

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM UM HIDROGERADOR DE GRANDE PORTE¹

Tiago Kosak²
 Isaura Zanini Mergen³
 Fabiano Faller⁴
 Daiane Carla Casonatto⁵

RESUMO

A análise de vibração se mostra muito importante no estudo da saúde operacional de um hidrogerador e outros vários equipamentos mecânicos. Com isso, a avaliação de falhas se torna mais rápida e segura, evitando paradas inesperadas destes equipamentos. Neste trabalho, foi realizado um estudo de campo com o objetivo de avaliar os níveis de vibração de um hidrogerador de grande porte com potência de 290 MW, e compará-los com a norma *ISO 7919: Mechanical vibration -Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Part 5 – Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*. Foi realizada a avaliação da vibração através do *software* de monitoramento específico instalado na usina hidrelétrica, e comprovado pelo menos uma causa da vibração com verificação através de medições em campo. Como conclusão deste estudo, puderam ser elencadas as possíveis falhas, como folga de mancais, desbalanceamento mecânico, desalinhamentos, entre outras, que ocasionam o elevado nível de vibração em um hidrogerador, assim como sugerir meios de correção.

Palavras-chave: Análise. Hidrogerador. Vibração.

1 INTRODUÇÃO

Em nosso país, a produção de energia elétrica por usinas hidrelétricas é de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico das indústrias e população em geral. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019) aproximadamente 60,75% da energia do Brasil é resultante do aproveitamento de recursos hídricos (água oriunda de rios e lagos) existente no território nacional. Nesse contexto, pode-se destacar o papel fundamental dos equipamentos que realizam a conversão desses recursos hídricos, nomeados de hidrogeradores.

Ao se tratar do funcionamento de hidrogeradores de grande porte, destacam-se as características específicas do modo de falhas indicada em cada equipamento. Dois equipamentos similares ou com projetos praticamente iguais e na mesma instalação, podem

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica. E-mail tiagokosak@hotmail.com.

³ UCEFF Faculdades. Docente do Curso de Engenharia Mecânica. E-mail isauramergen@hotmail.com.

⁴ UCEFF Faculdades. Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: fabiano.faller@uceff.edu.br.

⁵ Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: daianecasonatto@uceff.edu.br.

apresentar falhas completamente divergentes (BRITO JUNIOR, 2017). Um exemplo é a vibração apresentada nesses equipamentos.

Para a adequada operação de um hidrogerador de grande porte, o nível de vibração apresentado deve conter valores aceitáveis, estabelecidos na norma ISO 7919-5 (*Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria*). Através de um sistema de supervisão e monitoramento contínuo desses equipamentos é possível identificar o comportamento vibracional em várias condições de operação, e acompanhar a evolução de um provável defeito relacionado a esse tema. A identificação de um elevado grau de vibração dessa máquina gera ou resulta em um grande risco a integridade da estrutura.

A vibração mecânica de um equipamento ou conjunto de equipamentos é um dos principais fatores de falha em máquinas, desse modo, o seu monitoramento e a análise constante dos dados tornam-se de grande importância no meio industrial mecânico. Tratando-se de hidrogeradores de grande porte, ainda que operem em uma baixa velocidade de rotação, podem encontrar-se níveis de vibração excessivos, tornando o seu funcionamento impossibilitado ou restrito em determinadas faixas de operação.

Se projetados de forma adequada, hidrogeradores de grande porte têm elevada resistência mecânica e uma baixa taxa de falhas. Contudo, estes equipamentos em sua maioria interligados ao SIN (Sistema Interligado Nacional) já operam de forma quase ininterrupta há vários anos, o que aumenta a possibilidade do surgimento de defeitos e de eventuais de falhas. Outro fator relevante é o fato de que hidrogeradores, são máquinas construídas sob medida para determinadas especificações de vazão volumétrica e queda manométrica, por isso, o tempo de manutenção e reparo de falhas dessas máquinas pode chegar a vários meses ou anos, resultando em perdas financeiras elevadas. Portanto, diante dos fatores explanados, questiona-se: **quais as principais causas para um elevado nível de vibração de um hidrogerador de grande porte?**

Face ao exposto, este trabalho tem por objetivo geral analisar as causas do elevado nível de vibração de um hidrogerador de grande porte com potência de 290MW, e comparar estes valores aos limites de tolerância determinados pela norma *International Organization for Standardization* (ISO), identificar as causas do elevado nível de vibração neste equipamento, bem como propor formas de correção das possíveis falhas apresentadas.

Dessa forma, o estudo sobre a vibração destes equipamentos mostra-se essencial para a engenharia e justifica-se por permitir um maior grau conhecimento sobre sua operação, podendo ser melhorados, ganhando rendimento e disponibilidade. Na engenharia de

manutenção a avaliação prematura de falhas, através da análise de vibração, promove a ação antecipada para correção dos defeitos, evitando perdas em consequências de paradas não programadas e torna-se indispensável para avaliação do estado de saúde operacional dos equipamentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HIDROGERADOR

Um hidrogerador, ou também chamado de unidade geradora, pode ser definido como o conjunto que é constituído por um gerador elétrico síncrono trifásico conjugado a máquina motriz (ex. turbina hidráulica) e respectivos equipamentos, destinado à conversão de energia hidráulica em energia elétrica (ANEEL, 2008). Os principais componentes que compõem um hidrogerador são expostos no Quadro 1.

