

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM SISTEMA COM SENSORES ADXL321

Prof. MSc. Antônio Fernando M Santos; afmoura@mecanica.ufu.br
Profa Dra. Rosenda Valdés Arencibia; arvaldes@mecanica.ufu.br
Prof. Dr. Marcus Antônio V Duarte; mvduarte@mecanica.ufu.br
Prof. Dr. Marcos Morais de Sousa; mmsousa@mecanica.ufu.br
Mestrando Eng. Mecatrônico Vinicius Abrão da Silva Marques; vinicius.abrao@hotmail.com

Resumo: Este trabalho tem como objetivo desenvolver e calibrar um sistema de medição de baixo custo baseado no acelerômetro ADXL321, para aplicações gerais. A calibração visa à determinação dos parâmetros metrológicos do sistema de medição, a saber: exatidão, precisão, resolução, sensibilidade, função resposta em frequência, coerência, entre outros. Paralelamente será desenvolvida uma metodologia para estimar a incerteza associada à calibração. Para tanto são propostas as seguintes etapas: projeto e montagem do sistema de medição; calibração; identificação das variáveis de influência; definição do modelo matemático para cálculo da incerteza e estimativa da mesma; por fim, análise dos resultados. Foi possível concluir que o sistema de medição funciona de forma adequada com: boa exatidão; precisão de $(1,1658 \pm 0,0026)$ V/m/s²; intervalo de confiança de 0,0018 V/m/s²; boa linearidade até 4 kHz e faixa dinâmica de 19 dB. Para o Sistema 1 a incerteza expandida associada à frequência de vibração medida, foi de 4,41 % em 156,00 Hz para $k = 2$ e 95,45% de abrangência. Enquanto que para a sensibilidade foi de 4,35% em 1,1659 V/m/s² para $k = 2$ e 95,4% de abrangência. Para o Sistema 2 a incerteza expandida associada à frequência de vibração medida foi de 4,16% em 156,00 Hz para $k = 2$ e 95,45% de abrangência. Enquanto que para a sensibilidade foi de 4,17 % em 1,1659 V/m/s² para $k = 2$ e 95,45% de abrangência.

Palavras-chave: palavra acelerômetro, incerteza, calibração

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução dos processos de fabricação, tornou-se necessário o desenvolvimento de técnicas de aquisição e análise dos sinais de vibração. Os sinais de vibração contêm informações úteis e oferecem excelentes possibilidades para diagnóstico em tempo real de muitos problemas críticos da usinagem, incluindo o desgaste da ferramenta. Porém, uma das questões que dificulta a implementação dos sistemas de aquisição desses sinais é o alto custo dos aparelhos utilizados, dentre eles, acelerômetros triaxiais cujo custo supera os US\$ 1000,00.

Graças à tecnologia dos Sistemas Microeletromecânicos, SMEM, atualmente os acelerômetros com sensibilidade triaxial estão reduzidos a apenas um componente com aproximadamente 15 mm³ 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. Conseqüentemente, estão sendo amplamente utilizados na indústria automotiva para a medição de vibrações e choques mecânicos. 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).

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. Visto que a maioria das aplicações está ainda em uma fase muito primária de desenvolvimento.

Pelo exposto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e calibrar um sistema de medição de baixo custo baseado no acelerômetro ADXL321, para aplicações gerais, bem como, o desenvolvimento de uma metodologia para estimar a incerteza associada à calibração.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O desempenho metrológico do sistema de medição está relacionado com a sua capacidade de executar uma determinada tarefa. Na busca da melhoria do desempenho do mesmo, a análise dos erros, que são inerentes aos componentes do sistema, é um fator extremamente importante. O valor e o comportamento dos erros podem ser determinados através de um procedimento de calibração.

Segundo o INMETRO (2009), a calibração é a operação que estabelece, em uma primeira etapa e sob condições

especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas. Ela permite, além, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência. Em uma segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição mais completo a partir de uma indicação.

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, 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, 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. et. al., 2006).

A ISO 16063-1 (1998) apresenta os conceitos básicos relativos à calibração de transdutores de vibração e as diretrizes relativas ao cálculo de incerteza que são válidos para todas as demais partes. Enquanto que a ISO 16063-11 (1999) especifica a instrumentação e os procedimentos para a calibração de acelerômetros somente ou com condicionador, abrangendo a obtenção da magnitude e o atraso de fase da sensibilidade complexa empregando excitação senoidal e interferometria a laser.

Por sua vez, a ISO 16063-21 (2003) descreve a calibração de transdutores de vibração por comparação. Por fim a ISO 16063-22 (2005) especifica a instrumentação e os procedimentos a serem usados para a calibração secundária de transdutores de vibração, empregando excitação por choque.

