

Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

Diagnóstico de defeitos em unidades geradoras utilizando modelos matemáticos robustos

**ALDEMIR AP CAVALINI JR (1); VALDER STEFFEN JR (1); MÁRCIO LUNARDI PERIN (2);
HENRIQUE G BORDUQUI (3); JORGE VIDOZA GUILLEN (3); MARCUS SANTANA (4)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (1); COMPANHIA ENERGÉTICA RIO DAS ANTAS (2);
CPFL GERAÇÃO (3); CSC ENERGIA (4)**

RESUMO

Os defeitos que ocorrem em unidades geradoras (UGs) podem ser divididos em três grandes grupos: problemas hidráulicos, elétricos e mecânicos. Com a simples análise dos espectros medidos diretamente em UGs pode levar a detecções inconclusivas dos defeitos. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional para auxiliar na detecção de defeitos através da solução de um problema inverso associado com o modelo matemático representativo da UG. Diferentes modos de falha são inseridos no modelo através de um método de otimização. O defeito é detectado quando a resposta do modelo se mostrar similar as respostas medidas experimentalmente.

PALAVRAS-CHAVE

Diagnóstico, Máquina virtual, Incertezas, Simulação, Calibração.

1.0 - INTRODUÇÃO

As fontes de origem renovável são um foco importante de desenvolvimento no segmento de geração de energia. Tradicionalmente, a energia hidrelétrica tem fornecido energia limpa em diversos países com suficientes recursos hídricos, como o Brasil. Nesse contexto, a disponibilidade dos empreendimentos hídricos se torna um fator crítico para efetivamente reduzir custos e emissões de CO₂. Assim, os sistemas de diagnóstico desempenham um papel importante no contexto da redução de custos e da agilidade no diagnóstico de defeitos em centrais geradoras de energia.

Como mencionado, os defeitos que ocorrem em UGs podem ser divididos em três grandes grupos: problemas devido às excitações hidráulicas, problemas de origem elétrica e de origem mecânica. Com a análise dos espectros de vibração (e outros sinais monitorados; por exemplo, temperatura, tensão, entre outros), as UGs podem ser monitoradas continuamente e os defeitos que comprometem sua operação segura podem ser detectados. A simples análise dos espectros de vibração medidos diretamente no sistema pode levar a detecções inconclusivas dos defeitos.

No entanto, as técnicas de detecção de danos que associam diferentes sinais monitorados com o modelo matemático representativo do sistema (máquina virtual) parecem ser uma alternativa interessante que vem sendo cada vez mais utilizada por pesquisadores devido à possibilidade da detecção de falhas. Assim, a simulação matemático-computacional de uma UG configura-se como um recurso indispensável para o engenheiro, pois permi-

te uma compreensão abrangente acerca do comportamento dinâmico do sistema quanto às diversas variáveis de estado envolvidas, além da previsão de comportamentos mecânicos indesejados do equipamento.

Desta forma, os defeitos que afetam o bom funcionamento de UGs podem ser detectados através da solução de um problema inverso associado com o modelo matemático representativo da UG (máquina virtual representativa). Neste caso, os resultados obtidos pelo modelo são comparados com os espectros de vibração medidos na unidade. Diferentes modos de falha são inseridos no modelo através de um método de otimização. O defeito é detectado quando a resposta do modelo se mostrar similar as respostas medidas experimentalmente.

Destaca-se que os subsistemas que compõem uma UG possuem incertezas associadas à sua geometria (por exemplo, proveniente de desgastes) e regime de trabalho (por exemplo, temperatura do óleo dos mancais) que claramente afetam o desempenho do sistema. Desta forma, uma evolução natural da modelagem e otimização determinística é a implementação da análise de incertezas a fim de se obter um modelo mais representativo da UG (modelo robusto), possibilitando uma melhor avaliação dos modos de falha sobre o comportamento dinâmico da máquina. Desta forma, obtém-se uma ferramenta bastante poderosa para analisar os defeitos.

Neste contexto, uma ferramenta computacional foi construída a fim de simular o comportamento dinâmico de UGs, fazer sua calibração e o diagnóstico de diferentes defeitos. A calibração da máquina virtual da UG pode ser feita através da análise de incertezas, levando ao modelo robusto mencionado. O objetivo foi desenvolver uma ferramenta computacional para auxiliar no diagnóstico de falhas que ocorrem em UGs. O código computacional desenvolvido é baseado no modelo matemático representativo da UG (modelo completo de elementos finitos calibrado a partir de medições experimentais), combinado com uma técnica de análise de incertezas. O diagnóstico dos defeitos é realizado através da solução de um problema inverso típico, sendo que estes são detectados comparando as respostas de vibração determinadas pelo modelo representativo (máquina virtual) com aqueles medidos diretamente na UG. O sistema de auxílio ao diagnóstico desenvolvido desempenha um papel importante para a redução de custo e a agilidade na detecção de defeitos em UGs. Com o uso desta ferramenta, o tempo para a detecção dos possíveis defeitos apresentados pelo equipamento em circunstâncias de comportamento anômalo das plantas é reduzido. O sistema de monitoramento é capaz de auxiliar a equipe de manutenção, direcionando os seus colaboradores a um diagnóstico ágil e confiável.

