



19º Congresso Nacional de Iniciação Científica

TÍTULO: MEDIÇÃO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS ROTATIVOS

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA

SUBÁREA: Engenharias

INSTITUIÇÃO: FACULDADE ANHANGUERA DE TAUBATÉ -

AUTOR(ES): WALLACE MAGELA DOS SANTOS

ORIENTADOR(ES): EVERALDO DE BARROS

1. RESUMO

Máquinas rotativas são amplamente utilizadas nos setores da indústria, nas áreas de óleo e gás, geração de energia, indústria aeronáutica, indústria automotiva e indústria pesada. Modelos em escala representativos de rotores de grande porte, tais como turbinas e compressores, são amplamente empregados para a avaliação da dinâmica de rotores. O estudo teórico e experimental da dinâmica de rotores decorre do fato que a dinâmica de um rotor não é exatamente a mesma dinâmica de um sistema massa-mola. Neste trabalho são reportadas as análises da medição de vibrações em um dos mancais de rolamento utilizados para apoio do rotor de uma bancada educacional desenvolvida para o estudo de dinâmica de rotores. A análise espectral das medições realizadas revelou algumas componentes de frequências dominantes no espectro, notadamente 244 Hz, 637 Hz e 6082 Hz na velocidade de 770 rpm. A metodologia apresentada pode ser adotada em diagnósticos de defeitos e análise da tendência de falhas em máquinas rotativas.

2. INTRODUÇÃO

O fenômeno denominado vibração mecânica ocorre geralmente devido aos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, ou ainda devido a forças desequilibradas de componentes rotativos e de movimentos alternados. Máquinas rotativas são amplamente utilizadas nos setores da indústria, encontrando aplicação nas áreas de óleo e gás, geração de energia, indústria aeronáutica, indústria automotiva e indústria pesada. Máquinas de grande porte, tais como turbinas e compressores, são equipamentos fundamentais em refinarias, termoelétricas e plantas do setor petroquímico. Falhas e paradas não programadas nesses equipamentos acarretam perdas econômicas significantes às empresas (MEDEIROS ET AL, 2018).

A dinâmica de um rotor não é exatamente a mesma dinâmica de um sistema massa-mola. Formas modais e frequências naturais estão presentes em sistemas massa-mola e em modelagem de rotores, porém, com dinâmicas diferentes. O estado de referência do sistema massa-mola é estacionário enquanto que a do rotor é rotacional. No sistema estacionário, o espectro de frequências é caracterizado pela presença de picos de amplitude e mudança de fase (ressonâncias) e, em sistemas rotativos, ressonâncias são denominadas velocidades críticas. Uma análise do

comportamento de rotores desenvolvida de modo mais simplificado pode ser consultada em Nelson (2007).

O desenvolvimento de modelos matemáticos para rotores pode ser feito por meio de diferentes métodos, como por exemplo, a simulação por elementos finitos. Para validação experimental destes sistemas é comum o desenvolvimento de ensaios experimentais em modelos em escala, que permitem aprimorar a avaliação e identificação de fenômenos dinâmicos complexos em máquinas rotativas. Procedimentos computacionais e experimentais podem ser consultados em Cota (2008). Os procedimentos experimentais envolvem o uso de diferentes tipos de sensores para monitoramento das máquinas de modo a aumentar a confiabilidade no diagnóstico na condição operacional, conforme reportado por Shakya, Darpe e Kulkarni (2016).

Diversos estudos são conduzidos em instituições de ensino envolvendo bancadas de teste representativas de rotores de grande porte, incluindo o emprego de uma bancada para análise de falhas em máquinas rotativas (SILVA, 2012); o cálculo das frequências naturais dos modos de flexão do eixo de uma unidade geradora hidráulica em escala, por meio do método elementos finitos (MAZER, 2016); o desenvolvimento de uma bancada de testes aplicada ao estudo de dinâmica de rotores (MEDEIROS ET AL, 2018).

Neste trabalho são apresentados os níveis de vibração em uma bancada de teste educacional. As medições foram realizadas em um dos mancais de rolamento utilizados para apoio do rotor com a bancada operando em determinadas rotações.