Os padrões nacionais primários de medição, na área de vibrações, consistem basicamente em um excitador de vibrações para gerar movimento harmônico senoidal, um sistema interferométrico para quantificar este movimento mecânico e instrumentação para medição do sinal de saída do transdutor sob calibração. Devido às limitações dos excitadores de vibração, não é possível empregar um único equipamento para a geração de movimento harmônico puro em uma ampla faixa de frequências.

A calibração primária da magnitude da sensibilidade de acelerômetros padrão e de cadeias de medição de aceleração padrão é apresentada na ISO 16063-11 (1999). O Método de contagem de franjas pode ser usado para frequência entre 1 e 1000 Hz. Por sua vez, o Método de ponto mínimo pode ser usado para o intervalo de 1 a 10 kHz. Enquanto que o Método de aproximação por seno permite a calibração de amplitude e fase com níveis constantes de aceleração de 10 Hz a 10 kHz.

3. METODOLOGIA

O sistema de medição de baixo custo, baseado no ADXL321 (Figura 1) apresenta os seguintes componentes: transdutor formado por três acelerômetros triaxiais, cada um, com dois pequenos chips ADXL321, montados, adequadamente, em estruturas de alumínio com geometrias diferentes. A montagem dos mesmos foi efetuada conforme recomendado por Marques e Souza (2007), permitindo a obtenção de um sensor triaxial.

Unidade de tratamento do sinal composta por um transformador comercial, do tipo 220 V/ ± 12 V, que reduz a tensão alternada fornecida pela rede elétrica para o valor nominal de 12 V (corrente alternada). Na sequência uma ponte de Wheatstone com diodos retifica a tensão alternada, gerando duas saídas de corrente contínua, uma de +12 V e outra de -12 V. Ambas passam, ainda, pelo regulador de tensão garantindo uma alimentação mais estabilizada, eliminando a componente alternada chamada de ondulação (“ripple”), característica de circuitos retificadores com diodos que oscila na crista da tensão contínua nominal. O regulador de tensão comercial é do tipo LM 7812 e LM 7912.

Esta tensão contínua alimenta um filtro do tipo passa baixa (F), um ganho (G) e um somador (S). Todos eles são amplificadores operacionais do tipo LM 348, os quais têm como funções: filtrar frequências de vibrações indesejáveis ou acima de um determinado valor nominal; amplificar o pequeno sinal de saída do sensor e somar um determinado valor na saída nominal do sinal para que o conversor analógico de sinal (A/D), somente converta sinais elétricos positivos, respectivamente.

Paralelamente a tensão contínua passa por uma ponte de Wheatstone com diodos de condução reversa (Zener) que terá a função de alimentar os sensores nas faixas de 2,7, 4,7 ou 5,7 V.

O condicionador de sinais é composto por uma fonte de tensão contínua responsável pela alimentação dos sensores (5,7 V), dos circuitos de ganho (1, 2 e 5) e filtragem dos sinais. Uma frequência de corte de 6,0 kHz para o filtro passa baixa, analógico de dois pólos.

O conversor/multiplexador A/D é do fabricante Data Translation/USA, Econ/Série, modelo DT9812, programável, o qual deve ser alimentado com corrente contínua de 2,500 V, 12 bit. Possui 8 canais de entrada e 2 de saída, 5 faixas de ganho, resolução de 12 bit, sistema binário de codificação de dados e frequência de chaveamento (varredura) de 6.300 Hz, isto é, 6.250 leituras/s para cada canal.

Por sua vez, a unidade mostradora está composta por um Notebook e um programa computacional, em linguagem C++, especialmente desenvolvido para leitura e armazenamento dos dados.

A seleção de cada canal do sensor a ser lido é efetuada através de comandos binários enviados ao conversor/multiplexador/A/D pelo programa. Estas informações são enviadas através de uma interface universal (USB) para o computador.

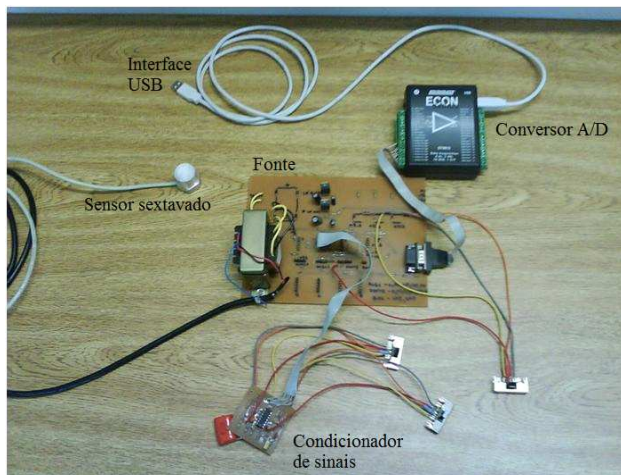


Figura 1. Sistema de medição

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 (1998) e da NBR ISO/IEC 17025 (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 a faixa nominal é de 0 % a 100 % e a resolução de 0,1 %.

