



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA AVALIAÇÃO DA FIXAÇÃO DE BARRAS DO ESTATOR DE HIDROGERADORES

Pedro Magalhães Sobrinho, sobrinho@feg.unesp.br¹

João Tadeu A dos Santos, joao.santos@belanus.com.br²

Allan Almeida Lima, allan.lima@cesp.com.br³

Manoel Dias Silva, manoel.dias@pvsolar.com.br⁴

José Hilton Carvalho, hilton@compergy.com.br⁵

¹Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá-SP, CEP: 12.516-410

²Belanus Software e Soluções Ltda, Av. D Pedro I, 230, Apt 121, Vila Osasco, Osasco, SP, CEP:06083-000

³Companhia Energética de São Paulo, Avenida Nossa Senhora do Sabará, 5312, São Paulo –SP, CEP: 04447-011

⁴ATS Tecnologia de Apoio e Serviços Ltda, Comendador Francisco Pettinati, 44, São Paulo –SP, CEP:05634-010

⁵Compergy Qualidade Ltda, Rua Irmã Pia 231, São Paulo –SP, CEP:05335-050

Resumo: Esta pesquisa estudou o comportamento de sistemas de cunhagem de hidrogeradores diante uma excitação mecânica, obtendo através de sua resposta acústica um método para avaliar o grau de fixação do enrolamento estatórico. Conhecendo este comportamento, foram desenvolvidos um hardware de medição para a captação do sinal acústico e um software que utiliza algoritmos para decomposição do sinal captado em suas componentes de frequência e posterior classificação para cada condição de fixação. O sistema desenvolvido visa retirar a subjetividade presente na avaliação da cunhagem, realizada de forma auditiva por um técnico, conferindo maior precisão no diagnóstico.

Palavras-chave: cunhagem, diagnóstico, hidrogerador, isolamento

1. INTRODUÇÃO

Entre as falhas mais comuns relacionadas as paradas inesperadas de geradores estão, estatisticamente, os problemas apresentados no sistema de isolamento da máquina, como apresentado por Bruetsch *et al.* (2008), com base em um levantamento de um comitê de estudos da CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, 2003). Este comitê realizou em 2003 um levantamento de falhas ocorridas em um campo amostral de 1199 hidrogeradores, obtendo assim dados estatísticos de falhas, como pode ser visto na Fig. 1.



Figura 1. Danos em hidrogeradores (Bruetsch *et al.* 2008).

Os danos causados no sistema de isolamento podem estar associado a diversos fatores, como por exemplo o envelhecimento da máquina, ciclos térmicos, descargas parciais em ranhuras e muitos outros, conforme pode-se ver em Bruetsch *et al.* (2008), Stone *et al.* (2004) e Rusu-Zagar *et al.* (2014). Dentro deste contexto, o trabalho desenvolvido busca colaborar com uma metodologia mais precisa para a avaliação da fixação das cunhas no estator de hidrogeradores, uma vez que este mecanismo apresenta um caráter crítico para parte do sistema de isolamento quando a

máquina se encontra em operação. As cunhas tem função de fixar as barras ou bobinas dentro das ranhuras do estator, como pode ser visto na Fig. 2, evitando a movimentação e/ou vibração, causadas principalmente pelos esforços de origem magnética e térmica (dilatação/contração), apresentado em Stone *et al.* (2004). Usualmente os principais fabricantes de geradores utilizam o mecanismo de fixação das bobinas ou barras baseado no sistema de mola tipo *ripple spring* e cunhas de fibra de vidro, enquanto para alguns geradores mais antigos a fixação é realizada apenas com calços e cunhas de fibra de vidro. Ao longo da sua operação, em função principalmente da diferença dos coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos (materiais isolantes, cobre e aço) o processo de dilatação e movimentos vibratórios causam desgastes na pintura ou fita semicondutora, danificando a isolamento superficial e principal do enrolamento e acarretam danos ao enrolamento estático.

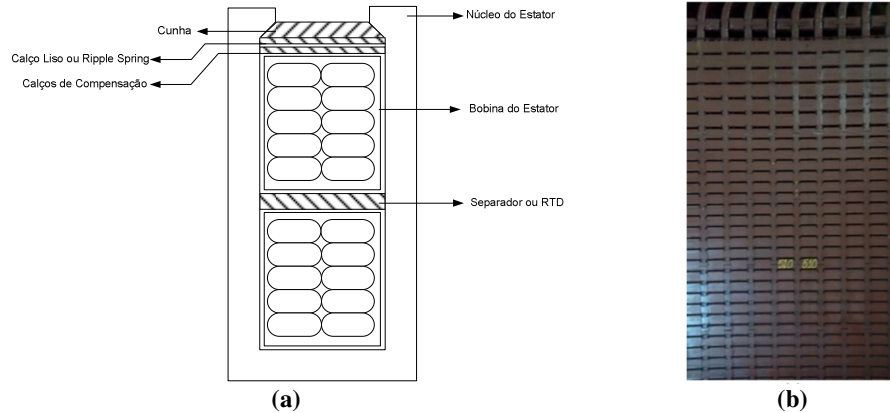


Figura 2. a) Fixação do enrolamento em uma ranhura; b) Trecho do estator de um hidrogerador.

