

ANTÔNIO FERNANDO MOURA SANTOS

CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDAÇÃO
DE VIBRAÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA
APLICAÇÕES GERAIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

ANTÔNIO FERNANDO MOURA SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDAÇÃO DE VIBRAÇÕES
DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte

Co-orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

UBERLANDIA - MG

2011

Aos meus pais, José Santos e Maria das Dores Moura Santos,
À Mara Sueli (meu primeiro amor),
Aos meus filhos (as):
Lívia Mara (minha princesa), Fernando Antonio e Larissa, Gustavo e Viviane.
Aos meus irmãos José Ilídio e Lúcia Maria.

Epígrafe

“Ninguém passa por esse mundo inutilmente. Todos aqueles que cruzam o nosso caminho,
deixam um pouco se si e levam um pouco de nós”.

Homenagem da 59^a. Turma de Eng. Mecânica. Julho /2001.

AGRADECIMENTOS

A Deus que equilibra o Universo e concede coisas boas para todos nós.

A toda minha grande família e aos amigos (as), tudo que tenho, sempre crescendo no domínio do tempo e da freqüência, sempre festeiros nas alegrias e apoiando fortemente nas tristezas.

Aos orientadores Prof. Marcus Antônio Viana Duarte e Profa. Rosenda Valdés Arencibia que acreditaram ser possível e me orientaram na realização deste trabalho. A eles minha imensa gratidão.

Ao Prof. Marcos Morais de Sousa pela sua afeição, habilidade e paciência na montagem dos sensores ADXL321, os quais me incentivaram a desenvolver este trabalho.

Ao Eng. e pós-graduando Vinicius pela dedicação e presteza nos experimentos.

Aos colegas, alunos e alunas, da pós-graduação que me incentivaram a aprender novos conhecimentos.

A todos aqueles que contribuíram e torceram pelo término deste trabalho.

À FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio recebido.

Aos Laboratórios de Acústica e Vibração, Sistemas Mecânicos e de Metrologia Dimensional pelo apoio recebido.

A todos os meus alunos (as) pelas coisas boas que me ensinaram.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xii
Resumo	xv
Abstract	xvi
CAPÍTULO I - Introdução	1
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	4
2.1. Acelerômetros. Tipos. Aplicações	4
2.2. Calibração	11
2.3. Sistema de medição, módulos funcionais e parâmetros metrológicos	19
2.3.1 <i>Características ligadas à faixa de utilização</i>	21
2.3.2 <i>Características ligadas à indicação</i>	22
2.3.3 <i>Características que relacionam o estímulo com a resposta</i>	22
2.3.4 <i>Características ligadas aos erros de medição</i>	23
CAPÍTULO III - Fundamentos teóricos	30
3.1. Acelerômetro ADXL321	30
3.1.1. <i>Modelo dinâmico do sensor desenvolvido</i>	33
3.2. Estatística básica	37
3.2.1. <i>Análise de variância (ANOVA)</i>	41
3.3. Incerteza de medição	45
3.3.1 <i>Incerteza padrão</i>	46
3.3.2 <i>Incerteza padrão combinada</i>	51
3.3.3. <i>Incerteza expandida</i>	53

CAPÍTULO IV - Desenvolvimento da metodologia para validação do sistema de medição proposto	56
4.1. Sistema de medição proposto e desenvolvido	58
4.1.1. <i>Unidade sensora ou transdutor</i>	59
4.1.2. <i>Unidade de tratamento do sinal</i>	60
4.1.3. <i>Unidade mostradora</i>	62
4.2. Calibração do Sistema de Medição	63
4.2.1. <i>Calibração direta por comparação (Sistema 1)</i>	64
4.2.2. <i>Calibração direta por comparação (Sistema 2)</i>	68
4.2.3. <i>Calibração direta por comparação (Sistema 3)</i>	70
4.2.4. <i>Calibração direta por comparação (Sistema 4)</i>	71
4.2.5. <i>Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistema 5)</i>	73
4.2.6. <i>Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistemas 6)</i>	75
4.2.7. <i>Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistemas 7)</i>	77
4.2.8. <i>Testes complementares (Sistema 8)</i>	79
4.2.9. <i>Determinação das freqüências de ressonância e avaliação dos efeitos cruzados (Sistema 9)</i>	82
4.2.10. <i>Determinação da faixa dinâmica (Sistema 10)</i>	84
CAPÍTULO V - Resultados e discussão	86
5.1. Resultados da calibração do Sistema 1	86
5.2. Resultados da calibração do Sistema 2	87
5.3. Resultados da calibração do Sistema 3	92
5.4. Resultados da calibração do Sistema 4	96
5.5. Resultados da calibração do Sistema 5	98
5.6. Resultados da calibração do Sistema 6	107
5.7. Resultados da calibração do Sistema 7	109
5.8. Resultados da calibração do Sistema 8 e 9	110
5.9. Resultados da calibração do Sistema 9	114
5.10. Resultados da calibração do Sistema 10	119

CAPÍTULO VI - Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros **122**

CAPÍTULO VII - Referências Bibliográficas **125**

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Sistema massa-mola do funcionamento de um acelerômetro	5
Figura 2.2	Curvas de sensibilidade de sensores capacitivos	5
Figura 2.3	Esquema de montagem do SMEM	9
Figura 2.4	Estrutura básica do “comb-drive”	10
Figura 2.5	Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de contagem de franjas (ISO 16063-11, 1999)	15
Figura 2.6	Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de mínimos da função de Bessel (ISO 16063-11, 1999).	16
Figura 2.7	Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de aproximação de senos (ISO 16063-11, 1999)	17
Figura 2.8	Esquema geral de um Sistema de Medição	20
Figura 2.9	Exemplo de um ruído branco no tempo (FILHO, 2011)	25
Figura 2.10	Representação de um ruído rosa	26
Figura 3.1	Esquema simplificado do sensor capacitivo	31
Figura 3.2	Sistema massa-mola em conjunto com os capacitores	31
Figura 3.3	Esquema funcional do acelerômetro ADXL321	32
Figura 3.4	Acelerômetro capacitivo ADXL321 montado em uma placa	32
Figura 3.5	Modelo Dinâmico de um grau de liberdade	33
Figura 3.6	Curvas de amplificação de amplitudes para sistema com 1 grau de liberdade	36
Figura 3.7	Método da largura de banda de meia potência para determinar ξ	36
Figura 3.8	Curva de distribuição normal de probabilidade	39
Figura 3.9	Probabilidade de x pertencer ao intervalo (a, b)	40
Figura 3.10	Distribuição normal	46
Figura 3.11	Distribuição retangular	48
Figura 3.12	Distribuição triangular	49
Figura 3.13	Distribuição trapezoidal	50
Figura 4.1	Sistema de medição proposto	57
Figura 4.2	Componentes básicos do sistema de medição proposto	57

Figura 4.3	Montagens blindadas em alumínio dos acelerômetros ADXL321 (MARQUES e SOUZA, 2007).	58
Figura 4.4	Ilustração da montagem de cada sensor (Analog Devices, 2007)	59
Figura 4.5	Condicionador de sinais	59
Figura 4.6	Conversor/Multiplexador A/D	60
Figura 4.7	Transformador e regulador de tensão	61
Figura 4.8	Esquema da montagem da calibração direta por comparação	63
Figura 4.9	Esquema da montagem do Sistema 1	63
Figura 4.10	Sistema 1 (acelerômetro piezoelétrico (B&K), condicionador de sinais (B&K) e conversor A/D (NI USB 9162)) - Sistema padrão	64
Figura 4.11	Esquema da montagem do Sistema 2	67
Figura 4.12	Sistema 2 (acelerômetro piezoelétrico (B&K), condicionador de sinais, (B&K), condicionador desenvolvido e conversor A/D _{ECON})	67
Figura 4.13	Esquema da montagem do Sistema 3	69
Figura 4.14	Sistema 3 (Sistema de medição desenvolvido)	69
Figura 4.15	Esquema da montagem do Sistema 4	70
Figura 4.16	Sistema 4 (Sistema 1 e 2 acoplados ao excitador 4808)	71
Figura 4.17	Esquema da montagem do Sistema 5	73
Figura 4.18	Sistema 5 (sensor ADXL321, condicionador e conversor A/D _{ECON})	73
Figura 4.19	Sensores acoplados a um refrigerador	74
Figura 4.20	Esquema da montagem do Sistema 6	75
Figura 4.21	Esquema da montagem do Sistema 7	76
Figura 4.22	Esquema da montagem do Sistema 8	78
Figura 4.23	Sistema 8 usado para determinação das Freqüências de Ressonância, Função Resposta em Freqüência, Função Coerência e Ângulo de Fase	79
Figura 4.24	Esquema da montagem do Sistema 9	81
Figura 4.25	Montagem do acelerômetro cilíndrico sobre o bloco padrão	81
Figura 4.26	Esquema da montagem do Sistema 10	83
Figura 4.27	Sensor de geometria quadrada sobre o acelerômetro padrão	83
Figura 5.1	Desvios-padrão associados à sensibilidade (Sistemas 1 e 2)	87
Figura 5.2	Intervalos de confiança associados à sensibilidade (Sistemas 1 e 2)	88
Figura 5.3	Valores médios de sensibilidade para o Sistema 3	93
Figura 5.4	Desvio padrão e intervalo de confiança (95%) para o Sistema 3	93

Figura 5.5	FRFs na direção de hesitação (—) e na direção transversal (—)	96
Figura 5.6	Valores médios de sensibilidade	100
Figura 5.7	Valores médios de desvio padrão associados à sensibilidade	101
Figura 5.8	Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 1	103
Figura 5.9	Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 2	105
Figura 5.10	Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 3	107
Figura 5.11	Diagrama de caixa – Sistema 5, experimentos 1, 2 e 3	108
Figura 5.12	Sinais no domínio do tempo e da freqüência para o Sistema 6 na direção 1 no primeiro dia	109
Figura 5.13	FRF do Sistema 7	112
Figura 5.14	FRFs dos Sistemas 9	114
Figura 5.15	Efeitos cruzados Sistemas 8 e 9	114
Figura 5.16	FRFs do sensor geometria quadrada e padrão	117
Figura 5.17	Erro de ganho	118
Figura 5.18	Erro de fase	118
Figura 5.19	FRFs do sensor quadrado	119
Figura 5.20	Faixa dinâmica para direção x1	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características técnicas do acelerômetro ADXL321 (Catálogo da Analog Devices, 2007)	33
Tabela 3.2	Tabela da análise de variância.	43
Tabela 5.1	Resultados da calibração pontual do Sistema 1.	85
Tabela 5.2	Resultados da calibração pontual do Sistema 2 para ganho de 1	86
Tabela 5.3	Incerteza da calibração - Sistema 1 (Freqüência, Hz)	89
Tabela 5.4	Incerteza da calibração - Sistema 1 (Sensibilidade, V/m/s ²)	89
Tabela 5.5	Incerteza da calibração do Sistema 2 (ganho 1) para a freqüência	90
Tabela 5.6	Incerteza da calibração do Sistema 2 (ganho 1) para a sensibilidade	90
Tabela 5.7	Resultados da calibração pontual do Sistema 3 (Estabilidade)	91
Tabela 5.8	Incerteza da calibração - Sistema 3 (freqüência)	94
Tabela 5.9	Incerteza associada à calibração do Sistema 3 (estabilidade)	95
Tabela 5.10	Incerteza da calibração - Sistema 3 (estabilidade)	95
Tabela 5.11	Incerteza da calibração do Sistema 4 para o ganho (dB)	97
Tabela 5.12	Incerteza da calibração do Sistema 4 para o ângulo de fase (graus)	98
Tabela 5.13	Valores de sensibilidade para o Sistema 5 (Experimento 1)	99
Tabela 5.14	Resultados da calibração incerteza (Sistema 5, experimento 1, data 09/02/11)	101
Tabela 5.15	Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 1, data 10/02/11)	101
Tabela 5.16	Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 1, data 14/02/11)	102
Tabela 5.17	Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 1, data 15/02/11)	102
Tabela 5.18	Resultado da análise de variância Sistema 5 experimento 1	102
Tabela 5.19	Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 23/03/11)	103
Tabela 5.20	Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 24/03/11)	104
Tabela 5.21	Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 25/03/11)	104
Tabela 5.22	Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 26/03/11)	104

