



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/27  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH**

**ANÁLISE DAS CAUSAS DE VIBRAÇÃO ELEVADA NO NÚCLEO DO ESTATOR DO HIDROGERADOR 03 DA UHE ILHA SOLTEIRA QUANDO OPERADO COMO COMPENSADOR SÍNCRONO**

<b>Allan Almeida de Lima(*) CESP</b>	<b>Rafael Guimarães Cardoso CESP</b>	<b>Edson Morales Leal CESP</b>	<b>Márcio B. Matos CESP</b>
<b>Roberto T. Kagesawa CESP</b>	<b>Sandro Barcello CESP</b>	<b>Luiz C. Bastos CESP</b>	<b>Washington L. C. Freire CESP</b>
<b>Carlos A. Scorissa CESP</b>	<b>Ricardo Avante CESP</b>	<b>Luciano M. Ramalho CESP</b>	<b>Nelson A. Nakano CESP</b>

**RESUMO**

Durante a operação da Unidade Geradora nº 03 da UHE Ilha Solteira, foi identificado nível de ruído anormal na sala do gerador, característico de vibração do núcleo do estator. Trata-se de um gerador que em 2010 passou por adequações de regulação e controle para operar como compensador síncrono de reativos. Foram realizados ensaios de vibração em diversos pontos de operação incluindo-se a compensação de reativos com a finalidade de diagnosticar a origem da vibração do núcleo do estator. Os ensaios demonstraram as consequências das forças magnéticas parasitas que podem agir no estator quando operado em condição não simulada em projeto ou fora das características nominais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Máquinas Síncronas, Compensador Síncrono de Reativos, Vibração, Ressonância, Forças Magnéticas Parasitas

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Durante a operação da Unidade Geradora nº 03 (UG-03) da UHE Ilha Solteira como compensador síncrono de reativos foi identificado ruído anormal na sala do gerador, característico de vibração do núcleo do estator.

A UG-03, cuja potência e tensão terminal é de 185 MVA e 14,4 kV respectivamente, entrou em operação comercial em 1973 e no início da década de 90 passou por reisolamento do enrolamento do estator, reempilhamento de pacotes do núcleo do estator e reforços estruturais na carcaça, motivados pela degradação causada por altos níveis de vibração e consequentes curtos circuitos sofridos desde sua entrada em operação. Em 2010 esta UG passou por adaptação do projeto de controle, regulação do sistema de excitação, medição de faturamento e proteções a fim de permitir sua operação como compensador síncrono de reativos, atendendo à determinação do órgão regulador emitida através da Resolução Autorizativa ANEEL nº 1.330/2008.

Em busca da identificação da origem do ruído, foram realizadas medições de vibração do núcleo do estator em variados pontos de operação dentro dos limites da sua curva de capacidade, variando-se carga e fator de potência e monitorando oscilações de eixo, vibrações, e ruídos. Os ensaios confirmaram a suspeita de que a origem do ruído fosse no núcleo do estator, tornando-se evidente quando a UG era operada como compensador síncrono. Foram encontrados níveis de velocidade de vibração do núcleo do estator de até 19,88 mm/s RMS na frequência de 120 Hz quando operado como compensador de reativos e fornecendo 144 MVar (indutivo) ao sistema de potência.

Após os ensaios, houve a desmontagem do gerador para investigação da origem das elevadas vibrações constatadas, uma vez que a CESP utiliza-se como parâmetro o limite de 4 mm/s rms de vibração do núcleo

estatórico como aceitável. A desmontagem do gerador permitiu a localização de diversos pontos de vibração ao longo do estator conforme as Figuras 1 e 2.



Figura 1: Ponto de vibração - Lado interno do núcleo.



Figura 2: Ponto de vibração - Lado externo do núcleo.

Além dos reparos dos pontos de vibração, foram verificados e reapertados os tirantes do núcleo estático. Apesar do alto nível de vibração observado, não foram encontrados tirantes fora da faixa de tolerância do torque.

