



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/24

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH**

**ANÁLISE DE SINAIS DINÂMICOS PARA DETERMINAÇÃO DA CAUSA RAIZ DE FALHA EM UM CONJUNTO  
GERADOR DE 120 MW**

**Renato V. Del Frari(\*)  
ENGIE**

**Leonir J. Cibulski  
ENGIE**

**Nilson R. do R. Filho  
ENGIE**

**Paulo H. S. Feitosa  
ENGIE**

**Thobias de A. S. Carlotto  
ENGIE**

**RESUMO**

O presente artigo tem como objetivo apresentar o estudo para identificação da causa raiz do desprendimento de uma chaveta tangencial do anel magnético de um hidrogerador Kaplan de 120 MW. Este componente adentrou a região do entreferro com a unidade em operação, ocasionando um curto-circuito bifásico no gerador.

As análises foram embasadas no histórico dos sinais dinâmicos de entreferro e vibração, coletadas através do sistema de monitoramento instalado na unidade, assim como nos procedimentos realizados para reestabelecimento das condições de projeto, visando garantir o retorno seguro do conjunto gerador ao sistema interligado.

**PALAVRAS-CHAVE**

Excentricidade, Verticalidade, Monitoramento, Entreferro, Empuxo Magnético Desbalanceado.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em decorrência do desprendimento de uma chaveta do anel magnético, a qual causou um curto-circuito bifásico em uma unidade geradora Kaplan de 120 MW, instaurou-se um estudo para levantamento da causa-raiz do desprendimento deste componente.

A chaveta que se desprende faz parte de um conjunto de chavetas projetadas para permitir a expansão térmica do anel magnético. Este conjunto possui 4 chavetas axiais fixas (2 na aranha e 2 no anel magnético) e uma central móvel que é solidária ao anel magnético. A chaveta que se desprende foi uma das chavetas posicionadas na aranha (posição 3 da Figura 1), sendo fixada a esta por apenas um pequeno cordão de solda, sem funções estruturais, apenas para garantir o posicionamento.

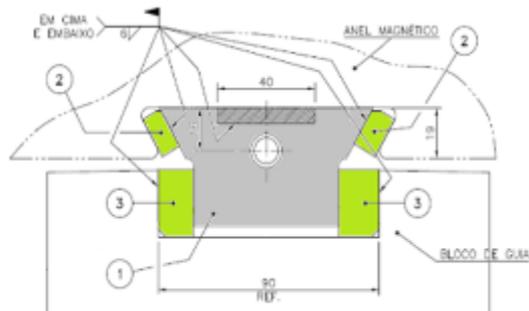


FIGURA 1 – Detalhe das chavetas do anel magnético

Foram verificados todos os protocolos de montagem e ensaios de comissionamento, indicando que todas as condições operacionais e de montagem, estavam dentro do especificado pelo fabricante. Adicionalmente a isto, não era conhecido histórico de um evento similar, sendo assim ficou claro a necessidade de um estudo mais profundo.

No decorrer das análises foi verificada a existência de um desvio de excentricidade com a máquina operando em vazio, o qual sofria um incremento quando excitada, causada pelo efeito do Empuxo Magnético Desbalanceado, o qual causava, além do deslocamento do conjunto girante, esforços adicionais nos componentes do rotor.

Durante os serviços de reparo e inspeções constatou-se que a verticalidade da unidade também encontrava-se fora das tolerâncias definidas por norma e pelo fabricante, sendo necessária sua correção. A interferência do anel magnético também necessitou ser corrigida, uma vez que estava abaixo dos valores estabelecidos em projeto, permitindo supostamente a flutuação da coroa polar abaixo do definido em projeto.

O comissionamento da unidade geradora, após correções de montagem, foi realizado, com o monitoramento de todas as componentes dinâmicas (vibração, temperatura, entreferro, etc), constatando-se que a causa raiz do problema fora eliminada. Também, como melhoria, foi implementado o travamento mecânico de todas as chavetas de guia e torque do anel magnético, impossibilitando assim o desprendimento dos componentes em qualquer condição operacional.