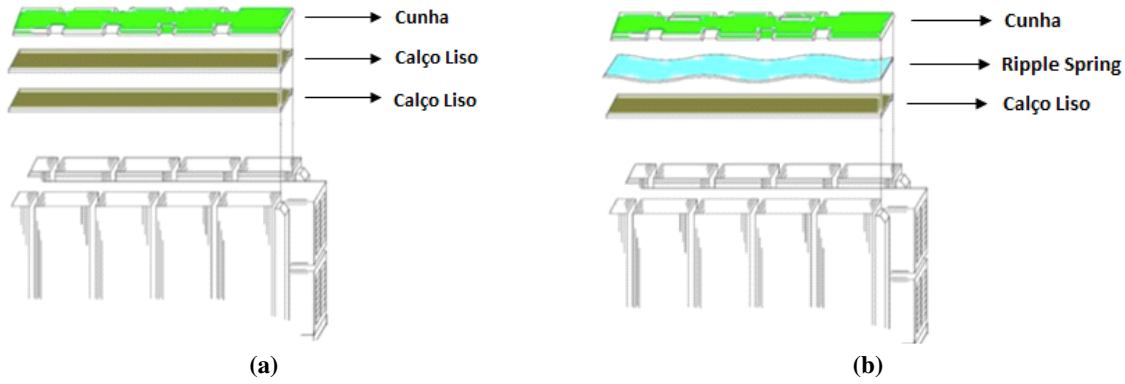
Embora a fixação das cunhas tenham tamanha importância, a avaliação da cunhagem realizada quando da montagem do gerador ainda é majoritariamente realizada de forma manual e subjetiva, utilizando um método de percussão. Neste procedimento, o montador bate levemente um pequeno martelo de 50g e com base do som emitido pela cunha ele define se a fixação está correta ou se é necessário a adição de novos calços. Observa-se que este método apresenta uma carga subjetiva elevada, visto que os parâmetros que definem a qualidade da fixação não são constantes e nem possíveis de serem quantificados, uma vez que o montador pode a cada realização aplicar uma força diferente ao martelo, assim como a qualidade do aperto está atrelado ao conhecimento do executor, bem como dependente da sua acuidade auditiva para gerar a definição da condição de aceite. Dentro desta análise ainda cabem apenas duas possibilidades para a condição de cunhagem, fixa ou solta, uma vez que existe muita dificuldade em quantificar qualquer nível intermediário.

Buscando eliminar esta subjetividade, aumentar a precisão da avaliação da fixação das cunhas e tornar o ensaio independente da realização por parte do montador, foi desenvolvido um sistema composto por um *hardware* responsável pela excitação mecânica da cunha e captação do sinal acústico emitido, assim como um *software* com um algoritmo de classificação que utiliza o sinal obtido para estimar o grau de fixação do enrolamento estático nas ranhuras do gerador. Esta nova metodologia visa permitir a avaliação da cunhagem através de uma escala de aceitação e também garantir a reprodução do ensaio de forma uniforme para todas as cunhas presentes no estator do hidrogerador a ser analisado, levando uma maior confiabilidade aos resultados e garantindo a qualidade do trabalho de cunhagem.

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A fixação do sistema de cunhagem nos geradores em operação, pode apresentar duas formas distintas, dependendo do tipo de preenchimento adotado pelo fabricante do gerador para a fixação das cunhas, conforme abordado por Stone *et al.* (2004). Uma destas formas de fixação é formada por conjuntos de calços lisos, visto na Fig. 3-a, enquanto o outro é um conjunto formado por *ripple spring* e calços lisos, como pode ser visto na Fig. 3-b. Portanto, o sistema desenvolvido deve ser capaz de avaliar a fixação para estas dois sistemas, buscando cobrir boa parte dos geradores que podem se beneficiar desta técnica.