Com a conclusão dos reparos, o gerador foi montado e em seguida executados novos ensaios com vistas a verificar seu comportamento após o reaperto. Os resultados indicaram uma redução nos níveis de vibração do núcleo do estator, entretanto não o suficiente para ser considerado aceitável segundo os critérios da CESP.

## 2.0 - INVESTIGAÇÃO

A investigação da origem das vibrações foi realizada com base em uma série de ensaios cujos resultados e análises serão apresentadas nos itens a seguir.

### 2.1 Medição da vibração do núcleo do estator nas condições de compensador de reativos e gerador

O ensaio foi realizado antes e após os reparos do estator, consistindo no monitoramento da vibração em 120 Hz em seis pontos equidistantes do núcleo do estator. Com o gerador "frio" (55°C de temperatura do núcleo), variou-se a carga reativa do gerador durante o período de 30 minutos. Ao longo de todo o ensaio o gerador permaneceu absorvendo 4 MW necessários à sua operação. Os resultados estão ilustrados no gráfico da Figura 3.

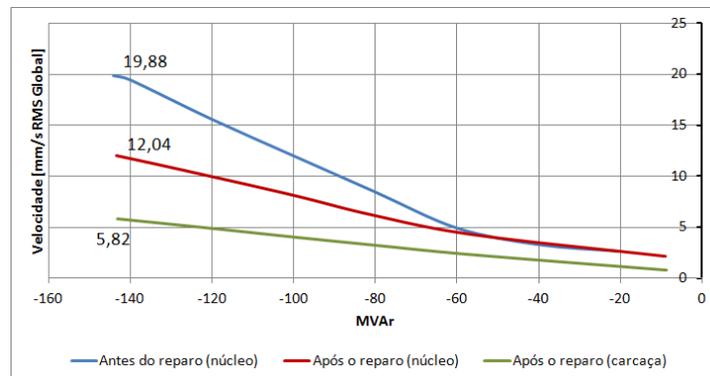


Figura 3: Vibrações como compensador síncrono de reativos.

O gráfico da Figura 3 apresenta as velocidades em 120 Hz obtidas através dos sensores de vibração. Constatou-se que o reparo dos pontos de vibração do núcleo do estator bem como o reaperto dos tirantes reduziram os níveis de vibração na frequência de 120 Hz de 19,88 para 12,04 mm/s RMS, entretanto este valor ainda é considerado crítico com base nas referências e histórico adotado pela CESP.

Na sequência, foi realizado o ensaio com variação de carga no modo de gerador cujo resultado pode ser observado na Figura 4.

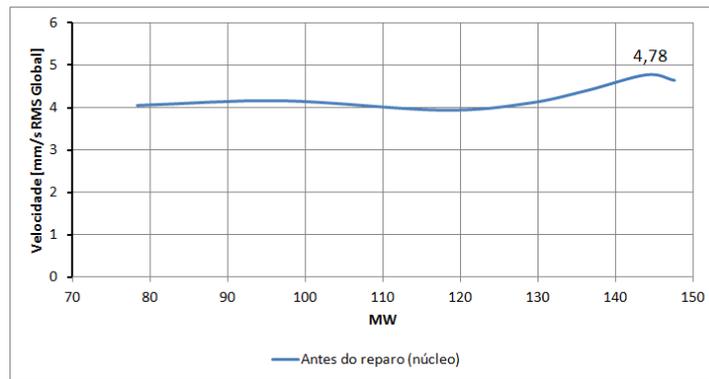


Figura 4: Vibração como Gerador.

Conforme o gráfico da Figura 4, os níveis de vibração do núcleo do estator em 120 Hz não sofreram variações consideráveis, permanecendo abaixo de 5 mm/s RMS ao longo de todo o ensaio. O resultado deste ensaio sugere haver diferenças significativas nas forças de origem magnética entre a operação do gerador fornecendo carga ativa e fornecendo carga reativa.

A vibração do núcleo estático é o resultado da interação entre os campos de reação da armadura do estator e de excitação. Este campo está associado à vibração do núcleo através dos conceitos de forças parasitas. Para um melhor esclarecimento das diferenças observadas no ensaio de vibração, alguns fundamentos são necessários.