Quadro 01 – Principais componentes de um hidrogerador

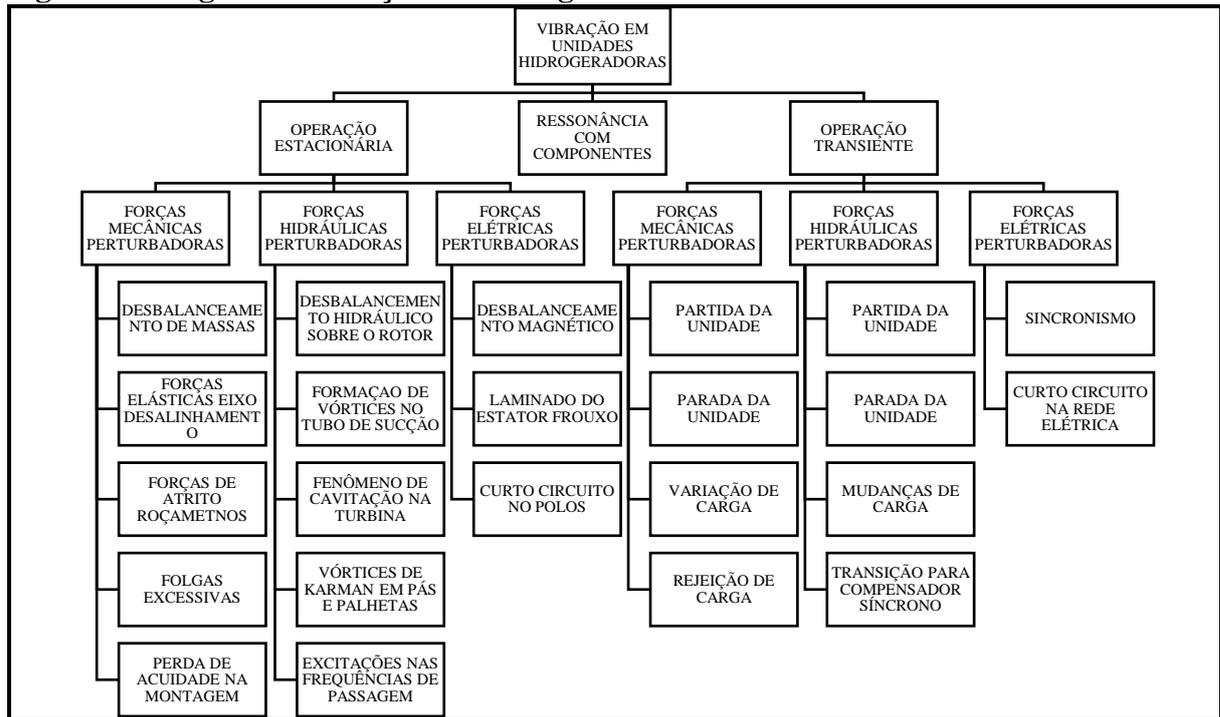
<p>Turbinas hidráulicas</p> 	<p>As turbinas hidráulicas são máquinas motoras que transformam a energia cinética da água em movimento, em energia mecânica de rotação, que move um gerador elétrico. Na área de engenharia existem vários projetos de turbinas hidráulicas adequadas às características específicas de cada projeto, como vazão e altura da queda d'água disponível. As turbinas hidráulicas são divididas em dois grandes grupos, turbinas de ação (Turbinas Pelton) e turbinas de reação (Turbinas Francis, Kaplan e Bulbo).</p>
<p>Eixo</p> 	<p>O acoplamento da turbina hidráulica com o gerador síncrono é realizado por um eixo, que transmite a energia mecânica rotacional da turbina hidráulica para o gerador síncrono. Além da junção entre turbina e gerador, o eixo é empregado para a montagem dos mancais radiais e axiais das unidades geradoras e também são determinados e instalados os principais pontos de monitoramento de vibração do equipamento.</p>

<p style="text-align: center;">Gerador síncrono</p> 	<p>O Gerador consiste basicamente no conjunto mecânico rotor-estator, que realiza a conversão da energia mecânica de rotação da turbina em energia elétrica. O gerador elétrico tem seu rotor acionado pelo acoplamento direto com a turbina, desta maneira o torque é transmitido acionando o conjunto. Os geradores aplicados em unidades geradoras são síncronos, ou seja, a velocidade de rotação é constante com a frequência da rede elétrica.</p>
<p style="text-align: center;">Mancais</p> 	<p>Os mancais são elementos mecânicos responsáveis por suportar os esforços submetidos das partes rotativas e da parte fixa das máquinas. Outra função importante dos mancais é permitir o movimento rotativo existente entre dois componentes do equipamento, além de serem utilizados na indústria, estando presente, praticamente, em todo tipo de maquinário que possua algum movimento de deslocamento linear, rotativo ou ambos.</p>

Fonte: Henn (2012), Magnoli (2005), Mott (2015), Samed (2017) e Tralli (2018).

2.2 VIBRAÇÃO EM HIDROGERADORES

Conforme abordado em sua obra *Vibration of hydro units in hydroelectric power plants*, Vladislavlev (1979) destaca que a vibração em hidrogeradores pode ter como causa as forças de perturbação tanto hidráulicas, como mecânicas e elétricas. Na Figura 1, é apresentada a árvore das principais falhas em hidrogeradores, adaptada de Freire (2006). É possível observar que a vibração varia tanto em regimes de operação estacionária, quanto em regimes de transitórios do sistema. Destaca-se também a vibração causada pela ressonância com componentes, onde as forças de excitação coincidem com a frequência natural do sistema.

Figura 1 - Origem da vibração em hidrogeradores

Fonte: Adaptada de Freire (2006).