Foram encontrados alguns trabalhos na literatura sobre estudo do comportamento dinâmico de UGs, não necessariamente associados ao monitoramento. Julliard, Santos, Coelho e Brasil Jr (2006) mostraram uma análise de CFD do escoamento em uma UG bulbo do complexo hidrelétrico de Belo Monte. Um pacote comercial foi utilizado para simular o canal de tomada d'água, rotor, difusor e tubo de sucção. Coelho e Brasil Jr (2006) obtiveram resultados qualitativos e quantitativos referente ao desenvolvimento do escoamento em tubos de sucção de UGs bulbo para momentos estatísticos de ordem 1 e 2, ou seja, perfis de velocidade média e rms. Almeida (2008) realizou o diagnóstico automático de defeitos em UGs de pequeno porte utilizando técnicas de manutenção preditiva e redes neurais artificiais. Neste caso, a metodologia mostrada foi aplicada com sucesso na detecção de desalinhamento em UGs Kaplan. Necker e Aschenbrenner (2009) utilizaram um código comercial de CFD, usando modelagem RANS para diagnosticar cavitação em uma UG do tipo bulbo.

Zhu et al. (2012) apresentaram bancadas de ensaios distintas de uma UG. Sridharan e Kuppuswamy (2013) apresentaram uma metodologia de controle para a atenuação de vibração de UGs de pequeno porte. Neste caso, o suporte de concreto foi modificado para obter uma operação suave dos grupos geradores. Novković et al. (2014) também utilizaram uma ferramenta comercial para realizar análises de CFD em uma UG bulbo. Candel et al. (2014) apresentou uma técnica para a detecção de cavitação em turbinas hidráulicas. Buaphan e Premrudee-preechacharn (2017) desenvolveram um sistema supervisor para o diagnóstico de falhas para uma UG bulbo de 8 MW. O sistema proposto é baseado na análise do histórico de operação e manutenção do equipamento.

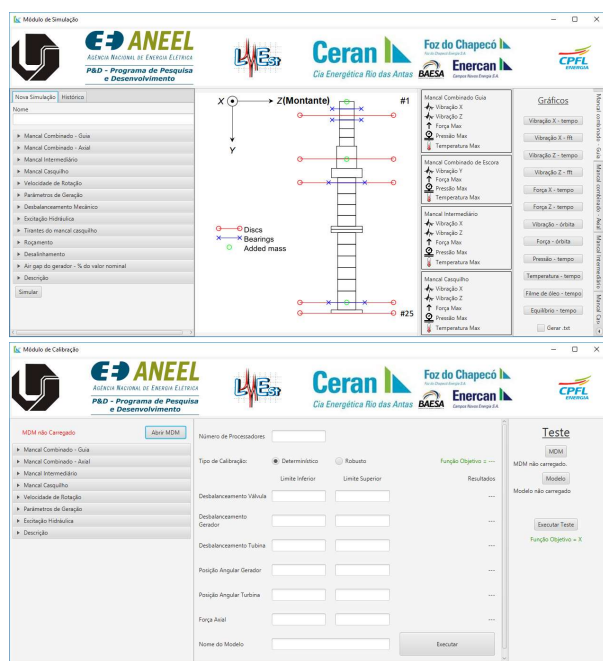
Também, não foi encontrado nenhum trabalho nas bases de dados disponíveis (INPI, ANEEL, Google Academics, Google Patents, USPTO, Derwent e Espacenet) envolvendo a elaboração e a aplicação de modelos matemáticos (máquina virtual) para o diagnóstico de falhas em UGs. Somente foram encontrados trabalhos (base ANEEL) envolvendo a modelagem determinística dos componentes de UGs. Existem outros projetos ANEEL associados ao monitoramento de UGs (ANEEL PD-0064-1004/2010; ANEEL PD-2945-0009/2009; ANEEL PD-0372-0032/2011; ANEEL PD-0061-0036/2013). É importante ressaltar que a ferramenta desenvolvida neste tra-

balho se diferencia bastante dos projetos ANEEL apresentados acima. Portanto, o trabalho aqui proposto é considerado inédito no que diz respeito ao setor elétrico.

2.0 - CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO DA ARTE

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, algumas contribuições inovadoras ao estado da arte foram obtidas: desenvolvimento de uma ferramenta de simulação, calibração e diagnóstico de defeitos dedicado para UGs; desenvolvimento de um modelo matemático de uma UG considerando os efeitos de seus diferentes componentes; validação experimental da máquina virtual construída para as UGs da usina de Castro Alves considerando duas condições típicas de operação (25 e 43 MW); modelagem computacional do escoamento turbulento, transiente, na turbina da UG, bem como caracterização de frequências de emissão de e identificação de estruturas turbulentas coerentes (estruturas helicoidais, por exemplo); modelagem computacional do escoamento turbulento, transiente, na turbina da UG, bem como caracterização de frequências de emissão de e identificação de estruturas turbulentas coerentes (estruturas helicoidais, por exemplo); representação dos modelos termohidrodinâmicos dos mancais da UG através de metamodelos (Kriging); e incorporação de diferentes defeitos na ferramenta, possibilitando o diagnóstico separado ou em conjunto dos mesmos (*quebra dos tirantes, roçamento nos mancais, desalinhamento angular e paralelo, abertura irregular do distribuidor, variação do desbalanceamento mecânico, variação da viscosidade do óleo dos mancais, variação do airgap no gerador e do desbalanceamento magnético, variação da folga radial dos mancais, defeitos combinados e detecção de frequências naturais*).

Neste sentido, foi desenvolvida uma ferramenta de simulação, calibração e diagnóstico de defeitos dedicada para UGs com interface gráfica amigável e intuitiva (software com pedido de registro em elaboração). A Fig. 1 mostra a interface gráfica construída, com detalhes acerca dos seus três módulos. Note que a ferramenta é capaz de trabalhar diretamente com o sistema de monitoramento utilizado na usina Castro Alves da CERAN.



Módulo de simulação

Módulo de calibração



Módulo de diagnóstico

FIGURA 1 – Ferramenta computacional construída.