Tabela 5.23	Análise de variância Sistema 5, experimento 2	105
Tabela 5.24	Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 3, data 11/05/11)	105
Tabela 5.25	Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 3, data 12/05/11)	106
Tabela 5.26	Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 3, data – 13/05/11)	106
Tabela 5.27	Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 3, data 14/05/11)	106
Tabela 5.28	Análise de variância Sistema 5, experimento 3	107
Tabela 5.29	Análise de variância Sistema 5, experimentos 1, 2 e 3	107
Tabela 5.30	Incerteza da calibração - Sistema 6 (freqüência)	110
Tabela 5.31	Incerteza da calibração - Sistema 6 Sensibilidade	110
Tabela 5.32	Freqüência de ressonância e freqüência de operação linear dos sensores estudados	113
Tabela 5.33	Incerteza da calibração - Sistema 8 - Ganho	115
Tabela 5.34	Incerteza da calibração - Sistema 8 – Ângulo de fase	115
Tabela 5.35	Incerteza da calibração - Sistema 8 - Coerência	116
Tabela 5.36	Incerteza da calibração - Sistema 8 – Efeito cruzado	116
Tabela 5.37	Incerteza da calibração - Sistema 9 - Ganho	120
Tabela 5.38	Incerteza da calibração - Sistema 9 – Ângulo de fase	120
Tabela 5.39	Incerteza da calibração - Sistema 9 - Coerência	121
Tabela 5.40	Incerteza da calibração - Sistema 9 – Efeito cruzado	121
Tabela 5.41	Faixa dinâmica para as diferentes direções	123
Tabela 5.42	Incerteza de medição - Sistema 10 (Ganho mínimo)	123
Tabela 5.43	Incerteza de medição - Sistema 10 (Faixa dinâmica, dB)	124

LISTA DE SÍMBOLOS

v_i	- grau de liberdade associado a cada variável de entrada
v_{eff}	- grau de liberdade efetivo
Y_{ij}	- observação do i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental ou parcela
$r(x_i, x_j)$	- coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j
u_c	- incerteza padrão combinada
σ	- desvio padrão da população
ΔA	- Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro
$\Delta A/D$	- Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D
$\Delta A/DE$	- Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D
ΔAP	- Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão
$\Delta AP1$	- Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 1
$\Delta AP2$	- Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 2
ΔAS	- Correção devida à incerteza da calibração do amplificador de sinais
ΔAX	- Correção devida à incerteza da calibração dos sensores ADXL321
ΔCS	- Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais
ΔCSI	- Correção devida à incerteza do condicionador de sinais do acelerômetro 1
$\Delta CS2$	- Correção devida à incerteza do condicionador de sinais do acelerômetro 2
ΔCSD	- Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais desenvolvido
ΔE	- Correção devida à incerteza da calibração do excitador
ΔFFT	- Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital
ΔFPB	- Correção devida à incerteza da calibração do filtro passa banda
ΔGS	- Correção associada à incerteza do gerador de sinais
$\Delta P1BP$	- Correção devida à planeza entre as superfícies de medição do bloco padrão
$\Delta P2BP$	- Correção devida ao paralelismo entre as superfícies de medição do bloco padrão
$\Delta P3BP$	- Correção devida à perpendicularidade entre a superfície de medição e a

	superfície lateral
ΔPC	- Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
ΔR	- Correção associada à resolução do sistema de medição
μ	- corresponde à média da população
a	- aceleração
A	- área das placas
a_0	- aceleração
p_0	- pressão acústica
c	- amortecimento viscoso equivalente
C	- capacidade
CS	- coeficiente de sensibilidade
d	- distância entre as placas.
DP	- distribuição de probabilidade
Fe	- amplitude de excitação
F	- força
$Freq$	- freqüência
FRF	- função resposta em freqüência
GL	- graus de liberdade
H_0	- Hipótese nula
H_1	- Hipótese verdadeira
$F_{calculado}$	- Fator calculado para Análise de Variância
$F_{tabelado}$	- Fator tabelado para Análise de Variância (Distribuição F)
valor-P	- Confiabilidade para Análise de Variância
I	- número de tratamentos
I_0	- intensidade acústica
J	- número de réplica do tratamento
k	- fator de abrangência
kpm	- propriedade do material colocado entre as placas
keq	- rigidez equivalente
m	- massa
$M(\tau, \zeta)$	- fator de amplificação
n	- número de leituras

Pb	- chumbo
QMC	- quadrado da magnitude da coerência
s	- desvio padrão amostral
S	- sensibilidade
s(Leit.)	- Desvio padrão das leituras
Sn	- estanho
<i>SQRes</i>	- variação Dentro de um tratamento
<i>SQTrat</i>	- variação Entre tratamentos
<i>U</i>	- incerteza expandida
v_0	- velocidade
W_0	- potência acústica.
X	- distância entre as placas que formam os capacitores
x	- valor de cada variável de entrada (xi)
xi	- variável de entrada
<i>Xp</i>	- amplitude de resposta
z	- quantidade em consideração
z_0	- valor de referência
α	- nível de significância
ε	- constate que dependente do material entre as placas,
ε_{ij}	- erro associado ao i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental ou parcela
ξ	- fator de amortecimento
τ	- razão entre as freqüências de excitação e natural não amortecida
τ_i	- efeito do i -ésimo tratamento
ϕ	- Ângulo de fase
ω	- freqüência de excitação

SANTOS, A. F. M.. 2011. **Caracterização de um sistema de medição de vibrações de baixo custo para aplicações gerais.** 152 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Resumo

Os Sistemas de Medição devem ser calibrados antes de serem utilizados. As legislações pertinentes, bem como as normas técnicas em vigor determinam os procedimentos de calibração e os padrões que devem ser utilizados para garantir a rastreabilidade das calibrações e dos ensaios que serão efetuados com esses sistemas. Ainda, destacam a importância de efetuar-se a avaliação da incerteza em todos os níveis da cadeia de rastreabilidade. Na fase de desenvolvimento de um sistema de medição, a calibração do mesmo tem uma importância impar, pois permite determinar os parâmetros metrológicos que o caracterizam, bem como, a aptidão para ser utilizado. Entretanto, a demanda de mercado busca sistemas de medição de baixo custo, eficaz, automatizados e versáteis. Assim sendo, este trabalho desenvolveu um sistema de medição baseado no sensor capacitivo ADXL321 de baixo custo para aplicações gerais. Foram efetuados dois tipos de calibração direta por comparação, uma pontual e outra em uma faixa de freqüência de 2 Hz a 20 kHz, para tanto foram planejados e realizados dez experimentos. Os dados coletados foram analisados e comparados com aqueles obtidos com um sistema de medição padrão. Em seguida foi avaliada a incerteza associada a todas as calibrações, através da aplicação da metodologia proposta no ISO/TAG 4/WG 3 (2008). Como resultado obteve-se um sistema de medição de baixo custo com boa exatidão, resolução de 0,0006 V, faixa dinâmica de 19 dB, precisão de $\pm 0,0183$ V, estável no tempo e com incerteza expandida, próxima, de 4,58% para todas as calibrações.

SANTOS, A. F. M. 2011. **Characterization of a system of vibration measurement of low cost for general applications.** 152 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia - MG.

Abstract

Measurement Systems should be calibrated before use. Relevant legislation and technical standards in effect determine the calibration procedures and reference transducer that should be used to ensure traceability of calibrations and tests made with these systems. The importance of evaluation of uncertainty at all levels of the traceability chain is emphasized. In the development phase of a measurement system, its calibration has a unique importance because it allows the determination of the metrological parameters that characterizes it, as well as its capability. However, the market requires low cost, efficient, automated and versatile measurement systems. Therefore, this study developed a measurement system based on capacitive accelerometer ADXL321 of low cost for general applications. Two types of direct calibration by comparison, one at 160 Hz and the other in frequency range 2 Hz to 20 kHz, were planned and ten experiments made. The data collected were analyzed and compared with those obtained with a standard measurement system. In following the uncertainty associated with all calibrations was evaluated, applying the methodology proposed in ISO/TAG 4/WG 3 (2008). Resulting in a measurement system of low cost with good accuracy, resolution 0.0006 V, dynamic range 19 dB, precision ± 0.0183 V, stable over time and expanded uncertainty of 4.58% for all calibrations.

CAPÍTULO I

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. Por tal motivo, esses sinais têm sido investigados para sua possível aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real e alguns resultados têm sido relatados (ABRÃO et al., 2008).

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 U\$ 1000,00 impossibilitando seu uso na maioria das aplicações. Assim sendo, até aproximadamente doze anos atrás, a aplicação de acelerômetros estava condicionada a áreas em que o seu custo era irrelevante como a militar e a aeroespacial.

Graças à tecnologia dos Sistemas Microeletromecânicos, SMEM, atualmente os acelerômetros com sensibilidade tri-axial (medição ao longo de três eixos ortogonais) estão sendo fabricados em larga escala e baixo custo, por exemplo: preço unitário do acelerômetro capacitivo ADXL321, em outubro de 2009 era de R\$ 32,00 (trinta e dois reais). Entre outras características estes sensores possuem tamanho reduzido, baixo consumo de potência, boa reproduzibilidade, interatividade com a microeletrônica abrindo novas possibilidades de aplicações em diversos ramos da ciência e do conhecimento (FRUETT, 2008).

Conseqüentemente, os custos destes sensores tornaram-se suportáveis para outras áreas como a indústria automotiva onde são amplamente utilizados para a medição de vibrações e choques mecânicos. Estas medições têm aplicação em diversos segmentos, como pesquisa e

desenvolvimento, avaliação de componentes, segurança veicular, suspensões e pneus, conforto, etc. (RIPPER et al., 2006).

Os Sistemas Microeletromecânicos, também, poderão ser usados em muitas outras áreas, entretanto é 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, como exemplo podem-se citar: sistemas de realidade virtual, nomeadamente ao nível de dispositivos para serem montados em capacetes e luvas, sistemas de apoio GPS, monitorização de choques durante o transporte e carregamento de bens sensíveis/frágeis, brinquedos eletrônicos e outros (BRACKE; PUERS; HOOF, 2007).

Paralelamente à evolução dos acelerômetros são observados avanços significativos dos componentes eletroeletrônicos, dentre eles os computadores, permitindo, o monitoramento simultâneo de várias grandezas de forma rápida. Assim sendo, áreas como a medicina e a do esporte vêm aumentando a aplicação dos SMEM. Todos estes fatores tendem a reduzir, significativamente, os custos, já que um mesmo sensor, montado adequadamente com outras unidades do sistema de medição, poderá ser usado em diversas aplicações (LIMA; FREITAS; KRUEGER, 2002).