A fixação com *ripple spring* permite um segundo método de verificação do aperto da cunhagem, o qual se atribui a qualidade da fixação ao grau de deflexão da mola, realizando-se uma medida com uso de um relógio comparador através da fenda presente na cunha, método exposto em Ladislau e Yamaguchi (1999). Esta técnica fornece um parâmetro de controle sobre o sistema e que pode ser correlacionado às respostas obtidas, permitindo verificar a eficácia da metodologia para este sistema.



Utilizando o método de percussão como base para o desenvolvimento de uma nova metodologia, buscou-se substituir os elementos presentes atualmente, por componentes que poderiam ser controlados e que atribuiriam uma padronização para a medição. Desta forma, o martelo utilizado nos ensaios de percussão foi substituído por um solenoide, responsável pelo impacto na cunha e que poderia ser controlado conforme protocolo definido, enquanto para a captação da resposta acústica foi utilizado um microfone direcional do tipo cardióide.

3. FORMALISMO MATEMÁTICO

O método atual de verificação da rigidez da cunhagem, ainda que rudimentar, utiliza técnicas de medição de vibração utilizando excitação por impulso, como apresentado em Rao (2008) e Silva (2005). Portanto, esta técnica pode ser formalizada matematicamente em busca de um critério de avaliação que utiliza a medição da vibração acústica captada para estabelecer a condição de fixação das cunhas. Na Figura 4, pode-se ver a representação gráfica simplificada do sistema de cunhagem utilizado para determinar o modelo matemático utilizado como referencia para o desenvolvimento experimental, esta representação utiliza como referencia uma cunhagem realizada somente com calços lisos, sem *ripple spring*, contendo uma região solta, sem uma boa fixação, a qual será a área de interesse tratada pelo formalismo.

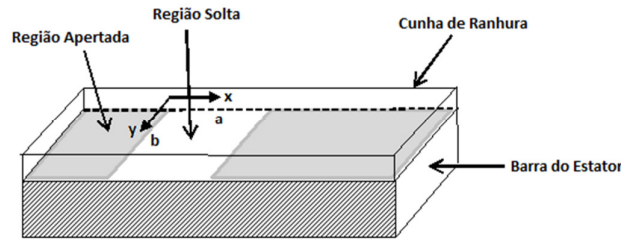


Figura 4. Representação simplificada de uma cunha fixada na ranhura, com uma região solta

A região solta mostrada na Fig. 4, possui dimensão a na direção do eixo x e dimensão b na direção do eixo y , enquanto o restante da superfície da cunha apresenta uma fixação bem apertada. A configuração desta região pode ser simplificada a uma placa fina ressonante, como mostrado por Ma *et al.* (2001), onde estará submetida a uma excitação mecânica e como resposta a esta excitação. As cunhas utilizadas no experimento, assim como as empregadas na fixação de bobinas estatóricas de hidrogeradores, são fabricadas utilizando-se fibra de vidro e resina epóxi, através de um processo que permite obter um material homogêneo e isotrópico. Utilizando-se estas informações, assim como se conhecendo o fato que durante a excitação mecânica o deslocamento da cunha é bem menor quando comparado a sua espessura e tomada suas dimensões, esta área de interesse pode ser tratada como uma placa de Kirchhoff, como também feito por Ma *et al.* (2001). Sendo adotado este tratamento, pode-se utilizar a Eq. 1 para descrever o comportamento da área estudada, onde sua solução, utilizando-se as condições de contorno do sistema, possibilita a obtenção dos modos de vibração e suas frequências correspondentes.

$$\frac{\partial^4 \vartheta}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \vartheta}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \vartheta}{\partial y^4} + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

onde ϑ representa o deslocamento transversal, ρ é a densidade volumétrica do material, h a espessura da placa e D é a rigidez a flexão de uma placa isotrópica. Resolvendo a Eq. 1 pode ser simplificada adotando-se as coordenadas $\xi - \eta$ ao invés do plano de coordenadas $x - y$, onde relação entre estas coordenadas é apresentada na Eq. 2.

$$\xi = \frac{x}{a} \text{ e } \eta = \frac{y}{a}, \quad (2)$$

onde a é a dimensão da região estudada na direção x . A Equação 1 pode ser reescrita, apresentando a seguinte forma

$$\frac{\partial^4 \vartheta}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 \vartheta}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \frac{\partial^4 \vartheta}{\partial \eta^4} + \frac{\rho h a^4}{D} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

e a solução para a Eq. 3 é dada por

$$\vartheta = [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] \vartheta_0(\xi, \eta), \quad (4)$$

a Figura 4 mostra que se pode considerar a região solta como uma placa fina com bordas apertadas, desta forma pode-se obter as seguintes condições de contorno

$$\text{eixo } x: \vartheta_0 = 0, \frac{\partial \vartheta_0}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\text{eixo } y: \vartheta_0 = 0, \frac{\partial \vartheta_0}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

substituindo a Eq. 4 em Eq. 3 e sendo aplicada as condições de contorno Eq. 5 e Eq. 6, pode-se encontrar as frequências de vibração da área estudada, conforme também é demonstrado em Ma *et al.* (2001) e Rao (2008)

