

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DE ACELERÔMETROS DE BAIXO CUSTO

Rafael Faria Melo, rafaelfariameo@hotmail.com¹

Luan Roberto Marques Angelino, luanmarquesangelino@gmail.com¹

Pedro de Campos Muradas Cerântola, perantola@gmail.com²

Sidney Bruce Shiki, bruce@ufscar.br¹

¹UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, 13565-905, Brasil.

²EESC - USP - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos, SP, 13566-590, Brasil.

Resumo. *Através do monitoramento de vibrações em sistemas mecânicos é possível identificar desgastes, falhas e mal funcionamento de peças durante a operação. Além disso, pode-se extrair parâmetros modais de grande relevância, tais como frequências e modos naturais de vibração, contribuindo para a implementação de técnicas capazes de reduzir ruídos e desgastes. Entretanto, a instrumentação utilizada para tal geralmente apresenta alto custo e difícil implementação, envolvendo sensores, sistemas de aquisição e softwares sofisticados. Assim, no presente estudo, como forma de simular o processo de validação de um sensor de baixo custo com base em outro de referência, foi desenvolvida uma simulação numérica que descreve a medição experimental de vibrações feita por acelerômetros MEMS (microelectromechanical systems), em específico do modelo ADXL335. Com base nas informações contidas nos datasheets dos sensores, fez-se uma estimativa das funções de transferência do ADXL335 e de um acelerômetro piezoelétrico comercial, usado como referência, e comparou-se as respostas medidas por ambos sob entradas de diferentes naturezas. Ao final, foi possível determinar a faixa de operação, avaliar a sensibilidade, amplitude e defasagem e estabelecer até que ponto o acelerômetro MEMS apresenta medições satisfatórias, além de validar a utilização da metodologia de comparação entre sinais medidos por sensores.*

Palavras chave: *Acelerômetros. MEMS. Simulação numérica. Monitoramento de vibrações.*

Abstract. *By monitoring vibrations in mechanical systems, it is possible to identify wear, faults and malfunctions of parts during operation. In addition, great relevance modal parameters can be extracted from the structures, such as natural frequencies and modes of vibration, contributing to the implementation of techniques capable of reducing noise and wear. However, the instrumentation used for this is generally expensive and difficult to implement, involving sophisticated sensors, acquisition systems and software. Thus, in the present study, as a way to simulate the validation process of a low-cost sensor based on another reference sensor, a numerical simulation was developed describing the experimental measurement of vibrations made by microelectromechanical systems (MEMS) accelerometers, in particular model ADXL335. Based on the information contained in the sensor datasheets, an estimate of the transfer functions of the ADXL335 and of a commercial piezoelectric accelerometer, used as a reference, was made, and the responses measured by them under inputs of different natures were compared. Finally, it was possible to determine the range of operation, evaluate the sensitivity, amplitude and lag and establish the extent to which the MEMS accelerometer presents satisfactory measurements, in addition to validating the use of the methodology for comparing signals measured by sensors.*

Keywords: *Accelerometers. MEMS. Numerical Simulation. Vibration monitoring.*

1. INTRODUÇÃO

Por meio da análise de vibrações é possível extrair um grande número de informações de sistemas mecânicos e estruturas. Além do monitoramento da saúde de construções como pontes e prédios, a riqueza de informações de um sinal vibratório permite, por exemplo, analisar com detalhes os prováveis defeitos por desgaste de uma máquina enquanto ela permanece em pleno funcionamento (Schuler, 1997). Acelerômetros são sensores amplamente utilizados para a realização dessas análises. Segundo Rao (2017), dentre os parâmetros que podem ser extraídos a partir da medição de vibrações, merecem destaque as frequências naturais de vibração, nas quais o sistema tende a operar quando em movimento livre, os modos naturais, que são seus padrões geométricos de deslocamento, e as frequências de ressonância do sistema, que

tendem a causar grandes deslocamentos quando a frequência de excitação é com elas coincidente.

Porém, sabe-se que a utilização de sensores comerciais, em geral de origem piezoelétrica, em conjunto com sistemas de aquisição sofisticados, costuma ser de alto custo, além de geralmente exigir grande conhecimento técnico por parte do operador. Sendo assim, uma alternativa para realizar tal monitoramento é a utilização de sistemas microeletromecânicos (MEMS, do inglês *microelectromechanical systems*) os quais, segundo Mahalik *et al.* (2006), são sensores, atuadores, válvulas, engrenagens, entre outros componentes em escala microscópica inseridos em chips semicondutores. Eles são pequenos dispositivos que combinam elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos, e que possuem a vantagem de serem geralmente mais baratos, quando comparados a equipamentos que apresentam a mesma função. Cabe lembrar também que acelerômetros MEMS podem operar em conjunto com *hardwares* e *softwares* de processamento de sinais mais acessíveis e de fácil operação, sendo esta outra grande qualidade destacada.

Diversos pesquisadores já buscaram realizar a validação de sensores microeletromecânicos para aplicações de monitoramento de vibração, sendo que a maioria recorreu a métodos experimentais. Albarbar *et al.* (2009) constataram por meio das respostas medidas por um acelerômetro MEMS e por um piezoelétrico, utilizado como referência, diferenças de sensibilidade e de fase quando ambos os tipos de sensores foram submetidos a entradas periódicas e aleatórias. Já com um martelo de impacto, puderam detectar divergências ligadas às amplitudes das respostas medidas. Por fim, concluíram que ainda são necessários mais estudos acerca dos sensores MEMS antes de serem aplicados de fato.