Assim, podem ser analisadas as informações de diferentes sensores e suas interações mútuas, isto é, os chamados efeitos cruzados. Citando dois exemplos de aplicação tem-se:

- a) Engenharia: Os sensores podem ser capazes de operar com facilidade, sem ou com pouca intervenção do operador e manutenção sem muita complexidade.
- b) Medicina: podem ser usados ou implantados sem qualquer desconforto para o usuário.

Dentre os SMEM o acelerômetro capacitivo ADXL321, da Analog Devices foi escolhido para desenvolvimento deste trabalho. O ADXL321 possui sensibilidade em dois eixos, assim sendo, a montagem adequada de dois destes acelerômetros possibilita a obtenção de um sensor triaxial, que será utilizado no monitoramento, aquisição e análise dos sinais de vibração.

Seja qual for a aplicação destes sensores triaxiais diversos ensaios devem ser conduzidos em tempo real e de acordo com as normas em vigor, para caracterizar

metrologicamente o sistema de medição. Esta caracterização inclui, também, o cálculo da incerteza expandida.

Pelo exposto, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um sistema de medição de vibrações de baixo custo baseado no acelerômetro ADXL321 para aplicações gerais. Também, caracterizar o sistema de medição no que tange a: resolução, sensibilidade, exatidão, linearidade, estabilidade, resposta em frequência, incerteza de medição, entre outros. Outro objetivo é a calibração do sistema a partir de métodos recomendados pelas normas técnicas em vigor visando à validação e comprovação de sua eficácia.

Assim o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, além deste. No capítulo dois apresenta-se a revisão bibliográfica sobre acelerômetros, tipos, características construtivas e suas aplicações. São abordados, também, os procedimentos e normas técnicas vigentes relacionados à calibração e, finalmente o sistema de medição desenvolvido é apresentado, bem como, seus módulos funcionais e os parâmetros metrológicos que o caracterizam.

No terceiro capítulo são apresentados os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho, são eles: estudo do acelerômetro capacitivo ADXL321, estatística básica, análise de variância e incerteza de medição.

O quarto capítulo apresenta o sistema de medição, baseado no acelerômetro de baixo custo ADXL321, proposto e desenvolvido especialmente para monitoramento de vibrações. De forma detalhada, é descrita cada uma das etapas da calibração, bem como, as fontes de erros e os modelos matemáticos para avaliação da incerteza de medição.

No capítulo cinco são apresentados e discutidos os resultados experimentais e aqueles decorrentes da avaliação da incerteza de medição.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre: acelerômetros, destacando os tipos, as características construtivas e as aplicações; procedimentos de calibração de acelerômetros, enfatizando as normas técnicas existentes e, por fim, o sistema de medição, seus módulos funcionais e os parâmetros metrológicos que o caracterizam.

2.1. Acelerômetros. Tipos. Aplicações.

Existem muitos tipos de acelerômetros, fabricados com tecnologias diferentes, por exemplo, ópticos, térmicos, capacitivos, por indução magnética, entre outros. Cada um possui características únicas, vantagens e desvantagens. Dos acelerômetros mecânicos, os mais comuns são os capacitivos, os piezoelétricos e os piezoresistivos. Recentemente, os acelerômetros mecânicos começaram a ser substituídos por um novo tipo, os eletromecânicos. Um exemplo é o acelerômetro Sistemas Microeletromecânicos (SMEM) (FIGUEIREDO et al., 2007).

O conceito de acelerômetro pode ser explicado de uma maneira bastante simples, baseado no sistema massa-mola, ilustrado na Fig. 2.1.

Basicamente, consiste de uma pequena massa solidária a uma mola amortecedora engastada na outra extremidade. Quando este conjunto é perturbado por uma aceleração, a massa se desloca, fazendo com que a mola sofra um deslocamento proporcional, retornando o

conjunto massa-mola para sua posição inicial. Esse deslocamento é medido e interpretado para obter o valor da aceleração.

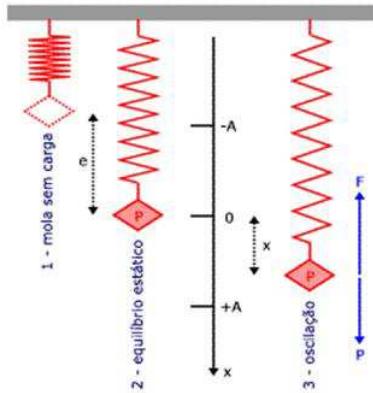


Figura 2.1 - Sistema massa-mola mostrando o funcionamento de um acelerômetro

Acelerômetros capacitivos: o funcionamento dos sensores capacitivos baseia-se na variação da capacidade elétrica de um par de corpos, isto é, um capacitor. Há três formas de provocar esta variação: variando o dielétrico (isolante elétrico), a distância entre duas placas (corpos) ou a área. A Figura 2.2 ilustra estes princípios, juntamente com suas respectivas curvas características (SANTOS, 2003).

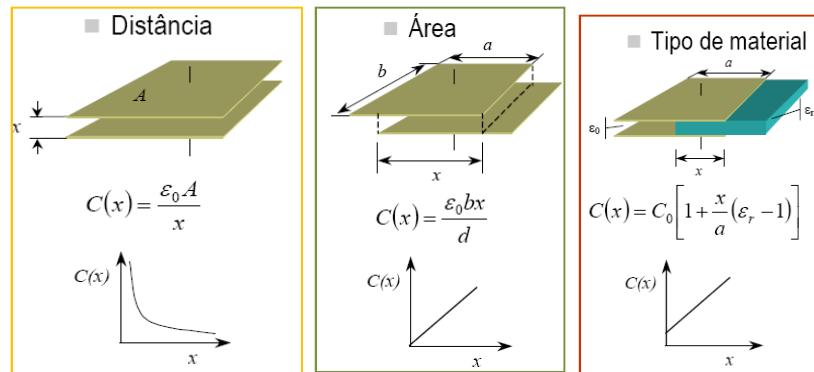


Figura 2.2 - Curvas de sensibilidade de sensores capacitivos (SANTOS, 2003)

Os capacitores são componentes elétricos que armazenam carga. Um capacitor é, geralmente, formado posicionando-se duas placas paralelas entre si. A capacidade é dada pela Eq. (2.1), em função da variação de área (FIGUEIREDO et al., 2007).

$$C = \epsilon A / d \quad (2.1)$$

Onde ϵ é uma constante que dependente do material entre as placas, A é a área das placas e d corresponde à distância entre elas.

Os acelerômetros capacitivos contêm um condensador entre a massa e a estrutura que serve de suporte e é sensível às mudanças na capacidade entre estes. Uma aceleração da massa provoca variações no espaço entre as placas fixa e móvel do condensador, as quais são inversamente proporcionais à carga do condensador. Como resposta à aceleração, a capacidade elétrica varia provocando uma variação do sinal de saída do circuito.

Segundo Bracke, Puers e Hoof (2007) estes sensores capacitivos podem medir diferentes tipos de grandezas físicas como umidade, aceleração, pressão e posição. São adequados em montagens ou aplicações blindadas, uma vez que nenhuma energia se dissipá e apresentam alta sensibilidade, bem como, baixo consumo de energia. Apresentam bom desempenho para monitoramento de variações de temperatura e são menos sensíveis à deriva que os sensores piezoelétricos. Por isso, os sensores capacitivos são freqüentemente utilizados em baixa potência e aplicações de alto desempenho, além de serem desenvolvidos por micro usinagem.

Acelerômetros Piezoelétricos: os cristais piezoelétricos são cristais sintéticos ou naturais que produzem carga elétrica quando são comprimidos, tracionados ou flexionados. Nos acelerômetros piezoelétricos, a massa é unida a um cristal piezoelétrico. Quando o corpo do acelerômetro é sujeito à vibração, a massa obedece às leis da inércia e o cristal piezoelétrico fica submetido a forças de tração e compressão, gerando cargas elétricas. Estas forças são proporcionais à aceleração, de acordo com a segunda lei de Newton, Eq. (2.2).

$$F=ma \quad (2.2)$$

Estes sensores são úteis somente para forças não estáticas, pois de outro modo, gerariam uma carga estática, que rapidamente se escoaria em decorrência de sua própria superfície. (SANTOS, 2003).

Os acelerômetros piezoelétricos apresentam boa linearidade e uma faixa dinâmica maior em comparação com outros acelerômetros, cujas aplicações requerem baixas amplitudes de acelerações ou baixas freqüências. Não necessitam de fonte de alimentação, ou seja, o sinal de saída é conectado diretamente ao condicionador de sinais do sistema de medição (BARBARINI et al., 2007). Quando comparados com os sensores capacitivos pode-se dizer

que os sensores piezoelétricos têm uma estrutura mais simples e facilidades no processo de fabricação.

Acelerômetros Piezoresistivos: Neste tipo de acelerômetros, surge um componente piezo resistivo em substituição ao cristal piezoelétrico. A força exercida pela massa faz variar a resistência, que é detectada por uma ponte Wheatstone. Estes acelerômetros têm a vantagem de serem aplicados para medir acelerações de 1 a 100 Hz (FIGUEIREDO et al., 2007).

De forma geral, os acelerômetros são amplamente utilizados em diversas áreas da ciência e da tecnologia. No campo médico e terapêutico, o acelerômetro é fortemente usado na avaliação da atividade física diária tanto em indivíduos saudáveis quanto em doentes, com paralisias ou outras alterações da força muscular. Esta avaliação é efetuada com sensores fixos ao corpo, utilizando eletrodos de eletromiograma, EMG (FIGUEIREDO et al., 2007).

Os acelerômetros são sensores que respondem tanto à freqüência quanto à intensidade do movimento, e o seu uso na avaliação da atividade física se baseia nas relações demonstradas entre a saída do acelerômetro e a energia gasta nos estudos da análise do movimento ou estudos ergonômicos. Estes diferem em muitos aspectos, a saber, na sensibilidade axial (uni, bi ou triaxial), na freqüência de ressonância e na sensibilidade direcional. Para este último, é necessário relacionar a amplitude do sinal com o ângulo de inclinação. A saída de um acelerômetro ideal, que está diretamente relacionada com o movimento humano, é:

- 1) a aceleração resultante do movimento que depende do tipo de atividade realizada, assim como da medição;
- 2) a aceleração gravitacional.

Existem, ainda, outras fontes que contribuem para a saída do acelerômetro, como, por exemplo, vibrações externas as quais podem, sobretudo, introduzir ruídos.

Os acelerômetros são utilizados, também, na medicina de reabilitação, para determinar o risco de queda de pessoas idosas (que pode resultar em fraturas ou até mesmo em morte), em que as causas subjacentes estão relacionadas com uma marcha e equilíbrio deficientes.

Os acelerômetros permitem avaliar a capacidade de um idoso de sentar-se e levantar-se de uma cadeira, uma prática fundamental na vida diária, assim como, estudar a redução da mobilidade associada a diferentes determinantes, como a saúde física e mental. Deste modo, e juntamente com outros testes de avaliação clínica da condição física, é possível estabelecer-se programas de reabilitação e outras terapêuticas adequadas. Tal como para os idosos, estas

técnicas podem ser usadas para avaliar as condições físicas de indivíduos que sofrem de diversos tipos de doenças, como a de Parkinson e outros tipos de tremores.