Inicialmente, foi efetuada uma calibração direta, por comparação conforme recomendado pela ISO 16063-21 (2003). A qual consistiu da calibração na frequência pontual de 159,15 Hz usando o excitador padrão fabricado pela Bruel & Kjaer (B&K), modelo 4294 (Figura 2). Este montagem foi denominada de Sistema 1.

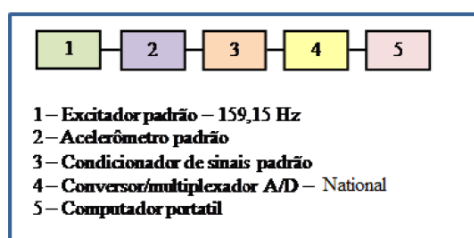


Figura 2. Esquema e montagem experimental do Sistema 1

Quatro amostras foram coletadas automaticamente, permitindo o armazenamento de 16.384 leituras por segundo, durante 20 segundos de aquisição, totalizando 327.680 leituras. Entre a coleta de uma amostra e outra todos os equipamentos foram desligados para avaliar a estabilidade e a precisão do sistema ao longo do tempo.

Este procedimento foi repetido substituindo-se, somente, o conversor A/D da National, pelo condicionador de sinais desenvolvido e o conversor A/D DT-9812 obtendo-se o Sistema 2 (Figura 3).

Para o Sistema 2, o procedimento acima foi repetido efetuando novas aquisições de dados. No final, todos os equipamentos foram desligados e o procedimento foi repetido 2 h mais tarde para ambos os sistemas. Posteriormente, com todos os equipamentos ligados e, após um período de 24 h, o procedimento foi repetido.

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 (2003). 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 filtro passa banda, B&K 1621 (2 kHz e 23 %) e pelo amplificador de sinais, B&K modelo 2712, que por sua vez alimenta o excitador, B&K modelo 4808. Completando esta montagem, Sistema 3, foram fixados ao excitador, com os

respectivos condicionadores de sinais, o transdutor a calibrar e o acelerômetro padrão, B&K 4371, um sobre o outro. As saídas foram automaticamente analisadas e gravadas pelo analisador digital, da Scientific-Atlanta modado SD380 e com auxílio de um computador. Todo este conjunto foi montado sobre uma mesa inercial, conforme Figura 4.