3.0 - METODOLOGIA

O fluxograma detalhando a técnica de monitoramento construída é mostrado na Fig. 2. Trata-se do módulo de diagnóstico da ferramenta. Este sistema de auxílio de diagnóstico é iniciado medindo as respostas na UG monitorada. Desta forma, os espectros de vibração associados (FFTexp) são calculados. Os espectros de vibração também são determinados a partir da máquina virtual (modelo robusto e representativo) da UG (FFTmod), ao qual o otimizador adiciona diferentes combinações de defeitos (variação de folga radial, pontos de desgaste, rotor excêntrico, desbalanceamento, excitação hidráulica, entre outros). As respostas espectrais determinadas a partir da máquina virtual são então comparadas com as medidas na UG, utilizando uma função objetivo. Havendo convergência, o valor mínimo da função objetivo corresponderá ao defeito (ou defeitos) que possivelmente estão afetando o comportamento dinâmico da UG.

É importante ressaltar que a calibração da máquina virtual é realizada de forma semelhante ao diagnóstico, ou seja, as respostas espectrais da máquina virtual são comparadas com as respostas correspondentes medidas na UG. Contudo, no módulo de calibração, o desbalanceamento da UG é identificado através do processo de otimização. No caso do módulo de simulação, a máquina virtual pode ser diretamente simulada considerando os diferentes defeitos implementados na ferramenta. Neste caso, podem ser obtidas as respostas de vibração nos domínios do tempo e frequência, carregamentos nos mancais, forças de desbalanceamento mecânico e magnético, temperatura máxima nos mancais, pressão no filme de óleo, força hidráulica, órbitas 3D, carregamentos exercidos na UG pelos defeitos, entre outros.

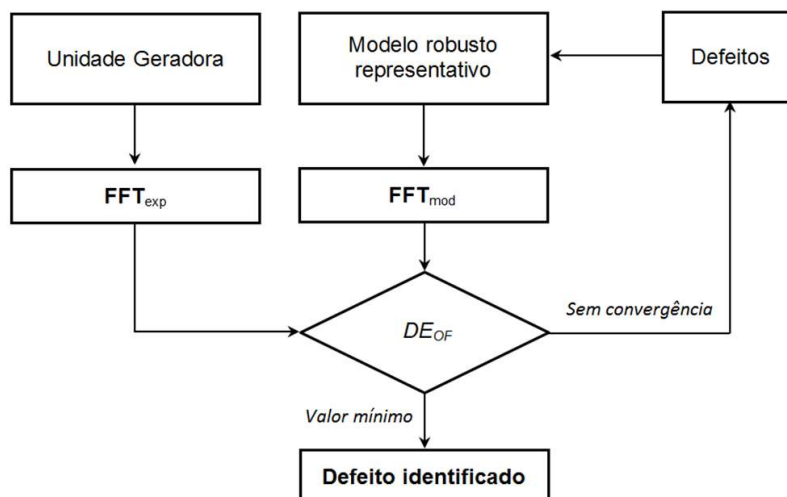


FIGURA 2 – Fluxograma acerca da técnica de monitoramento construída

Em todos os módulos (simulação, calibração e diagnóstico), a máquina virtual foi construída a partir do método dos elementos finitos. Os mancais foram representados inicialmente considerando modelos termohidrodinâmicos, sendo que metamodelos Kriging foram utilizados para o acoplamento com o modelo do eixo da UG. O desbalanceamento magnético foi determinado a partir de um modelo simplificado. Contudo, os esforços hidráulicos foram obtidos através de simulações de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que considera o problema completo (escoamento 3D). Neste caso, o efeito do selo mecânico foi desconsiderado por, devido à sua disposição na máquina, não afetar o comportamento dinâmico resultante.

4.0 – TESTE DE FUNCIONALIDADE

Diferentes testes de funcionalidade da ferramenta construída foram realizados considerando dados numéricos e experimentais. Assim, numericamente, vários modos de falha foram diagnosticados, além da determinação das frequências naturais da UG 02 da usina Castro Alves (CERAN). O teste experimental foi feito considerando as respostas de vibração desta mesma UG antes e após uma intervenção de manutenção.

4.1 Validação Numérica

Neste caso, os seguintes defeitos foram avaliados: quebra dos tirantes; roçamento nos mancais; desalinhamento angular e paralelo; abertura irregular do distribuidor; variação do desbalanceamento mecânico; variação da viscosidade do óleo dos mancais; variação do gap entre o gerador e o estator (desbalanceamento magnético); variação da folga radial do mancal guia do gerador; e detecção de frequências naturais. Contudo, somente alguns deles serão apresentados neste trabalho. É importante ressaltar que as validações que serão apresentadas foram realizadas a partir da máquina virtual da UG 02 da usina Castro Alves (CERAN).

Quebra dos tirantes

A Fig. 3 mostra as respostas de vibração da máquina virtual sem e com defeito. Para simular a quebra dos tirantes, as rigidezes usadas para representar na máquina virtual o suporte do mancal guia da turbina foram modificadas. Assim, as rigidezes ao longo das direções X e Z foram: $k_x = 1 \times 10^9$ N/m e $k_z = 1 \times 10^8$ N/m. Considerando 5×10^7 N/m $\leq k_x \leq 5 \times 10^9$ N/m e 5×10^7 N/m $\leq k_z \leq 5 \times 10^9$ N/m como espaço de projeto, os seguintes resultados foram obtidos:

$$k_x^* = 1000000000,000049800000 \text{ N/m} \quad k_z^* = 100000000,000007180000 \text{ N/m}$$

Note que os valores ótimos são idênticos aos adotados para simular o defeito.

Roçamento nos mancais

A Fig. 4 mostra as respostas de vibração da máquina virtual sem e com defeito.