A polissonografia é um estudo realizado durante a noite, num laboratório, e é o método padrão no diagnóstico dos distúrbios do sono (onde uma diversidade de sistemas cada vez maior se apresenta no mercado). A montagem polissonográfica possibilita o registro em polígrafo do eletro-encefalograma (EEG), do eletrooculograma (EOG), da eletromiografia (EMG) do movimento de membros, do movimento tóraco-abdominal, das medidas do fluxo oronasal, do eletro-cardiograma (ECG) e da oximetria de pulso (FIGUEIREDO et al., 2007).

A síndrome de apneia-hipopneia durante o sono também é um dos distúrbios que prejudica este, e que pode ser igualmente medido através do uso de acelerômetros. A atividade respiratória e cardíaca, durante esta síndrome, pode ser medida analisando espectralmente o sinal proveniente de um ou mais acelerômetros. O registro destas variáveis também pode ser obtido colocando-se acelerômetros ao longo do pescoço do paciente, de modo a registrar os sons e vibrações acústicas que ocorrem durante aquele distúrbio e que permite, por exemplo, identificar um aumento súbito da respiração.

Os acelerômetros podem ajudar a avaliar a eficácia da medição da pressão sanguínea durante a atividade física normal, onde se usam esfigmomanômetros automatizados que fazem medições da pressão, no punho, em intervalos fixos e conhecidos. Esta avaliação é necessária uma vez que há fatores naturais, do dia-a-dia, que influenciam a atividade cardiovascular, por exemplo: o stress, a disposição e a interação social, entre outros (FIGUEIREDO et al., 2007).

Os acelerômetros podem ser usados no desenvolvimento e no controle do desempenho de ortóteses e próteses, de modo a permitir uma vida mais cômoda a quem sofre alguma limitação a nível físico (FIGUEIREDO et al., 2007).

Na área de fabricação, os acelerômetros são utilizados para medir vibrações ou no monitoramento dinâmico em máquinas-ferramenta durante os processos de usinagem, tais como: comportamento dinâmico de tornos (REZENDE, 2006) e monitoramento do desbalanceamento do rebolo de uma máquina retificadora de alta velocidade (SCHUHLI, 2007).

Até pouco tempo atrás, a aplicação de acelerômetros estava condicionada a áreas bastante específicas como os sistemas militares e aeroespaciais. Graças à tecnologia dos Sistemas Microeletromecânicos, atualmente os acelerômetros com sensibilidade triaxial (medição ao longo de três eixos ortogonais) estão reduzidos a apenas um componente com

cerca de 15 mm³ e massa de poucos miligramas. Os custos tornaram-se suportáveis para outras áreas como a automotiva, onde são utilizados em larga escala, para a medição de vibrações e choques mecânicos. Estas medições têm aplicação em diversos segmentos da engenharia de automóveis, como pesquisa e desenvolvimento, avaliação de componentes, segurança veicular, suspensões e pneus, conforto, entre outras (RIPPER et al., 2006).

Microacelerômetros: A tecnologia SMEM é uma das mais excitantes no campo da tecnologia análogo-digital. Explora as propriedades mecânicas do silicone para criar estruturas móveis (dinâmicas) que, no caso dos sensores SMEM, detectam movimento (aceleração e vibração) em direções distintas. Estes sensores são sensíveis, compactos e baratos, e permitem acrescentar novas capacidades aos produtos, tornando-os mais funcionais e seguros. A família dos sensores SMEM inclui acelerômetros que podem medir a aceleração e a vibração em um, dois ou três eixos (FIGUEIREDO et al., 2007).

A Figura 2.3 mostra esquematicamente a montagem de um SMEM, os quais podem interagir resultando em um funcionamento ideal (FRUETT, 2008).

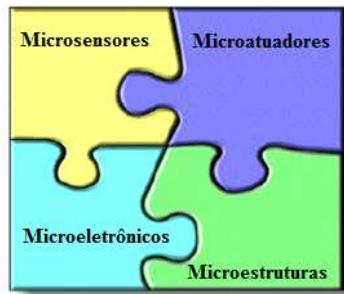


Figura 2.3 - Esquema de montagem do SMEM (FRUETT, 2008)

Segundo Schmidt et al. (2009) os SMEM são micro-sistemas utilizados na transferência de energia eletro-mecânica, cujo princípio funcional se baseia na geração de força através de carga eletrostática (atuador) ou também pela variação desta ocasionada pela aceleração mecânica (sensor). Usualmente os SMEM são feitos de silício. As tecnologias para sua fabricação são: fotolitografia, remoção do substrato pela face anterior ou frontal, remoção do substrato pela face posterior, remoção de camadas sacrificiais presentes na superfície do substrato, entre outros. O baixo custo das microestruturas é garantido quando milhões delas são fabricadas num único “wafer” usando técnicas de processamento em larga escala. A Figura 2.4 mostra uma estrutura básica do “comb-drive”. O “comb-drive” é tido como a estrutura básica mais importante para a construção de SMEM. O nome de “comb-drive”

deriva da forma geométrica mostrada na Fig. 2.4, similar a um minúsculo pente (CAMBRIDGE, 1995).

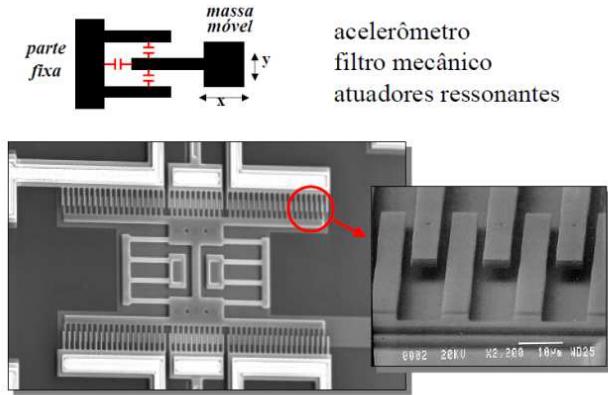


Figura 2.4 - Estrutura básica do “comb-drive” (CAMBRIDGE, 1995)

Esta tecnologia faz a integração de sensores, atuadores e outros componentes eletrônicos em um substrato de silício comum com os componentes micro-mecânicos fabricados usando tecnologias de micro-usinagem (micro-fabricação). Tal desenvolvimento está revolucionando quase todas as categorias de produtos, aplicações eletromecânicas e computacionais (BRACKE, PUERS e HOOF, 2007).

Segundo Lavieri (2011) na primeira metade do século XX, a corrosão controlada tornou-se um importante método de fabricação de placas de circuito impresso e, desde a década de 1950, vem sendo empregada na fabricação de dispositivos eletromecânicos de pequenas dimensões. Muitas pesquisas levaram ao aperfeiçoamento desta técnica de modo a garantir características dimensionais mais exatas. Na idade média os artesãos utilizavam este processo de fabricação para decorar suas armaduras com intrincados desenhos, produzidos pela corrosão controlada das placas de metal. Os acelerômetros com tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos (SMES) avançaram mais tecnologicamente que os sensores de velocidade angular e hoje possuem desempenho superior a estes últimos. Razão pela qual inúmeros cientistas têm utilizado os SMES em aplicações de navegação inercial.

Contudo, a maioria das aplicações dos SMES está, ainda, em uma fase muito primária de desenvolvimento e, por enquanto são limitadas as potencialidades deste tipo de acelerômetros. Têm-se, como exemplos, aplicações em sistemas de realidade virtual, nomeadamente ao nível de dispositivos para serem montados em capacetes e luvas, sistemas de apoio GPS, monitoramento de choques durante o transporte, carregamento de bens sensíveis (frágeis), brinquedos eletrônicos e outros. Estes sensores têm um baixo custo em

relação aos convencionais e são utilizados em circuitos de dimensões reduzidas, alimentados por uma pequena bateria. Além disso, podem ser produzidos em larga escala e implementados em circuitos integrados (BRACKE, PUERS e HOOF, 2007).

As vantagens do acelerômetro capacitivo, como exemplo, o ADXL321 do fabricante Analog Devices, têm incentivado sua aplicação em vários segmentos da Engenharia, principalmente quando se requer um sistema de medição relativamente barato para monitoramento de vibrações e aquisição automatizada de dados. Outros exemplos de aplicações são: monitoramento remoto em câmaras de choque térmico (SEQUÉIRA, 2006), equipamento de ensaios de máquinas rotativas (FRAGA, 2009), monitoramento de vigas delgadas engastadas em uma das extremidades (VILLALOBOS et al., 2009), análise do nível de vibrações verticais no assento de um trator agrícola (FRANCHINI, 2007).

Abrão et al. (2008) estudaram a aplicabilidade, no meio industrial, de um acelerômetro da série ADXL321 com o objetivo de utilizá-lo no monitoramento de vibrações em um processo produtivo. Para tanto, o ADXL321 foi montado em uma estrutura metálica obtendo-se como resultado um sensor de custo reduzido. A precisão do acelerômetro construído foi avaliada utilizando-se um sistema Laser Doppler Vibrometer da Polytec, revelando uma excelente correlação de velocidade de vibração entre o acelerômetro ADXL321 e pelo sistema a laser da Polytec, na faixa de freqüência analisada.

2.2. Calibração

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, permitindo atribuir ao sistema de medição a categoria de “apto” ou “não apto” para efetuar uma determinada tarefa.

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 disto, determinar outras propriedades metrológicas como o efeito das grandezas de influência. Em uma segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma

relação visando à obtenção de um resultado de medição mais completo a partir de uma indicação.

Os procedimentos de calibração podem ser divididos em dois grandes grupos que são: calibração indireta e direta. A calibração indireta utiliza-se de artefatos padrões, previamente calibrados para obter os erros do sistema de medição. Por outro lado a calibração direta consiste na obtenção dos erros do sistema de forma direta, isto é, através de instrumentos de medição ou padrões, tais como o interferômetro laser. Neste caso, é necessário dispor de uma coleção de medidas materializadas para cobrir a faixa de medição do instrumento, ou de um sistema padrão que permita gerar valores das grandezas predefinidas. Determina-se o erro, comparando o resultado de cada medição com o valor verdadeiro convencional. Cabe ressaltar que o sistema de medição ou padrão utilizado deve apresentar uma incerteza dez vezes menor que o sistema a ser calibrado.

Ainda, a calibração pode ser parcial ou total. A calibração parcial é, geralmente, aplicada na fase de desenvolvimento do sistema de medição, podendo-se calibrar separadamente cada uma das unidades ou módulos do mesmo. Por sua vez, a calibração total pressupõe a determinação do comportamento operacional e metrológico do sistema de medição avaliado na sua integridade (transdutor, unidade de tratamento e mostrador).

O resultado da calibração deve ser registrado em um documento, denominado certificado de calibração (NBR ISO/IEC 17025, 2005). Esse documento deve incluir toda a informação necessária à interpretação dos resultados da calibração e aquela requerida pelo método utilizado. Dentre as informações estão:

- Título.
- Nome e endereço do laboratório.
- Identificação do relatório de calibração. Cada página numerada, além da clara identificação do final do certificado de calibração.
- Nome e endereço do cliente.
- Identificação do método utilizado.
- Descrição, condição e identificação dos itens calibrados.
- Data do recebimento dos itens de calibração e a data da realização da calibração.
- Referência ao plano e procedimento de amostragem utilizados.
- Resultados da calibração com as unidades de medida.
- Nomes, funções e assinaturas ou identificação equivalente das pessoas autorizadas para emissão do certificado.