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (7)$$

onde ω_{mn} são as frequências de vibração, m e n são índices para os modos de vibração, ρ é a densidade volumétrica do material, h a espessura da placa e D é a rigidez a flexão de uma placa isotrópica. Contudo, para se realizar a análise do aperto do sistema de cunhagem, será observada a frequência fundamental, que pode ser obtida utilizando $m = 1, n = 1$.

A Equação 7, demonstra que mudanças na rigidez a flexão, através do incremento ou decremento de calços de apoio no sistema de cunhagem, ocasiona uma variação na frequência fundamental de vibração, deste modo uma metodologia inicial pode ser avaliada utilizando como informação relevante para o diagnóstico de aperto das cunhas a frequência fundamental medida na cunha sob teste, desde que, exista uma referência dentro deste espaço amostral, uma cunha que o operador considera estar com uma ótima qualidade de fixação e que permitirá utilizar sua frequência fundamental como base de comparação, procedimento que mostra uma assertividade em Jia *et al.* (2009).

Outra informação importante tirada desta solução diz respeito a variação da frequência para cada tipo de ranhura e sistema de cunhagem empregado, portanto, qualquer modificação nas características mecânicas do sistema (tipo de calço, material utilizado na fabricação das cunhas, uso de *ripple spring*) leva a uma nova frequência fundamental, indicando que cada estator ensaiado é um caso particular dentro da solução geral obtida, como apresentado em Peng *et al.* (2008) onde são realizados experimentos com adição de *ripple spring*. Esta variabilidade de casos torna necessária uma calibração ou informação adicional sobre o sistema avaliado, para então definir a parametrização correta para verificar a fixação da cunhagem.

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Experimentalmente, foi desenvolvido um protótipo, composto de um hardware e um software, capaz de substituir a execução do ensaio por parte do montador, assim como permitir o tratamento dos sinal acústico capturado. O *hardware* montado tem seu controle feito pelo *software*, o qual também é responsável pelas rotinas matemáticas para decomposição do sinal acústico em domínio de frequência, o fluxograma de funcionamento pode ser visto na Fig. 5.

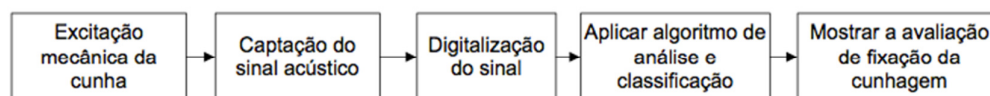


Figura 5. Fluxograma de operação do protótipo.

O *hardware* empregou os mesmos princípios utilizados por técnicas de medição de vibração e excitação por impulso, como apresentado em Rao (2008) e Silva (2005), onde a excitação é realizada por um solenoide controlado pelo *hardware*, que pode imprimir uma força de um pulso único ou com uma frequência ajustada no setup do ensaio. A captação do sinal acústico é realizada através de um microfone direcional capacitivo do tipo cardioide, para frequências na faixa do audível (até 20 kHz), sua aquisição é realizada com tempo de 30s, sendo digitalizado com uma frequência de amostragem de 40 kHz e filtrado por um algoritmo de filtro FIR (Finite Impulse Response) utilizando uma janela *Blackman*, com uma resposta em frequência atendendo os parâmetros do projeto. Este algoritmo está presente no *hardware* desenvolvido, sendo implementado com base no trabalho apresentado por Oppenheim e Nawab (1997).

Posteriormente a etapa de filtragem, o sinal acústico é decomposto em suas componentes de frequência através de um algoritmo de *Fast Fourier Transform* (FFT) com uso de 2048 pontos, demonstrado em Oppenheim e Nawab (1997) e no trabalho de Burrus (1985), permitindo então obter o espectro de frequências do sinal captado. Após a obtenção do espectro do sinal acústico, a frequência fundamental da resposta irradiada pela cunha quando excitada mecanicamente, que corresponde a máxima frequência observada no espectro, é isolada pelo algoritmo de análise. Uma vez definida a componente fundamental do espectro de frequência, ela é avaliada com o valor de referência, definido inicialmente no momento de setup do software, utilizando como base uma cunha que conhecidamente bem fixa.