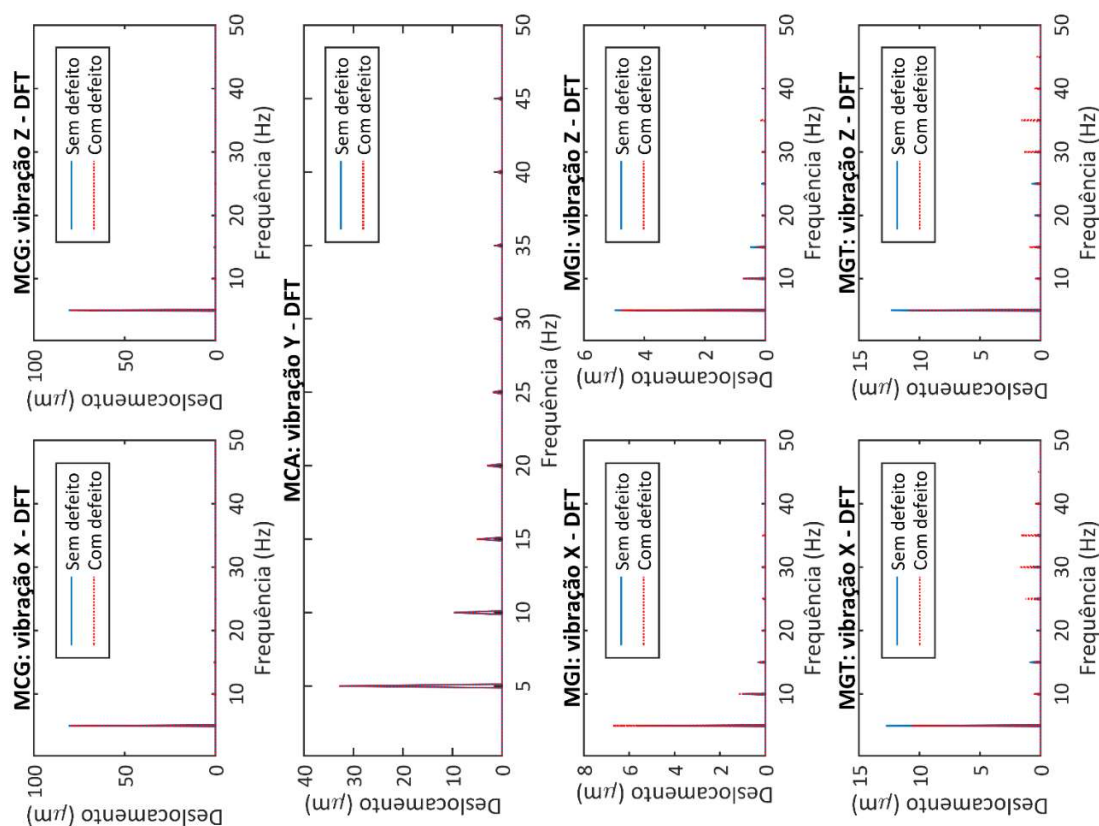


FIGURA 3 – Respostas de vibração da UG / Quebra dos tirantes

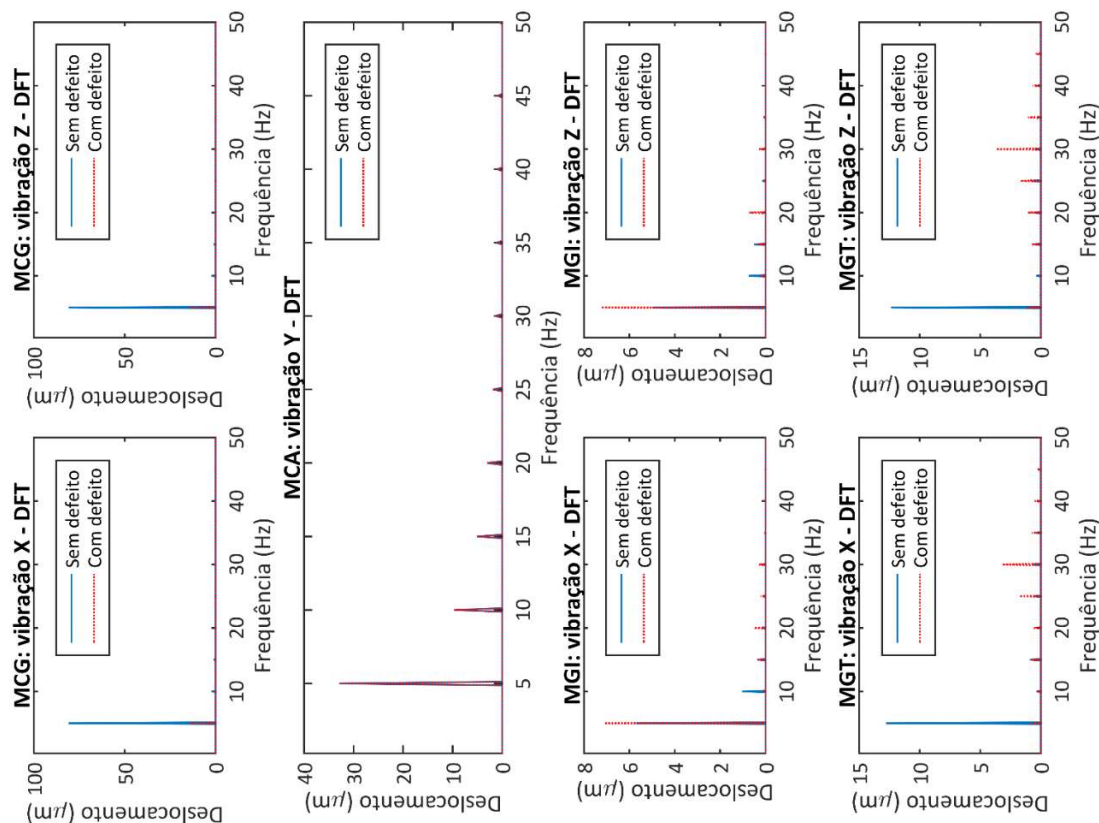


FIGURA 4 – Respostas de vibração da UG / Roçamento nos mancais

Para simular o roçamento nos mancais, a rigidez do contato usada na máquina virtual foi incluída. Foi considerando o contato sempre ocorrendo durante a simulação. Assim, a rigidez do contato foi adotada como: $k_c = 5 \times 10^9$ N/m. Note que o defeito aplicado resultou em modificações mais significantes nas respostas de vibração da UG. Considerando $1 \times 10^5 \text{ N/m} \leq k_c \leq 1 \times 10^{10} \text{ N/m}$ como espaço de projeto, o seguinte resultado foi obtido:

$$k_c^* = 5000000000,000056300000 \text{ N/m.}$$

Novamente, note que o valor ótimo é idêntico ao adotado para simular o defeito.

Desalinhamento angular e paralelo

A Fig. 5 mostra as respostas de vibração da máquina virtual sem e com defeito.

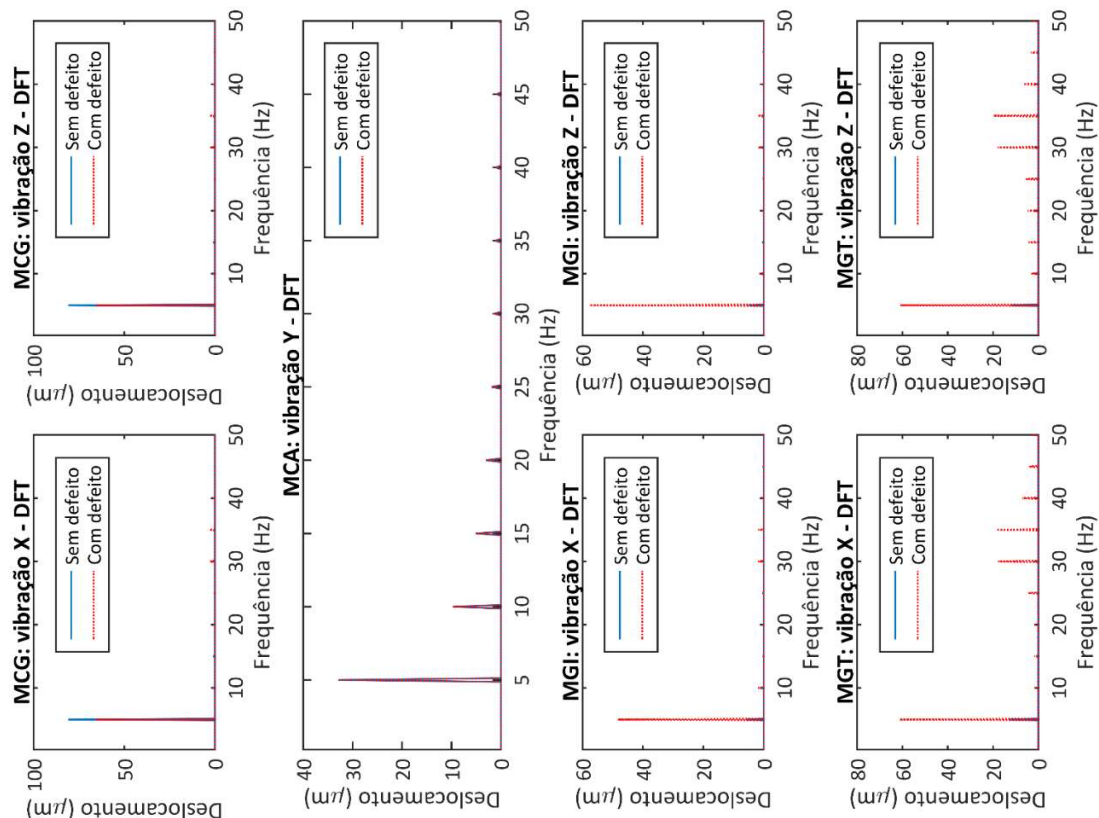


FIGURA 5 – Respostas de vibração da UG / Desalinhamento angular e paralelo

Para simular os desalinhamentos angular e paralelo na UG, a distância do desalinhamento e os ângulos dos desalinhamentos angular e paralelo foram modificados. Assim, foram adotados: $e = 1.2 \times 10^{-6}$ m, $A = 45$ graus e $P = 135$ graus, respectivamente. Considerando $0,1 \times 10^{-6}$ m $\leq e \leq 2 \times 10^{-6}$ m, 0 graus $\leq A \leq 180$ graus e 0 graus $\leq P \leq 180$ graus como espaço de projeto, os seguintes resultados foram obtidos:

$$e^* = 1,20 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$A^* = 44,99 \text{ graus}$$

$$P^* = 134,99 \text{ graus}$$

4.2 Validação Experimental

Neste caso, foi avaliada a condição estrutural da UG antes e após uma troca de óleo do mancal casquilho realizada no ano de 2014 devido a uma contaminação por água. A Fig. 6 mostra as respostas de vibração obtidas na calibração da máquina virtual, considerando as respostas de vibração experimentais da UG após a troca do óleo do mancal guia da turbina. Note que as respostas de vibração da máquina virtual estão próximas das respostas experimentais.

