

EFEITOS CRUZADOS EM ACELERÔMETROS CAPACITIVOS

Antônio Fernando Moura Santos, afmoura@mecanica.ubu.br

Elias Bitencourt Teodoro, teodoro@mecanica.ufu.br

Marcos Morais de Sousa, mmsousa@mecanica.ufu.br

Marcus Antônio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo. Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para determinar possíveis interferências ou efeitos cruzados; estimar a incerteza associada à calibração do sistema de medição, de baixo custo, baseado no acelerômetro capacitivo ADXL321. Para tanto são propostas as seguintes etapas: Calibração; identificação das variáveis de influência; definição do modelo matemático; estimativa da incerteza de medição e análise dos resultados. Analisou-se a exatidão, função resposta em frequência (FRF) e efeitos cruzados. Foi possível concluir que o sistema de medição tem boa exatidão, funciona de forma adequada e similar com o sistema de referência, isto é, observou-se que o comportamento nas direções principais e cruzadas é semelhante tanto para os acelerômetros padrão, quanto para os sensores estudados. O resultado da avaliação da incerteza expandida em relação aos efeitos cruzados é: $(10,0000 \pm 0,7278)$ dB para $k=2,0$ e 95,45% de probabilidade de abrangência.

Palavras chave: acelerômetro, efeitos cruzados, calibração, incerteza.

1. INTRODUÇÃO

Graças à tecnologia dos Sistemas Microeletromecânicos, SMEM, atualmente os acelerômetros com sensibilidade biaxial ou tri axial estão reduzidos a apenas um componente com aproximadamente 15 mm^3 e poucos miligramas de massa. Estes sensores são produzidos em larga escala a um custo baixo e podem ser implementados em circuitos integrados de dimensões reduzidas alimentados por bateria. Assim sendo, estes podem adicionar novas tecnologias e vantagens aos acelerômetros, tornando-os mais funcionais e seguros.

Os sistemas Microeletromecânicos, também, poderão ser usados em muitas outras áreas, entretanto resulta necessário o desenvolvimento de pesquisas para validar a sua aplicabilidade e eficácia. Estas medições têm aplicação em diversos segmentos da indústria, tanto nas pesquisas quanto no desenvolvimento e avaliação de componentes (Ripper, G.P. et al., 2006).

Todo sistema de medição deve ser calibrado antes de utilizá-lo, baseado em normas vigentes. A partir de 1993, é obrigatório efetuar a avaliação da incerteza de todo processo de calibração ou medição. Hoje dia, avaliação é regida pelas normas ISO/IEC 1725 (2005) e ISO TAG 4/WG 3 (2008).

Pelo exposto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para determinar possíveis interferências ou efeitos cruzados; estimar a incerteza associada à calibração de um sistema de medição de baixo custo baseado no acelerômetro capacitivo ADXL321.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Deseja-se que um sensor bidirecional, ou mesmo um tri direcional, não apresente resposta em uma direção perpendicular à direção de excitação. Motivo pelo qual, os testes para avaliar a possível interferência cruzada foram de suma importância para validar o sistema de medição desenvolvido.

O uso de equipamentos calibrados permite assegurar a qualidade dos resultados obtidos. Estes são requisitos para a rastreabilidade dos resultados de uma medição às diferentes unidades do Sistema Internacional de unidades (Ripper, G.P. et al., 2006).

A calibração de um transdutor de vibrações tem como objetivo a determinação da sua sensibilidade a vibrações mecânicas nas amplitudes e frequências de interesse, para o grau de liberdade de movimento em que este foi projetado e será usado (Ripper, G.P. et al., 2006).

A calibração de transdutores de vibração é tratada pelo conjunto de normas ISO 16063 – Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Elas abrangem métodos de calibração primária, métodos de calibração comparativa e ensaios para determinação de características adicionais de transdutores para medição de vibração e choque (Ripper, G.P., et al., 2006).

Neste trabalho, adotou-se a norma ISO 16063-21 que descreve os procedimentos de calibração direta por comparação de transdutores de vibração e orienta ainda sobre a avaliação da incerteza.

3. METODOLOGIA

O sistema de medição de baixo custo, baseado no ADXL321 (Fig. 1) apresenta os seguintes componentes: três transdutores montados, perpendicularmente e adequadamente, com dois pequenos “chips” ADXL321 em estruturas de

alumínio com geometrias diferentes. A montagem dos mesmos foi efetuada conforme recomendado por Marques e Sousa (2007), permitindo a obtenção de um sensor tri axial.