4.1. Medições realizadas em laboratório

Em um protótipo construído, foram realizadas medições em um modelo reduzido montado em laboratório, o qual foi construído com seis tipos de cunhagem diferentes, apresentado na Figs. 6 (a) (b). Deste modo avaliou-se o funcionamento do protótipo para cada condição de cunhagem, verificando suas respostas e limitações, através da variação dos parâmetros de fixação, como número de calços ou modificação da flexão residual da *ripple spring*.

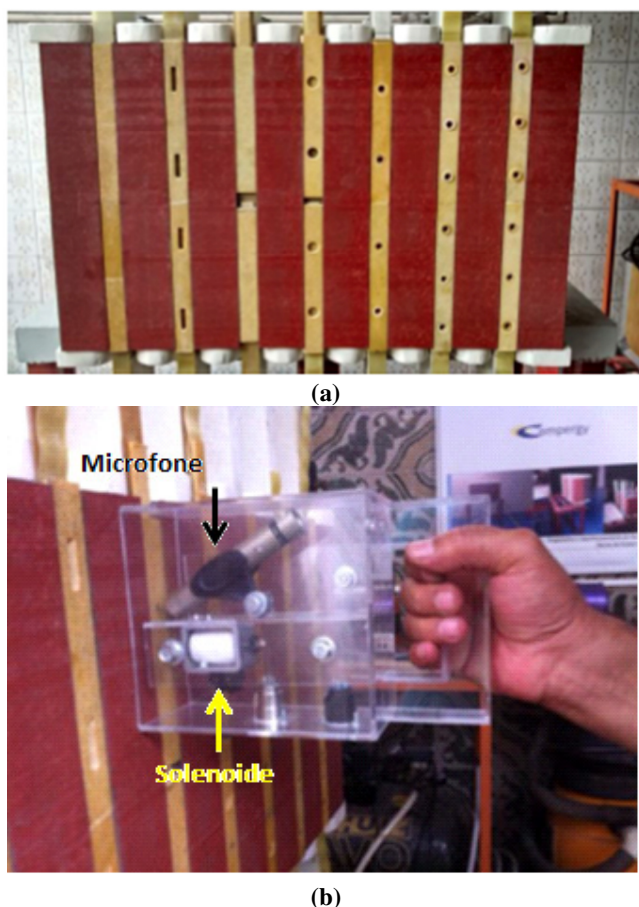


Figura 6. a) Modelo reduzido montado para medições em laboratório; b) Medição realizada com o protótipo

Os tipos de cunhagem utilizados em cada uma das ranhuras, sendo a ranhura 1 a primeira a esquerda e numeradas em ordem crescente da esquerda para direita, podem ser vistos na Tab. 1, indicando o tipo de conjunto empregado na fixação. Embora exista uma variedade nos tipos de fixação presentes no modelo reduzido, duas ranhuras apresentam um maior interesse para este estudo, sendo elas as ranhuras 1 e 2, uma vez que são as mais utilizadas pelos hidrogenadores presentes em território nacional. Os resultados obtidos na ranhura 1 serão inclusive comparados aos

colhidos em campo, em um dos geradores da Usina Hidroelétrica (UHE) de Ilha Solteira, uma vez que as máquinas instaladas neste usina apresentam um sistema de cunhagem com utilização de calços lisos.

Tabela 1. Cunhagens realizadas no estator de provas.

Ranhura	Montagem
1	Cunha lisa com calços lisos
2	Cunha lisa com calços lisos e <i>ripple spring</i>
3	Cunha dupla com calços lisos
4	Cunha dupla com calços lisos e <i>ripple spring</i>
5	Cunha com dois parafusos, calços lisos e <i>ripple spring</i>
6	Cunha com três parafusos, calços lisos e <i>ripple spring</i>
7	Cunha com três parafusos, calços lisos e <i>ripple spring</i>

O protótipo foi parametrizado para realização dos ensaios em todas as ranhuras, porém para efeito comparativo neste trabalho, foram consideradas apenas as análises das ranhuras 1 e 2, que correspondem ao sistemas mais utilizados e que permitiria confrontar os resultados obtidos com as medições realizadas em campo. As medições realizadas utilizaram uma excitação mecânica, onde o setup poderia variar de apenas um pulso até excitações com frequência de 10 Hz, escolhendo-se a excitação por pulso único para estas ranhuras, enquanto o sistema de aquisição foi configurado para adquirir um conjunto de 2048 pontos, aos quais serão aplicados o algoritmo de FFT. Os pontos escolhidos para testes são denominados C1 (condição de cunha solta) e C2 (condição de cunha com boa fixação), estes dois pontos são mantidos sempre os mesmos para a cunha analisada, assim como as configurações de fixação são conhecidas e controladas. As medições realizadas na ranhura 1, com uso do sistema operando, são a apresentadas na Fig. 7.