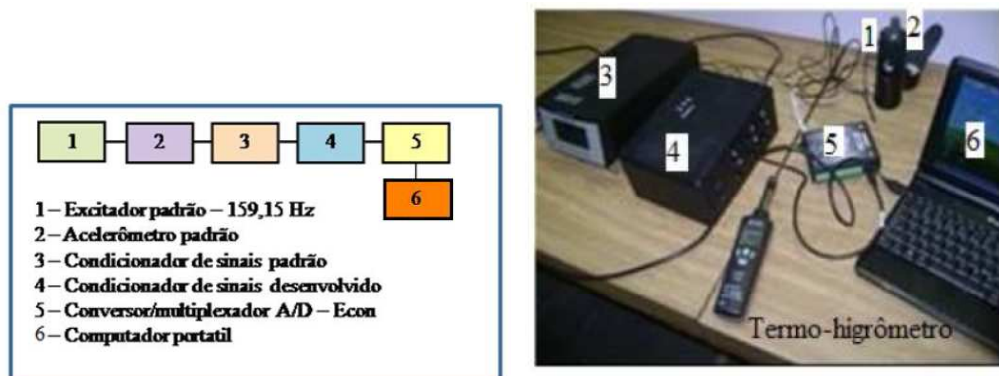


Figura 3 - Esquema e montagem experimental do Sistema 2

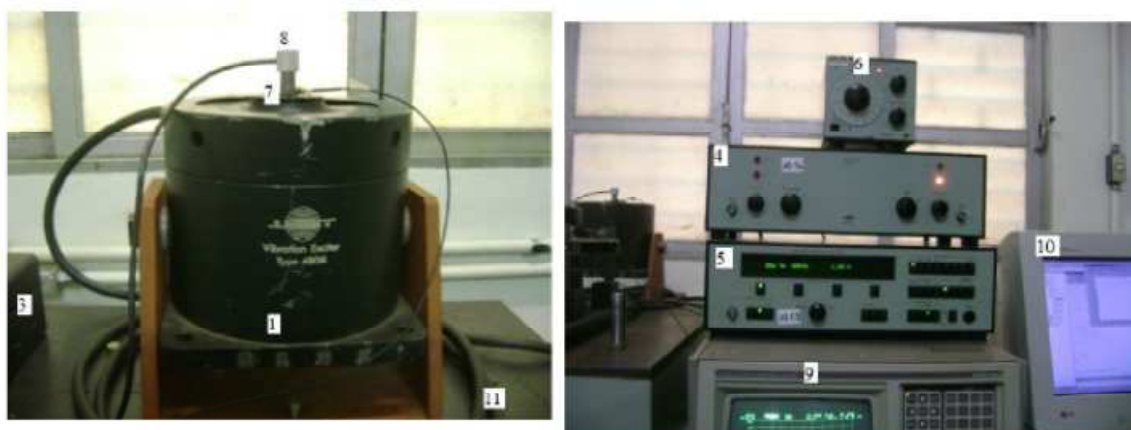
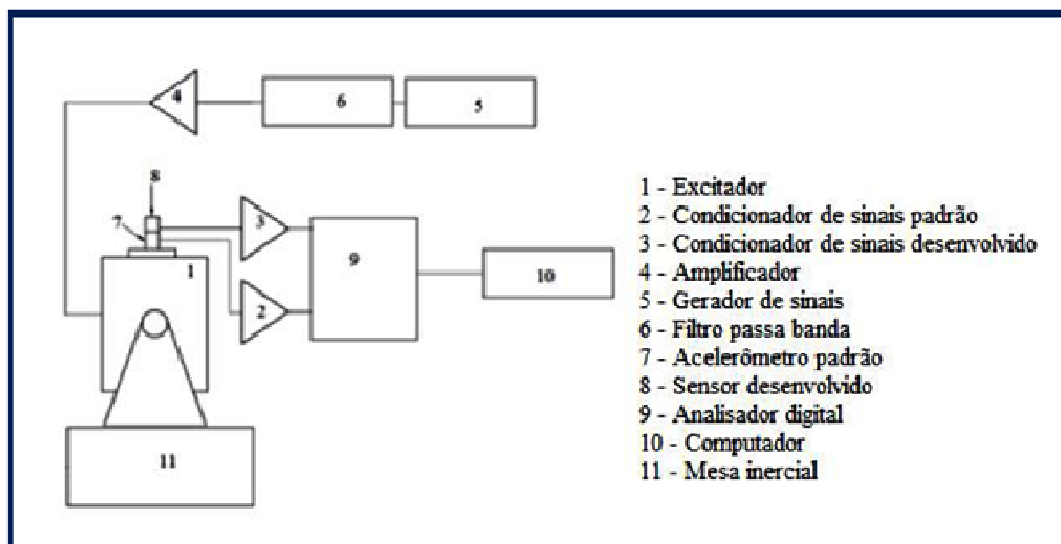


Figura 4. Esquema e montagem experimental do Sistema 3

A calibração do sistema 3 tem a finalidade de determinar a faixa dinâmica do transdutor em estudo e, o comportamento dinâmico em relação ao acelerômetro padrão.

4. RESULTADOS

A Tabela 1 mostra os resultados da calibração pontual do sistema utilizado como padrão. A frequência de avaliação, neste caso, foi de 159,15 Hz e o ganho 1.

Tabela 1. Resultados da calibração pontual do sistema 1

	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média (V/m/s ²)	DP (V/m/s ²)	IC (V/m/s ²) (95,45%)
	Amostra						
	1	2	3	4			
E1	1,1652	1,1647	1,1685	1,1869	1,1669	0,0105	0,0103
E2	1,1666	1,1692	1,1640	1,1646	1,1656	0,0023	0,0023
Para 8 amostras					1,1659	0,0076	0,0053

Na Tabela 1 E1 representa a calibração inicial e o E2 uma calibração efetuada, nas mesmas condições, 2 h mais tarde. Todos os valores são expressos em V/m/s².

Durante os experimentos 1 e 2 se verificou que a frequência indicada pelo Sistema 1 apresentou um valor médio de 156,00 Hz. Quando comparados os valores médios de sensibilidade encontrados para ambos os experimentos pode-se dizer que os mesmos são similares. Os desvios-padrão apresentaram uma variação, que pode ser justificada pela defasagem entre o instante no qual se aplica a vibração e o instante em que se inicia a coleta das leituras.

A Tabela 2 apresenta os resultados encontrados durante a calibração do Sistema 2 para o ganho 1.