O acelerômetro ADXL321 é fabricado pela Analog Devices/USA e apresenta as seguintes características: Dimensões=4 x 4 x 1,45 mm; Resolução=0,03 m/s² em 50 Hz; Sensibilidade=57 mV/g (g = 10 m/s²); Faixa de medição=± 18 g ou 180 m/s²; Não linearidade=± 0,2% da faixa de medição; Erro de montagem=±1°; Erro de alinhamento=± 0,1°; Sensibilidade em eixos= ± 2% faixa de medição; Faixa de frequência=0,5 Hz a 2,5 kHz e frequência de ressonância=5,5 kHz, conforme informação do catálogo da Analog Devices (2007).

O condicionador de sinais foi projetado e desenvolvido por Marques (2010).

A Figura 2 mostra a montagem do sensor cilíndrico sobre o bloco padrão.

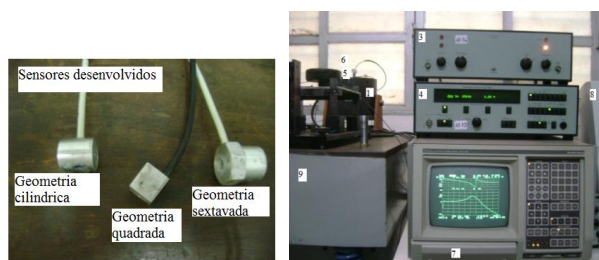


Figura 1 – Sensores desenvolvidos. Figura 2 – Montagem do sensor cilíndrico sobre o bloco padrão

A calibração do sistema de medição desenvolvido foi efetuada no Laboratório de Vibrações e Acústica e no Laboratório de Sistemas Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), seguindo as recomendações do conjunto de normas técnicas ISO 16063 e da NBR ISO/IEC 17025 de 2005. A temperatura e umidade relativa do ar durante todos os experimentos foram monitoradas. Para tanto foi utilizado um Termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 °C e intervalo de medição de -20 a 60 °C para a temperatura. Enquanto que para a umidade relativa faixa nominal é de 0 % a 100 % e a resolução de 0,1 %.

A seguir foi realizada uma calibração direta por comparação, utilizado um sistema de monitoramento de vibrações descrito a seguir conforme requisitado na ISO 16063-21. Foi utilizado um gerador de sinais B&K 1049, em diferentes níveis de aceleração: 3,0; 6,0 e 9,0 m/s² (RMS) e na faixa de 2 Hz a 20 kHz. O sinal de saída passando por um amplificador de sinais, B&K modelo 2712, que por sua vez alimenta o excitador, B&K modelo 4808. Completando esta montagem, foi fixado ao excitador: um bloco padrão de 22,8 mm de comprimento, de classe K, rastreado ao padrão nacional; sobre ele o sensor a calibrar e o condicionador de sinais desenvolvido. O Este conjunto foi montado sobre uma mesa inercial, conforme (Fig. 3). Duas saídas, na direção de excitação *z* e na direção cruzada *x* foram automaticamente mostradas e gravadas pelo analisador digital, da Scientific-Atlanta modelo SD380. Um computador foi usado para o armazenamento de dados.

Outra calibração similar foi realizada com dois acelerômetros padrão B&K 4371: um foi acoplado em uma das superfícies de medição do bloco padrão e o segundo acoplado na superfície lateral e perpendicular do bloco. O objetivo desta montagem foi avaliar possíveis efeitos cruzados do próprio excitador. O bloco padrão teve também a função de uma superfície de referencia para o apoio, dos sensores desenvolvidos, sobre o excitador em outros testes.

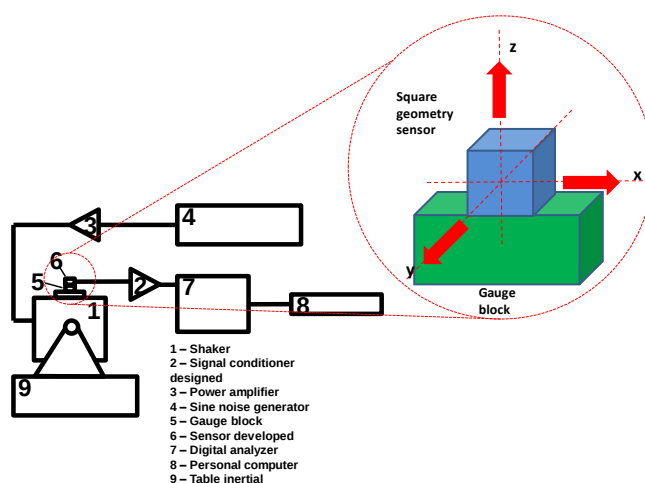


Figura 3 – Esquema da montagem da calibração.