É importante ressaltar que o módulo de calibração ajusta somente a componente 1X de vibração (ajuste do desbalanceamento). Os outros harmônicos que aparecem nas respostas experimentais podem ser associados com defeitos presentes na UG.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

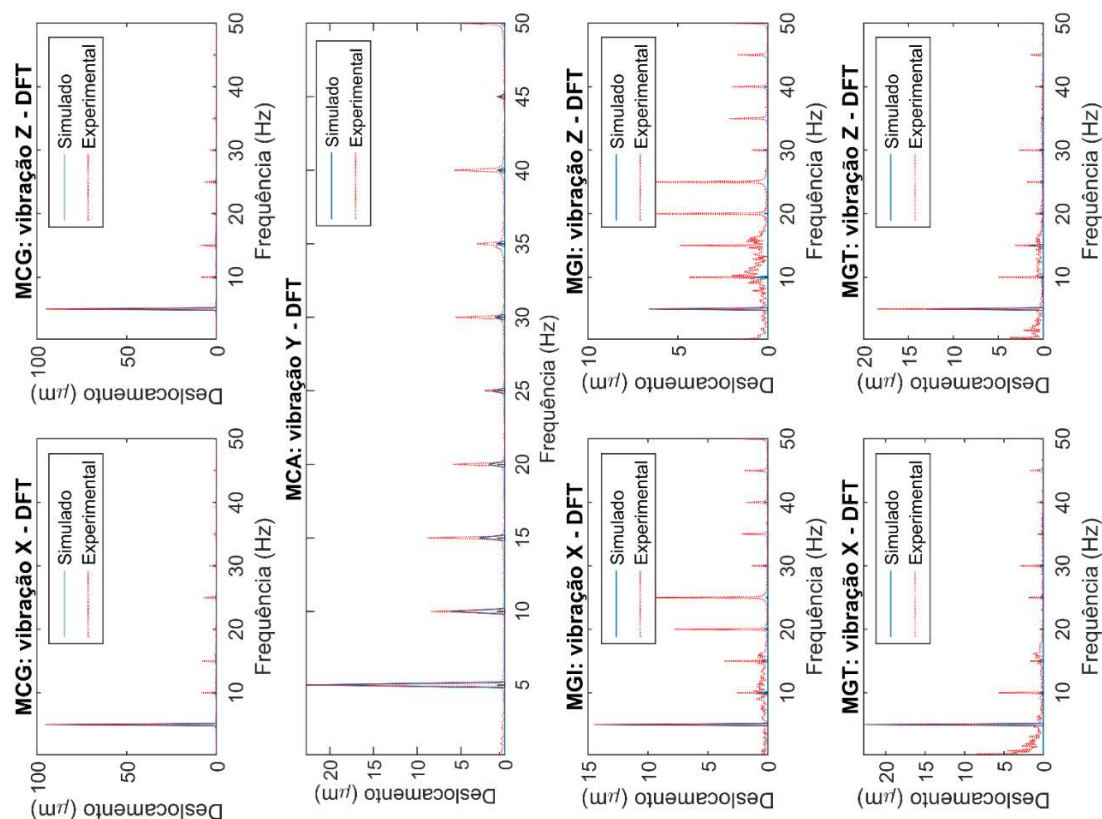


FIGURA 6 – Respostas de vibração da UG / Contaminação com água

Para o diagnóstico da contaminação por água no óleo do mancal casquilho, é esperado que apenas a variação da sua viscosidade seja identificada pelo módulo de diagnóstico da ferramenta construída. Contudo, devido a presença de diferentes harmônicos nas respostas de vibração experimentais medidas após a correção deste defeito, pode ser verificado que mais problemas devam estar afetando o funcionamento da UG.

Neste contexto, o diagnóstico foi realizado considerando os seguintes defeitos e limites: desalinhamento angular e paralelo ($1 \times 10^{-6} \text{ m} \leq e \leq 2 \times 10^{-6} \text{ m}$; $0 \text{ graus} \leq A \leq 180 \text{ graus}$; $0 \text{ graus} \leq P \leq 180 \text{ graus}$); abertura irregular do distribuidor ($-20 \% \leq F_x \leq 0 \%$; $-50 \% \leq F_z \leq -30 \%$); variação da viscosidade do óleo dos mancais ($-60 \% \leq \mu_{\text{mancal com. bin.}} \leq -40 \%$; $-35 \% \leq \mu_{\text{mancal intermediário}} \leq -15 \%$; $-45 \% \leq \mu_{\text{mancal casquilho}} \leq -25 \%$); variação do gap entre o gerador e o estator (desbalanceamento magnético; $25 \% \leq \text{gap na direção X} \leq 75 \%$; $75 \% \leq \text{gap na direção Z} \leq 100 \%$; $1 \leq \text{coeficiente de Carter} \leq 2$); variação da folga radial do mancal combinado guia ($-60 \mu\text{m} \leq \text{folga radial na direção X} \leq 0 \mu\text{m}$; $0 \mu\text{m} \leq \text{folga radial na direção Z} \leq 60 \mu\text{m}$; $0 \text{ graus} \leq \text{inclinação} \leq 90 \text{ graus}$); variação da folga radial do mancal intermediário ($-60 \mu\text{m} \leq \text{folga radial na direção X} \leq 0 \mu\text{m}$; $0 \mu\text{m} \leq \text{folga radial na direção Z} \leq 60 \mu\text{m}$; $0 \text{ graus} \leq \text{inclinação} \leq 90 \text{ graus}$); e variação da folga radial do mancal casquilho ($-50 \mu\text{m} \leq \text{folga radial} \leq 0 \mu\text{m}$).