Por outro lado, Girolami *et al.* (2018) utilizaram cinco acelerômetros do tipo LIS344ALH para a extração das frequências naturais e dos modos de vibração de uma viga, por meio de técnicas de processamento de sinais. Após confrontar os resultados obtidos com um modelo físico desenvolvido, concluíram que MEMS podem ser usados como sistemas de baixo custo capazes de fornecer informações a respeito da vibração de sistemas em tempo real.

No presente artigo foi conduzido um estudo numérico que reproduz a medição experimental de vibrações mecânicas feita por sensores MEMS, com o intuito de determinar quais são seus limites de aplicação. Para isso, foram estimadas as funções de transferência representando dois acelerômetros distintos: um de referência de larga aplicação industrial para medições de vibrações mecânicas e um de baixo-custo tipo MEMS. Essas funções foram então aplicadas para simular medições desses dois dispositivos. Em seguida, foi estimada a função de resposta em frequência do sensor MEMS tomando como base a própria medição do sensor industrial. Essas simulações numéricas foram feitas de modo a representar um processo de validação e calibração de acelerômetros que será realizado futuramente para se atestar a performance de sensores de baixo-custo promissores.

2. MODELO DINÂMICO SIMPLIFICADO DE ACELERÔMETROS

Primeiramente, foi necessário consultar nos *datasheets* dos sensores ADXL335, fornecido pela empresa *Analog Devices*, e PCB333B30, disponibilizado no *site* da *PCB Piezotronics*, quais eram as sensibilidades e frequências de ressonância apresentadas. Essas informações constam na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos acelerômetros estudados.

Acelerômetro	ADXL335	PCB333B30
Sensibilidade (mV/(m/s ²))	30,58	10,19
Frequência de Ressonância (kHz)	5,5	>40

Para se representar o comportamento dinâmico desses sensores, considerou-se que os mesmos seriam descritos por uma função de transferência (FT) de terceira ordem, conforme propõem Ogami *et al.* (2017). Assim, a FT dos sensores apresenta o seguinte formato:

$$\frac{V}{A}(s) = \frac{Ks}{(\tau s + 1)\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1\right)} \quad (1)$$

sendo s a variável complexa de Laplace, V a tensão elétrica de saída do acelerômetro, A a aceleração a ser mensurada pelo sensor, K a sensibilidade do mesmo, τ sua constante de tempo, e ω_n e ζ a frequência natural não-amortecida e razão de amortecimento do dispositivo, respectivamente.

Conhecendo tais propriedades, pôde-se estimar os parâmetros das FTs que descrevem a relação entre tensão elétrica de saída do sensor e o mensurando. A equação 2 ilustra a FT para o acelerômetro ADXL335 ($FT_{ADXL335}$) e a equação 3 mostra a FT para o acelerômetro piezoelétrico ($FT_{PCB333B30}$).

$$FT_{ADXL335} = \frac{\frac{0,3}{9,81} \times s}{(s + 1)\left(\frac{s^2}{(2\pi \times 5732)^2} + \frac{2 \times 0,2}{2\pi \times 5732}s + 1\right)} \quad (2)$$

$$FT_{PCB333B30} = \frac{\frac{0,1}{9,81} \times s}{(s + 1)\left(\frac{s^2}{(2\pi \times 41692)^2} + \frac{2 \times 0,2}{2\pi \times 41692}s + 1\right)} \quad (3)$$

Os coeficientes foram determinados de forma que o Diagrama de Bode referente a cada acelerômetro apresentasse uma magnitude condizente com as respectivas sensibilidades dos sensores e um pico de magnitude nas respectivas frequências de ressonância, conforme apresentado na Tabela 1. Na Figura 1 é possível visualizar a magnitude e defasagem da função de resposta em frequência para ambos os acelerômetros.

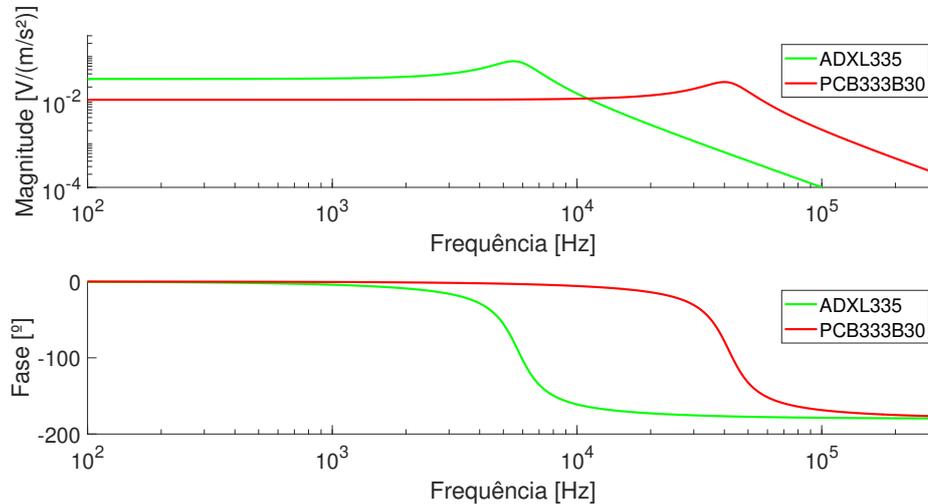


Figura 1. Diagrama de Bode dos acelerômetros

Nota-se para os dois acelerômetros que a magnitude se mantém constante e igual à sensibilidade destes até o momento em que a frequência se aproxima da ressonância, na qual é observado um pico de magnitude e, posteriormente, sua redução a valores muito baixos. No que se refere à defasagem, é observado o valor nulo até a ressonância, quando ela passa a ser de -180° para ambos os sensores.