- Uma declaração de que os resultados se referem somente aos itens calibrados.

Para que haja confiabilidade nas medições realizadas por meio de acelerômetros, é necessário que elas sejam executadas por pessoal qualificado, usando métodos de medição de preferência padronizados e, instrumentação adequada à aplicação e devidamente calibrada. A combinação destes fatores é fundamental para a aceitação internacional das medições realizadas no país (RIPPER et al., 2006).

O uso de equipamentos calibrados permite assegurar a qualidade dos resultados obtidos. Estes, um requisito indispensável para garantir a rastreabilidade dos resultados de uma medição às diferentes unidades do Sistema Internacional de unidades (SI), (RIPPER et al., 2006).

A calibração de um transdutor de vibrações tem como principal objetivo a determinação da sua sensibilidade à vibrações mecânicas nas amplitudes e freqüências de interesse, para o grau de liberdade de movimento em que este foi projetado para ser usado (RIPPER et al., 2006).

A calibração de transdutores de vibração é tratada pelo conjunto de normas ISO 5347 e ISO 16063. A família de normas 5347 está sendo revisada e substituída pela família 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 (RIPPER et al., 2006).

A ISO 16063-11 (1999) especifica a instrumentação e os procedimentos para a calibração de acelerômetros, empregando excitação senoidal e interferometria a laser. Ela apresenta três métodos interferométricos para calibração de acelerômetros de referência (RIPPER et al., 2006).

A ISO 16063-21 (2003) descreve a calibração de transdutores de vibração por comparação. Os métodos apresentados, também, podem ser aplicados em outros níveis da hierarquia metrológica, embora ela aborde principalmente a calibração por comparação utilizando um padrão calibrado por métodos primários.

A ISO 16063-22 (2005) especifica a instrumentação e os procedimentos a serem utilizados para a calibração secundária de transdutores de choque (impacto).

A ISO 16063-31 (2009) especifica detalhes da instrumentação e métodos utilizados para testes de vibração transversal de sensibilidade.

A ISO 16063-21 (2009) descreve a calibração de transdutores de vibração retilíneo, por comparação. Destaca a calibração utilizando comparação direta com um padrão calibrado por métodos primários. Os métodos descritos podem ser aplicados entre outros níveis na hierarquia de calibração. Especifica os procedimentos para a realização de calibrações de transdutores de vibração retilíneo por comparação na faixa de freqüência de 0,4 Hz a 10 kHz.

ISO 16063-12 (2002) especifica a instrumentação e procedimentos a serem utilizados para a calibração primária de acelerômetros utilizando o método da reciprocidade. É aplicável à calibração de acelerômetros com comportamento linear retilíneo na faixa de freqüência de 40 Hz a 5 kHz e em uma frequência dependente da faixa de amplitude de 10 m/s^2 a 100 m/s^2 . É baseado no uso da bobina de um vibrador eletrodinâmico como o transdutor recíproco.

A ISO 16063-15 (2006) especifica a instrumentação e os procedimentos utilizados para a calibração primária de vibrações angulares em acelerômetros angulares ou rotacionais, usando interferometria laser.

A ISO 16063-12 (2008) especifica a instrumentação e os procedimentos a serem utilizados para a calibração primária de acelerômetros utilizando o método da reciprocidade.

A ISO 16063-13 (2001) aborda os métodos para calibração primária de acelerômetros de vibração e impacto, usando interferometria laser.

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 determinada faixa de freqüências. Para minimizar a influência de perturbações no movimento gerado podem ser implementados diferentes sistemas, denominados de:

Sistemas de baixas freqüências (de 1 a 100 Hz).

Sistemas de médias freqüências (de 10 a 5 kHz).

Sistemas de altas freqüências (de 4 a 10 kHz).

Sistemas de quadratura homodino (de 10 Hz a 10 kHz).

A calibração primária da magnitude da sensibilidade de acelerômetros padrão e de cadeias de medição de aceleração padrão deve ser realizada conforme os requisitos da norma

ISO 16063-11 (1999). O método de contagem de franjas (Fig. 2.5) pode ser usado para freqüência entre 1,0 Hz e 1,0 kHz. Por sua vez, o método de ponto mínimo (Fig. 2.6) pode ser usado para o intervalo de 1 a 10 kHz , enquanto que o método de aproximação por seno (Fig. 2.7) permite a calibração de amplitude e fase com níveis constantes de aceleração de 10 Hz a 10 kHz (RIPPER et al., 2006).

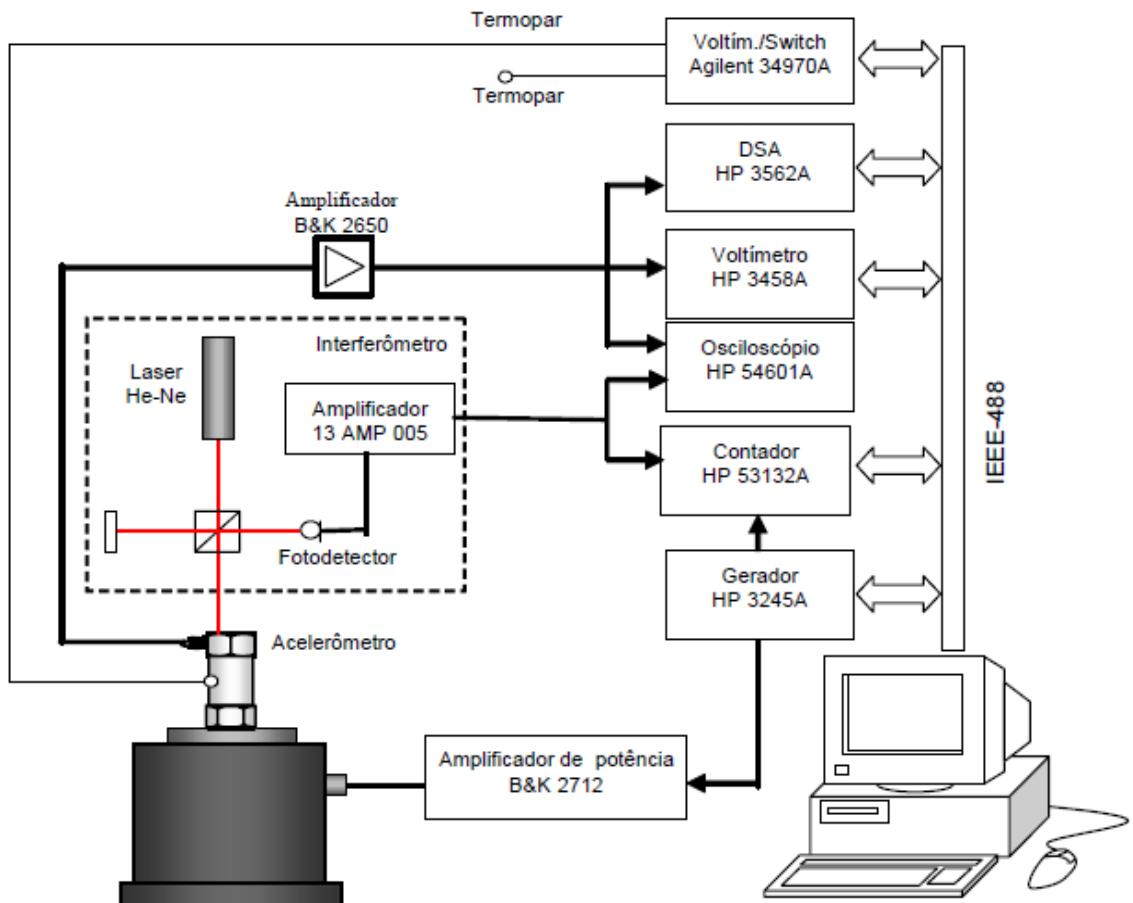


Figura 2.5 - Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de contagem de franjas (ISO 16063-11, 1999)

Os dois primeiros métodos usam um interferômetro de Michelson, que só permite a determinação da sensibilidade do objeto sob calibração, enquanto o terceiro usa um interferômetro homodino de quadratura, que permite a determinação tanto da amplitude, quanto do ângulo de fase (RIPPER et al., 2006).

Nogueira et al., (2006) avaliaram metrologicamente um acelerômetro axial projetado para o monitoramento de vibrações em cabos de energia e linhas de transmissão. A calibração foi realizada utilizando interferometria a laser com incerteza de 0,5% e faixa de freqüência de 10,0 Hz a 1,0 kHz, conforme recomendado pela ISO 16063-11 (1999). Os autores efetuaram

500 leituras no intervalo de 10-150 Hz e acelerações de até 40 m/s². A saída do acelerômetro foi estimada através de uma equação logarítmica. Como o sinal AC não era totalmente independente da freqüência foi efetuada uma correção para este efeito. Para tanto, as leituras foram agrupadas segundo os valores de entrada de freqüência e os valores inconsistentes foram eliminados usando o critério de Chauvenet. Em seguida, uma equação de tendência foi calculada aplicando o método dos mínimos quadrados nos dados restantes. Os autores usaram a média das freqüências de 75 Hz como referência e efetuaram a correção através de uma determinada equação. Em seguida, os valores corrigidos foram reagrupados considerando como entrada a aceleração e novamente submetidos ao critério de Chauvenet. O método dos mínimos quadrados foi aplicado utilizando os valores médios de cada subgrupo,

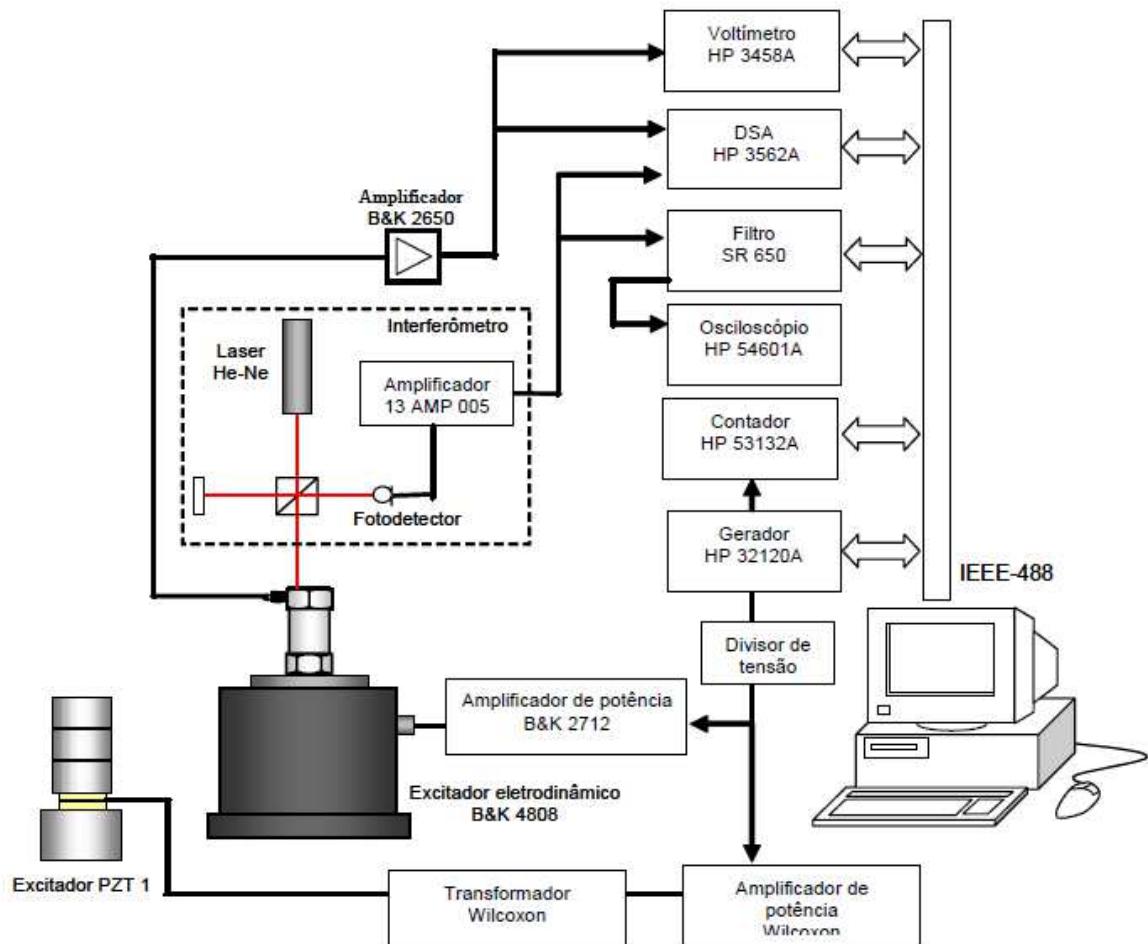


Figura 2.6 - Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de mínimos da função de Bessel (ISO 16063-11, 1999)