Todas estas forças de perturbação e ressonância podem surgir separadamente, associadas ou de forma combinada. Vibrações com forças mais intensas principalmente em regime permanente de operação são, em geral, de uma condição periódica, por este fato, cada força pode ser identificada por um domínio de frequência específico (FREIRE, 2006).

2.2.1 Vibrações de origem mecânica

Os componentes mecânicos são destacados como os principais causadores de vibração em um equipamento. Tratando-se de hidrogeradores de grande porte, as forças mecânicas de perturbação são consideradas como fator da origem de excesso de vibração no mesmo. Vladislavlev (1979) aponta que as vibrações de origem mecânica são causadas pelo desequilíbrio de massas rotativas, forças elásticas no eixo do hidrogerador, forças de atrito, folgas excessivas e perda de acuidade na montagem.

O desequilíbrio de massas rotativas, também conhecido como desbalanceamento mecânico, é considerado uma causa comum e frequente da vibração em hidrogeradores. O desbalanceamento tem sua origem devido a problemas no processo de fabricação, construção e montagem do hidrogerador, onde massas residuais excêntricas ao eixo geométrico geram esforços dinâmicos que se propagam pelo sistema (MAZARINI E OLIVEIRA, 2009). A

correção do desbalanceamento mecânico é realizada efetuando-se inclusão ou retirada de massas em pontos específicos do rotor de forma a corrigir a excentricidade. Em um espectro de frequência com propriedades de um desbalanceamento mecânico, identifica-se que a frequência predominante é igual ao valor de 1X a rotação da máquina (referência).

As forças elásticas no eixo são ocasionadas devido ao desalinhamento dos acoplamentos ou, também podem ser geradas por uma alteração da linha de centro do eixo, tornando-o excêntrico ao restante do conjunto. O desalinhamento (paralelo ou angular) do eixo produz esforços nos mancais de guia e, conseqüentemente, um aumento da vibração. O desalinhamento angular pode ser caracterizado quando as linhas do centro do eixo entre os acoplamentos formam um ângulo, o espectro de vibração axial caracteriza-se 1X e 2X, e pode alcançar até 3X a rotação do eixo. Já no desalinhamento paralelo as linhas de centro do eixo são equidistantes em todos os pontos, não coincidindo entre si. Na análise do espectro de frequência de um desalinhamento exclusivamente paralelo, verifica-se que a frequência que predomina é 2X a rotação do eixo (SILVA, 2013).

Silva (2013) relata que as folgas excessivas dos mancais são consequência do desgaste avançado das sapatas de deslizamento do hidrogerador, aumentando a folga projetada entre as sapatas e o eixo. O aumento da folga reduz a capacidade de absorção de forças dinâmicas, tornando possível que a menor perturbação mecânica provoque elevados níveis de vibração. A análise do espectro de vibração de uma folga radial mostra excitações em harmônicos de 1X, 2X, 3X, 4X e até superiores a rotação do eixo.

2.2.2 Vibrações de origem hidráulica

As vibrações correspondentes a forças hidráulicas de excitação têm sua origem no fluxo de massa do fluido que passa pelo rotor da turbina, criando ruídos e excitações características hidráulicas. Conforme a árvore de falhas adaptada por Freire (2006), Vladislavlev (1979) as vibrações de origem hidráulica ocorrem principalmente por desbalanceamento hidráulico, formação de vórtices, fenômeno de cavitação, vórtices de Karman e excitações na frequência de passagem.

A cavitação é uma das principais causas do surgimento de vibrações de origem hidráulica e ocorre devido a implosões de bolhas de ar que geram impactos repetitivos no rotor da turbina acarretando em vibrações aleatórias e em alta frequência (SILVA, 2013).

2.2.3 Vibrações de origem elétrica

A vibração em motores e geradores também pode ter origem relacionada a problemas elétricos do sistema. Em hidrogeradores as forças de perturbação elétrica têm origem no rotor do gerador, onde se combinam e propagam-se para demais elementos do sistema, variando conforme a estrutura construtiva do equipamento (DE ALMEIDA, 2008).

As falhas por vibrações com origem elétrica podem ser relativas ao desbalanceamento magnético do rotor, ao laminado do estator frouxo e ao curto circuito nos polos (VLADISLAVLEV 1979). De forma consoante às originárias de elementos mecânicos, as vibrações de origem elétrica têm características específicas em seu espectro de frequência, relacionadas diretamente a velocidade de rotação, tornando a análise mais eficaz.

De Almeida (2008) destaca que o desbalanceamento magnético é resultante da excentricidade entre rotor e estator (variação de entreferro), evidenciando que a atração magnética entre o conjunto, combinada com a falha construtiva, produz excitações de vibrações. Para este determinado caso de distribuição desigual do campo magnético, verifica-se que o espectro de vibração radial predominante é igual a 1X a rotação da máquina.

Outra falha comum é o curto circuito dos polos do rotor, falha que termina por acarretar na distribuição não uniforme da indução magnética, e observado deste ponto, é similar ao desbalanceamento magnético sendo identificada pelo espectro de frequência radial em 1X a rotação da máquina e seus harmônicos (FREIRE, 2006).

2.3 INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO

Os sistemas de monitoramento constituem-se em uma série de sensores próprios para cada aplicação e coleta de dados. Para a correta medição torna-se de grande importância a especificação de todos os instrumentos de monitoramento de vibração. Nos itens a seguir serão apresentados os principais instrumentos aplicados para a medição de vibração em hidrogeradores.

2.3.1 Sensores de proximidade

Os sensores de proximidade medem o deslocamento existente entre a ponta do sensor e a ponta do eixo do rotor, transmitindo para o sistema de monitoramento o valor dessa medição.