Assim, foi possível determinar as respostas dos acelerômetros para entradas de diferentes naturezas, como será detalhado no próximo tópico deste artigo. Além disso, como forma de validar a metodologia de comparação entre sinais medidos por um acelerômetro de referência e por um acelerômetro que se deseja avaliar os limites de aplicação, foram delineadas as funções de resposta em frequência (FRF) considerando as medições do sensor PCB333B30 como entrada e as do acelerômetro MEMS como saída.

Outro ponto que merece ser mencionado é que, segundo o *datasheet* do acelerômetro ADXL335, é possível utilizá-lo para fazer medições de 0,5 até 1600 Hz. Na seção 3 desse estudo é feita uma avaliação dentro e fora dessa faixa de frequência. Por fim, vale lembrar que toda a metodologia de simulação numérica desenvolvida neste estudo será utilizada como material de apoio para uma futura aplicação experimental dos sensores estudados.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ACELERÔMETROS

Com o auxílio do *software MATLAB* e a partir das FTs estimadas foram simuladas as respostas dos sensores às seguintes entradas:

- Entrada *chirp*: Sinal harmônico constituído por 10 pulsos, cada um contendo uma amplitude constante de 1 m/s^2 e frequência crescendo linearmente de 0 até 8000 Hz em 0,1 segundos.
- Entrada aleatória gaussiana: Sinal aleatório processado por um filtro passa-baixa *Butterworth*, com frequência de corte de 12 kHz, conforme Shin and Hammond (2008).
- Entrada *stepped sine*: Sinal harmônico com uma amplitude constante de 1 m/s^2 e frequência inicial de 10Hz, aumentando para 100 Hz após 2,5 segundos, em seguida para 1000 Hz após mais 2,5 segundos e por fim para 10000 Hz, nos 2,5 segundos finais.

Foram selecionados esses três tipos de sinais para que os acelerômetros sejam avaliados tanto em situações nas quais a excitação é harmônica, quanto naquelas em que é aleatória, explorando também uma ampla faixa de frequência, a qual abrange a ressonância do sensor de baixo custo. Convém lembrar ainda que tais entradas simularão acelerações que os sensores podem medir e as respostas obtidas por meio do *software* representam as tensões elétricas produzidas por eles.

Abaixo são expostos os resultados obtidos para o acelerômetro piezoelétrico PCB333B30, utilizado como referência, e para o acelerômetro de baixo custo, cujos limites de aplicação foram avaliados.

3.1 Simulação numérica de um acelerômetro piezoelétrico comercial

Primeiramente foi imposta a entrada do tipo *chirp*. Na Figura 2 é possível observar dois ciclos do sinal de entrada imposto, bem como parte da resposta medida pelo sensor em termos de tensão elétrica de saída do mesmo.

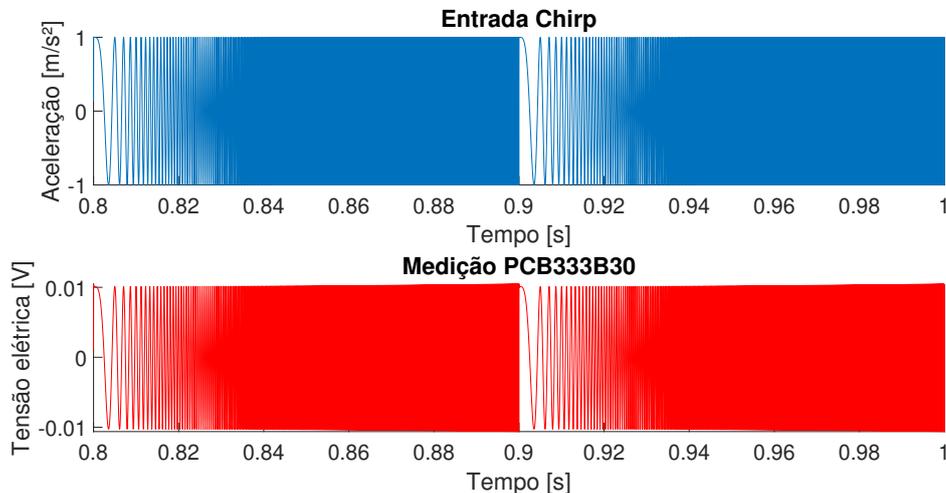


Figura 2. Simulação de uma entrada *chirp* para o acelerômetro PCB333B30

De acordo com o gráfico acima, pode-se afirmar que, em regime permanente, a resposta medida pelo sensor apresenta amplitude condizente com sua sensibilidade e que as curvas estão em fase, permitindo concluir que a medição simulada foi satisfatória. Isso ocorreu devido ao fato de que o mensurando foi configurado de modo a excitar o sensor em frequências mais baixas que sua ressonância, de modo que a operação ocorreu dentro de sua faixa útil de funcionamento.

Na Figura 3 é possível visualizar a densidade espectral de potência (PSD, do inglês *Power-spectral-density*) obtida a partir do sinal de entrada e do medido pelo acelerômetro.