A pressão exercida na região de entreferro relacionada à vibração do núcleo é dada pela equação (1).

$$p(x,t) = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2(x,t) \quad [\text{N/m}^2] \quad (1)$$

Onde:

$B$  é a indução resultante no entreferro, composto pela soma dos campos gerados pela reação da armadura e pela excitação dos polos, considerando toda a sua gama de harmônicos.

$\mu_0$  corresponde à permeabilidade magnética do ar no entreferro.

O fluxo resultante no entreferro é dependente da forma geométrica da sapata polar, do núcleo e das ranhuras do estator além da permeância do entreferro durante a sua operação. Como resultado, a forma de onda do fluxo magnético é composta por uma série de harmônicos de amplitude elevada. A Figura 5 ilustra o gráfico de simulação do fluxo resultante na operação como gerador em sua carga nominal e fator de potência 0,95 e na sua operação como compensador de reativos.

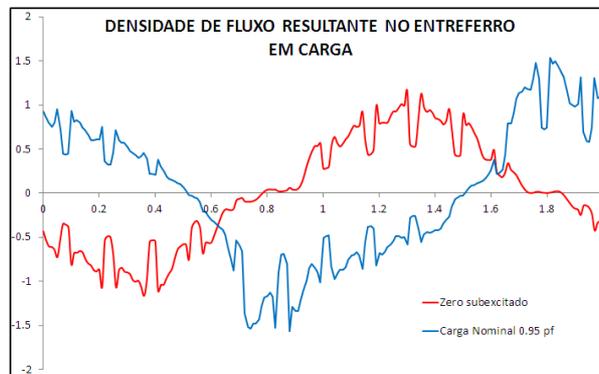


Figura 5: Fluxo resultante no entreferro.

Observa-se no gráfico da Figura 5 que o fluxo resultante no entreferro difere em amplitude, forma de onda e defasagem. A decomposição de ambas as curvas na série de Fourier resulta em um espectro de harmônicos cuja relação se pode estabelecer.

## 2.2 Medição da vibração do núcleo do estator e carcaça com variação de temperatura

Com o gerador em operação à carga de 132 MW e fator de potência em 0,98, foram monitoradas as vibrações do núcleo do estator e da carcaça na frequência de 120 Hz, variando-se a vazão de água de resfriamento dos radiadores. Este ensaio teve duração total de 8 horas e gerou o resultado conforme os gráficos das Figuras 6 e 7.

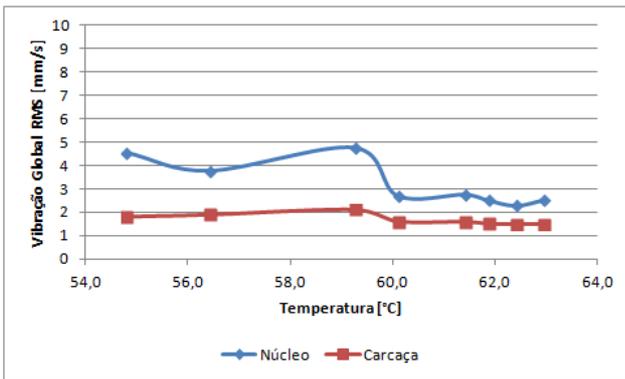


Figura 6: Vibração média dos sensores.

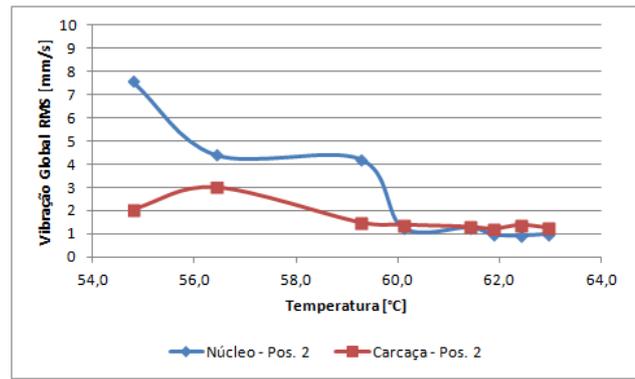


Figura 7: Vibração na posição 2.