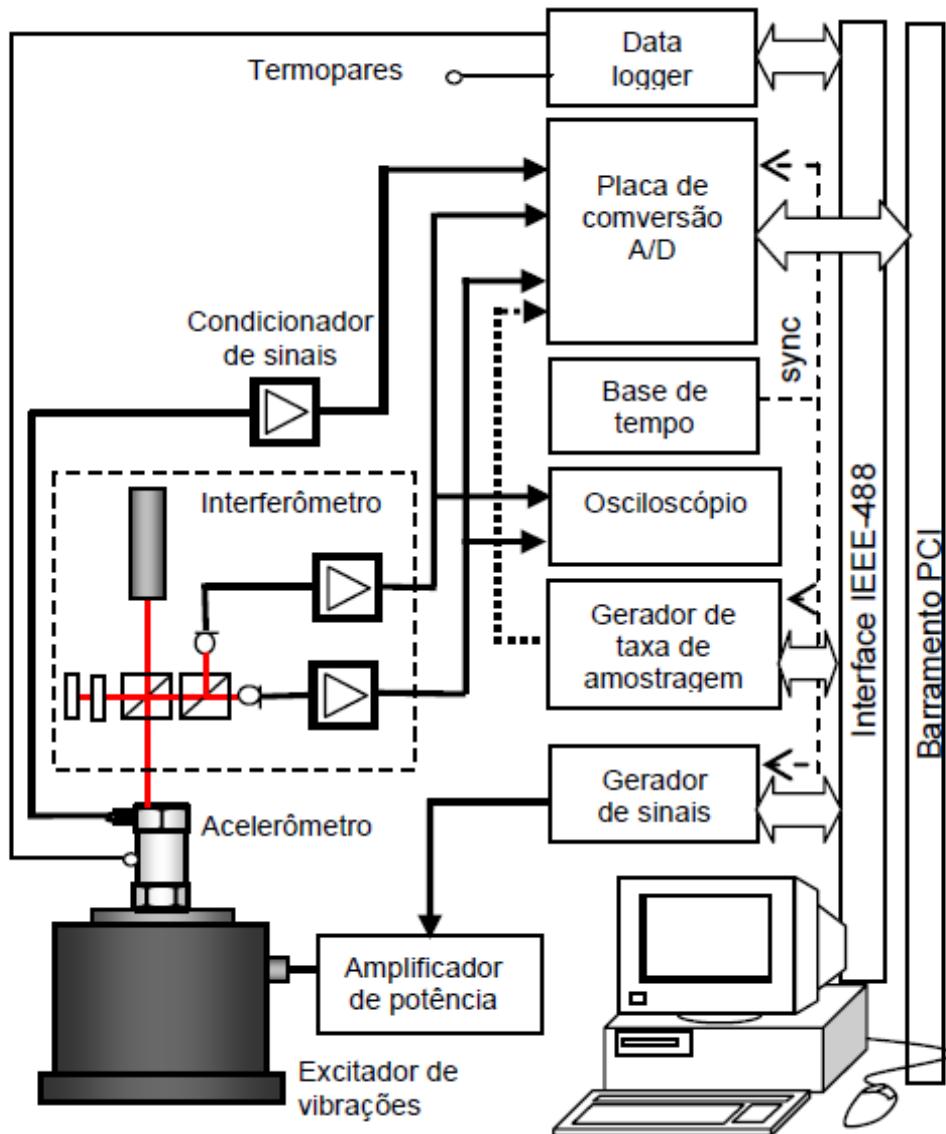


Figura 2.7 - Sistema para calibração primária de acelerômetros pelo método de aproximação de senos (ISO 16063-11, 1999)

Abrão et al., (2008) avaliaram a eficiência da montagem do sensor, de geometria quadrada, no monitoramento de uma máquina ferramenta em condições adversas. A avaliação consistiu na comparação das Funções de Resposta em Freqüência (FRF) tendo como saída os sinais do sensor estudado e como entrada os sinais de um acelerômetro de referência do tipo 4371 da B&K. O estimador de FRF foi o H1 para uma freqüência de aquisição de 25,60 kHz e 800 linhas de freqüência, resultando uma resolução em freqüência de 12,5 Hz e uma banda de análise de 0 a 10 kHz. Na estimativa das FRF foi utilizado um analisador espectral da Scientific Atlanta, modelo SD380 Spectral Dynamics, com uma superposição de 50 % e um

tempo de aquisição total de 72 segundos por FRF. A excitação foi do tipo ruído branco na banda de 2 a 20 kHz.

Os autores verificaram a influência do comprimento dos cabos e determinaram o valor da freqüência de ressonância da montagem. O sensor foi, então, utilizado durante a fabricação das luvas de 3^a e 4^a velocidades de câmbios automotivos da Fiat, Betim, sediada em Minas Gerais. Os ensaios foram realizados, utilizando-se os três tipos de insertos, a saber, VNMA 160408 e CBN, em um Torno Weisser, com as seguintes condições de corte: velocidade de 200 m/min; avanço de 0,1 mm/volta; profundidade de corte em duas faces, respectivamente, uma de 0,550 mm outra 0,500 mm; 0,265 mm (diâmetro) e, óleo solúvel emulsionável a 3% como fluído de corte.

Para fins de comparação dos sinais no domínio do tempo e da freqüência, foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico da B&K, que monitorou as vibrações durante a fabricação de 600 peças. Foi utilizado, também, um condicionador de sinais Nexus, da B&K, do tipo 2692; um micro computador; um acelerômetro, da B&K, do tipo 4371; um acelerômetro ADXL321; uma placa A/D, da National Instruments, USB – 9162; um amplificador de sinais de quatro canais. Os sinais foram adquiridos durante 10 segundos com uma freqüência de aquisição de 8,192 kHz e com os filtros passa baixa analógicos do condicionador com uma freqüência de corte de 3 kHz, resultando em uma faixa de freqüência útil de 0 a 2,0 kHz.

Para verificar-se a integridade do comportamento da FRF do acelerômetro ADXL321 após sua utilização no monitoramento do processo de fabricação de 600 peças, utilizou-se um Laser Doppler Vibrometer da Polytec, tipo OFV303-8, com o respectivo condicionador de sinais da Polytec, tipo OFV3001SH6.

Os sinais do acelerômetro ADXL321 e do laser foram adquiridos com uma freqüência de 16,384 kHz. Os sensores foram posicionados sobre o excitador eletro-dinâmico. Foram obtidos os espectros médios de aceleração do sensor utilizado e de velocidade do LDV para 4096 linhas (resolução em freqüência de 2 Hz) e um tempo de aquisição total de 50 segundos com 50% de superposição das FFTs. O sensor foi submetido à uma excitação do tipo ruído branco, na faixa de freqüência de 2 Hz a 20 kHz. Para efeito de comparação, o espectro de aceleração foi integrado digitalmente.

Observou-se que não houve diferenças explícitas entre os comportamentos das curvas de FRFs para ambos os comprimentos dos cabos. Ainda as variações das magnitudes, em altas freqüências, foram de aproximadamente 2, 1,5 e 1,5 dB, para as amplitudes de excitação alta,

baixa e média, respectivamente, comprovando que o comprimento dos cabos não influencia as respostas do sistema.

Para verificar a faixa de operação da montagem do acelerômetro ADXL321, obteve-se o Diagrama de Bode da resposta do sinal adquirido devido à excitação de 1,25 V para o cabo coaxial de 1,5 m.

A freqüência de ressonância do sistema se deu por volta de 5,8 kHz. Com isso, infere-se que a faixa de operação do sensor atinge cerca de 2 kHz, referente à faixa onde o sistema responde linearmente. Este valor de freqüência de ressonância é menor do que o especificado pela Analog Devices devido à alteração na massa e na rigidez do circuito integrado e modificado quando montado em estrutura de alumínio.

Também foram analisados os sinais de aceleração em função do tempo adquiridos durante o processo de torneamento da luva de 3^a e 4^a velocidades de câmbios automotivos, para os sensores da B&K e da ADXL321, respectivamente. Estes sinais são referentes à 170^a peça fabricada. Os autores concluíram que as regiões de usinagem das três ferramentas utilizadas no processo estão bem definidas em ambos os casos.

O sinal do sensor da B&K foi filtrado no tempo para uma freqüência de corte de 2,0 kHz, utilizando-se um filtro “Butterworth”, passa baixa de 4 pólos. Os sinais foram analisados somente até 2,0 kHz devido à faixa de operação do acelerômetro ADXL321 estar limitada nesta freqüência. Foi verificado que não há diferenças explícitas entre as magnitudes dos espectros, sendo que o erro médio entre ambas as curvas foi de aproximadamente 0,4 dB. Verificou-se, também, uma excelente correlação entre as duas curvas na banda de 20 Hz a 3,0 kHz, corroborando os resultados obtidos com o acelerômetro de referência.

2.3. Sistema de medição, módulos funcionais e parâmetros metrológicos

Um sistema de medição, Fig. 2.8, pode ser definido como o conjunto de um ou mais instrumentos de medição e freqüentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de tipos especificados (INMETRO, 2009).

A grande maioria dos sistemas de medição, que operam pelo princípio de indicação apresentam três módulos funcionais bem definidos (ALBERTAZZI; SOUSA, 2010). São eles:

Transdutor: O transdutor é o módulo do sistema de medição que está em contato com o mensurando. Uma série de fenômenos físicos pode ocorrer no transdutor gerando um sinal de baixa energia. O sinal de medição pode ser mecânico, pneumático, elétrico ou de outra natureza, mas estará sempre relacionado ao valor do mensurando por meio de uma função bem definida, normalmente linear. De forma geral o transdutor transforma um efeito físico em outro mais conveniente para ser medido (ALBERTAZZI; SOUSA, 2010).

Alguns transdutores mais sofisticados podem ser compostos de vários estágios, onde várias transformações de efeitos físicos podem estar presentes. O primeiro estágio do transdutor é denominado de sensor. O sensor é a parte do transdutor que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida (INMETRO, 2009). Na maioria dos casos gera um sinal de baixa energia.