## 2.0 - ANÁLISE DOS SINAIS DINÂMICOS – ANTERIORES À OCORRÊNCIA

A análise dos sinais dinâmicos foi iniciada através do histórico de dados do sistema de monitoramento, com o objetivo de se identificar se, em algum período, houve variação significativa no comportamento da unidade geradora. A pesquisa mostrou que o comportamento vibracional, desde a instalação do sistema, sempre foi similar, portanto, optou-se por aprofundar a busca utilizando dados do período brevemente anterior à ocorrência da falha.

Esta segunda etapa buscou avaliar o comportamento na condição da unidade em vazio (máquina fria), excitada (giro em vazio e fria) e em carga nominal (temperaturas estabilizadas). Os dados utilizados foram os sinais de vibração relativa dos mancais e os sinais de entreferro.

### 2.1 Vibração relativa dos mancais

A medição da vibração relativa dos mancais é efetuada através de sensores de proximidade instalados conforme Figura 2.

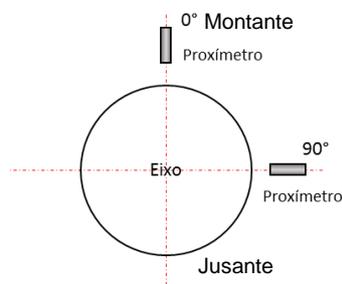


FIGURA 2 – Disposição dos sensores de proximidade

A unidade geradora é composta por três mancais, sendo: mancal guia do gerador (MGG), mancal de escora (ME) e mancal guia da turbina (MGT). Os dados mais relevantes obtidos através destes sensores são apresentados na Tabela 1, para as condições operacionais de giro em vazio e excitada, ambas com o gerador frio.

Tabela 1 – Sinais de vibração relativa dos mancais. Variação da posição de equilíbrio estático ( $\Delta DC$ ) e valores de vibração pico-a-pico (AC)

Posição	$\Delta DC$ [ $\mu m$ ]	AC [ $\mu m$ ]	
		vazio	excitada
<b>MGG – 0°</b>	88	110	115
<b>MGG – 90°</b>	-5	110	55
<b>ME – 0°</b>	-809	510	275
<b>ME – 90°</b>	-163	580	435
<b>MGT – 0°</b>	-508	480	90
<b>MGT – 90°</b>	-242	480	275

O mancal de guia do gerador, na direção de 0°, apresentava valores de oscilação de eixo na faixa 110  $\mu m$  pico-a-pico (sinal AC), considerado aceitável para operação conforme norma ISO 7919-5. O sinal DC, que representa a distância do eixo em relação ao sensor de proximidade, mostrou um aumento de 88  $\mu m$ , indicando que o eixo sofreu um afastamento do sensor, comparando as condições de giro em vazio e máquina excitada.

Analisando os valores AC do MGG na direção de 90°, temos os mesmos valores identificados nas leituras da direção 0° (110  $\mu m$  pico-a-pico). O valor DC se manteve praticamente o mesmo.

A movimentação do eixo na direção de 0° mostra claramente a presença do esforço magnético quando a unidade opera excitada.

No plano do mancal de escora a oscilação de eixo (componente AC) é significativamente maior do que no MGG. Quando a excitação é ativada, percebemos na direção de 0° uma mudança significativa na posição do eixo (-809  $\mu m$ ). Isto significa que o eixo se aproximou do sensor 809  $\mu m$ , indicando novamente a atuação de esforços magnéticos (Empuxo Magnético Desbalanceado/Unbalanced Magnetic Pull – UMP), que atuam diretamente no rotor do gerador, porém ele é percebido no mancal de escora em função do desalinhamento do eixo. Na posição de 90° percebemos também uma aproximação do sensor, porém em um valor menor (163  $\mu m$ ).

No mancal da turbina, na direção de 0°, a posição de equilíbrio estática (sinal DC) sofreu uma alteração de 508  $\mu m$ , como consequência do grande deslocamento no plano do mancal de escora. Isto reflete, mais uma vez, o efeito dos esforços magnéticos atuantes sobre o rotor, fazendo com que o eixo todo opere em uma posição diferente quando a excitação está ativa.

## 2.2 Diagrama de órbita dos mancais

As mesmas informações da seção anterior podem ser visualizadas nas Figuras 3 e 4, as quais representam a órbita dos mancais nas mesmas condições operacionais.

