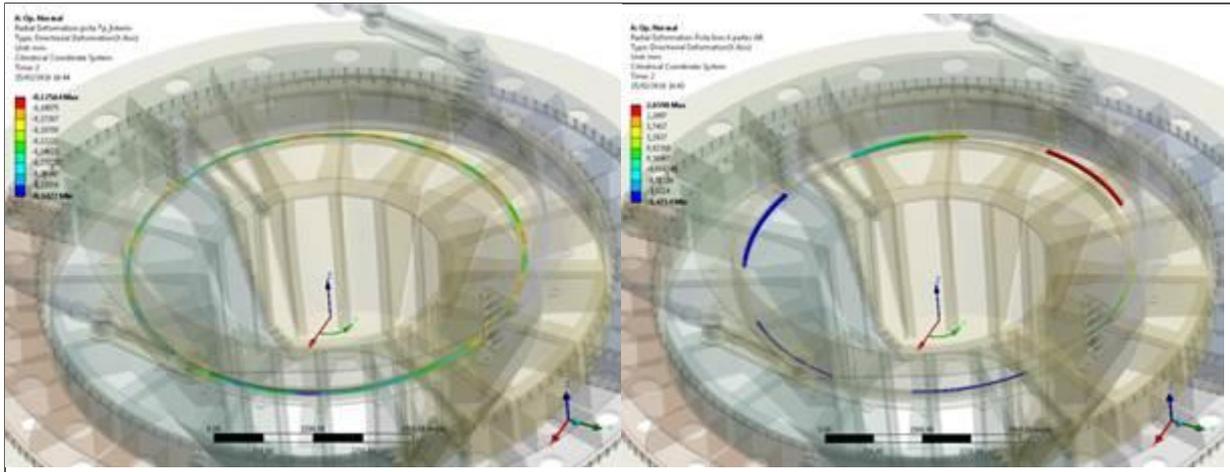


FIGURA 16: Deformação radial na tampa e no anel de regulação na região dos mancais no caso de operação normal

4.0 - CONCLUSÃO

A fixação dos segmentos autolubrificantes com adesivo químico além dos parafusos calibrados se mostrou eficiente.

Nos resultados obtidos em simulação numérica (que serão verificados no campo através de medições) observou-se que o anel de regulação possui uma flexibilidade excessiva, que levou ao desgaste prematuro dos segmentos guia e escora do anel de regulação. Também observou-se que os descolamentos axiais das tampas com diferentes carregamentos ocorrem de maneira uniforme mostrando que a mesma apresenta rigidez adequada, não contribuindo com os danos verificados nos segmentos.

Com base nos resultados acima, o fabricante propôs como solução possível as seguintes ações: (i) aumento da rigidez radial do anel de regulação no plano da pista de deslizamento dos mancais; (ii) a regularização final das superfícies de fixação e contato dos segmentos autolubrificantes; e (iii) o reestabelecimento das folgas radiais dos mancais. Como as ações (i) e (iii) demandam a desmontagem parcial da unidade geradora e, portanto, significativo tempo de parada de máquina, até o momento, foi implementada parcialmente (somente na superfície de fixação) a ação (ii) em aproveitamento a parada da UG02 em 2016.

Ademais, estão previstos para este ano (2017) ensaios de campo para validação do modelamento computacional desenvolvido e confirmação dos resultados obtidos.

5.0 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- (1) **Hain, F.L.; Yamashita, M.S.** RM-ME-UHSA01-Programa de Ensaio para Avaliação Operativa do Anel de Regulação da Unidade 01 - UHSA, Usina Hidrelétrica São Salvador, Paranã – TO, 2011;
- (2) **Hain, F.L.** Recuperação dos Mancais e Pista de Deslizamento do Anel de Regulação do Distribuidor – UHSA, Usina Hidrelétrica São Salvador, Paranã – TO, 2011.
- (3) **Gabiatti, M. A.** Verificação dos novos valores propostos para as folgas dos mancais do anel de regulação UG01 – UHSA, Usina Hidrelétrica São Salvador, Paranã – TO, 2013.
- (4) <http://www.federalmogul.com/en-US/OE/Products/Pages/Product-Details.aspx?CategoryId=38&SubCategoryId=189&ProductId=833>, site do fabricante, acessado em 22/03/2017.
- (5) http://www.orkot.com/en/technical_information/materials_grades/tlmm/tlmm.html, site do fabricante, acessado em 22/03/2017.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



(*) **Fernando Luiz Hain**, nascido em Rancharia – SP, em 27/12/1983. Formado em eng. Mecânica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE - campus Foz do Iguaçu-PR. Atua na área de Geração Hidráulica há 9 anos, sendo 2 na área de manutenção e 7 na área de engenharia.

Leonir Juarez Cibulski, nascido em Itatiba do Sul/RS, em 30/01/1986. Formado em Eng. Mecânica pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Campus de Erechim/RS, atua na área de Geração Hidráulica há 12 anos, sendo 9 na área técnica e 3 na Engenharia de Manutenção da Engie Brasil Energia.

Murilo Trettel Mariano

Itu/SP – 1983

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – 2005

Engenheiro Mecânico de Turbinas Hidráulicas

Eduardo Koichi Iha

Brasília/DF – 1978

Universidade de Brasília – UnB – 2003

Engenheiro Mecânico de Turbinas Hidráulicas