Foram utilizados 6 sensores de vibração com distribuídos no núcleo do estator e mais 6 sensores na carcaça do gerador, posicionados próximos dos sensores do núcleo mas não necessariamente na mesma linha por questões de facilidade de instalação.

O gráfico da Figura 6 refere-se ao valor médio obtido dos sensores enquanto o gráfico da Figura 7 refere-se à posição 2 dos sensores do núcleo e da carcaça. Verifica-se que em ambos os gráficos existe uma tendência semelhante de estabilização dos valores de vibração lidos. Entre 59 e 61 °C há uma queda acentuada na amplitude da velocidade de vibração do núcleo e em menor intensidade na carcaça. A partir desta faixa de temperatura pode ser percebida a acomodação dos valores lidos tanto na carcaça quanto no núcleo do gerador.

Os resultados sugerem que nesta faixa de temperatura ocorre um aumento na efetividade da ligação entre o núcleo e a carcaça do gerador, que passam a vibrar na mesma intensidade. Devido às diferenças nos coeficientes de dilatação da carcaça e do núcleo e ainda considerando que o aquecimento ocorre a partir do cobre do enrolamento estatórico, o núcleo se expande inicialmente em velocidade maior do que a carcaça até o acoplamento entre ambos. Enquanto não ocorre o acoplamento, a vibração é maior no núcleo e se transfere para a carcaça após ultrapassar a faixa de 59 a 61 °C.

O estator do gerador da UG-03 foi montado em fábrica e posteriormente transportado em 6 segmentos para montagem na UHE Ilha Solteira. Não há documentos ou relatos no manual de montagem do gerador que digam respeito à forma de acoplamento entre o núcleo estatórico e a carcaça. Os geradores que passaram por reforma nos últimos 15 anos da UHE Ilha Solteira utilizaram-se de fixação com tirantes tipo “rabo de andorinha”, de forma a manter uma folga de 0,5 mm entre o núcleo e a carcaça e reduzir os efeitos das diferenças de dilatação dos materiais durante a sua operação. Outros fabricantes utilizaram um sistema de fixação rígido, não havendo portanto folgas entre o núcleo e a carcaça. As Figuras 8 e 9 ilustram esquematicamente ambas as técnicas.

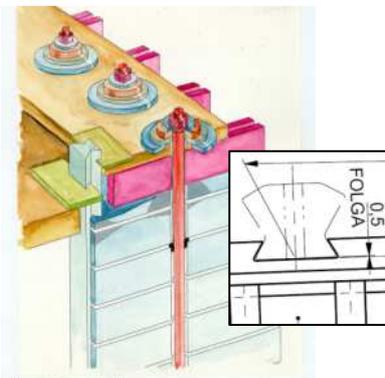


Figura 8: Fixação com folga.

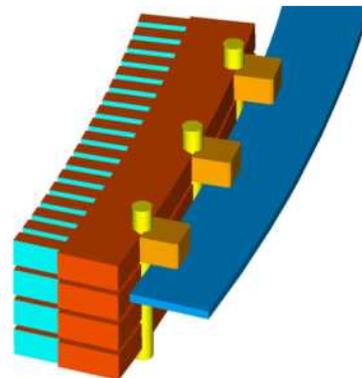


Figura 9: Fixação sem folga.

Os resultados das Figuras 6 e 7 sugerem que existe uma folga entre o núcleo do estator e a carcaça, que estaria ligada ao desgaste de operação do gerador, uma vez que o mesmo teria sido montado conforme a Figura 9 e que o gerador possui histórico de vibrações elevadas e problemas estruturais da carcaça desde sua entrada em operação.

### 2.3 Medição da vibração do núcleo do estator como compensador de reativos e variação de temperatura

Na sequência ao ensaio de variação de temperatura como gerador, foram realizadas medições de vibração com a UG como compensador de reativos, fornecendo 140 MVar com fator de potência indutivo. Os resultados podem ser observados nos espectros de vibração da Figura 10.