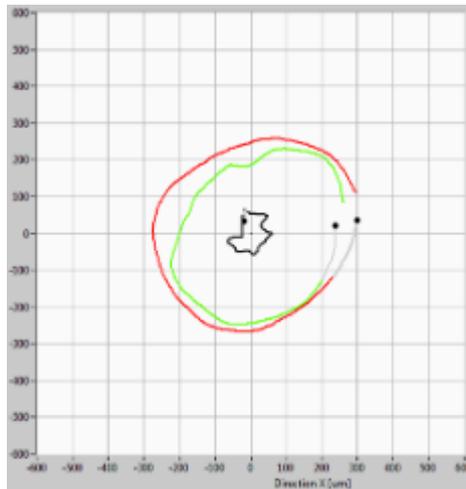


FIGURA 3 – Diagrama de órbita dos mancais na condição de giro em vazio nos planos do MGG (preto), ME (vermelho) e MGT (verde)

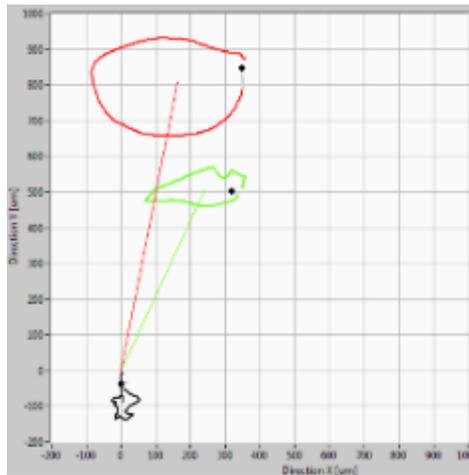


FIGURA 4 – Diagrama de órbita dos mancais na condição de giro excitado nos planos do MGG (preto), ME (vermelho) e MGT (verde), incluindo a variação da posição de equilíbrio estático (sinal DC)

Com o uso desta ferramenta fica muito claro o efeito que o empuxo magnético causa no conjunto girante. Estes esforços são gerados na região do entreferro e, por isso, os maiores deslocamentos devem ser vistos entre rotor e estator.

### 2.3 Entreferro

A unidade geradora também possui um sistema de monitoramento de entreferro, que é composto de 16 sensores de air gap instalados, 8 no plano superior radial do núcleo do estator e 8 no plano inferior. Os sensores de cada um dos planos são igualmente distribuídos nos ângulos de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°.

Na primeira etapa das análises de entreferro foram verificados os sinais com a unidade em giro em vazio. A diferença verificada entre o maior e menor entreferro no plano superior do núcleo do estator foi de 3,2 mm e na região inferior de 2,1 mm. Isto significa que existe um desvio no centro de giro do eixo na ordem de 1,6 mm ( $3,2 \div 2$ ) na região superior e 1,05 mm ( $2,1 \div 2$ ) na região inferior.

Para a condição da unidade excitada os resultados se mostraram ainda mais preocupantes. O rotor mostrou um incremento no deslocamento de 1,2 mm no plano superior e mais 1 mm para o plano inferior, muito próximos a direção de 0°-180°.

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos sensores de entreferro, com exceção dos sensores posicionados em 0°, os quais não estavam operacionais.

Tabela 2 –Valores médios de entreferro para as condições de giro em vazio e excitada. Plano superior e inferior.

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
<b>Sup. – vazio [mm]</b>	15.5	16.3	18.3	18.7	17.8	17.9	18.0	16.1
<b>Sup. – exc. [mm]</b>	13.7	15.1	18.2	19.3	18.3	18.7	18.3	15.2
<b>Inf. – vazio [mm]</b>	-	16.5	18.6	18.6	18.2	18.0	18.1	16.5
<b>Inf – exc. [mm]</b>	-	15.2	18.5	19.3	19.1	18.9	18.1	15.4

### 2.4 Sinais adicionais - Temperaturas do MGG

O resultado líquido da excentricidade citada no item anterior é um empuxo magnético radial e estacionário, atuando sobre o conjunto do rotor e eixo. Do ponto de vista do mancal e do rotor esta carga radial é considerada estática, sendo os esforços resultantes suportados principalmente pelo mancal de guia do gerador.

Este fato pôde ser verificado através da análise dos registros de temperaturas do mancal guia superior do gerador. A pesquisa mostrou que as diferenças de temperaturas nos segmentos se mantiveram praticamente constantes com o passar dos anos, sendo assim, foi elaborada a Figura 5, com um registro brevemente anterior a ocorrência da falha.