Existem dois grandes grupos principais de sensores, os sensores de proximidade indutivos e os sensores de proximidade capacitivos.

Para detecção da posição ou presença de materiais são empregados sensores indutivos sem contato. Estes dispositivos utilizam a variação de um campo eletromagnético emitido na extremidade do sensor para a identificação e medição da distância do objeto a ser verificado. O sensor de proximidade é composto por uma bobina, um oscilador, um circuito de disparo e um circuito de saída do sinal, respectivamente nesta ordem (FRANCHI e CAMARGO, 2009).

Como destaca Thomazini & Albuquerque (2017), quando um objeto metálico se aproxima do sensor, a bobina induz um campo magnético variável, surgindo, desta maneira, correntes elétricas no objeto, acarretando perdas de energia no circuito oscilador. O circuito de disparo detecta então as mudanças da oscilação e converte em sinais de correntes bem estabelecidas para o circuito de saída.

Apesar da forma construtiva similar, sensores de proximidade indutivo e de proximidade capacitivos possuem uma grande diferença em seu princípio de operação. O sensor capacitivo também dispõe de um oscilador interno, que na ausência de um material próximo a sua extremidade permanece inativo (FRANCHI e CAMARGO, 2009).

O alvo próximo ao sensor varia a capacitância do sensor instalada na ponta do instrumento de medição, que depois de ter ativado o oscilador, o mesmo manda sinais para o restante do sistema (THOMAZINI E ALBUQUERQUE,2017).

2.3.2 Acelerômetros

Um acelerômetro pode ser especificado como um instrumento que executa a medição de aceleração de um sistema vibratório (RAO, 2008). Acelerômetros são largamente utilizados em equipamentos de análise de vibração, além de serem também aplicados para a detecção de terremotos. Este sensor é constituído basicamente de uma massa sísmica, um cristal piezelétrico, e uma estrutura construtiva para fixar e abrigar seus componentes.

Seu princípio de medição e operação consiste na 2ª Lei de Newton, isto é, a força aplicada é igual ao produto entre a massa e a aceleração do corpo. Desse modo a informação de vibração é diretamente relacionada à força da massa sísmica do instrumento sobre o cristal piezelétrico, que emitirá um sinal de aceleração do sistema (DE ALMEIDA, 2008).

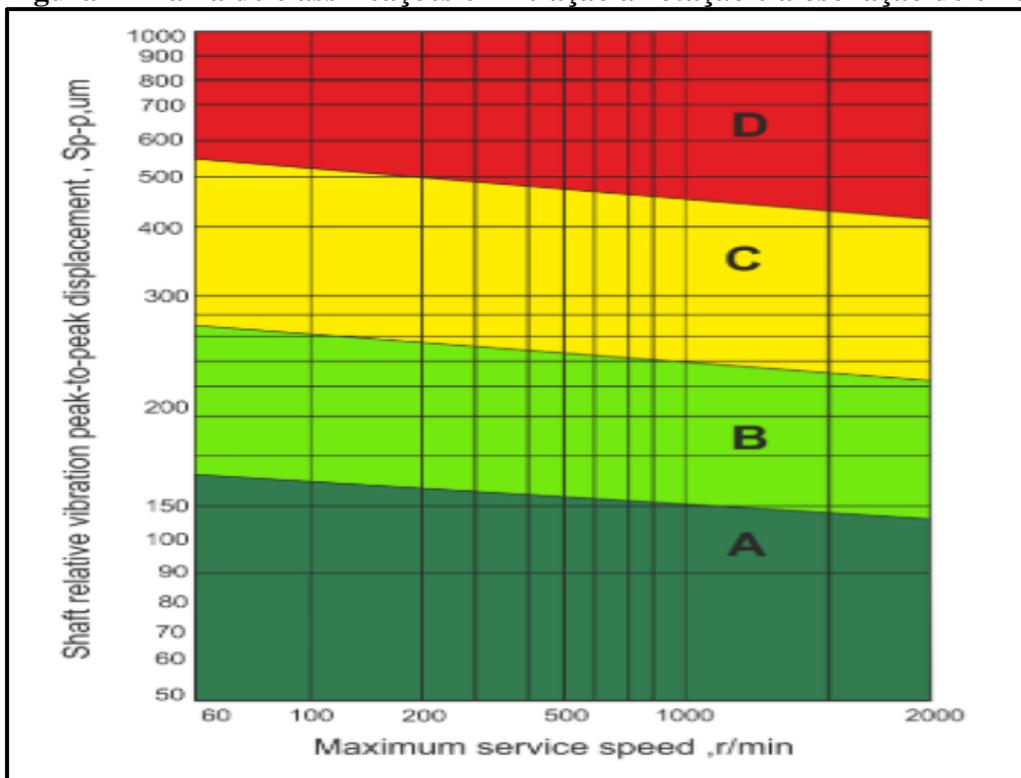
2.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM HIDROGERADORES

Para um adequado diagnóstico dos defeitos de um equipamento, a análise de vibração vem sendo largamente aplicada. Em um hidrogenador, devido às diversas falhas já abordadas e até mesmo pela própria operação do equipamento, é comum aparecerem vibrações em toda sua estrutura. Para correta operação do hidrogenador existem normas que determinam os níveis de vibrações aceitáveis.