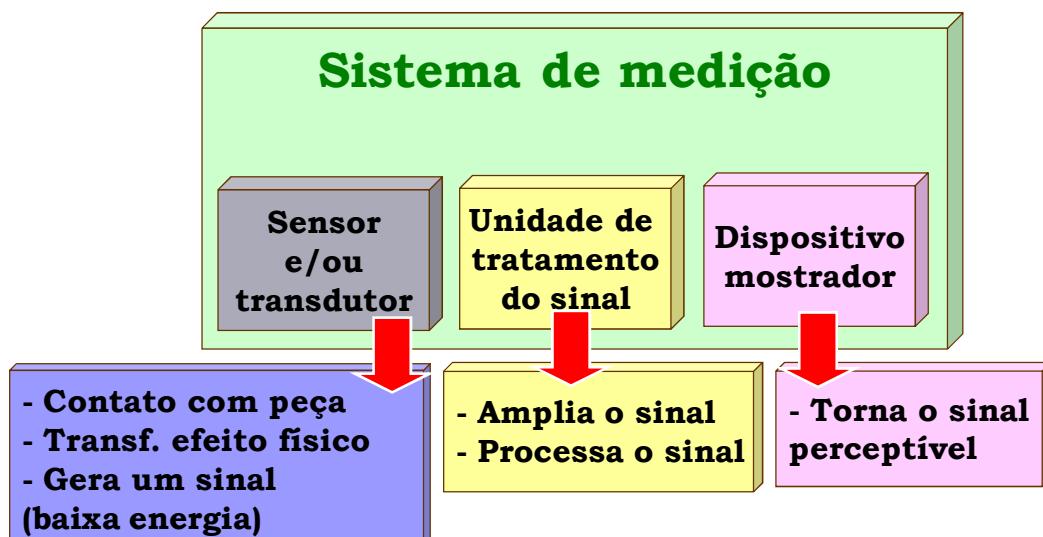


Figura 2.8 - Esquema geral de um Sistema de Medição

Unidade de tratamento do sinal: O sinal gerado pelo transdutor, geralmente é de baixa energia, difícil de ser diretamente indicado. Assim a unidade de tratamento de sinal tem por principal função amplificar a potência do sinal de medição. Pode assumir outras funções como: filtragem, compensação, integração, processamento, etc. É às vezes chamada de condicionador de sinais. Este módulo pode não estar presente em alguns sistemas de medição mais simples. Em determinados sistemas de medição, fornece energia ao sensor (ALBERTAZZI; SOUSA, 2010).

Unidade mostradora: O dispositivo mostrador recebe o sinal tratado (amplificado, filtrado, etc.) e através de recursos mecânicos, eletromecânicos, eletrônicos ou outro qualquer,

transforma-o em um número inteligível ao usuário, isto é, produz uma indicação direta perceptível. Essa indicação pode ser um número, se o mostrador for digital. Para instrumentos analógicos o operador deverá efetuar a leitura da indicação a partir da posição de um ponteiro ou marca sobre uma escala ou mais escalas.

São diversos os parâmetros metrológicos que podem ser usados para caracterizar um sistema de medição, dentre eles: resolução, exatidão, precisão, sensibilidade, linearidade, faixa de medição, diagrama de calibração, estabilidade, resposta em freqüência e incerteza de medição. Estes parâmetros podem ser expressos através de um simples número, uma faixa de valores, uma tabela ou um gráfico. A seguir são apresentadas as terminologias destes parâmetros e suas respectivas definições de acordo com o INMETRO (2009).

Albertazzi e Sousa (2010) agrupam as principais características metrológicas em quatro categorias, a saber:

- Características ligadas à faixa de utilização.
- Características ligadas à indicação.
- Características que relacionam o estímulo com a resposta.
- Características aos erros de medição.

2.3.1. Características ligadas à faixa de utilização

Um sistema de medição pode operar em uma ou várias faixas de utilização. Os limites das faixas devem ser bem caracterizados para que seja possível selecionar de forma adequada o sistema de medição para uma dada aplicação. Bem como, para evitar sobrecargas e consequentes avarias.

Dentre as características ligadas à faixa de utilização tem-se:

Intervalo ou faixa de indicações: Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas. Um intervalo de indicações é geralmente expresso em termos de seu menor e maior valor.

Faixa ou intervalo nominal de indicações: Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas arredondadas ou aproximadas, obtido com um posicionamento particular dos controles de um instrumento de medição ou sistema de medição e utilizado para designar este posicionamento. Um intervalo nominal de indicações é geralmente expresso em termos de seu menor e maior valor, por exemplo, para um voltímetro, “100 V a 200 V”.

Intervalo ou amplitude de medição: Valor absoluto da diferença entre os valores extremos de um intervalo nominal de indicações. Exemplo para um voltímetro: um intervalo nominal de indicações de -10 V a +10 V a amplitude de medição é 20 V.

2.3.2. Características ligadas à indicação

A indicação de um sistema de medição pode ser de duas formas, analógica ou digital. Dentre as características ligadas à indicação tem-se:

Resolução: menor variação da grandeza medida que causa uma variação perceptível na indicação correspondente (INMETRO, 2009).

A resolução de um instrumento ou sistema de medição sem nônio corresponde à metade do valor de uma divisão, entretanto a resolução depende de alguns fatores, tais como: qualidade do dispositivo mostrador, capacidade do usuário em fazer interpolações e do bom senso do operador quanto às condições de uso e das necessidades de medição. É muito importante ressaltar que instrumento ou sistema de medição com nônio não se deve interpolar.

Incremento digital: corresponde à menor variação da indicação direta possível de ser apresentada por um dispositivo mostrador digital.

Valor de uma divisão: nos instrumentos com mostradores analógicos, corresponde à diferença entre os valores da escala entre duas marcas sucessivas. Cabe ressaltar que o valor de uma divisão é expresso na unidade marcada sobre a escala, independentemente da unidade do mensurando.

2.3.3. Características que relacionam o estímulo com a resposta

As características metrológicas do sistema de medição, que relacionam a entrada e a saída do mesmo pertencem a este grupo. Estes parâmetros são importantes na fase de especificação de um sistema de medição para uma dada aplicação. São, também, úteis para melhor compreender e lidar com alguns erros de medição. Dentre elas tem-se:

Curva característica de resposta: representa a relação entre o estímulo (entrada) e a resposta (saída) de um sistema de medição. Esta relação pode ser expressa através de uma equação matemática, um gráfico ou tabela numérica.

Cabe ressaltar que embora os princípios físicos sejam escolhidos e o sistema de medição projetado de forma a resultar em uma relação linear entre estímulo e resposta, nem sempre o ideal acontece. A resposta de um sistema de medição real não segue exatamente o comportamento previsto pelos princípios físicos, porque erros sistemáticos e aleatórios

afastam o comportamento nominal do real. Assim sendo, é conveniente definir a curva característica de resposta real.

Sensibilidade: é o quociente entre a variação de uma indicação de um sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida. Geometricamente, a sensibilidade corresponde à inclinação da curva característica de resposta. Para sistemas de medição lineares, a sensibilidade é constante e corresponde à tangente do ângulo de inclinação da reta que representa a curva característica de resposta.

A sensibilidade de um acelerômetro, por exemplo, pode ser determinada através da razão entre a sua saída e a entrada correspondente.

Curva de erros ou de calibração: é a expressão gráfica dos erros do sistema de medição como função de sua indicação. É composta por uma linha central que representa os erros sistemáticos (tendência) e uma faixa que delimita os valores dos erros aleatórios.

A curva de erros mostra o comportamento metrológico do sistema de medição, revelando os valores e a forma de comportamento dos erros. Assim sendo, esta curva permite identificar qual o valor da tendência que deve ser compensado para uma dada indicação.

A calibração permite que correções sejam efetuadas nos resultados das medições, para tanto basta subtrair da média das leituras o valor da tendência. De posse da curva de calibração é possível estimar o erro de linearidade de um sistema de medição.

Histerese: A histerese pode ser quantificada como a diferença entre a indicação para um dado valor do mensurando quando este é atingido por valores crescentes (ida) e por valores decrescentes (volta).

Tempo de resposta: Intervalo de tempo entre o instante em que um valor de entrada de um instrumento de medição ou de um sistema de medição é submetido a uma variação brusca entre dois valores constantes especificados e o instante em que a indicação correspondente se mantém entre limites especificados em torno do seu valor final estável.

Função Resposta em Freqüência (FRF) é utilizada para analisar e determinar as características dinâmicas de um sistema de medição, geralmente com sinais elétricos, medindo uma grandeza física variável com o tempo ou cíclica ou ondulatória. O gráfico da função resposta em freqüência é baseado no sinal amplificado ou atenuado (amplitude ou ganho) em uma faixa de freqüência previamente escolhida. Este gráfico expressa a relação entre o ganho (dB) e a faixa de freqüência (Hz). Ou seja, varia-se a freqüência do sinal de entrada dentro de um certo intervalo e, analisa-se a resposta a esta variação.

Dentre as vantagens da função resposta em frequencia tem-se: permite determinar a sensibilidade experimentalmente, projetar ou analisar um sistema minimizando os ruídos indesejáveis (PAIVA, 2009).

Quando um sinal que varia com o tempo, por exemplo, sinal senoidal, for aplicado a um sistema de medição linear, sua saída também será linear. Entretanto a saída poderá ser diferente em ganho e ângulo de fase.

A razão entre a amplitude de saída e a de entrada é comumente chamada de amplitude ou ganho. Uma alternativa muito usada em diversas áreas da engenharia é a representação do ganho em dB de modo a tornar a composição de ganhos aditiva, Eq. (2.3) (NEVES, 2003).

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.3)$$

Nesta equação, z é a quantidade em consideração e z_0 um valor de referência para a mesma quantidade.

O bel (B) é uma unidade fora do SI (2007) em uso com o mesmo, de acordo com o Comitê Internacional de Pesos e Medidas, CIPM, (SI, 2007). Desta forma, o bel é utilizado para expressar o valor de grandezas logarítmicas, tais como: nível de campo, nível de potência e nível de pressão acústica ou atenuação. Os logaritmos de base 10 são utilizados para se obter os valores numéricos das grandezas expressas em bels. O submúltiplo decibel, dB, é de uso corrente (SI, 2007).

Alguns valores de referência em uso para o cálculo em dB são: $v_0 = 10^{-8}$ m/s para a velocidade, $a_0 = 9,81 \times 10^6$ m/s² para a aceleração, $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ N/m² para pressão acústica, $I_0 = 10^{-12}$ W/m² para intensidade acústica e $W_0 = 10^{-12}$ W para potência acústica. Estes últimos valores (I_0 e W_0) correspondem aos limiares de percepção do ouvido humano.

A determinação das freqüências de ressonância pode ser efetuada analisando as Funções Repostas em Freqüência (FRF's). Para tanto, são consideradas como entrada os sinais gerados pelos acelerômetros durante a aquisição de um sinal do tipo ruído branco.

O ruído branco e rosa mais importante encontrados na natureza têm a propriedade de serem ruídos com distribuição Gaussiana, com valor médio nulo. Ruídos com outros tipos de distribuição são artificialmente produzidos (FILHO, 2011).