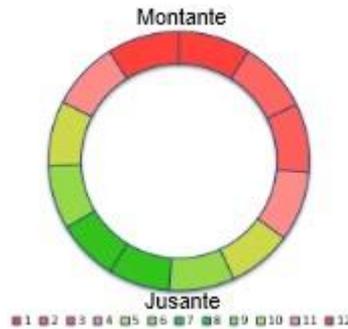


FIGURA 5 - Gráfico em escala de cores das temperaturas dos segmentos do MGG

A análise de temperaturas do mancal mostra que as sapatas mais à montante (local de menor entreferro medido) apresentam temperaturas mais elevadas que as sapatas de jusante ( $\sim 7,5^{\circ}\text{C}$ ), evidenciando assim claramente maiores esforços naquela região, ocasionados pela posição de giro do eixo do rotor.

Cabe salientar que a análise isolada das temperaturas dos segmentos do mancal não é um fator determinante e conclusivo com relação a excentricidade, uma vez que este fenômeno também pode ser causado por uma má centragem da cruzeta, ajuste inadequado das folgas das sapatas, ajustes com o rotor fora de centro, entre outros. Também cabe salientar que as temperaturas do mancal estavam dentro dos limites de projeto, sendo assim o efeito não teve um impacto nocivo ao mancal.

## 2.5 Conclusão

O estudo dos sinais dinâmicos e a análise de temperaturas mostrou claramente a existência de uma excentricidade considerável entre o conjunto rotor e estator. Sendo a força magnética inversamente proporcional ao entreferro e, havendo um desequilíbrio das forças que atuam radialmente sobre o conjunto, se dá o efeito denominado Empuxo Magnético Desbalanceado (em inglês UMP – Unbalanced Magnetic Pull) ou mais comumente chamado de “empuxo magnético”.

A força oriunda da excentricidade entre rotor e estator tem natureza estática sobre o conjunto rotativo e sobre o mancal de guia, pois a resultante tem direção e sentido fixo, ocasionando um deslocamento do rotor para a região de menor entreferro.

No campo dinâmico a análise da excentricidade apresenta outros efeitos. Em cada polo, a força magnética atua de maneira cíclica em função da rotação da unidade geradora, pois ora os polos se encontram na região de menor entreferro (maior força radial) e ora estão na região de maior entreferro (menor força radial). Sendo assim, para cada ciclo ou rotação da unidade geradora, os polos sofrem duas vezes uma variação de esforços que oscilam conforme a variação do entreferro.

Como os polos fazem parte do conjunto do anel magnético e estes estão fixados à aranha do rotor através dos conjuntos de chavetas, é inevitável que esta carga cíclica acabe atuando sobre as chavetas, com a mesma amplitude variável. Estes esforços cíclicos, mesmo que de pequena intensidade culminaram para a trinca por fadiga da solda de posicionamento da chaveta, possibilitando assim o desprendimento da mesma.

## 3.0 - ANÁLISE DOS SINAIS DINÂMICOS – APÓS CORREÇÕES

Durante os serviços de reparo no gerador foram realizadas diversas atividades de inspeções e verificações, incluindo a aferição manual do entreferro (circularidades/excentricidade), verticalidade e também inspeções completas em todas as chavetas do conjunto do anel magnético. Antes do retorno ao sistema a unidade geradora foi recomissionada, sendo os principais fatos apresentados na sequência.

### 3.1 Correções efetuadas

Uma das primeiras ações realizadas antes das correções foi a verificação manual do entreferro em 21 pontos dos 84 polos existentes, para definir o quanto seria necessário deslocar a carcaça do estator.

Com os resultados destas medidas foi detectada uma excentricidade entre rotor e estator no valor de **1,40 mm**, valores estes que ficam acima da tolerância admissível de projeto (**0,83 mm**). A excentricidade, que representa um deslocamento entre os centros do rotor e estator, pode ser calculada com auxílio da NBR 13224.

Antes da realização da correção da posição do estator, foi verificada a verticalidade do conjunto, sendo obtido um valor de 0,209 mm/m. Este valor representa um desvio de dez vezes comparado a referência da norma NBR 13224 (0,02 mm/m). Este fato também tem forte relação com a excentricidade, uma vez que o ângulo de correção, obtido através das análises, foi de 352°, demonstrando que o eixo estava inclinado justamente para a região com os menores valores de entreferro.