2.4.1 Normas aplicáveis

A norma ISO 7919-5 *Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria*, fornece as zonas de classificação para as oscilações de eixos rotativos. Na Figura 2 são apresentadas as classificações em relação à rotação por minuto e à oscilação de eixo, determinando a seguinte classificação: Faixa A – bom; Faixa B – aceitável; Faixa C – insatisfatório; Faixa D – inaceitável.

Figura 2 - Faixa de classificações em relação a rotação e à oscilação de eixo



Fonte: ISO 7919-5.

Para a verificação da vibração das partes estacionárias é aplicada a ISO 10816-5 *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*, que fornece a classificação dos valores em velocidade de vibração. Os valores das medições de vibração de partes estacionárias são integrados juntamente com os dados da oscilação do eixo para a obtenção da vibração absoluta. Hidrogeradores de grande porte são classificados no Grupo 3: “Vertical machine sets with bearing housings which are all braced against the foundation, usually with operational speeds of between 60 rpm and 1.800 rpm”, que estabelece os seguintes níveis de velocidades de vibração:

- Até 1,6 mm/s - Faixa A (máquinas recém comissionadas);
- De 1,6 a 2,5 mm/s - Faixa B (níveis de vibração aceitáveis sem restrição para operação);
- De 2,5 a 4,0 mm/s - Faixa C (nível de vibração insatisfatório, restrição no período de operação e programação para medidas corretivas);
- Acima de 4,0 mm/s - Faixa D (nível de vibração grave suficiente para causar danos no equipamento).

2.4.2 Metodologia de medição

Para a análise de vibrações mecânicas em hidrogeradores de grande porte, é necessária a aquisição de sinais de medições relativos ao comportamento operacional do equipamento. Medições como deslocamento, frequência, aceleração, e velocidade, são necessárias para quantificar a condição de funcionamento (SILVA 2013). Esses valores são geralmente medidos por sensores ou transdutores, e coletados por meio de softwares específicos.

Os procedimentos para monitoramento de vibração em hidrogeradores seguem as recomendações da *International Electrotechnical Commission (IEC/TC-4 Hydraulic Turbines)*, que determina a medição dos seguintes dados:

- Vibração radial em duas direções ortogonais nos mancais de guia;
- Vibração axial no mancal de escora;
- Vibração da tampa da turbina;
- Vibração no estator do gerador;
- Variação de pressão na caixa espiral e no tubo de sucção.

Mazzarini e Oliveira (2009), consideram que através de estudos e experimentos é possível definir um método mais simplificado, realizando a aquisição de sinais mais representativos a serem analisados medindo os seguintes sinais:

- Deslocamento do eixo em duas direções ortogonais nos mancais de guia;
- Vibração radial nas caixas dos mancais;
- Vibração axial no mancal de escora;
- Variação de pressão no tubo de sucção, tampa da turbina e caixa espiral;
- Oscilação de potência;
- Vibração radial no núcleo estatórico.

Com a medição dos pontos descritos anteriormente pode-se determinar algum tipo de falha nos componentes de um hidrogenador de grande porte como folga mecânica, desalinhamento, desbalanceamento, entre outros. As medições da oscilação relativa do eixo são monitoradas de forma indireta, utilizando-se dados transmitidos por um sensor sem contato (sensor de proximidade). Para a obtenção do valor absoluto de vibração aplicam-se sensores de velocidade ou aceleração fixados nas caixas dos mancais, esses valores são somados com os valores relativos para a obtenção dos valores absolutos.

2.4.3 Metodologia de análise

A vibração em máquinas dinâmicas normalmente detém características específicas em seu sinal de leitura de operação. Para a avaliação desses sinais é empregada a análise espectral, considerada um procedimento muito prático e fácil, largamente utilizado, que possibilita identificar o conteúdo de frequências em um determinado sinal.

Normalmente a vibração (oscilação) entre eixo e mancal de um equipamento é monitorada através da medição pico a pico. É comumente utilizada para obter a vibração absoluta, que é a maior variação de deslocamento em uma determinada amostragem de tempo (MAZZARINI E OLIVEIRA 2009). A sua unidade de medida é o micrometro (μm). Em alguns casos é utilizada a medição zero a pico, ou seja, a tomada na origem do sinal até atingir o ponto mais alto de oscilação. Outra medida de vibração empregada é o *Root Mean Square* (RMS), determinado por um sinal de amplitude média, sendo um valor menor que o pico a pico.

Quando o objetivo é identificar o comportamento dinâmico do eixo, em equipamentos de grande porte, operando em baixas rotações, torna-se necessário a avaliação da forma de giro que o eixo apresenta dentro do mancal. Para essa análise são utilizados os digramas de órbita. Com a instalação de dois sensores de proximidade defasados 90° entre si, é possível plotar um digrama dentro de um plano cartesiano XY (ARATO,2004).

Outra forma de análise de vibração e identificação de falhas em equipamentos é o chamado espectro de frequência de um sinal. A medição do valor global de oscilação na maioria das vezes torna a análise de vibração vaga e sem identificação da causa raiz do problema, sendo necessária uma desmontagem e inspeção geral na máquina para a identificação dos possíveis erros.

De modo geral, cada componente de um equipamento causa uma determinada frequência de vibração devido às características próprias de massa e elasticidade e em máquinas rotativas estão relacionadas diretamente com a rotação de operação. O gráfico extraído pelo processamento de um software específico de coleta de vibração, apresenta as frequências que integram o sinal e também as respectivas amplitudes. De Almeida (2008), descreve que cada frequência de vibração está relacionada a uma única amplitude do sinal, demonstrando as fontes específicas de ruídos.