Os limites descritos foram determinados a partir de vários procedimentos de diagnóstico, onde seus valores puderam ser refinados ao longo das análises realizadas. A Fig. 7 mostra as respostas de vibração encontradas no final do diagnóstico. Note que a componente de vibração 1X não foi representada de maneira satisfatória pelo diagnóstico realizado. Contudo, o desbalanceamento não foi considerado como variável de busca neste diagnóstico. Assim, esta mudança é esperada. O mesmo vale para a vibração axial, que está intimamente ligada com a vibração lateral da UG e, conseqüentemente, da máquina virtual. No entanto, observe que os harmônicos superiores de vibração foram melhor representados com o processo de diagnóstico (diferentemente do que foi observado nos resultados obtidos para a calibração da máquina virtual). Isto é um indicativo de que o diagnóstico está sendo realizado de forma satisfatória.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Os valores dos parâmetros encontrados são mostrados a seguir: desalinhamento angular e paralelo ($e = 1,11 \times 10^{-6}$ m; $A = 179,83$ graus; $P = 13,32$ graus); abertura irregular do distribuidor ($F_x = -6,37$ %; $F_z = -40,01$ %); variação da viscosidade do óleo dos mancais ($\mu_{\text{mancal combinado}} = -60$ %; $\mu_{\text{mancal intermediário}} = -33,83$ %; $\mu_{\text{mancal casquilho}} = -36,48$ %); variação do *air gap* entre o gerador e o estator (desbalanceamento magnético; *gap na direção X* = 25 %; *gap na direção Z* = 97,24 %; *coeficiente de Carter* = 1,99); variação da folga radial do mancal combinado guia (*folga radial na direção X* = -60 μm ; *folga radial na direção Z* = 58,27 μm ; *inclinação* = 89,70 graus); variação da folga radial do mancal intermediário (*folga radial na direção X* = -60 μm ; *folga radial na direção Z* = 37 μm ; *inclinação* = 89,67 graus); e variação da folga radial do mancal casquilho (*folga radial* = -22 μm).

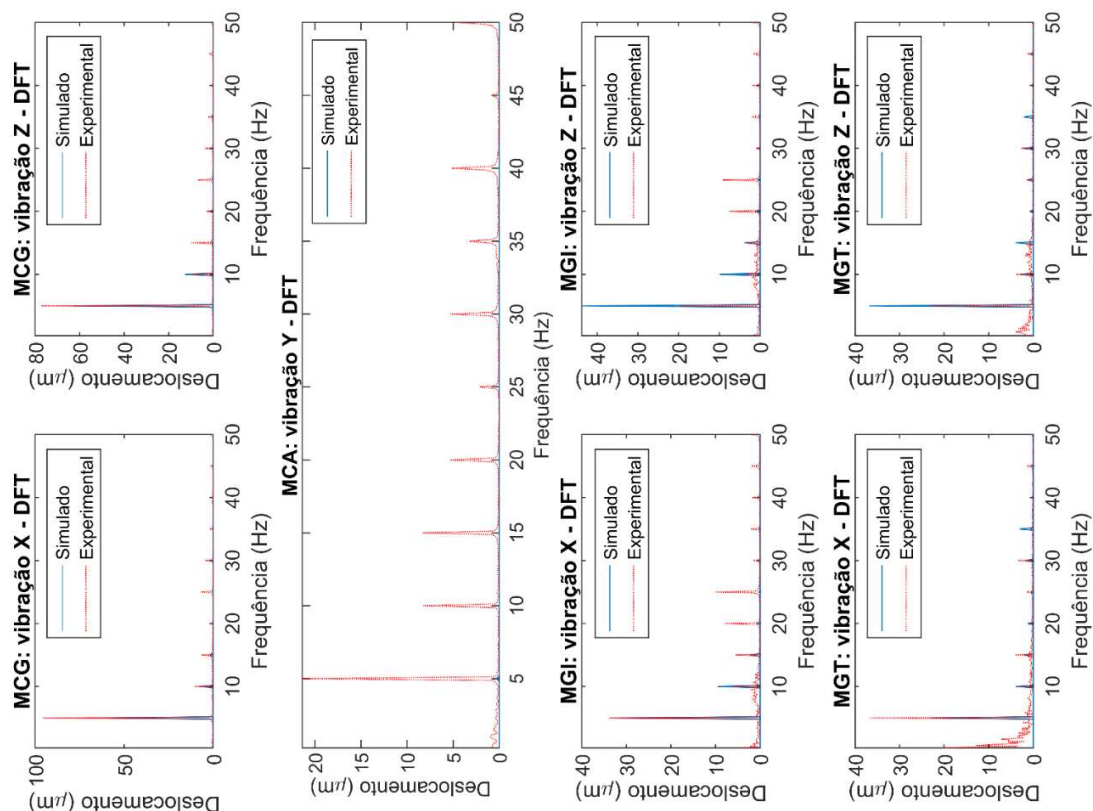


FIGURA 7 – Respostas de vibração da UG / Diagnóstico realizado

O módulo de diagnóstico é capaz de identificar os defeitos presentes na UG nos limites considerados. Assim, defeitos fora dos intervalos estabelecidos não podem ser identificados corretamente e atrapalham a identificação exata dos valores dos parâmetros associados aos defeitos presentes na máquina virtual. De qualquer forma, o módulo de diagnóstico da ferramenta construída deve ser utilizado como um indicativo de defeito (ou defeitos).

A Fig. 8 mostra a variação de cada um dos defeitos considerados no diagnóstico em relação aos seus valores nominais. Veja que o desalinhamento, o aumento da folga nos mancais, a variação da viscosidade do óleo (ou temperatura) e o *air gap* irregular são os defeitos mais importantes de acordo com o módulo de diagnóstico.