Tabela 2. Resultados da calibração pontual do Sistema 2 para ganho 1

	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média (V/m/s ²)	D P (V/m/s ²)	IC (V/m/s ²) (95,45%)
	Amostra						
	1	2	3	4			
E1	1,1667	1,1704	1,1693	1,1673	1,1683	0,0017	0,0017
E2	1,1650	1,1628	1,1650	1,1640	1,1645	0,0010	0,0010
Para 8 amostras					1,1658	0,0026	0,0018

A sensibilidade do Sistema 1, para ganho 1, considerando as oito amostras coletadas foi de (1,1659 ± 0,0076) V/m/s² e o intervalo de confiança de 0,0053 V/m/s². Enquanto que para o Sistema 2 tem-se (1,1658 ± 0,0026) V/m/s² e 0,0018 V/m/s², respectivamente.

Comparando esses resultados pode-se concluir que a unidade de tratamento de sinal desenvolvida e testada satisfaz as expectativas quanto a seu funcionamento. Os sinais coletados utilizando ambos os sistemas apresentaram valores de sensibilidade similares. Com relação ao desvio padrão pode-se dizer que este foi menor quando utilizado o condicionador de sinais desenvolvido.

A seguir foi efetuado o cálculo da incerteza para o Sistema 1, conforme recomendado pelo ISO/TAG 4/WG 3 (2008). Para cada sistema foram identificadas as variáveis que contribuem para a incerteza final. Foram propostos dois modelos matemáticos, um para avaliar a incerteza associada à frequência (Eq. 1) outro para a sensibilidade (Eq. 2).

$$F = \Delta I_{Leit} + \Delta R_{SM} + \Delta I_E + \Delta I_A + \Delta I_{CS} + \Delta I_{A/D} \quad (1)$$

$$S = \Delta I_{Leit} + \Delta R_{SM} + \Delta I_E + \Delta I_A + \Delta I_{CS} + \Delta I_{A/D} \quad (2)$$

onde

- ΔR_{SM} – Correção associada à incerteza da resolução do sistema de medição (A/D 24 bits);
- ΔI_E – Correção associada à incerteza da calibração do excitador (3%);
- ΔI_A – Correção associada à incerteza da calibração do acelerômetro padrão (2%);
- ΔI_{CS} – Correção associada à incerteza da calibração do condicionador de sinais padrão (0,04%);
- $\Delta I_{A/D}$ – Correção associada à incerteza da calibração do conversor A/D (1%);
- ΔI_{Leit} – Correção associada à variabilidade das leituras (16.384/s) (desvio padrão);
- ΔI_{PC} – Correção associada ao programa computacional.

Enquanto que F (Hz) e S (V/m/s²) são as variáveis de saída (Hz). I_{PC} é desprezível, tendo em vista que os sinais são estão digitalizados e o programa apresentou um bom desempenho e boa consistência. Os valores das variáveis b a f foram extraídos dos certificados de calibração, catálogos de fabricantes e manuais técnicos.

A avaliação da incerteza mostrou que a frequência de vibração possui uma incerteza expandida de 4,41 % em 156,00 Hz para k = 2 e 95,45% de abrangência. Com relação à sensibilidade a incerteza expandida foi de 4,35 % em

1,1659 V/m/s² para k = 2 e 95,45% de abrangência. Em ambos os casos a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à calibração do excitador (2,76 Hz).

Para o Sistema 2 as variáveis que afetam o resultado da calibração são:

- a) ΔR_{SM} – Correção associada à incerteza da resolução do sistema de medição (A/D 12 bits);
- b) ΔI_E - Correção associada à incerteza da calibração do excitador (3%);
- c) ΔI_A - Correção associada à incerteza da calibração do acelerômetro padrão (2%);
- d) ΔI_{CSA} – Correção associada à incerteza da calibração do condicionador de sinal padrão (0,04%);
- e) ΔI_{CSV} – Correção relativa à incerteza da calibração do condicionador de sinal desenvolvido (1%);
- f) $\Delta I_{A/D}$ – Correção associada à incerteza da calibração do conversor A/DECON (0,24%);
- g) ΔI_{Leit} – Correção associada à variabilidade das leituras (16.384/s) (desvio padrão);
- h) ΔI_{PC} - Correção associada ao programa computacional.

Enquanto que a variável de saída é a sensibilidade V/ms/s². ΔI_{PC} , neste caso também, pode ser desprezado.