Após correção da verticalidade foi obtido um valor de excentricidade na casa de 0,61 mm, limite aceitável pela norma, porém, em função das folgas dos mancais, foi realizado o reposicionamento do estator, ficando assim a excentricidade em 0,22 mm.

Adicionalmente, foi verificado a interferência das chavetas verticais do anel magnético e constatado que o valor estava ligeiramente abaixo do estabelecido em projeto, sendo assim optou-se por realizar a correção, evitando que o efeito do empuxo magnético pudesse ser potencializado por uma flutuação da coroa do anel magnético.

### 3.2 Vibração relativa dos mancais

Para a operação em giro mecânico, todos os valores de deslocamento pico-à-pico nas posições medidas tiveram significativa redução, exceto na posição de 0° do Mancal Guia Superior, que teve um pequeno incremento.

Tabela 3 – Diferenças na vibração pico-a-pico dos mancais antes e depois das correções

Posição	Antes da falha ( $\mu\text{m}$ )	Após correções ( $\mu\text{m}$ )
<b>MGG – 0°</b>	110	175
<b>MGG – 90°</b>	110	100
<b>ME – 0°</b>	510	330
<b>ME – 90°</b>	580	360
<b>MGT – 0°</b>	480	200
<b>MGT – 90°</b>	480	<b>345</b>

De modo geral notou-se uma melhoria significativa na resposta vibracional nesta condição. Para o Mancal de Guia de Turbina, apesar de se ter observado uma redução, o pico a pico em 90° ainda se encontra na região C da Norma ISO 7919-5, zona na qual não se é recomendada a operação por longos períodos de tempo.

Já as análises realizadas com a unidade excitada, tiveram como foco avaliar as mudanças na posição do eixo em comparação ao efeito da excentricidade, em decorrência do UMP.

Observando os valores de  $\Delta\text{DC}$  da tabela abaixo, verifica-se que ainda existe um deslocamento do eixo, porém a movimentação é bem menor após os serviços de correções.

Tabela 4 – Diferenças na vibração pico-a-pico dos mancais antes e depois das correções

Posição	Antes da falha		Após correções	
	$\Delta\text{DC}$ [ $\mu\text{m}$ ]	AC [ $\mu\text{m}$ ] vazio/exc.	$\Delta\text{DC}$ [ $\mu\text{m}$ ]	AC [ $\mu\text{m}$ ] vazio/exc.
<b>MGG – 0°</b>	-88	110/115	97	175/175
<b>MGG – 90°</b>	5	110/55	1	100/60
<b>ME – 0°</b>	<b>809</b>	510/275	<b>272</b>	330/495
<b>ME – 90°</b>	163	580/435	102	360/665
<b>MGT – 0°</b>	<b>508</b>	<b>480/90</b>	<b>87</b>	200/180
<b>MGT – 90°</b>	242	<b>480/275</b>	102	<b>345/390</b>

### 3.3 Entreferro

Das análises dos dados de entreferro pôde ser observado que a concentricidade entre rotor e estator foi significativamente melhorada, obtendo-se um valor de 0,22 mm (tolerância = 0,83 mm). Isto, conseqüentemente, indica que os esforços submetidos na região do anel magnético do rotor, onde se encontram as chavetas de guia radial, foram significativamente reduzidos.