3. OBJETIVOS

Esta pesquisa possui os seguintes objetivos:

Objetivo geral

Desenvolver habilidades e conhecimentos relacionados à medição e ao processamento de sinais para determinar as características dinâmicas de máquinas rotativas.

Objetivos específicos

Medir os níveis de vibração em um dos mancais de rolamento utilizados para apoio do rotor quando a bancada estiver operando em determinadas rotações.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho, a metodologia proposta foi dividida em duas partes. A primeira parte foi dedicada ao estudo de técnicas que podem ser aplicadas a problemas encontrados em observações experimentais em máquinas rotativas, incluindo requisitos de aquisição de dados e sistemas de análise, sensores utilizados para medir respostas dinâmicas, e experimentos que possibilitam simulação da dinâmica de rotores.

A segunda parte do estudo diz respeito a observações experimentais em uma bancada de testes educacional para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas.

A bancada investigada é uma bancada didática marca Triber, desenvolvida para o estudo de vibrações em máquinas rotativas. O sistema rotativo foi montado com transmissão por polias e correia em “V” e flange de desbalanceamento sem contrapeso para a composição do rotor, conforme ilustrado na Figura 1. O sistema de acionamento do eixo é realizado por um motor trifásico de 0,25 cv, com rotação máxima nominal de 1710 rpm, acionado por um controlador inversor de frequência que permite o controle manual da rotação. Foram avaliadas apenas as vibrações no eixo perpendicular ao plano horizontal (eixo Z), em um ponto localizado no mancal próximo ao motor com a bancada operando em determinadas rotações estabelecidas. As ferramentas utilizadas para caracterizar os valores globais de vibração e identificação de frequências incluem o histórico temporal e a densidade espectral de potência das medições, implementados no aplicativo computacional Matlab. A densidade espectral de potência foi obtida pela estimação de uma média de periodogramas, dada por :

$$\hat{G}_{xx}(f_k) = \frac{2}{n_d N t_s} \sum_{i=1}^{n_d} \left| \hat{X}_i(f_k) \right|^2, \quad (1)$$

onde n_d é o número de segmentos independentes ou médias, N é o número de amostras, t_s é o período de amostragem, $f_k = \frac{k}{N t_s}$, para $k = 0, 1, \dots, N/2$, e $\hat{X}_i(f_k)$ é a transformada discreta de Fourier de $x_i(t)$ observado no tempo T .

Figura 1 – Bancada de teste educacional para o estudo de máquinas rotativas.

(a) Vista geral



(b) Detalhe do posicionamento do acelerômetro de medição no mancal.