4. RESULTADOS

O acelerômetro ideal é aquele que apresenta sensibilidade somente na direção de excitação. Entretanto, na (Fig. 3), primeiro gráfico, é apresentado o efeito cruzado entre dois acelerômetros padrão. No segundo mostra o mesmo efeito para duas direções dos sensores em estudo. Cor azul para direção de excitação e cor vermelha para direção cruzada.

Pode-se observar nas figuras que o comportamento nas direções principais e cruzadas é semelhante para os acelerômetros padrão e sensores estudados. Mostra ainda maiores diferenças para o sensor 1 (quadrado) nas altas frequências e melhores resultados nas médias e baixas frequências; enquanto que para o sensor 2 (cilíndrico) apresentou melhores resultados até mesmo nas altas frequências.

Nota-se também uma diferença média do ganho cerca de 10 dB. Os efeitos cruzados dos sensores avaliados ocorrem na medida em que os ADXL321 não são montados perfeitamente paralelos às estruturas metálicas dos sensores. Tanto os acelerômetros padrão, quanto os sensores desenvolvidos apresentaram uma discrepância no ganho nas baixas frequências.

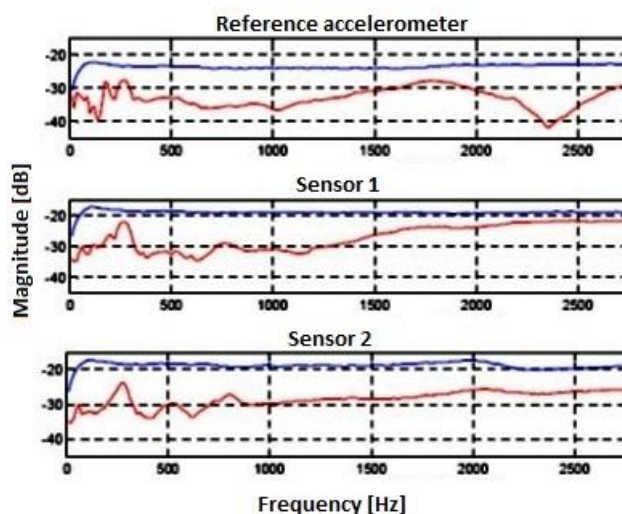


Figura 4 - Efeitos cruzados

A seguir foi efetuado o cálculo da incerteza em relação ao efeito cruzado, conforme recomendado pelo ISO TAG 4/WG 3 (2008). Foram identificadas as variáveis de influência que contribuem para a incerteza final. São elas:

ΔGS – correção associada à incerteza do gerador de sinais (0,05%); ΔAS – correção devida à incerteza da calibração do amplificador de sinais (0,5%); ΔAX – correção devida à incerteza da calibração dos sensores ADXL321 (4,4%); ΔCSD – correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais desenvolvido (1%); ΔFFT – correção devida à incerteza da calibração do analisador digital (0,025%); $s(Leit.)$ – desvio padrão das leituras (102 400/s); ΔPC – correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional do analisador digital, ΔR – correção associada à resolução do sistema de medição (1 dB); $\Delta P1BP$ – correção devido ao desvio de planeza superfícies de medição do bloco padrão de comprimento nominal de 22,8 mm; $\Delta P2BP$ – correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição do bloco padrão e $\Delta P3BP$ – correção devido ao desvio de perpendicularidade entre a superfície de medição e a superfície lateral do bloco padrão.

As correções ΔPC , $\Delta P1BP$, $\Delta P2BP$ e $\Delta P3BP$ são desprezíveis visto que tanto o bloco padrão, quanto o ΔPC apresentam incertezas muito pequenas. O modelo matemático para o cálculo da incerteza, para este sistema, após descartar as variáveis desprezíveis, é dado pela Eq. (1).

$$EC = s(Leit.) + \Delta RSM + \Delta GS + \Delta AS + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (1)$$

Onde EC é o mensurando ou variável de saída, isto é, o efeito cruzado em (dB) entre a direção de excitação e perpendicular. Para cada sensor estudado, o modelo matemático é similar; pois a análise, para cada um deles, foi referente ao efeito cruzado e depois comparado com os acelerômetros padrão.