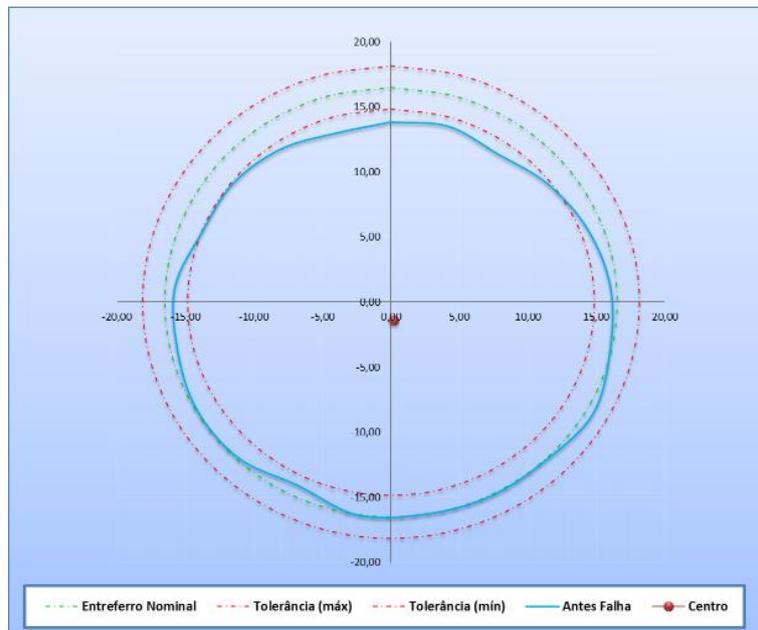


FIGURA 6 - Posição do estator/circularidade com relação ao melhor centro antes da falha

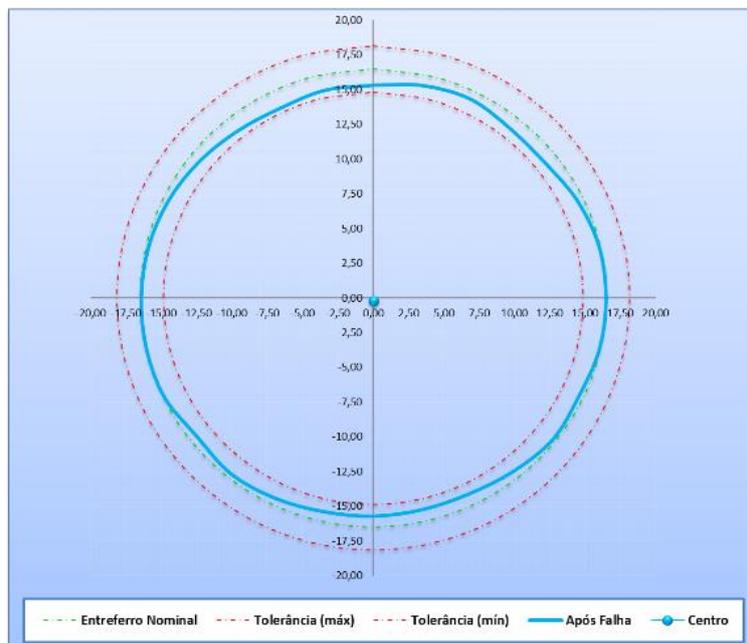


FIGURA 7 - Posição do estator/circularidade com relação ao melhor centro após correções

Outro fator importante a ser respondido através da análise do entreferro, é a respeito do comportamento da flutuação do anel magnético, de modo a garantir que o processo de reinterferência do mesmo foi eficaz. Durante o comissionamento foi utilizado um sistema de aquisição em paralelo, que possibilita observar a variação real do entreferro, fazendo uma compensação dos valores de vibração. O sistema tem a possibilidade de calcular os seguintes dados:

- Mín.: valor de entreferro mínimo calculado dos 84 polos;
- Médio: valor do entreferro médio calculado dos 84 polos;
- Máx.: valor do entreferro máximo calculado dos 84 polos.

A Figura 8 apresenta os dados analisados para os sensores posicionados em 0° (vermelho) e 90° (preto). Como o comportamento de ambos os planos do estator foram similares, será apresentado apenas a figura do plano superior.