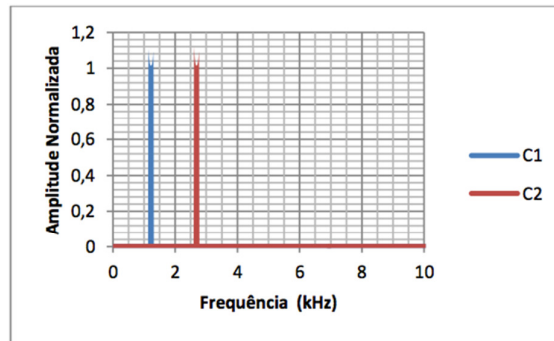


Figura 7. Variação do harmônico fundamental em relação ao aperto das cunhas na ranhura 1.

A Figura 7 demonstra que o comportamento da frequência fundamental com relação ao aperto esta em concordância com a expressão obtida na Eq. 7, uma vez que C1 e C2 são pontos da mesma cunha, porém com configurações diferentes de aperto ajustadas através da inclusão de calços. Esta mudança apresenta na condição de aperto apresenta uma diferença no harmônico principal do sinal acústico captado, permitindo distinguir a condição da cunha como analisado pelo formalismo matemático.

Após esta primeira coleta de dados, realizou-se uma medição na ranhura 2, agora um conjunto com presença de *ripple spring*. Nesta condição foram definidos dois pontos na mesma cunha, mas em regiões com aperto diferente, seguindo a mesma convenção, C1 para uma cunha considerada solta e C2 para uma cunha com uma boa fixação. O resultado obtido nesta medição pode ser verificado na Fig. 8.

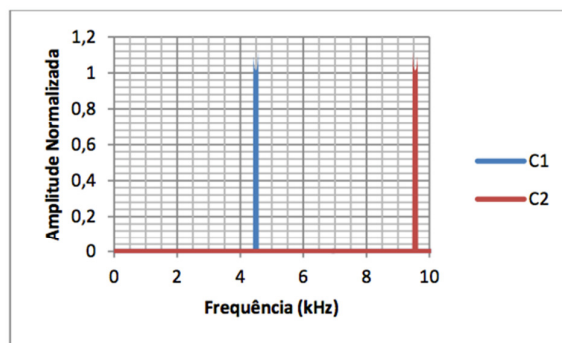


Figura 8. Variação do harmônico fundamental em relação ao aperto das cunhas na ranhura 2.

Pode-se observar que o comportamento se mantém o mesmo, embora os valores das frequências fundamentais sejam diferentes da medição realizada na ranhura 1, comportamento esperado uma vez que a configuração do sistema de fixação se apresenta modificada pela adição do *ripple spring*. Portanto, o comportamento esperado de variação da frequência fundamental de vibração ocorre, indiferente do sistema de fixação, mas com particularidades quanto ao harmônico fundamental, estas sim ligadas a natureza do sistema utilizado para a cunhagem. Fica claro desta forma que não existe possibilidade de unificar a comparação entre sistemas com e sem *ripple spring*, porém conhecendo-se o sistema de cunhagem e adotando-se uma referência, medições realizadas em ranhuras cunhadas da mesma forma apresentam caráter de comparação. Esta constatação valida o modelo matemático proposto inicialmente e demonstra que mesmo sem conhecer a frequência fundamental do sistema de fixação, é possível estabelecer um critério comparativo utilizando-se uma ranhura considerada bem fixa como referência inicial.

4.2. Medições realizadas na UHE Ilha Solteira

Após as medições realizadas em laboratório, o sistema foi levado para testes de campo na UHE Ilha Solteira, onde foi aproveitada a parada Unidade Geradora 17 (UG17), uma vez que seu rotor foi retirado, todo o estator estava acessível para realização das medições, como mostra a Fig. 9.



Figura 9. Unidade Geradora 17 da UHE Ilha Solteira.