Os modelos matemáticos para cálculo da incerteza, neste caso, são dados pelas equações 3 e 4, respectivamente, para a frequência e a sensibilidade.

$$F = \Delta I_{Leit} + \Delta R_{SM} + \Delta I_E + \Delta I_A + \Delta I_{CSA} + \Delta I_{CSV} + \Delta I_{A/D} \quad (3)$$

$$S = \Delta I_{Leit} + \Delta R_{SM} + \Delta I_E + \Delta I_A + \Delta I_{CSA} + \Delta I_{CSV} + \Delta I_{A/D} \quad (4)$$

Para a vibração, a incerteza expandida é de 4,16 % em 156 Hz para k = 2 e 95,45% de abrangência. Por sua vez, para a sensibilidade a incerteza expandida foi de 4,17 % em 1,1659 V/m/s² para k = 2 e 95,45% de abrangência. A variável que mais contribuiu em ambos os casos, para a incerteza final, foi a incerteza associada à calibração do excitador (2,76 Hz).

Os resultados da calibração do Sistema 3 estão mostrados a seguir. Na Figura 5 podem ser observados os sinais de ruído branco, filtrados em 2 kHz, que ao serem excitados, foram adquiridos simultaneamente pelo sensor padrão e pelo transdutor na direção da excitação.

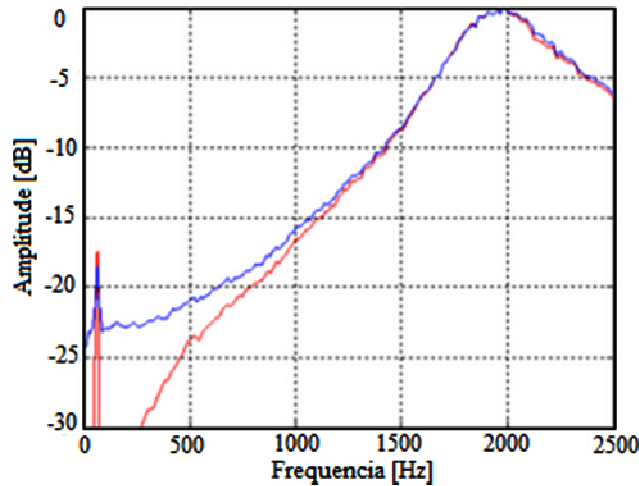


Figura 5 - Faixa Dinâmica

Pode-se notar uma diferença maior do que 1 dB entre os sinais adquiridos pelos sistema padrão e estudado a partir de -21 dB. Espera-se que o comportamento do sistema estudado, ao adquirir um sinal filtrado, se mantenha igual ao do sistema padrão dentro de sua faixa dinâmica de operação (19 dB).

Para o Sistema 3, as variáveis de influência são:

- a) ΔI_{GS} = Correção associada à incerteza da calibração do gerador de sinal (0,05%);
- b) ΔI_{AS} = Correção associada à incerteza da calibração do amplificador de sinais (0,5%);
- c) ΔI_{FPB} = Correção associada à incerteza da calibração do filtro passa banda (1,5%);
- d) ΔI_A = Correção associada à incerteza da calibração de dois sensores ADLX321 (4,4%);
- e) ΔI_{CSV} = Correção associada à incerteza da calibração do condicionador de sinal desenvolvido (1%);
- f) ΔI_{AP} = Correção associada à incerteza da calibração do acelerômetro padrão (2,0 % e k=2);
- g) ΔI_{CSA} = Correção relativa à incerteza da calibração do condicionador de sinal padrão (0,04%);

- h) ΔI_{FFT} = Correção associada à incerteza da calibração do analisador digital (0,025%);
i) $\Delta I_{Leit.}$ = Correção associada à variabilidade das leituras (102.400 l/s) (desvio padrão);
j) ΔI_{RAS} = Correção associada à incerteza da resolução do analisador digital (12) bits;
k) ΔI_{PC1} – Correção associada ao do programa computacional do analisador;
l) ΔI_{PC2} – Correção associada ao programa computacional para tratamento e análise de dados.

Os modelos matemáticos para o cálculo da incerteza, para este sistema, são dados pelas equações 5 e 6. ΔI_{Leit} , ΔI_{PC1} e ΔI_{PC2} podem ser desprezados, pois o analisador de sinais faz um amostragem com um número relativamente grande de leituras. E os programas computacionais mostraram, outra vez, boa qualidade de programação.

$$VG = \Delta I_{GS} + \Delta I_{AS} + \Delta I_{FPB} + \Delta I_A + \Delta I_{CSA} + \Delta I_{CSV} + \Delta I_{Leit} + \Delta I_{FFT} + \Delta I_{RAS} + \Delta I_{AP} \quad (5)$$

$$FD = \Delta I_{GS} + \Delta I_{AS} + \Delta I_{FPB} + \Delta I_A + \Delta I_{CSA} + \Delta I_{CSV} + \Delta I_{Leit} + \Delta I_{FFT} + \Delta I_{RAS} + \Delta I_{AP} \quad (6)$$

Onde VG é a variabilidade do ganho nas cinco direções avaliadas ganho (dB) e FD a faixa dinâmica (dB), para o sensor estudado, de geometria quadrada. Ambas as grandezas foram comparadas com as do acelerômetro padrão. I_{PC1}
As tabelas 3 e 4 mostram os resultados dos cálculos das incertezas para a calibração utilizando o Sistema 3.