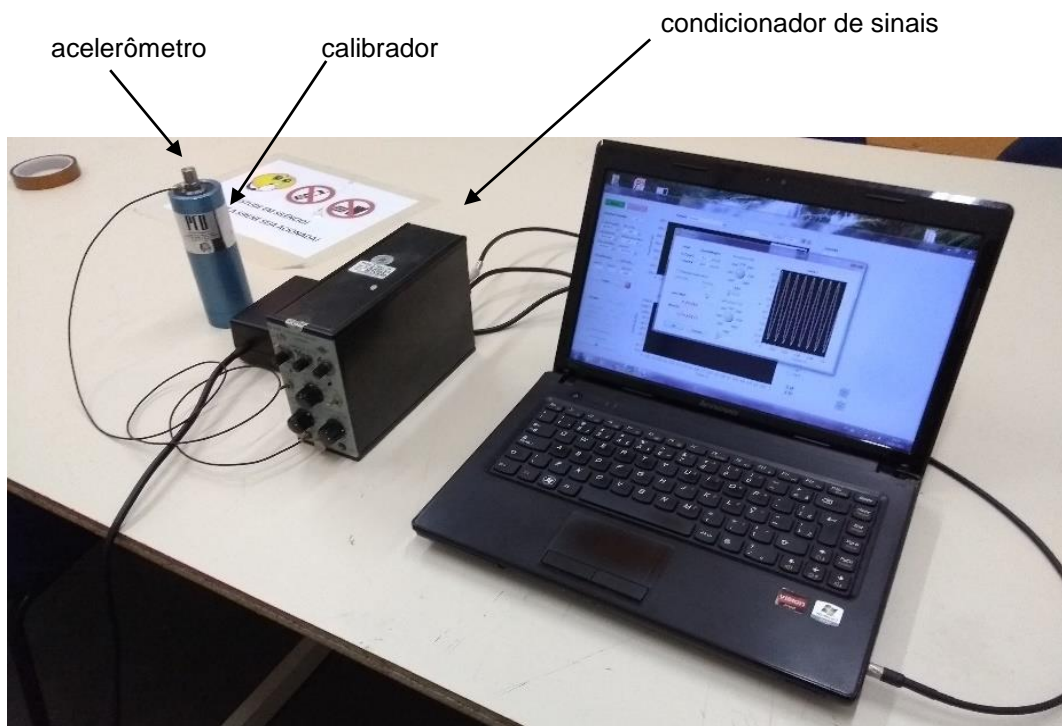


5. DESENVOLVIMENTO

A cadeia de medição utilizada foi constituída de um acelerômetro piezoelétrico unidirecional modelo 4371 e um condicionador de sinais modelo 2635, ambos da fabricante Brüel & Kjaer; um notebook e um aplicativo computacional desenvolvido na plataforma Labview que utiliza os canais da placa de som do notebook para coleta, medição e posterior análise dos sinais dinâmicos (BARROS ET AL, 2015).

A calibração do canal de entrada foi realizada com a função de integração do condicionador de sinal selecionada para aceleração, com o suporte de um padrão de referência de aceleração – um calibrador manual de vibração marca PCB Piezotronics modelo 394B05, que gera um nível de vibração senoidal padrão de frequência de 500 rad/s e valor global de 1 g_{rms} (9,80665 m/s^2). A Figura 2 ilustra o acelerômetro fixado no calibrador durante o procedimento de calibração do canal de entrada. A calibração foi obtida após o ajuste do valor de sensibilidade (expresso em mV/unidade de engenharia) para se atingir o valor de aceleração gerado pelo padrão de referência.

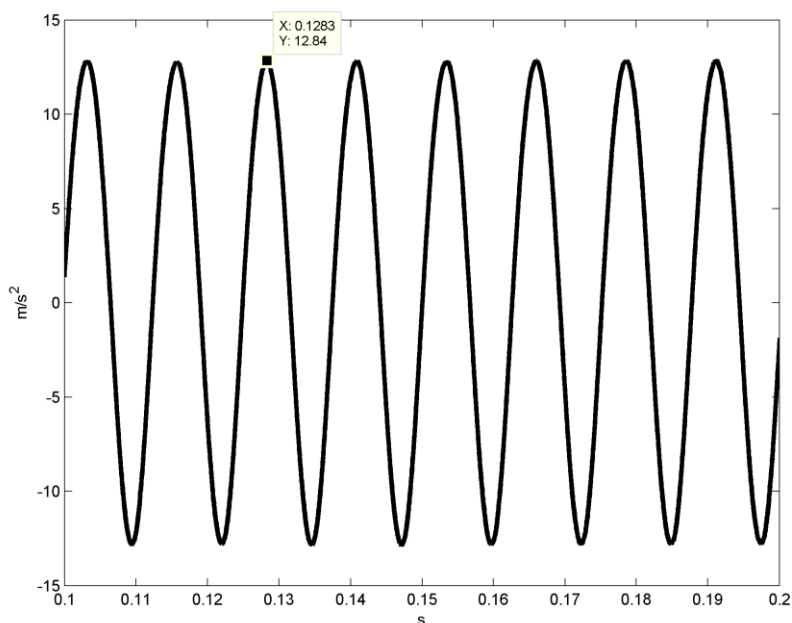
Figura 2 – Setup experimental para calibração do canal de entrada.



A medição da aceleração padrão está ilustrada na Figura 3. Inspecionando curva obtida, foi observado um valor de pico de 12,84 m/s^2 (erro de 7,4%), validando desta forma a cadeia de medição empregada.