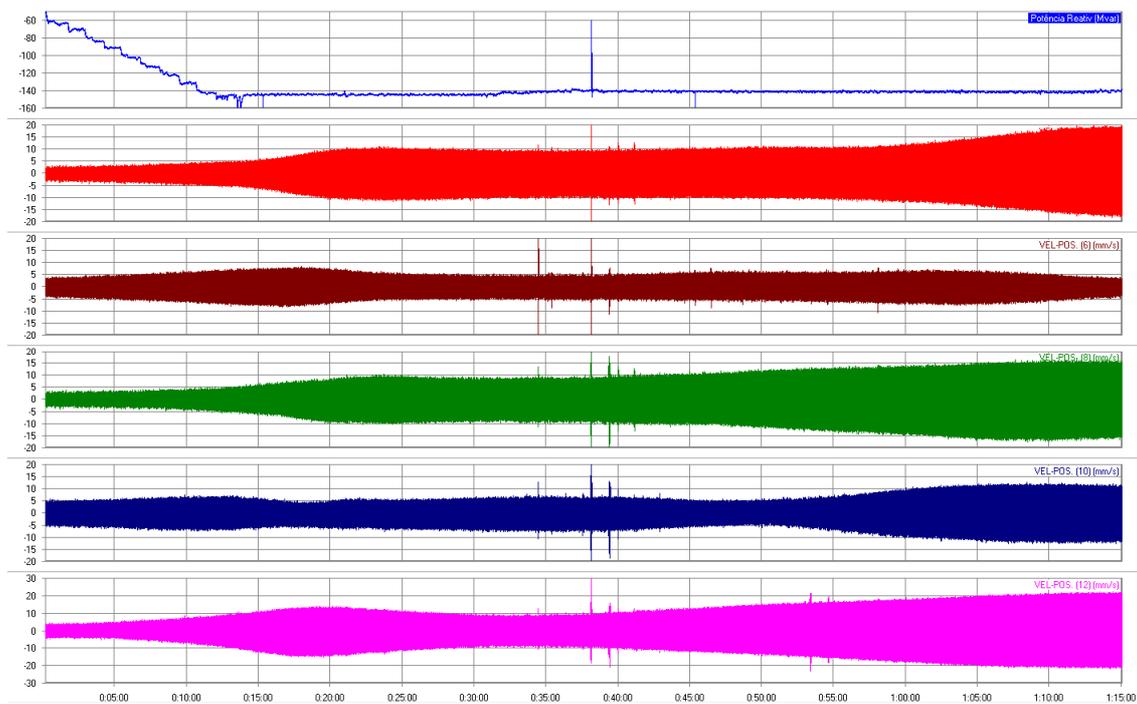


Figura 10: Medição de vibração como compensador síncrono.

O ensaio teve duração de 1 hora e 15 minutos, sendo a temperatura verificada no início do ensaio em 62,5 °C e ao final em 60,7 °C. É possível observar aumento nos níveis de vibração nos últimos 15 minutos de ensaio em 4 dos 5 sensores, o que pode ser explicado pelo fato de que o gerador é resfriado quando em operação como compensador síncrono, pois há redução nas perdas ferro devido à menor indução no entreferro. Ao passar pelo patamar de 61 °C, temperatura correspondente ao momento de efetivo acoplamento entre núcleo e carcaça do gerador, os níveis de vibração se elevam consideravelmente. Este resultado vai de encontro aos resultados dos ensaios anteriores, relacionando a temperatura de operação com os níveis de vibração e acoplamento entre o núcleo do estator e a carcaça.

#### 2.4 Medição da vibração do núcleo do estator e da carcaça com variação da rotação

Com o gerador excitado e em curto circuito, variou-se a rotação da UG com a finalidade de determinar a frequência natural do estator. O ensaio consistiu no monitoramento da vibração do núcleo do estator e da carcaça durante a variação da rotação da UG em patamares. Durante o ensaio, o gerador permaneceu com corrente estatórica nominal e terminais curto-circuitados. Os resultados podem ser observados nos gráficos das Figuras 11 e 12.