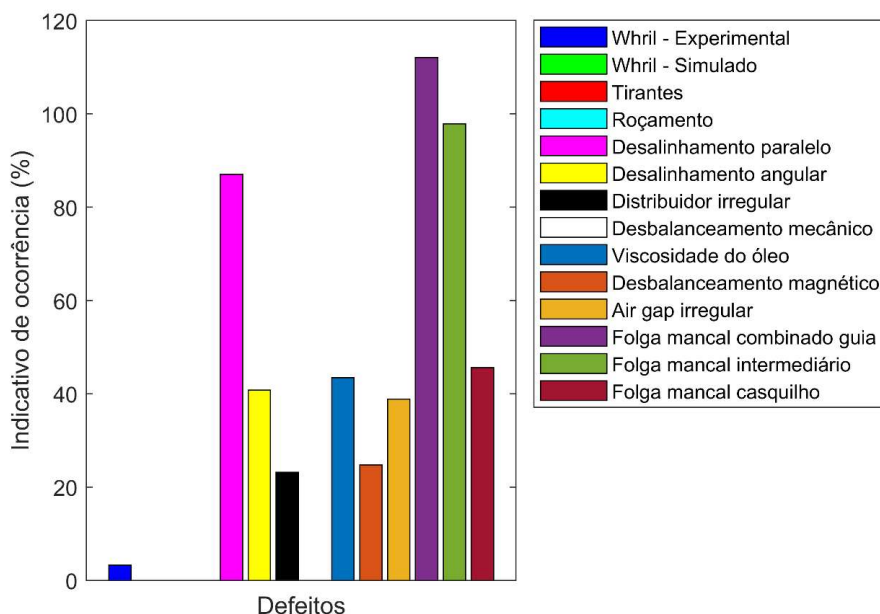


FIGURA 8 – Variação de cada um dos defeitos considerados no diagnóstico

5.0 - CONCLUSÃO

Uma ferramenta dedicada para a simulação, calibração e diagnóstico de defeitos em UGs foi apresentada neste trabalho. Os resultados obtidos demonstram a efetividade do sistema desenvolvido. Espera-se que a ferramenta desenvolvida contribua na otimização das atividades de manutenção, contando com planejamentos mais assertivos através do diagnóstico das falhas. Neste sentido, é esperada a diminuição da necessidade de paradas programadas de manutenção. A ferramenta construída pode ser usada como um indicador da condição estrutural da UG dentro dos limites da máquina virtual e modelos de defeitos adotados.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento brasileiras CAPES, CNPq (INCT-EIE) e FAPEMIG pelo apoio financeiro a este trabalho de pesquisa. Os autores também agradecem o apoio financeiro do projeto de P&D *Modelagem Robusta para o Diagnóstico de Defeitos em Unidades Geradoras* (02476-3108/2016), realizado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia e com o financiamento das empresas CERAN, BAESA, ENERCAN, Foz do Chapecó e CPFL Energia.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.C.L.. Diagnóstico automático de falhas em turbinas hidráulicas de pequenas centrais hidroelétricas utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2008.
- BUAPHAN, I.; PREMRUDEEPREECHACHAM, S.. Development of expert system for fault diagnosis of an 8-MW bulb turbine downstream irrigation hydro power plant. In: IYCE 2017, p. 1-6, 2017, International Youth Conference on Energy (IYCE), Hungary. Anais.

- CANDEL, I.; BUNEA, F.; DUNCA, G.; BUCUR, D.M.; IOANA, C.; REEB, B.; CIOCAN, G.D.. Detection of cavitation vortex in hydraulic turbines using acoustic techniques. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 22, n. 1, p. 1-8, 2014.
- JULLIARD, J.; SANTOS, C.C.B.; COELHO, J.G.; BRASIL JR, A.C.P.. Simulação numérica de turbinas hidráulicas tipo bulbo. In: POSMEC 2016, p. 1-10, 2006, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. Anais.
- NECKER, J.; ASCHENBRENNER, T.; MOSER, W.. Cavitation in a bulb turbine. In: CAV 2009, p. 1-7, 2009, International Symposium on Cavitation (CAV), USA. Anais.
- NOVKOVIC, D.M.; LECIC, M.R.; BURAZER, J.M.; RANDENKOVIC, D.R.. Flow simulations in a small bulb turbine using two-equation turbulence models. FME Transactions, v. 42, n. 1, p. 118-127, 2014.
- SRIDHARAN, P.; KUPPUSWAMY, N.. Mitigation of vibration on bulb turbine in small hydro electric power plants. International Journal of Engineering and Technology, v. 5, n. 6, p. 4968-4979, 2014.
- ZHU, L.; ZHANG, H.P.; ZHANG, J.G.; MENG, X.C.; LU, L.. Performance of a bulb turbine suitable for low prototype head model test and transient numerical simulation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 15, n. 1, p. 1-8, 2012.

8.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Mecânico graduado pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" campus de Ilha Solteira (UNESP/FEIS) e Mestre pela mesma instituição na área de Mecânica dos Sólidos e Projetos. Possui Doutorado em Engenharia Mecânica, igualmente na área de Mecânica dos Sólidos e Projetos, pela Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC/UFU), tendo como foco a atenuação de vibrações e o monitoramento da integridade estrutural de máquinas rotativas. Atualmente, trabalha como Professor Assistente na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Nos últimos anos vem realizando pesquisas voltadas para os seguintes temas: dinâmica de máquinas rotativas, materiais inteligentes, análise modal, identificação e ajuste de modelos, técnicas de detecção, localização e quantificação de danos, solução de problemas inversos através de métodos pseudo-aleatórios, análise de sinais e análise de incertezas.