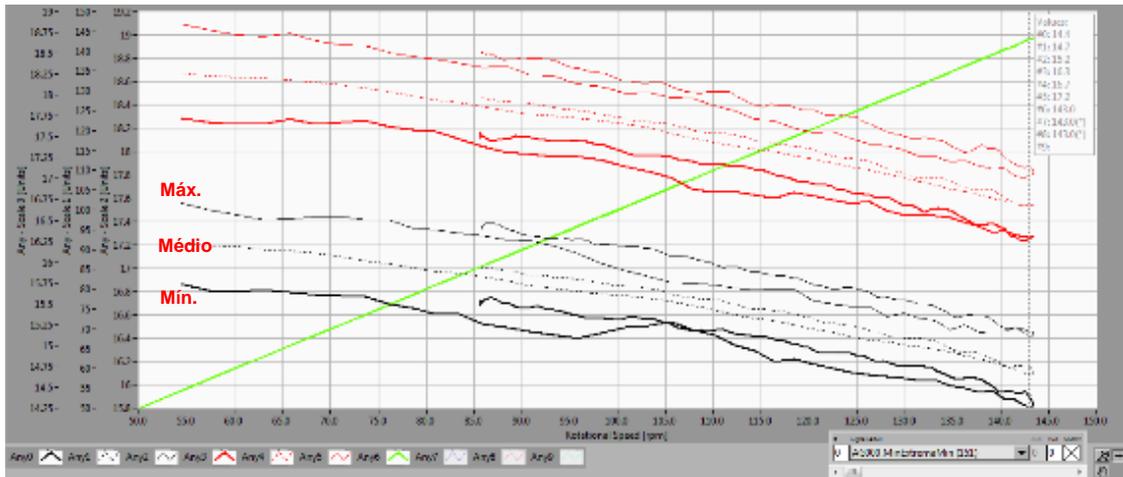


FIGURA 8 – Mín., Médio e Máx., valores do entreferro do plano superior do estator (0° - preto; 90° - vermelho), com compensação de vibrações

Os dados da figura acima, apresentam linhas paralelas, isto é uma indicação de que o anel magnético se expande e contrai uniformemente. A expansão total de 0 a 143 rpm registrada foi de 1,64 mm, que é menor do que o valor de interferência da coroa polar com a aranha (2,1 mm). Deste modo, conclui-se que até 143 rpm, o anel magnético permanece em contato com as chavetas verticais em todas as posições de sua circunferência, não existindo a flutuação da coroa polar.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A conclusão dos estudos apontou claramente que a causa raiz para o desprendimento da chaveta foi a existência de um desvio de excentricidade entre o conjunto rotor e estator, causado em parte pela falta de circularidade e verticalidade verificada posteriormente. A excentricidade gerou o efeito de empuxo magnético desbalanceado, o qual causou esforços repetitivos a coroa polar, culminando com a trinca da solda de posicionamento da chaveta que veio a se desprender.

A análise dos sinais dinâmicos da unidade geradora teve papel fundamental para determinação da causa raiz do problema e possibilitou uma atuação focada na correção das não conformidades verificadas, porém é uma ferramenta atual da manutenção que exige um alto grau de conhecimento técnico na área de vibração e necessita uma visão muito crítica para que sejam exploradas todas as ferramentas disponíveis e dados monitorados.

Salientamos também, que as inspeções e ensaios realizados durante os serviços de reparo com a unidade geradora parada, possuem um alto valor de assertividade, contribuindo para o sucesso das análises e com o principal objeto que é o retorno seguro do conjunto ao sistema interligado.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ISO 7919-5:2005 - Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machines sets in hydraulic power generating and pumping plants – Second Edition. Switzerland - 2005;
- (2) ABNT – NBR 13224:1994 – Tolerâncias de montagem de unidades hidrelétricas verticais de grande porte. Rio de Janeiro – 1994.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Renato Vargas Del Frari  
Nascido em Erechim/RS em 20 de novembro de 1985  
Graduado em Engenharia Mecânica pela UPF em 2010  
Especializado em Gestão de Projetos pela FGV (MBA) em 2013  
Empresa: ENGIE Brasil Energia  
Engenheiro de Manutenção em Hidrogeradores

Leonir Juarez Cibulski  
Nascido em Itatiba do Sul/RS em 30/01/1986  
Graduado em Engenharia Mecânica pela URI - Campus de Erechim/RS em 2014  
Empresa: ENGIE Brasil Energia  
Engenheiro de Manutenção Mecânica

Nilson Rosa do Rosário Filho  
Nascido em Goiânia/GO em 25/08/1986  
Graduado em Engenharia Elétrica pela PUC - GO em 2008  
Empresa: ENGIE Brasil Energia  
Engenheiro de Manutenção em Hidrogeradores

Paulo Henrique Santos Feitosa  
Nascido em Passos em 07 de maio de 1983  
Graduado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI em 2006  
Especialização em Sistemas Elétricos de Potência em 2012  
Empresa: ENGIE Brasil Energia  
Engenheiro de Manutenção em Hidrogeradores

Thobias A. S. Carloto  
Nascido em Realiza/PS em 14 de outubro de 1980  
Graduado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI em 2003  
Especialização em Sistemas Elétricos de Potência em 2012  
Empresa: ENGIE Brasil Energia  
Engenheiro de Manutenção em Hidrogeradores