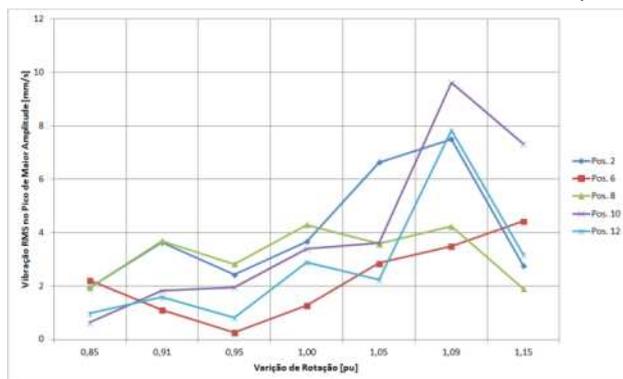


Figura 11: Vibração do núcleo.

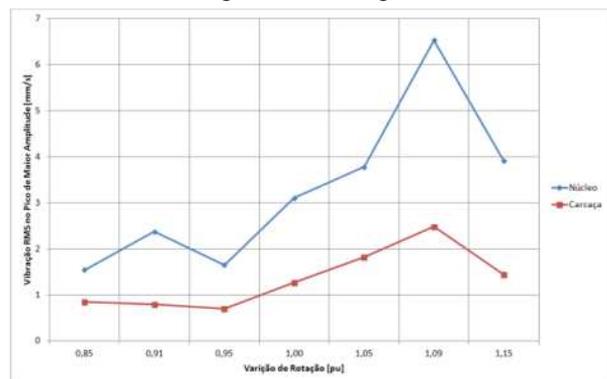


Figura 12: Vibração média do núcleo e da carcaça.

A Figura 11 mostra a velocidade das 5 posições monitoradas no núcleo do estator durante a variação da rotação do gerador de 85 a 115% da rotação nominal. Com excessão do sensor da Posição 6, todos os demais apresentaram característica semelhante, cuja amplitude máxima da velocidade de vibração ocorreu em 1,09 p.u., o que corresponde à frequência de 131 Hz. No gráfico da Figura 12, observa-se que a velocidade de vibração média dos sensores da carcaça teve uma tendência similar à do núcleo, mantendo-se a amplitude máxima em 131 Hz. Na faixa de rotação ensaiada, uma das frequências de ressonância dá-se entre 126 e 138 Hz, acima portanto da frequência de excitação do gerador, porém muito próxima.

Ensaio realizados na UG-02 da UHE Ilha Solteira após sua reforma, mostraram que quanto melhor a rigidez do acoplamento entre o núcleo e a carcaça do gerador, tanto maior será a sua frequência de ressonância. Os ensaios na UG-02 foram realizados em um sistema de fixação conforme a Figura 8, obtendo-se a frequência crítica em 113

Hz. Posteriormente o núcleo foi calçado de forma a retirar a folga entre a carcaça e o núcleo do estator, o que resultou numa frequência crítica de 120 Hz. Com base nesta experiência, é possível afirmar que com a operação do gerador, as folgas entre núcleo e carcaça na UG-03, cujo sistema de fixação é conforme a Figura 9, tendem a aumentar devido ao desgaste da isolamento do tirante e do metal pela vibração do núcleo estático (Ver Figura 2), fazendo com que haja queda na frequência crítica do estator. No caso da UG-03, esta queda tende a aproximar-se de 120 Hz, que é a frequência de excitação do gerador, amplificando os efeitos das forças magnéticas.

### 2.5 Análise das forças magnéticas no entreferro do gerador

As forças que agem no entreferro do gerador estão relacionadas conforme a Equação (1), em que B é a indução resultante no entreferro composta por todas as suas harmônicas. Na frequência da 2ª harmônica, correspondente à frequência de excitação do gerador em 120 Hz, a pressão resultante da Equação (1) nas condições de gerador e compensador síncrono pode ser ilustrada conforme a Figura 13.