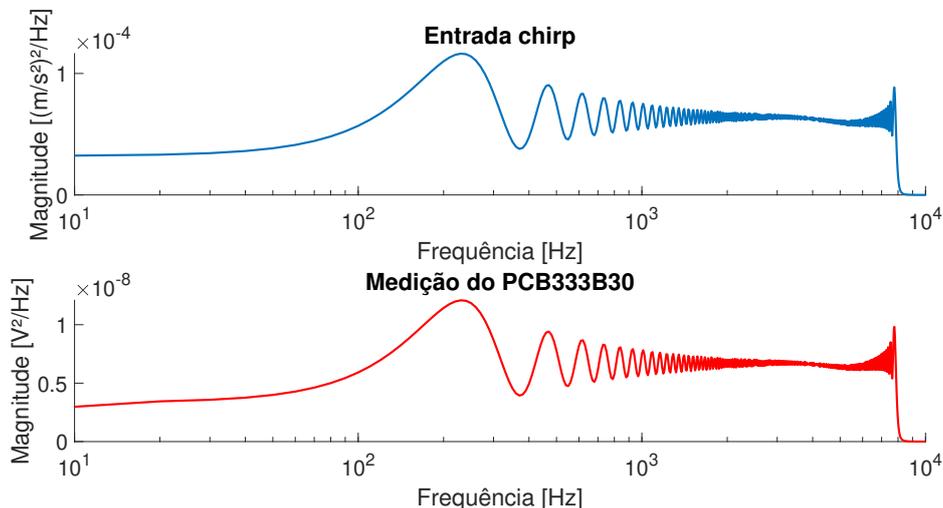


Figura 3. Densidade espectral de potência da entrada *chirp* e da medição do acelerômetro PCB333B30

Nota-se que os picos de frequência ocorrem nos mesmos pontos, evidenciando a capacidade do sensor de traduzir o sinal introduzido para a faixa de frequência excitada.

Em seguida, de maneira semelhante à descrita para a entrada *chirp*, foi analisada a resposta do sensor para a entrada aleatória, citada anteriormente. Na Figura 4 são destacados o sinal de entrada e o medido pelo sensor.

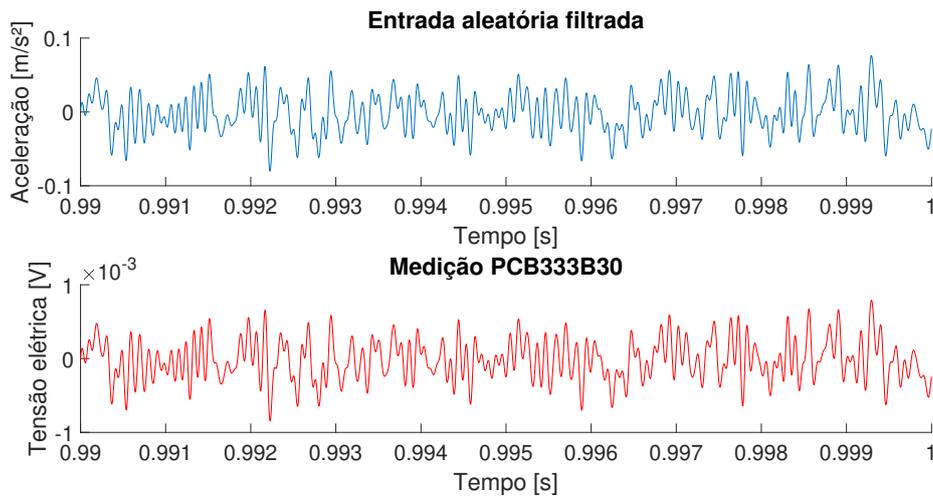


Figura 4. Simulação de uma entrada aleatória para o acelerômetro PCB333B30

Novamente, a medição do sensor PCB333B30 mostrou-se satisfatória, observando-se a proporcionalidade entre as amplitudes e a defasagem praticamente nula. Para essa entrada também extraiu-se a PSD, conforme a Figura 5.

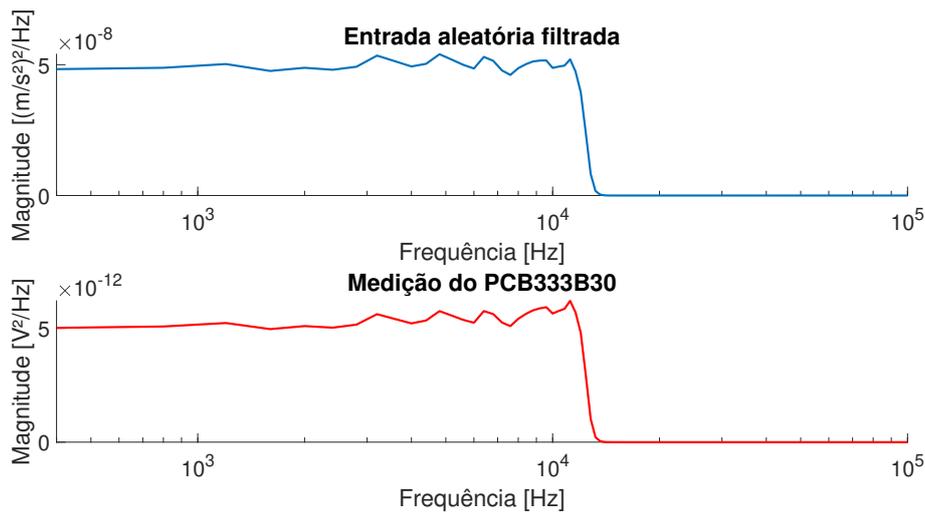


Figura 5. Densidade espectral de potência da entrada aleatória e da medição do acelerômetro PCB333B30

Pode-se observar que as curvas são bem semelhantes, apresentando uma queda brusca de magnitude para frequências acima de 12 kHz, como esperado, já que esta é a frequência na qual delimitou-se o filtro adicionado.