O monitoramento de tendência é mais um método de análise empregado para o acompanhamento dos níveis de vibração de um determinado equipamento. Esta ferramenta consiste em acompanhar a evolução dos dados medidos em relação ao tempo de operação do equipamento. Dessa forma monta-se um gráfico onde após estipulado um tempo de monitoramento é observada a curva de tendência de um valor aumentar ou diminuir, dependendo da condição da máquina.

Observa-se no gráfico a possibilidade de interpolar os dados de medição, obtendo-se uma reta com a determinação dos valores máximos atingíveis. A interpolação é construída a partir de modelos ou experimentalmente, e pode determinar a data aproximada para a programação da manutenção no equipamento. Os principais dados utilizados para a análise de tendência são o espectro de frequência, RMS, pico-a-pico e folga dos mancais (MAZARINI E OLIVEIRA, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o atendimento dos objetivos do trabalho proposto, foram desenvolvidas as atividades de análise e monitoramento de vibração em campo, que ocorreram nas dependências de uma Usina Hidrelétrica, localizada na divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, no setor de Engenharia e Manutenção da instalação.

No Quadro 1 são descritas as principais características técnicas do conjunto girante turbina, gerador e eixo, aplicados no hidrogerador em estudo.

Quadro 1 - Características técnicas do hidrogerador em estudo

TURBINA	
Tipo de turbina	Francis de eixo vertical
Vazão máxima	327,0 m ³ /s
Potência máxima	312,2 MW
Queda máxima	106,0 m
Rotação nominal	128,57 rpm
Massa	97 700 Kg
GERADOR	
Tipo de Gerador	Síncrono, trifásico de eixo vertical
Potência Nominal	290 MW
Frequência nominal	60 Hz
Tensão nominal	16 Kv
Rotação nominal	128,57 rpm
Massa	680 000 kg
EIXO	
Diâmetro externo	1500 mm
Diâmetro interno	1100 mm
Massa	55 000 kg

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

3.1 MATERIAIS

O sistema aplicado na instalação consiste em um hardware e software que realiza a coleta automática de diversos parâmetros como vibração, temperatura, vazão, entre outras. Com a utilização do sistema é possível acompanhar os registros de vibração em tempo real e resgatar o histórico de registros do equipamento.

As medições necessárias para o desenvolvimento do estudo foram realizadas pelo sistema de medição e instrumentação já existente e instalado no hidrogerador. Os principais instrumentos de medição para análise de vibração são abordados nos itens posteriores, bem como a posição de instalação, considerando um plano cartesiano.

As oscilações do eixo foram monitoradas por sensores de proximidade indutivos, no número de um instrumento por ponto de medição, conforme descrito os pontos de instalação de cada sensor:

- MGG/2° - Mancal de Guia do Gerador Superior na direção 2°;
- MGG/272° – Mancal de Guia do Gerador Superior na direção 272°;
- MGG/92° - Mancal de Guia do Gerador Superior na direção axial do eixo;
- MGT/2° – Mancal Guia da Turbina na direção 2°;
- MGT/272° – Mancal Guia da Turbina na direção 272°.

Para as vibrações e deslocamentos nos suportes, a medição foi efetuada por meio de acelerômetros instalados juntamente ao suporte dos sensores de proximidade, as posições estão descritas na sequência, em cada direção está instalado um sensor:

- MGGS/2° - Mancal de Guia do Gerador Superior na direção 2°;
- MGGS/272° – Mancal de Guia do Gerador Superior na direção 272°;
- MGGS/92° - Mancal de Guia do Gerador Superior na direção axial do eixo;
- MGT/2° – Mancal Guia da Turbina na direção 2°;
- MGT/272° – Mancal Guia da Turbina na direção 272°.

O monitoramento dos demais parâmetros como potência ativa de geração (MW) e rotação do hidrogerador (RPM) foi realizado através do software de medição e controle do hidrogerador, que possui ligação com o software de acompanhamento de vibração da planta.

3.2 MÉTODO

Os parâmetros monitorados e a sistema de medição são descritos abaixo, conforme levantamento bibliográfico e especificações das normas vigentes.

3.2.1 Oscilações pico-a-pico

Para monitoramento da oscilação do eixo foi utilizada a norma ISO 7919-5 como referência, que recomenda os valores limites de vibração relativa (deslocamento – μm) nos eixos de hidrogeradores. A leitura da medição foi realizada através dos sensores de proximidade indutivos, instalados conforme citado no item 3.1. Após coleta dos dados os valores de medição são comparados com os valores especificados na Figura 2, obtendo-se a classificação operação do hidrogerador especificado na norma ISO 7919-5.

3.2.2 Vibrações nos suportes

Para as análises de vibração em partes estáticas, foi usada a norma ISO 10816-5, como referência, que define valores de velocidade de vibração (mm/s) para diferentes classes de máquinas rotativas. No item 2.4.1 são demonstrados os valores aceitáveis para a vibração das partes estáticas do hidrogerador.

3.2.3 Espectro de Frequência

O gráfico de espectro de frequência foi monitorado diretamente no software de acompanhamento de vibração. Com o incremento de tecnologia de processamento de sinais, a grande maioria dos sistemas aplicados para análise de espectro de frequência utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT), considerado um método rápido, de baixo custo e bastante aplicável em diversos equipamentos. No item 2.2 são descritas as principais causas de vibração em hidrogeradores e juntamente são especificados os principais espectros de frequências que essas falhas apresentam.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO COM OS VALORES LIMITES DETERMINADOS PELA NORMA ISO 7919-5

A partir da observação da condição operacional do hidrogerador, verificou-se que a análise de vibração da unidade geradora número 04 foi necessária principalmente em decorrência do aumento dos níveis de oscilação dos mancais e o grande risco a estrutura e equipamentos. Dessa forma, foi iniciado o estudo para análise das possíveis causas de vibração deste hidrogerador de grande porte com a coleta de dados sobre a situação atual da oscilação do eixo, na região do mancal guia superior (MGS) e no mancal guia turbina (MGT).