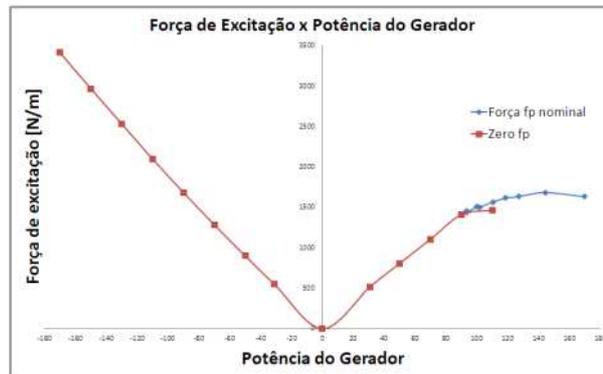


Figura 13: Gráfico da força resultante no entreferro na frequência de 120 Hz.

Verifica-se na Figura 13 que quando o gerador opera com sua potência e fator de potência nominais, a força de excitação em 120 Hz resultante no entreferro tende à estabilização a partir de 100 MW, entretanto, ao operar na condição de compensador de reativos, há tendência linear de aumento da força de excitação em função da carga, sendo que a partir de -100 MVAR os valores de velocidade de vibração passam a ser superiores aos verificados para qualquer carga na operação como gerador.

A Figura 14 corresponde às curvas da velocidade de vibração em função da força de excitação resultante e frequência a crítica do estator.

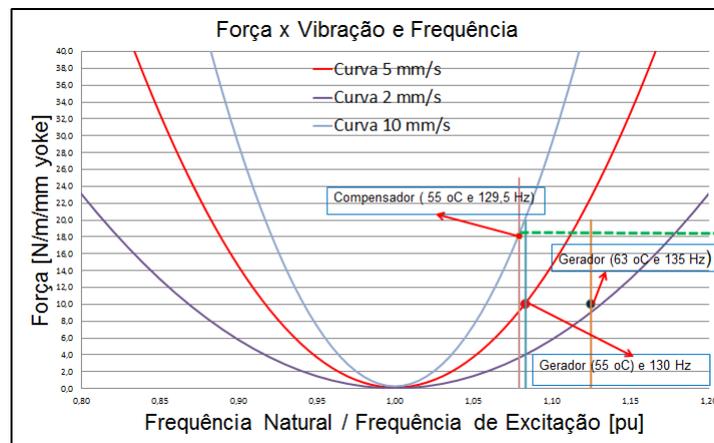


Figura 14: Curvas de vibração.

São simuladas 3 curvas de velocidade em 2, 5 e 10 mm/s e 3 retas com variação da frequência crítica entre 129,5 e 135 Hz, conforme determinado para a UG-03 através do ensaio de variação de rotação do item 2.3. O gráfico mostra que para a frequência natural de 130 Hz, a amplitude da velocidade de vibração, bem como a força que age sobre o núcleo são duplicadas quando operado como compensador em relação ao gerador. Levando-se em consideração o exposto na Figura 13, para uma carga de 160 MW, a amplitude de vibração corresponde à metade da amplitude que deve ser observada para uma carga de -155 MVAR (fator de potência indutivo). Com o aumento da temperatura do núcleo para 63°C, a frequência crítica se desloca no sentido de aumentar a frequência natural, reduzindo-se os níveis de vibração do estator como compensador de 10 para um valor na faixa de 4 a 5 mm/s.

### 2.6 Soluções propostas

Tendo em vista os resultados dos ensaios realizados e de forma a evitar danos e ocorrências no enrolamento do estator, a CESP restringiu a operação da UG-03 como compensador de reativos em -100 MVAR (indutivo), entretanto, está em testes a adoção de novo procedimento de redução da vazão de água de resfriamento quando o gerador passa a operar como compensador síncrono, de tal forma que o estator permaneça com a temperatura do

núcleo acima de 65 °C, limitando-se a temperatura do cobre do enrolamento estatórico em 120°C conforme e prevê a sua Classe de Temperatura. Neste sentido a CESP a alteração no procedimento é a solução mais adequada levando-se em conta o histórico e idade do gerador.