Após a calibração, a medição de aceleração de vibração foi realizada no mancal durante as rotações de 25%, 30%, 35%, 40% e 45% da velocidade nominal (428 rpm, 513 rpm, 599 rpm, 684 rpm e 770 rpm, respectivamente). A cada valor de rotação ajustado para o rotor, foi realizada uma aquisição de dados durante um intervalo de tempo de 1 segundo, com uma taxa de amostragem de 43,478 kHz (taxa de amostragem da placa de som do notebook). Em seguida, foi realizada uma análise dos dados no domínio do tempo e no domínio da frequência. Para o processamento dos sinais foi definido $N = 4096$ amostras e $t_s = 2.3\text{e-}5$ segundos.

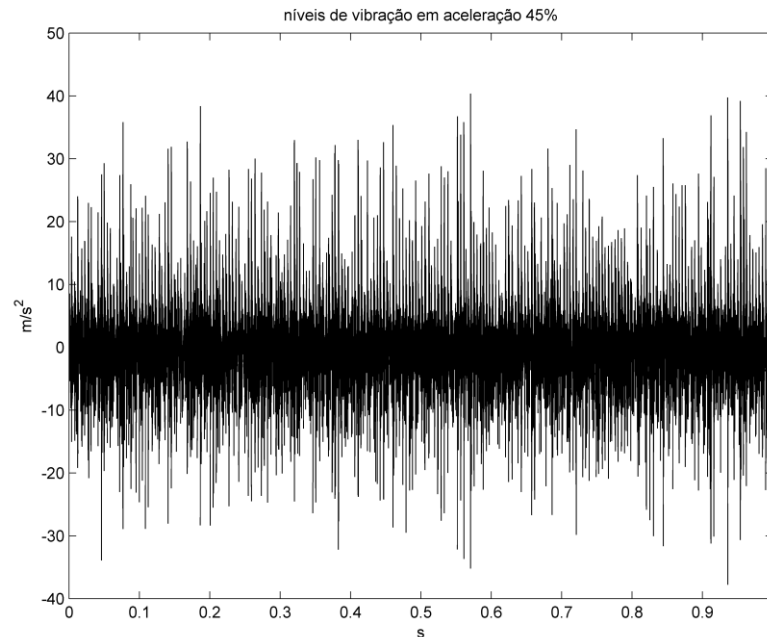
Figura 3 – Validação da cadeia de medição.



6. RESULTADOS

As observações experimentais foram inicialmente avaliadas no domínio do tempo. A Figura 4 ilustra o histórico temporal da aceleração, com os valores expressos em m/s^2 , medido durante a rotação ajustada no percentual de 45% da velocidade nominal. As medições foram validadas por meio de uma inspeção visual dos históricos temporais obtidos.

Figura 4 – Histórico temporal na rotação de 45% da velocidade nominal.



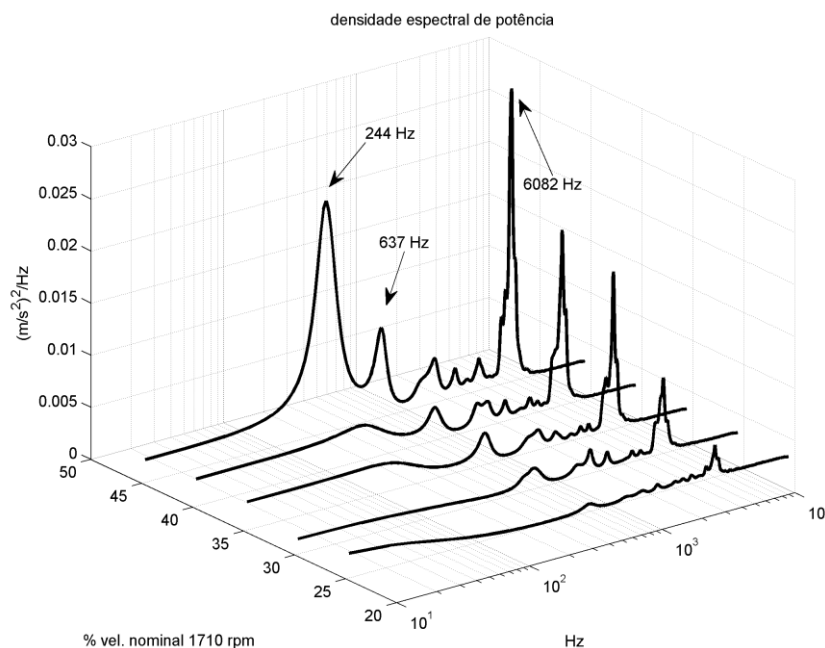
A partir da validação das medições, foi realizada uma análise no domínio do tempo para identificar a evolução do valor global de aceleração para cada nível de rotação estabelecido. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valor global de aceleração.