Tabela 3. Incerteza para o Sistema 3 (Variabilidade do Ganho nas 5 direções)

Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
ΔI_{Leit}	0	N	1	>100	0
ΔI_{RAS}	1	N	95×10^{-7}	>100	0,0001410
ΔI_{GS}	0,05%	N	1	>100	0,0007500
ΔI_{AS}	0,5%	N	1	>100	0,0075000
ΔI_A	4,4%	N	1	>100	0,0660000
ΔI_{AP}	2,1%	N	1	>100	0,0315000
ΔI_{CSD}	1,0%	R	1	>100	0,0173205
ΔI_{CS}	0,04%	N	1	>100	0,0006000
ΔI_{FFT}	0,025%	N	1	>100	0,0003750
ΔI_{FPB}	1,5%	N	1	>100	0,0225000
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,0788
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,1576
Incerteza da variabilidade da sensibilidade em relação a 3 dB					5,25%

Tabela 4. Incerteza para o Sistema 3 (Faixa Dinâmica)

Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
ΔI_{Leit}	0	N	1	>100	0
ΔI_{RAS}	1	N	95×10^{-7}	>100	0,0001410
ΔI_{GS}	0,05%	N	1	>100	0,0047500
ΔI_{AS}	0,5%	N	1	>100	0,0475000
ΔI_A	4,4%	N	1	>100	0,4180000
ΔI_{AP}	2,1%	N	1	>100	0,1999500
ΔI_{CSD}	1,0%	R	1	>100	0,1096966
ΔI_{CS}	0,04%	N	1	>100	0,0027500
ΔI_{FFT}	0,025%	N	1	>100	0,0003750
ΔI_{FPB}	1,5%	N	1	>100	0,0262500
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,4992
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,9983
Incerteza da faixa dinâmica em relação a 19 dB					5,25%

Todas as informações referentes ao cálculo da incerteza são apresentadas de forma resumida nas Tabelas 3 e 4. Nestas tabelas, DP representa a distribuição de probabilidade, CS o coeficiente de sensibilidade, enquanto que GL indica o número de graus de liberdade associado a cada variável de influência.

Em ambas as tabelas, pode-se observar que as incertezas expandidas são, respectivamente, 0,1576 dB e 0,9983 dB (ambas com 5,25%), para $k = 2$ e 95,45% de abrangência. A variável que mais influenciou no cálculo das incertezas está relacionada ao transdutor em estudo (0,4180 dB para faixa dinâmica). Entretanto com boa precisão e exatidão.

Na Figura 6 pode-se observar a Função Resposta em Frequência (FRF) para o sensor em análise, na direção de excitação (cor azul). Nota-se uma resposta linear até 4 kHz, já próxima da ressonância do sistema de medição. Na Figura 7, primeiro gráfico, é apresentado o efeito cruzado, relativo à direção de excitação, para os dois acelerômetros padrão. Enquanto que no segundo mostra o mesmo efeito para duas direções do sensor em estudo. Cor azul para direção de excitação e cor vermelha para direção cruzada.

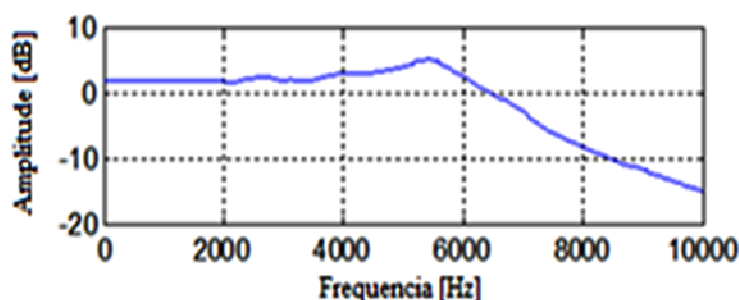


Figura 6. Função Resposta em Frequência

Observa-se, pela análise das figuras, que o comportamento dos espectros nas direções principais e cruzadas é semelhante para os acelerômetros padrão e estudados. Pode observar-se ainda que as diferenças entre os sinais principais e cruzados para o sensor padrão e os sensores em estudo são similares. Obtendo-se maiores diferenças, sensor 1, nas altas frequências e melhores resultados nas médias e baixas frequências. Para o sensor 2, se obtiveram melhores resultados até mesmo nas altas frequências.