Finalizando a análise desse acelerômetro, delineou-se também sua curva de resposta fornecida quando submetido à entrada *stepped sine*, que pode ser visualizada na Figura 6. Cada janela destaca uma das frequências estipuladas na seção anterior (10, 100, 1000 e 10000 Hz).

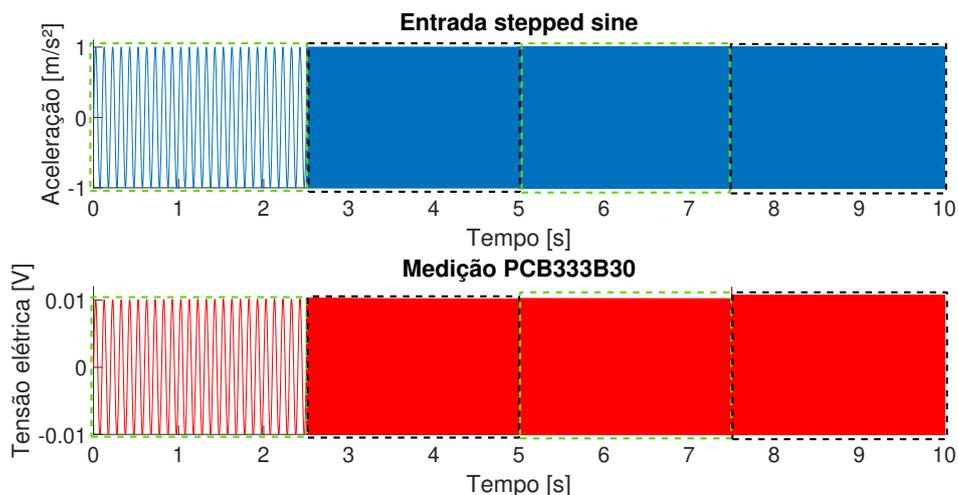


Figura 6. Simulação de uma entrada *stepped sine* para o acelerômetro PCB333B30

Nota-se que a sensibilidade do acelerômetro PCB333B30 se mantém praticamente constante independente da variação de frequência apresentada pelo sinal de entrada, o que confirma a capacidade do sensor de medir sinais com frequências dentro da faixa excitada.

3.2 Simulação numérica de um acelerômetro de baixo custo

Procedendo de forma semelhante à descrita no tópico anterior, na Figura 7 é possível observar a resposta do acelerômetro ADXL335 à mesma entrada *chirp* imposta ao acelerômetro de referência.

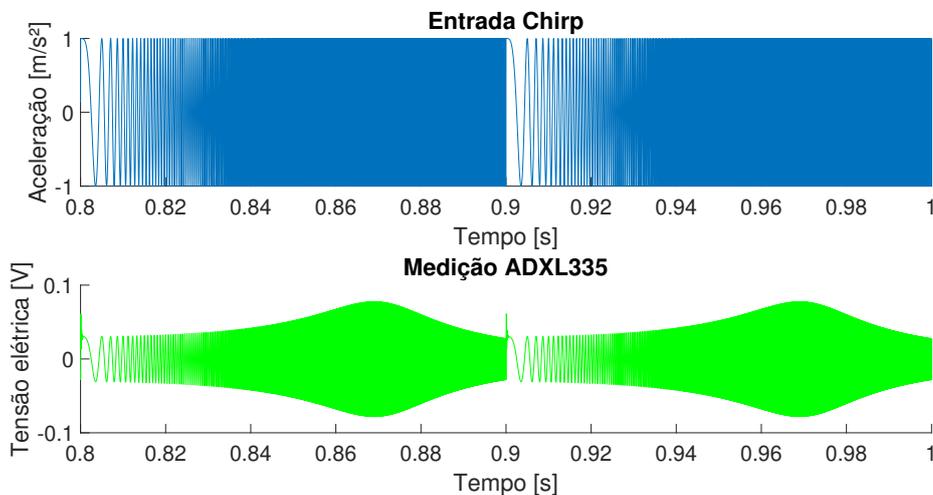


Figura 7. Simulação de uma entrada *Chirp* para o acelerômetro de baixo custo

Neste ponto é importante destacar que em regime permanente a amplitude se mantém condizente com a sensibilidade do sensor nas frequências mais baixas, mas há um pico de amplitude quando a excitação ocorre na frequência de ressonância do acelerômetro analisado.

Esse pico de amplitude pode ser melhor observado por meio da análise da PSD do sinal medido pelo acelerômetro, ilustrada na Figura 8.