As medições realizadas em campo seguiram as mesmas parametrizações de *hardware* utilizadas nas medições de laboratório. O ponto crítico encontrado em campo estava relacionado a cunha de referência, uma vez que o estator apresenta uma camada de pintura, por este motivo, as cunhas de interesse, que ainda pintadas pareciam apresentar o tipo de fixação adequada para serem utilizadas como referência, foram marcadas e tiveram sua camada de tinta tiradas posteriormente. Após serem realizadas medições em cada uma delas, optou-se por utilizar como referência aquela que possuía o maior harmônico fundamental, deixando as demais separadas para serem incluídas no espaço amostral composto por cunhas identificadas como soltas. A Figura 10 apresenta as medições realizadas nas cunhas do estator da UG17, sendo marcada como (R) a cunha de referência e as demais são cunhas medidas, sendo C1 e C2 consideradas fixas pelo operador da usina e C3 e C4 soltas.

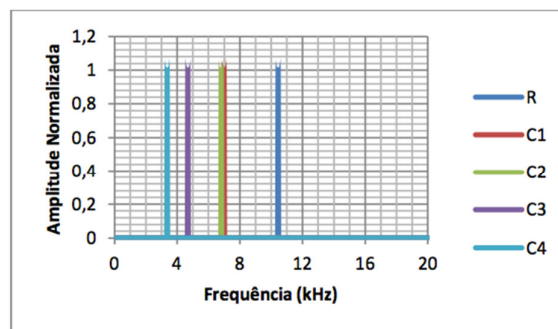


Figura 10. Valor medidos na UG17 da UHE Ilha Solteira.

Os valores medidos em campo validam a metodologia empregada, uma vez que como as medidas realizadas em laboratório, o comportamento esperado e a variação na frequência fundamental estão em consonância com a Eq. 7 encontrada na formalização matemática do problema e que demonstra que um aumento na rigidez a flexão, proveniente da adição de mais calços para uma melhor fixação altera o valor da frequência fundamental de vibração do sistema de cunhagem. Desta forma, o protótipo desenvolvido e parametrizado permite estabelecer um método de medição

quantitativo para avaliação da fixação de cunhagem, o que resultará em uma escala de fixação e uma interface amigável ao usuário.

4.3. Software de avaliação da cunhagem

Uma vez comprovado o funcionamento e consistência da metodologia, foi desenvolvida no software a interface responsável por trabalhar diretamente com o realizador do ensaio, Fig. 11, onde ao se definir a quantidade de ranhuras e cunhas a serem ensaiadas, apresenta-se uma representação matricial do estator e quando a medição é realizada, o elemento da matriz que representa o ponto medido apresenta um valor e o percentual de aperto, de modo comparativo usando como referencia uma medição realizada no momento de setup do sistema.

A escala de classificação de aperto da cunhagem é apresentada na Tab. 2, correlacionando cada cor com um percentual de aperto. Se faz necessário lembrar que por convenção, a cor amarela apresenta um resultado tolerável do aperto da cunhagem, enquanto a cor vermelha indica que o ponto avaliado deve ser recunhado, dentro dos critérios de retrabalho estabelecidos pela usina ou pelo fabricante do hidrogerador, segundo apresenta Stone et al. (2004). Estes níveis não são ajustados de forma linear, no algoritmo de classificação do *software*, a curva que rege a escala de classificação tem um caráter exponencial, uma vez que na fase experimental foram colhidas informações com montadores experientes e verificou-se que o intervalo entre uma cunha considerada fixa e outra considerada solta é bem estreito, sendo necessário uma queda exponencial para permitir um melhor ajuste do aperto da cunha com a escala estabelecida no software, conforme Fig. 11.

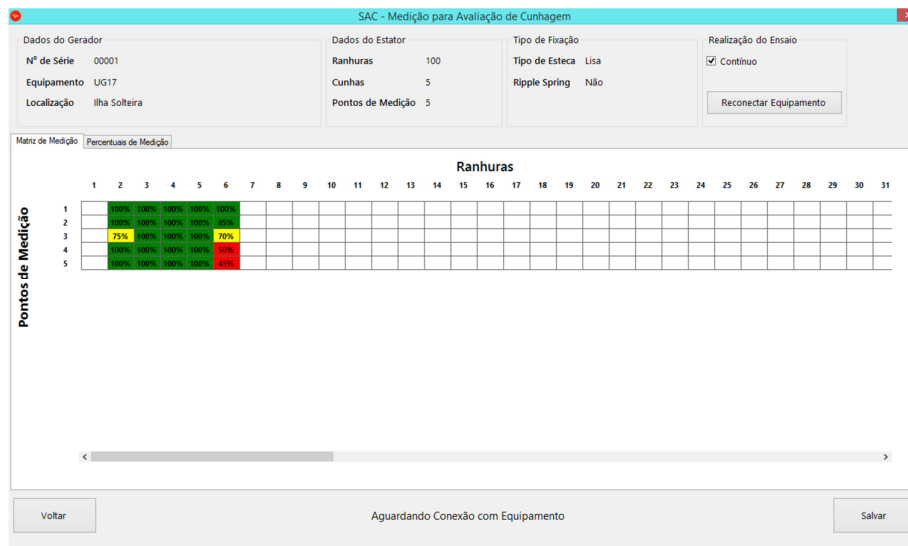


Figura 11. Interface de operação com os resultados medidos pelo hardware.