Posteriormente, os dados extraídos do sistema de monitoramento foram comparados com os limites de vibração determinados pela norma ISO 7919-5, que determina os seguintes níveis de oscilação pico a pico para o hidrogerador com rotação de 128 RPM:

- Até 160 μm Faixa A – bom;
- De 160 a 260 μm Faixa B – aceitável;
- De 260 a 520 μm Faixa C – insatisfatório;
- Acima 520 μm Faixa D – inaceitável.

No Quadro 2, são comparados os valores determinados pela norma ISO e os valores coletados.

Quadro 2 Comparação dos níveis de vibração com a norma ISO 7919-5.

Ponto Monitorado	Potência (MW)	Pico a pico (μm)	ISO 7919-5
SD-MGT-002 – Sensor de Deslocamento	290	793,75	Inaceitável

Mancal de Guia Superior na direção 2°			
SD-MGT-272 - Sensor de Deslocamento Mancal de Guia Superior na direção 272°	290	776,15	Inaceitável
SD-MGS-002 - Sensor de Deslocamento Mancal Guia da Turbina na direção 2°	290	71,20	Bom
SD-MGS-272 - Sensor de Deslocamento Mancal Guia da Turbina na direção 272°	290	66,86	Bom

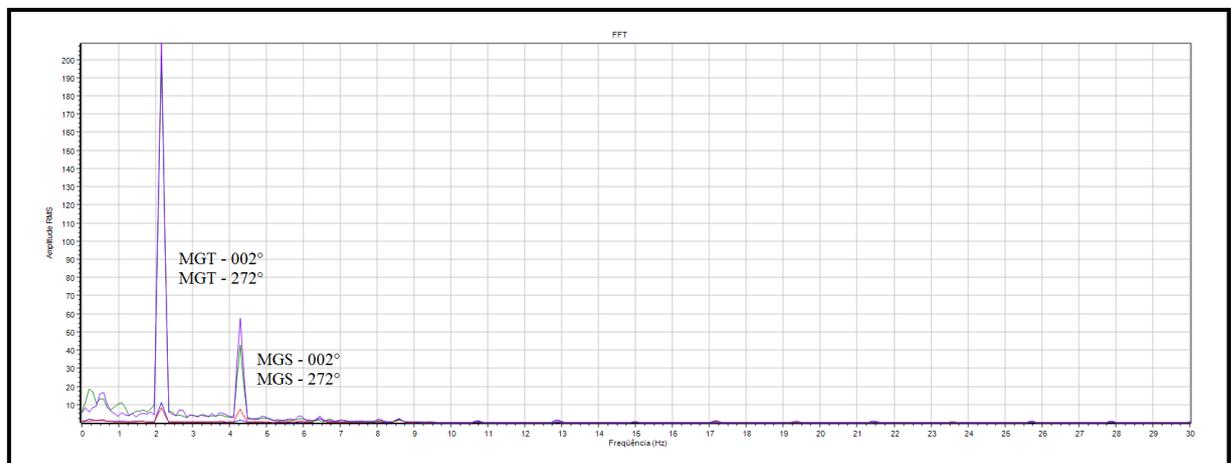
Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Como demonstra o Quadro 2, há uma oscilação no mancal guia da turbina, chegando a níveis inaceitáveis pelo o que determina a norma ISO 7919-5, no próximo capítulo será apresentado um estudo sobre as principais causas para o surgimento dessa vibração.

4.2 IDENTIFICAÇÃO DAS CAUSAS DO ELEVADO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

Para a identificação das causas dos elevados níveis de vibração do hidrogerador, foram extraídos do *software* de monitoramento o espectro de frequência com a potência nominal de 290 MW, demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Espectro de frequência hidrogerador (potência 290 MW)



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

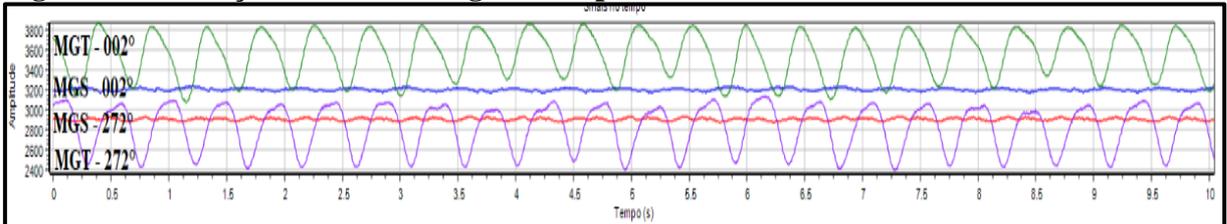
A Figura 3, apresenta o sinal espectral do eixo, com potência máxima (290 MW), a força na frequência de rotação (2,13 Hz) predomina, que conforme literatura indica as seguintes causas para o elevado nível de vibração:

- 1 X a rotação - Desbalanceamento mecânico;
- 1X e 2X e até 3X a rotação - Desalinhamento angular;
- 2 X a rotação – Desalinhamento paralelo;

- 1X 2X, 3X, 4X a rotação - Folga de mancal.

Do mesmo *software* de monitoramento, apresenta-se o acompanhamento dos níveis de oscilação nos mancais guia turbina e guia gerador, identificados na Figura 4.