Entretanto, a solução mais adequada para o problema é também a mais custosa. Consistiria na eliminação das folgas e melhoria da efetividade na ligação entre o núcleo e a carcaça do gerador através da inserção de calços ou usinagem ou ainda a troca dos tirantes, com o objetivo de afastar a frequência crítica da frequência de excitação do estator. Esta solução exigiria a desmontagem do enrolamento e pacote estatórico, sendo portanto inviável face aos problemas apresentados por esta UG desde a sua montagem e tempo de operação.

### 3.0 - CONCLUSÃO

A UG-03 da UHE Ilha Solteira apresentou ruídos anormais quando operada como Compensador Síncrono de Reativos. Uma vez detectado o comportamento anormal, foram definidos ensaios com medições de vibração do núcleo do estator e da carcaça, comprovando a origem do ruído na vibração do estator e mostrando a necessidade de parada da UG para averiguação e eventuais reparos.

Com a desmontagem do gerador, foram verificados diversos pontos de vibração no núcleo estatórico, que danificaram o isolamento de algumas barras e culminaram na quebra de chapas do núcleo. Após o reparo dos pontos, substituição de barras e montagem do gerador, foram realizados novos ensaios demonstrando ter havido melhora na amplitude de velocidade de vibração do estator, uma vez que os tirantes foram reapertados. Entretanto, os níveis das vibrações permaneceram elevados especialmente na condição de compensador síncrono de reativos.

Os ensaios demonstraram a significativa influência da temperatura do estator na sua amplitude de vibração e ainda demonstraram a importância do conhecimento da frequência natural do estator após uma reforma ou retrofit, de forma a mantê-la suficientemente distante da frequência de excitação do gerador.

Com a Interligação do Sistema Nacional e as mudanças das características das cargas, a necessidade de hidrogeradores com capacidade de operar como Compensador Síncrono de Reativos tornou-se fundamental para o controle de tensão e equilíbrio do Sistema. Neste sentido, para a reforma ou montagem de novos geradores, é imperativa a necessidade de realização de estudos, simulações e ensaios em todos os pontos de operação dentro da curva de capacidade, ou seja, o projetista deverá inclusive simular a operação do gerador como compensador síncrono de reativos. A solução em adoção pela CESP visa o prolongamento da vida útil do gerador, adotando-se medidas corretivas e viáveis ao menor custo.

### 4.0 - AGRADECIMENTOS

É justo tornar pública a valiosa cooperação técnica no desenvolvimento deste trabalho do Engenheiro Mauro Ken Ito Uemori, da Alstom Brasil Ltda., que com paciência e muita dedicação contribuiu com simulações computacionais para o entendimento das curvas de forças parasitas que agem no estator durante a operação como compensador síncrono, além do apoio na definição dos ensaios realizados na UG-03.

### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Dias, Manoel; Marconi, Edson; Uemori, Mauro; Costa, A. D. Carlos; Ang, I.B. Edwin; Oda, R. D. Paulo: Vibração no núcleo estatórico do gerador da UG-05 da UHE Porto Primavera. IX Encontro Regional Latino Americano do Cigré, 27 a 31 de maio de 2001, IX/Fi – 11.13 – Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil.

(2) Rocha E., J. Johnny: Una metodología para la identificación y análisis de fuerzas parasitas de origen electromagnética actuantes em estatores de máquinas síncronas. X Encontro Regional Latino Americano do Cigré, 18 a 22 de maio de 2003, X/PI – 11.10 – Puerto Iguazú – Argentina.

### 6.0 - DADOS BIBLIOGRÁFICOS



#### **Allan Almeida de Lima**

Nascido em Bragança Paulista (SP) em 1986, ingressou na USP – EESC São Carlos em 2005 no curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação. Fez estágio na empresa ELEKTRO S/A e Pós Graduação em Administração Estratégica pela FIA – SP em 2013. Teve publicações na IEEE Ultrasound Symposium e revista Chemical Engineering & Technology. Realizou apresentações no 7º SENSE em Gramado – RS, no V ENAM em Angra dos Reis – RJ e no XXII SNTPEE em Brasília - DF. Concluiu curso de especialização no setor de energia elétrica brasileiro pela ABCE em São Paulo – SP em 2013. Atualmente é Engenheiro da Companhia Energética de São Paulo – CESP.