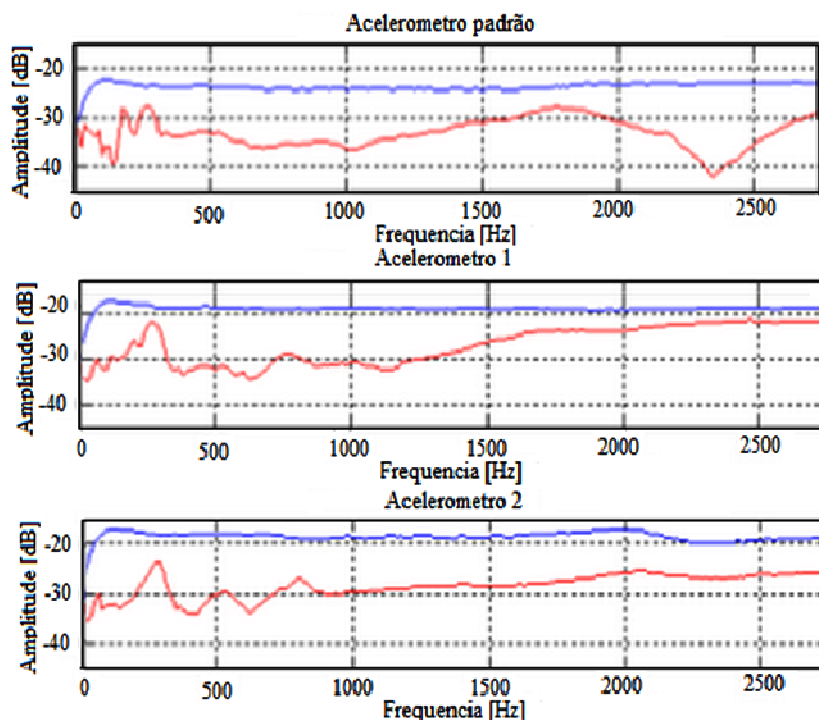


Figura 7. Efeitos cruzados

Os efeitos cruzados dos sensores avaliados ocorrem à medida que os chips podem não ter sido montados perfeitamente paralelos às estruturas metálicas dos sensores.

5. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as seguintes conclusões.

Para o Sistema 1 a incerteza expandida associada à frequência de vibração medida, foi de 4,41 % em 156,00 Hz para $k = 2$ e 95,45 % de abrangência. Enquanto que para a sensibilidade foi de 4,35 % em $1,1659 \text{ V/m/s}^2$ para $k = 2$ e 95,45 %. Em ambos os casos a incerteza associada ao excitador foi a variável que mais contribuiu para a incerteza final.

Para o Sistema 2 a incerteza expandida associada à frequência de vibração medida foi de 4,16 % em 156,00 Hz para $k = 2$ e 95,45 % de abrangência. Enquanto que para a sensibilidade foi de 4,17 % em $1,1659 \text{ V/m/s}^2$ para $k = 2$ e 95,45 %. Senso que a incerteza associada ao excitador teve a maior parcela de contribuição para a incerteza final.

Ambos os sistemas apresentam boa exatidão para a frequência avaliada nos ensaios pontuais em 159,15 Hz, obtendo-se 159,50 Hz em todos os ensaios. A variabilidade da frequência medida foi zero, indicando boa precisão.

Em relação ao Sistema 3, a calibração dinâmica mostrou que o sistema de medição proposto funciona corretamente com exatidão e precisão adequadas.

Pode-se concluir também, que os sinais abaixo de 21 dB (faixa dinâmica), em relação ao máximo valor do espectro, são considerados desprezíveis. O sensor em estudo responde linearmente até 4 kHz. Os efeitos cruzados são bastante semelhantes entre dois acelerômetros de referência.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU e a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio recebido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO DA SILVA MARQUES, V., MEOLA, T., DUARTE M. E MORAIS SOUZA, 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO/IEC 17025, Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, Rio de Janeiro, 2005. 37p.
- INMETRO, Sistema Internacional de Unidades – SI, janeiro 2007, 116p.
- INMETRO. “Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)”, 82p, 2009.
- ISO 16063, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers - part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”, 1st edition, 1999.
- ISO 16063-1:1998, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic Concepts”, Geneve, 1998.
- ISO 16063-11:1999, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”, Geneve, 1999.
- 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.
- ISO 16063-22:2005, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer”, Geneve, 2005
- ISO/TAG 4/WG 3, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, 2008, 131 p.
- 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.