Figura 4 - Oscilação do eixo hidrogerador (potência 290 MW)



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Através da análise da oscilação do eixo dos mancais (Figura) é possível identificar o aumento da folga do mancal guia turbina ($800 \mu\text{m}$), o que se confirmou após a medição da folga diretamente no mancal, conforme apresentado no Quadro 3. Devido ao mancal guia superior estar dentro dos níveis aceitáveis de vibração, a investigação ocorreu somente no mancal guia turbina.

Quadro 3 - Folga observada no mancal guia turbina do hidrogerador

Sapata	Folga de Projeto (mm)	Folga do Mancal Guia Turbina (mm)
1	0,29	0,43
2	0,29	0,44
3	0,29	0,48
4	0,29	0,49
5	0,29	0,44
6	0,29	0,37
7	0,29	0,33
8	0,29	0,38
9	0,29	0,41
10	0,29	0,44

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

4.3 FORMAS DE CORREÇÃO DO ELEVADO NÍVEL DE VIBRAÇÃO DO HIDROGERADOR

No Quadro 4 são expostas as falhas encontradas através da análise da vibração e as formas de correção sugeridas.

Quadro 4 - Falhas e formas de correção das falhas do hidrogerador

Descrição da falha	Forma de correção
--------------------	-------------------

Desbalanceamento mecânico	Realizar o balanceamento mecânico do hidrogerador inserindo massas de correção no rotor do gerador.
Desalinhamento angular	Efetuar medição com relógios comparadores nas posições 0°, 90° 180° e 270° na parte superior e inferior do acoplamento. Calcular correção de posicionamento, desacoplar e acoplar o eixo caso o desalinhamento seja originário do acoplamento e posicionar calços de correção para nivelar a linha de eixo.
Desalinhamento paralelo	Realizar medição com relógios comparadores nas posições 0°, 90° 180° e 270° na parte superior e inferior do acoplamento. Calcular correção de posicionamento, desacoplar e acoplar o eixo.
Folga do mancal	Medição e ajuste das folgas do mancal para os valores nominais de projeto.

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Devido ao sistema de monitoramento de vibração da unidade geradora operar a menos de dois anos não existem históricos dos níveis de oscilação, desta forma não é possível identificar o início das falhas, podendo-se ter origem no início de operação da mesma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação dos níveis de oscilação do hidrogerador com a norma ISO 7919-5 mostra uma diferença dos valores aceitáveis, no mancal guia turbina os níveis de vibração são considerados como inaceitáveis pela norma.

A partir da investigação e análise das causas dessa elevada vibração, pode-se concluir que há quatro fatores puramente mecânicos relacionados, sendo eles: o desbalanceamento mecânico, desalinhamento, acoplamento angular e paralelo e a folga do mancal guia turbina. A folga do mancal pode ser comprovada através do espectro de frequência e medição da mesma em local, estando acima dos valores de projeto. Já o restante das falhas não pôde ser confirmado através de medições em local, devido ao período de manutenção do equipamento não permitir a desmontagem e devidas verificações.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a investigação dos níveis de vibração do hidrogerador com a aplicação da modelagem dinâmica, através da simulação numérica em computador. Esta técnica está sendo a cada dia mais utilizada na área da engenharia, por meio do estudo da estrutura do equipamento é possível simular seu comportamento dinâmico, simulação de falhas, sendo mais assertivo na intervenção e resolução de falhas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração: BIG**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 25 fevereiro 2019.

ARATO, A. J. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004.

BRITO JUNIOR, Geraldo Carvalho. **Análise dinâmica de mancais radiais para suporte ao monitoramento da saúde estrutural de hidrogeradores de grande porte**. 2017. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DE ALMEIDA, F. C. L. **Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Estadual Paulista, 2008.

FREIRE, Evandro. **Vibrações em Hidrogeradores**. In: ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO, 3., 2006, Foz do Iguaçu. **Etc**. Foz do Iguaçu: Cigré, 2006.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Santa Maria: Ufsm, 2006.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10816-5 Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on non-rotating Parts**. Genebra. 2000.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 7919: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Part 5 – Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants**. Genebra. 2005.

FRANCHI, M. C.; CAMARGO, V. L. A. **Controladores Lógicos Programáveis: Sistemas Discretos**. 2.ed. Sao Paulo: Erica, 2009.

MAGNOLI, Marcelo Vinicius. **Cálculo das velocidades angulares críticas da linha de eixo de turbinas hidráulicas com ênfase no comportamento estrutural dinâmico do gerador**. 2005. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MAZARINI, João Artur Fiuza; OLIVEIRA, Marcos Vinicius Alves de. **Monitoramento de vibrações em hidrogeradores**. 2008. 105 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Unisaesiano– Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium, Ilha Solteira, 2008.

MOTT, Robert L. **Elementos de máquina em projetos mecânicos**. São Paulo: Pearson Education Brasil, 2015. Tradução: Giuliana Niedhardt e Poliana Magalhães Oliveira.

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SAMED, Márcia Marcondes Altimari. **Fundamentos de instalações elétricas**. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2017.

SILVA, Derick Henrique de Jesus. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SILVA, Edson Luiz da. **Dinâmica de rotores: modelo matemático de mancais hidrodinâmicos**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2006.

TRALLI, Fernando Cunha. **Modelagem Dinâmica de Rotores de Unidades Geradoras**. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

VLADISLAVLEV, L. A. **Vibration of hydro units in hydroelectric power plants**. New Delhi: Amerind Publishing Company, 1979.