Tabela 2. Escala de avaliação da fixação do sistema de cunhagem.

Cor	Intervalo
Verde	71 – 100%
Amarelo	50 – 70%
Vermelho	Inferior a 50%

5. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar com precisão, a avaliação do grau de fixação do enrolamento estatórico de geradores, eliminando a subjetividade da avaliação anteriormente realizada, cujo método dependia essencialmente da sensibilidade e experiência do técnico da manutenção. O sistema desenvolvido trouxe maior confiabilidade nos serviços de manutenção de geradores, uma vez que problemas de má fixação de cunhas trazem grandes prejuízos e graves consequências aos equipamentos.

6. REFERÊNCIAS

- Bruetsch, R., Tari, M., Froehlich, K., Weiers, T. and Vogelsang, R., 2008, "Insulation Failure Mechanism of Power Generators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 24, Issue 4, p. 17-25.
- Burrus, C.S., 1985, "DFT/TFT and Convolution Algorithms Theory and Implementation", John Wiley & Sons, New York, USA.
- CIGRE Study Committee SC11, EG11.02, 2003, "Hydrogenerator Failures – Results of the Survey".
- Jia, Z., Peng, S., Gao, S., Guan, Z., Yang, J. and Wang, T., 2009, "Laboratory of a new stator slot wedge tester for HV Generators", IEEE Transactions on Energy, Vol. 24, No 1, p. 146-152
- Ladislau, P. and Yamaguchi, L. M., 1999, "Cunhagem de Ranhuras", Treinamento Operacional (Alstom), São Paulo, Brazil.
- Ma, X., Lu, W. and Xie, H., 2001, "Detecting loose stator wedge in large motors", Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulation Materials, p. 685-688.
- Oppenheim, A. and Nawab, S.H., 1997, "Signal and Systems", Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Peng, X., Jia, Z., Gao, S., Guan, Z., Wang, L. and Wang, T., 2008, "New method for stator wedge testing of large generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No 4, p. 933-940
- Rao, S., 2008, "Vibrações Mecânicas", 4ª ed., Pearson Prentice Hall, São Paulo, Brazil.
- Rusu-Zagar, C., Notingher, P.V. and Stancu, C., 2014, "Ageing and degradation of electrical machines insulation", Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies, Vol. 8, p. 526-546
- Silva, C.W., 1997, "Vibration and Shock Handbook", CRC Press, Boca Raton, USA.
- Stone, G., Culbert, I., Boulter, E.A. and Dhirani, H., 2004, "Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing and repair", John Wiley & Sons, New York, USA.

DEVELOPMENT OF DEVICE FOR ASSESSMENT OF FIXING STATOR BARS OF HYDROGENERATORS

Pedro Magalhães Sobrinho, sobrinho@feg.unesp.br¹

João Tadeu A dos Santos, joao.santos@belanus.com.br²

Allan Almeida Lima, allan.lima@cesp.com.br³

Manoel Dias Silva, manoel.dias@pvsolar.com.br⁴

José Hilton Carvalho, hilton@compergy.com.br⁵

¹Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá-SP, CEP: 12.516-410

²Belanus Software e Soluções Ltda, Av D Pedro I, 230, Apt 121, Vila Osasco, Osasco, SP, CEP:06083-000

³Companhia Energética de São Paulo, Avenida Nossa Senhora do Sabará, 5312, São Paulo –SP, CEP: 04447-011

⁴ATS Tecnologia de Apoio e Serviços Ltda, Comendador Francisco Pettinati, 44, São Paulo –SP, CEP:05634-010

⁵Compergy Qualidade Ltda, Rua Irmã Pia 231, São Paulo –SP, CEP:05335-050

Abstract. *This project of research and development studies the behavior of hydrogenerator wedge slot systems on a mechanical excitation, getting through their acoustic response a method for assessing the degree of fixation of the stator winding. Knowing this behavior, we have developed a measurement hardware to capture the acoustic signal and a software that uses algorithms for signal decomposition in their frequency components and subsequent classification for each setting condition. The system is aimed at removing this subjectivity in the evaluation of minting held hearing way by a technical, giving greater accuracy in diagnosis.*

Keywords: *wedge, diagnosis, hydrogenerator, insulation*