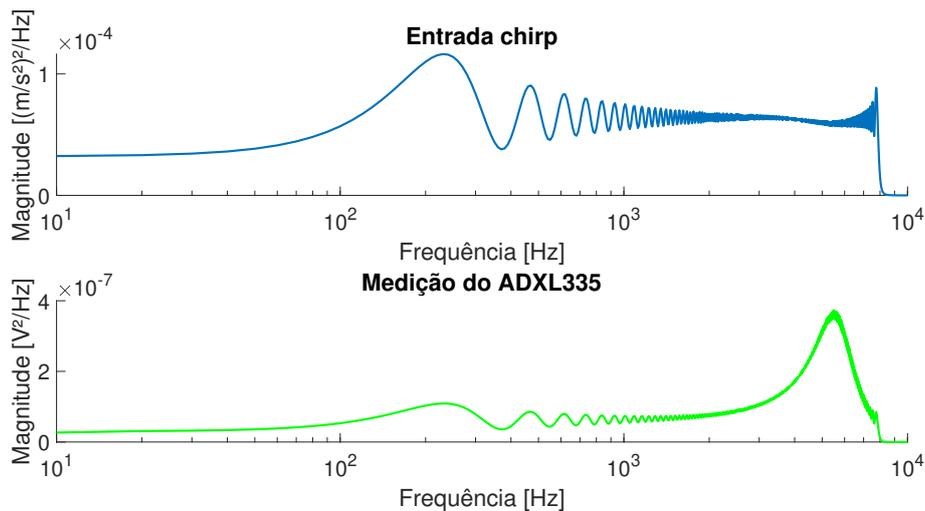


Figura 8. Densidade espectral de potência da entrada *chirp* e da medição do acelerômetro ADXL335

Nos gráficos observa-se também que para frequências mais baixas o acelerômetro testado destaca de forma coerente as frequências excitadas, ao apresentar oscilações semelhantes às obtidas para o sinal de entrada.

Em seguida foi imposta a mesma entrada aleatória filtrada e medida a resposta do acelerômetro ADXL335. Na Figura 9 são mostrados o sinal de entrada e a medição do sensor.

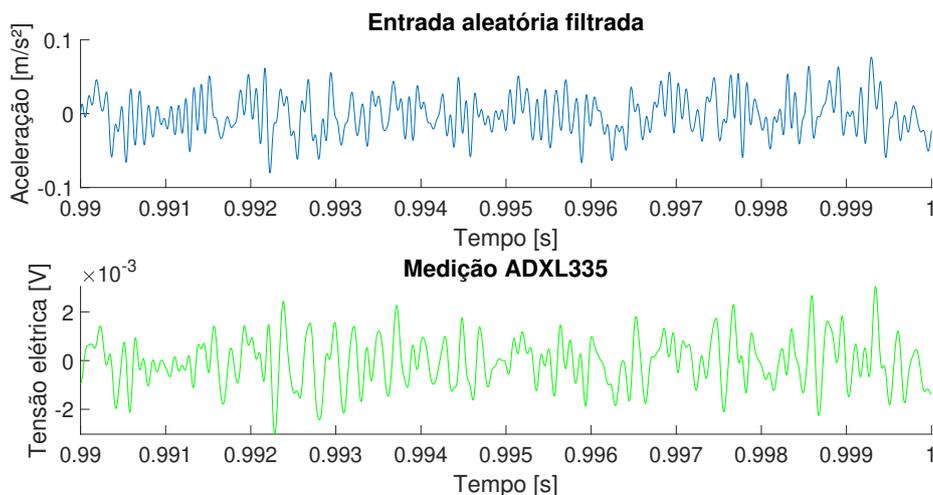


Figura 9. Simulação de uma entrada aleatória para o acelerômetro de baixo custo

Fica claro que o sensor não é capaz de medir as altas frequências do sinal de entrada, não identificando algumas oscilações existentes e apresentando amplitudes não condizentes com a sua sensibilidade. Observa-se que, quando há várias oscilações no sinal de entrada em um curto período de tempo, o acelerômetro não gera a tensão elétrica que reproduziria este sinal, além de apresentar amplitude diferente da aceleração multiplicada pela sensibilidade do mesmo em diversos pontos.

Para a entrada aleatória também delineou-se a PSD do sinal de entrada e do medido pelo acelerômetro, conforme apresentado na Figura 10.

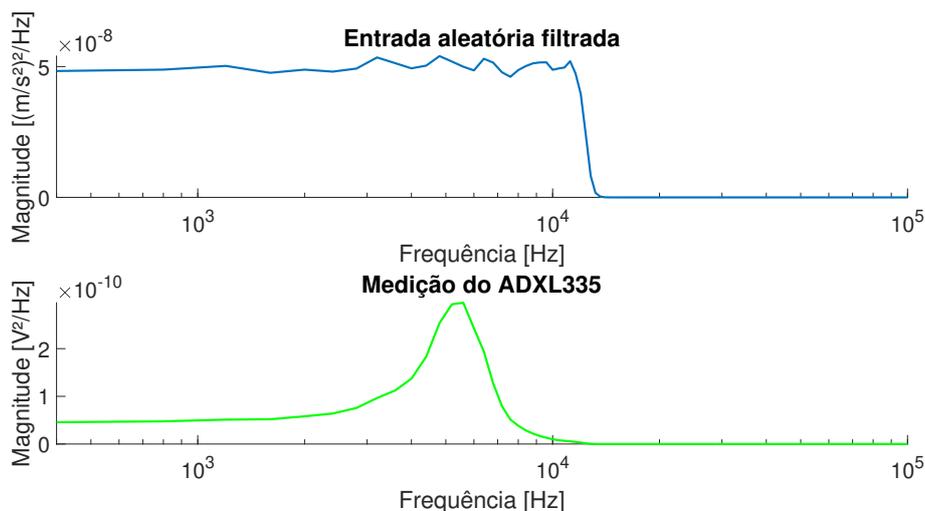


Figura 10. Densidade espectral de potência da entrada aleatória e da medição do acelerômetro ADXL335

As curvas obtidas são bem diferentes, evidenciando a incapacidade do sensor de medir sinais cuja frequência chega à 12 kHz. Vale destacar ainda que o pico de magnitude existente na curva correspondente à medição do sensor ocorre numa frequência que coincide com sua ressonância, concordando com o conceito de frequência de ressonância introduzido na seção 1.