Rotação		Valor global (m/s ²)
percentual vel. nominal	rpm	
25%	428	2,47
30%	513	3,42
35%	599	4,14
40%	684	4,61
45%	770	5,94

Em seguida, foi realizada uma análise espectral das medições realizadas. A Figura 5 ilustra o gráfico em cascata da densidade espectral de potência da aceleração da vibração para cada valor de rotação estabelecido, que exibe algumas componentes de frequências dominantes no espectro, notadamente 244 Hz, 637 Hz e 6082 Hz na velocidade de 770 rpm.

Figura 5 – Gráfico em cascata da densidade espectral de potência.



7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de excitação, transdutores e sistemas de medição e análise de vibração são necessários para investigação da dinâmica de estruturas. Neste trabalho, a instrumentação associada às medições incluiu um acelerômetro piezoelétrico unidirecional para medições, um condicionador de sinais e um sistema de aquisição e análise de dados versátil e de baixo custo baseado na placa de som de um notebook para medir e processar sinais de vibração.

Foram reportados os resultados obtidos da medição de vibrações em um dos mancais de rolamento utilizados para apoio do rotor de uma bancada educacional. As medições foram realizadas eixo vertical com a bancada operando nas rotações de 25%, 30%, 35%, 40% e 45% da velocidade nominal (428 rpm, 513 rpm, 599 rpm, 684 rpm e 770 rpm, respectivamente).

Os valores de nível global de aceleração da vibração para cada valor de rotação do rotor apresentaram uma linha de tendência linear. A análise espectral das medições revelou frequências dominantes no espectro, notadamente 244 Hz (19x, 637 Hz e 6082 Hz na velocidade de 770 rpm).

Finalmente, pode-se concluir que, uma vez que a metodologia adotada neste trabalho foi eficiente e confiável para medição e análise de vibrações em mancais, a

cadeia de medição utilizada, bem como os métodos para caracterização dos valores, podem ser empregados para a obtenção de diagnósticos de defeitos e análise da tendência de falhas em sistemas rotativos.

8. FONTES CONSULTADAS

BARROS E. et al. Application of a Computer Sound Card for Measurement of Mechanical Vibrations. **Revista Brasileira de Ensino em Física**, volume 37, n. 4, 2015.

COTA, R. E. Análise dinâmica de rotores em balanço utilizando procedimentos computacionais e experimentais. Dissertação de Mestrado, **Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte - MG, 2008.

MAZER, T.T. Cálculo em elementos finitos das frequências naturais dos modos de flexão de uma linha de eixo de unidade geradora hidráulica em escala. Dissertação de Mestrado, **Universidade Estadual Paulista**, Guaratinguetá - SP, 2016.

MEDEIROS, E. C., MENDONÇA, W. R. P., Barros, E., MATHIAS, M. H. Design and evaluation of a research-educational test bench applied to rotor dynamics studies. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16 (8), p. 2161-2167, 2018.

NELSON, F. C. Rotor Dynamics without equations. **International Journal of Comadem**, v. 10(3), p. 2-10, 2007.

SHAKYA, P., DARPE, A. K. e KULKARNI, M.S. Bearing diagnosis using proximity probe and accelerometer. **Measurement**, v. 80, p. 190-200, 2016.

SILVA, B. T. V. Bancada para análise de vibração: análise de falhas em máquinas rotativas. Dissertação de Mestrado, **Universidade de Taubaté**, Taubaté - MG, 2012.