A tabela 1 mostra o resultado da avaliação das incertezas para a calibração, referente ao efeito cruzado.

Tabela 1 - Incerteza da calibração – Efeito cruzado

Efeito Cruzado em [dB]							
Grandeza Xi	Estimativa Xi	TI	DP	CS	GL	IP PA=68%	PC [%]
$\Delta s(Leit)$	0,0000000	A	Normal	1	∞	0,0000000	0,00
ΔR_{SM}	1,0000000	B	Retangular	1	∞	0,288675	62,94
ΔGS	0,0005000	B	Normal	1	∞	0,002500	0,01
ΔAS	0,0050000	B	Normal	1	∞	0,025000	0,47
ΔAX	0,0440000	A	Normal	1	∞	0,220000	36,55
ΔCSD	0,0100000	B	Normal	1	∞	0,005774	0,02
ΔFFT	0,0002500	B	Normal	1	∞	0,001250	0,01
Incerteza padrão combinada (u_c) em [dB]						0,3639	100,00
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						> 100	
Fator de abrangência (k)						2,0	
Incerteza expandida (U) em [dB] – PA = 95,45%						0,7278	
Incerteza do Efeito Cruzado em relação a 10 dB						7,3%	

Todas as informações referentes ao cálculo da incerteza são apresentadas de forma resumida na tabelas 1. Nesta tabela, TI representa o tipo de incerteza, DP a distribuição de probabilidade, CS o coeficiente de sensibilidade, GL indica o número de graus de liberdade associado a cada variável de influência, IP a incerteza padrão e PC a parcela de contribuição.

Pode-se observar que a incerteza expandida é de 0,7278 dB (7,3%) para $k = 2,0$ e 95,45% de probabilidade de abrangência. As variáveis que mais influenciaram no cálculo das incertezas estão relacionadas a ΔR_{SM} (0,2868) [dB] - 62,94% e ΔAX (0,2200 [dB] - 36,55%). É importante salientar que os demais resultados, não são apresentados, por serem similares.

5. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas algumas conclusões:

O sistema desenvolvido, baseado no acelerômetro capacitivo ADXL321, funciona corretamente.

O ganho da função resposta em frequência cruzada é em média 10 dB menor que a apresentada na direção da excitação, a qual pode ser considerada adequada para as aplicações pretendidas para o sistema proposto.

A avaliação dos efeitos cruzados para os acelerômetros padrão, o sensor de geometria quadrada, cilíndrica e sextavada mostraram um comportamento similar. Os efeitos cruzados dos sensores avaliados ocorrem na medida em que os acelerômetros capacitivos ADXL321, na montagem bastante trabalhosa, não ficam perfeitamente paralelos ou perpendiculares em suas estruturas metálicas.

A calibração dinâmica mostrou que o sistema de medição funciona corretamente com exatidão e precisão adequadas.

O resultado da avaliação da incerteza expandida em relação aos efeitos cruzados é: (10,0000 $\pm$ 0,7872) dB para $k=2,0$ e 95,45% de probabilidade de abrangência.

7. REFERÊNCIAS

- Ripper, G.P. Silva Dias, R. e Garcia, G.A. “A importância da calibração de acelerômetros para a indústria automobilística” INMETRO – Diavi – Divisão de Metrologia em Acústica e Vibrações/Lavib - Laboratório de Vibrações Av. N. S. das Graças 50, Xerém. D. Caxias, RJ 25250-020, 15p. Brasil, 2006.
- ISO 16063-21:2003, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer” Geneve, 2003.
- Marques, V. A. S; Meola, T., Duarte M. e Moraes Sousa, M. “Um acelerômetro de baixo custo para aplicações industriais”. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM-2008, Salvador Bahia, Brasil, 25 a 28 de agosto de 2008.
- Marques, V. A. S; “Desenvolvimento de uma instrumentação de baixo custo para monitoramento de vibrações”, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso, 2010, 36 p.
- ISO/TAG 4/WG 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, 2008, 131p.
- ISO/IEC 17025 “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”, Janeiro 2005.
- Catálogo do fabricante AnalogDevices/USA, 2007.

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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