Por fim, obteve-se também a resposta do acelerômetro ADXL335 para a entrada *stepped sine*, conforme ilustra a Figura 11. Novamente, cada retângulo delimita uma frequência de entrada.

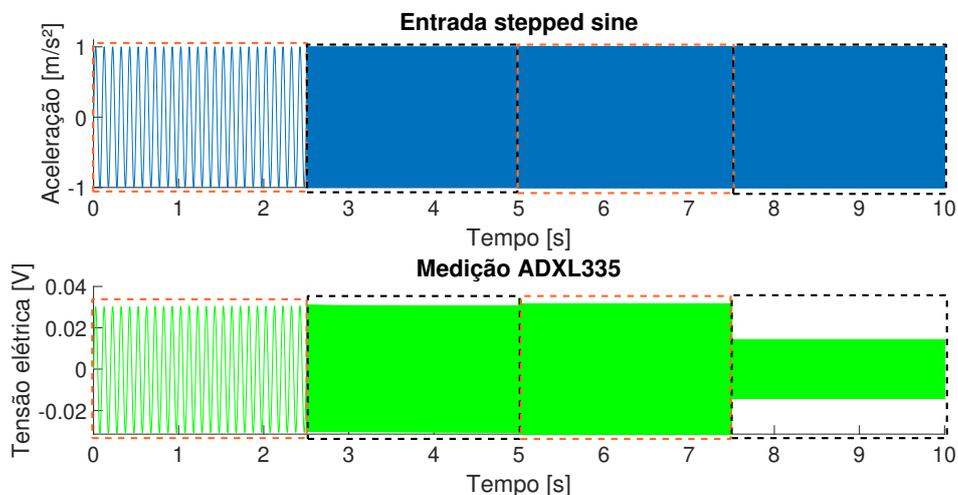


Figura 11. Simulação de uma entrada *stepped sine* para o acelerômetro de baixo custo

É possível observar pelos gráficos que a tensão elétrica gerada é condizente com a sensibilidade do acelerômetro até a frequência de 1000 Hz. Entretanto, quando estabelecida uma frequência de 10 kHz, há uma divergência no que se refere à amplitude do sinal medido pelo sensor, certamente devido ao fato da operação ocorrer em frequência superior à ressonância do modelo ADXL335 avaliado.

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DE SENSORES

Confrontando as respostas de ambos os acelerômetros com as entradas impostas observou-se que o ADXL335 não apresenta respostas condizentes com o sinal de entrada quando há frequências próximas ou maiores que sua ressonância. Porém, geralmente o comportamento dinâmico de sistemas reais não apresenta entradas bem definidas e conhecidas por completo e, portanto, não é possível fazer a validação dos sensores por meio da comparação entre as entradas existentes e os sinais medidos por eles.

Assim, uma saída é comparar a medição do acelerômetro que se deseja validar ou calibrar com um sensor de referência. Para tal, foi calculada uma FRF de modo a relacionar a saída do sensor de referência PCB333B30 com a do sensor ADXL335. Para isso, utilizou-se de um estimador espectral H_1 (Shin and Hammond, 2008) para calcular a FRF entre a

tensão elétrica medida no sensor de baixo-custo e a aceleração medida pelo dispositivo de referência ($\frac{V_{ADXL335}}{A_{PCB333B30}}(\omega)$). Esse cálculo foi implementado considerando-se a média de 10 realizações para se minimizar a variância da estimativa. Os sinais no domínio do tempo foram processados por meio de uma janela *Hanning*.

Na Figura 12 é possível visualizar tanto a FRF para o acelerômetro ADXL335 analítica, quanto as FRFs reconstruídas a partir das medições feitas pelos sensores, considerando a medição do acelerômetro de referência como entrada. Vale lembrar que ao se mencionar o termo "FRF analítica" refere-se à função de resposta em frequência obtida através das função de transferência desse sensor, descrita na seção 2.

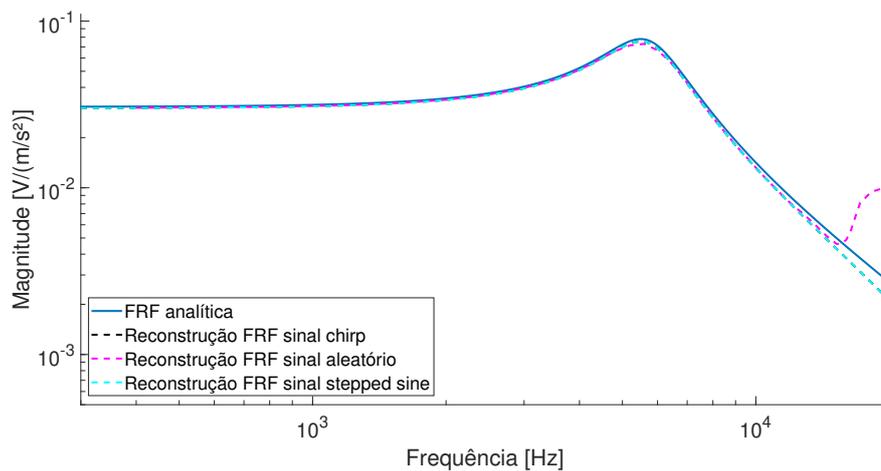


Figura 12. Funções de resposta em frequência analítica e reconstruídas

Nota-se que as FRFs reconstruídas são bem semelhantes à FRF analítica. No caso da entrada aleatória observam-se pequenas diferenças de magnitude na frequência de ressonância e acima de 16 kHz, ou seja, acima da faixa de frequência excitada pelo mensurando nesse caso (até 12 kHz).

Na Figura 13 é mostrada a função de coerência relativa à estimativa das FRFs calculadas com o estimador H_1 . Essa representação confirma que, para frequências acima de 16 kHz, a estimativa da FRF tem performance ruim, o que é resultado da própria atenuação do sinal de entrada para frequências acima de 12 kHz.

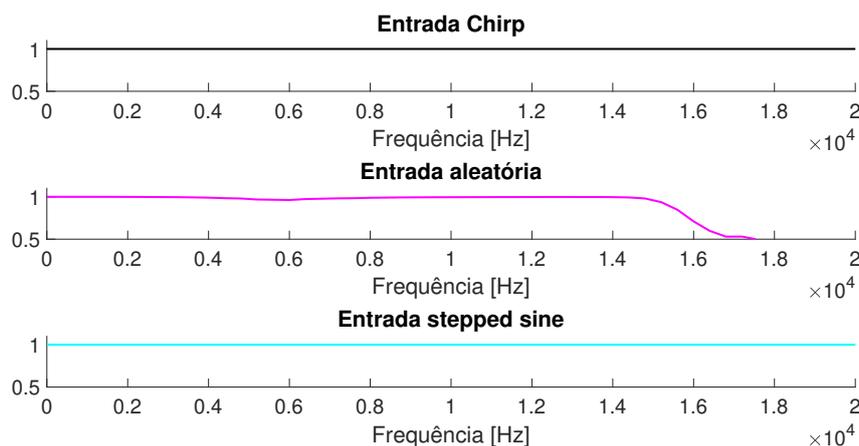


Figura 13. Funções de coerência entre os sinais medidos pelos acelerômetros

É possível observar que, ao estimar a FRF do acelerômetro de baixo-custo considerando-se a medição do acelerômetro piezoelétrico como uma entrada, foi possível verificar de forma bastante completa o comportamento dinâmico do sensor ADXL335. Visto que a faixa de frequência útil do sensor PCB333B30 é consideravelmente maior que a do ADXL335, mostrou-se razoável investigar a FRF do mesmo aplicando a metodologia proposta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, primeiramente estimou-se as funções de transferência que descrevem os comportamentos dinâmicos dos acelerômetros ADXL335 e PCB333B30, com base nos *datasheets* dos mesmos. Em seguida, analisou-se as

respostas geradas pelo acelerômetro PCB333B30, utilizado como referência, para entradas de diferentes naturezas. Depois, procedeu-se de maneira análoga para o acelerômetro de baixo custo, avaliando as respostas dadas por ele quando submetidos às entradas *chirp*, aleatória e *stepped sine*. Ao final, utilizando um estimador espectral e a função de coerência, fez-se uma avaliação do comportamento dinâmico do acelerômetro ADXL335.

Por meio dos passos citados acima foi possível determinar qual é a faixa de frequência na qual o acelerômetro ADXL335 apresenta medições satisfatórias e, além disso, validar a metodologia de comparação entre as respostas dadas por acelerômetros, a fim de definir quais são os limites de operação de determinado modelo com base em outro modelo utilizado como referência, dado que este último possui sensibilidade adequada em uma faixa mais ampla de frequência. Dessa forma, planeja-se futuramente utilizar dessa mesma metodologia de validação com o intuito de se estabelecer de modo experimental quais são os limites de utilização do acelerômetro MEMS estudado em medições de vibração, através de aplicações em análise modal experimental de estruturas mecânicas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através dos processos nº 2015/25146-3 e 2018/25135-0 pelo fomento que permitiu a compra das ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho. O primeiro autor agradece ainda à FAPESP, Processo nº 2020/05973-0, pelo apoio financeiro e institucional, tornando possível a realização deste estudo.

7. REFERÊNCIAS

- Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J.K. and Starr, A., 2009. "Performance evaluation of MEMS accelerometers". *Measurement*, Vol. 42, No. 5, pp. 790–795.
- Girolami, A., Zonzini, F., De Marchi, L., Brunelli, D. and Benini, L., 2018. "Modal analysis of structures with low-cost embedded systems". In *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. IEEE, pp. 1–4.
- Mahalik, N.P., Iyuke, S. and Ahn, B.H., 2006. "Principles of MEMS and MOEMS". *Micromanufacturing and Nanotechnology*, pp. 19–44. doi:10.1007/3-540-29339-62.
- Ogami, Y., Murakita, N. and Fukudome, K., 2017. "Computational experiments on the step and frequency responses of a three-axis thermal accelerometer". *Sensors*, Vol. 17, No. 11, p. 2618.
- Rao, S.S., 2017. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education, Incorporated. ISBN 9780134361307. URL <https://books.google.com.br/books?id=t6gHswEACAAJ>.
- Schuler, E., 1997. *Equipamento de ensaio para acelerômetros piezoelétricos*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. URL <http://hdl.handle.net/10183/159056>.
- Shin, K. and Hammond, J., 2008. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. John Wiley & Sons.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.