O ruído branco é por definição aquele que tem a sua potência distribuída uniformemente na freqüência, ou seja, é uma constante. O nome ruído branco advém da analogia com o

espectro eletromagnético na faixa de luz. A luz branca contém todas as freqüências do espectro visível, daí o nome adotado. Na natureza, encontramos ruídos com essa característica constante até cerca de 1.000 GHz . Para freqüências mais altas, conforme previsto pela teoria quântica, a amplitude do ruído decresce (FILHO, 2011). A Figura 2.9 ilustra um exemplo de ruído branco no tempo.

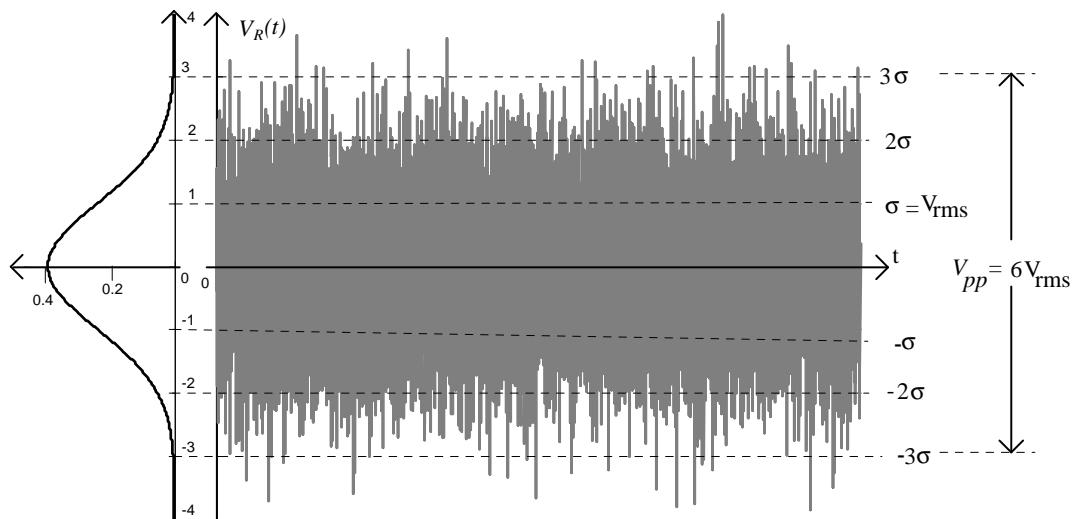


Figura 2.9 – Exemplo de um ruído branco no tempo (FILHO, 2011)

O ruído rosa é, por definição, aquele cuja Densidade Espectral de Potência é proporcional ao inverso da freqüência. O nome ruído rosa vem também de uma analogia com o espectro luminoso. A luz vermelha possui a mais baixa freqüência do espectro visível e o ruído rosa tem mais energia nas baixas freqüências. Este tipo de ruído é comumente encontrado na natureza (FILHO, 2011). A Figura 2.10 ilustra um ruído rosa (BRAGA, 2011).

Ângulo de fase (ϕ) é o ângulo inicial do argumento da função senoidal que descreve o movimento harmônico. O ângulo de fase começa a se tornar importante quando se comparam dois movimentos harmônicos não coincidentes no tempo. Ao se estabelecer um movimento como básico, uma escolha adequada do início da observação do movimento fará com que o ângulo de fase represente o quanto um movimento está adiantado ou atrasado em relação ao outro. O ângulo de fase é normalmente medido em radianos, mas pode ser expresso em graus (PICCOLI, 2005).

Coerência ou função coerência fornece uma medida quantitativa do grau de correlação linear entre dois sinais no domínio da freqüência. A função coerência pode ser obtida como

um subproduto natural de outros cálculos baseados na função resposta em freqüência (FRF). O parâmetro que avalia a coerência é denominado quadrado da magnitude da coerência (QMC). A função QMC assume valores na faixa de 0 a 1. Se a saída de um sistema linear for devida somente à entrada então $QMC = 1$. Se a saída do sistema não possuir relação causal com a entrada então $QMC = 0$. A função coerência com um valor maior que zero e menor que um, indica uma das seguintes situações: está presente uma fonte de ruído desconhecida ou uma ou mais interferências, o sistema que liga a entrada à saída envolve não-linearidade, a saída é devida a entradas além da entrada conhecida. Isso é importante como medida do acoplamento mútuo. Ocasionalmente, erros aleatórios podem produzir um valor maior que 1 (UNIVATES, 2011).

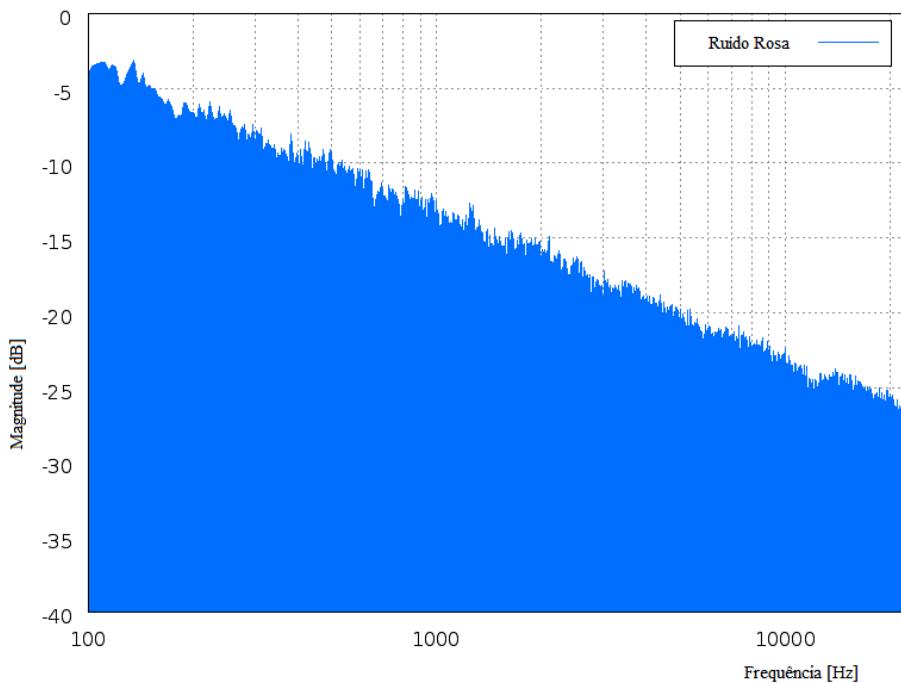


Figura 2.10 - Representação de um ruído rosa

Faixa dinâmica: Embora o termo “faixa dinâmica” não esteja previsto no INMETRO (2009), é um conceito muito utilizado e divulgado quando são analisados sinais dinâmicos.

Pode ser definido como o intervalo de valores para a qual o erro de um instrumento de medição destina-se a ficar dentro dos limites especificados. Dentro desta faixa, a leitura tem uma bem definida exatidão ou aplicabilidade. Fora do intervalo, não. É diferente da faixa de funcionamento, dentro do qual o instrumento irá fornecer uma medida, mas o erro não está bem definido (OILFIELD GLOSSARY, 2011).

2.3.4. Características ligadas aos erros de medição

Um conjunto de parâmetros metrológicos expressa a capacidade do sistema de medição de medir bem. A seguir são apresentados os parâmetros relativos aos erros de medição.

Tendência: Estimativa de um erro sistemático.

Por sua vez, **o erro sistemático** é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. Como sua determinação prevê a realização de infinitas medições, no lugar é efetuada uma estimativa do mesmo, denominada de tendência.

Sempre haverá uma incerteza associada à tendência, assim, a compensação dos erros sistemáticos não é perfeita. Assim utiliza-se, alternativamente, a correção, que é a compensação de um efeito sistemático estimado.

Tanto a tendência quanto a correção podem ser utilizadas para caracterizar o sistema de medição, bem como, para medidas materializadas.

Precisão: é o grau de concordância entre as indicações ou valores medidos fornecidos por um instrumento ou sistema de medição para medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas.

A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por indicadores de incerteza tais como: dispersão, desvio-padrão, variância ou coeficiente de variação, sob condições de medição especificadas. As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, condições de repetitividade, condições de precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade.

Exatidão: é o grau de concordância entre os valores fornecidos por um sistema de medição e o valor verdadeiro de um mensurando. Cabe ressaltar que a exatidão é um parâmetro qualitativo e permite agrupar os instrumentos de medição em classes, denominadas classes de exatidão. A uma determinada classe de exatidão pertencem instrumentos de medição ou sistemas de medição que atendem a requisitos metrológicos estabelecidos para manter os erros de medição ou as incertezas de medição instrumentais dentro de limites especificados, sob condições de funcionamento especificadas.

Repetitividade de medição: é a precisão de medição sob um conjunto de condições de repetitividade.

Reprodutibilidade de medição: Precisão de medição sob um conjunto de condições de reprodutibilidade. Em outras palavras, este parâmetro exprime a intensidade com que agem os

erros aleatórios em repetidas medições do mesmo mensurando, efetuadas em condições variadas de medição.

Linearidade: é um parâmetro que exprime o quanto a curva de resposta real afasta-se de uma reta.

Existem diferentes métodos para determinar o erro de linearidade de um sistema de medição.

1- Método terminal: A reta de referência é estabelecida pela reta que une o ponto inicial e o final da linha média da característica de resposta real.

2- Método independente: São ajustadas duas retas paralelas à curva de erros que contenham todos os pontos da curva, de modo que a distância entre elas seja mínima. Neste caso, o erro de linearidade é igual a distância entre as duas retas dividido por dois.

3- Método dos mínimos quadrados: Este método ajusta uma reta de regressão à curva de erros do sistema de medição. O erro de linearidade é, então, determinado como o maior afastamento da curva de erros sistemáticos à reta de regressão.

Somente através da calibração é possível garantir a rastreabilidade metrológica dos resultados das medições.

Erro máximo admissível: Valor extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, aceito por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição.

Estabilidade: propriedade de um instrumento de medição segundo a qual este mantém as suas propriedades metrológicas constantes ao longo do tempo. Outras grandezas como a temperatura podem ser utilizadas como função para expressar a estabilidade.

Todo equipamento utilizado em ensaios e/ou em calibrações, incluindo os equipamentos para medições auxiliares (por exemplo: condições ambientais), que tenha efeito significativo sobre a exatidão ou validade do resultado do ensaio, calibração ou amostragem, deve ser calibrado antes de entrar em serviço.

A calibração do sistema de medição é indispensável para garantir a obtenção de resultados válidos e para confirmar a rastreabilidade do sistema de medição e dos resultados obtidos.

Rastreabilidade metrológica: é a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição. A rastreabilidade metrológica requer uma hierarquia de calibração estabelecida.

Os elementos necessários para confirmar a rastreabilidade metrológica são uma cadeia de rastreabilidade ininterrupta a um padrão internacional ou a um padrão nacional, uma incerteza de medição documentada, um procedimento de medição documentado, uma competência técnica reconhecida, a rastreabilidade metrológica ao Sistema Internacional de Unidades (SI, 2007) e os intervalos entre calibrações.

A cadeia de rastreabilidade é a seqüência de padrões e calibrações utilizada para relacionar um resultado de medição a uma referência.

Incerteza de medição: é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Intervalo de confiança: é um parâmetro estatístico muito usado em análises de sinais dinâmicos. Não deve ser confundido com nível de confiança ou probabilidade de abrangência, que são parâmetros relacionados com a estatística e a incerteza de medição ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

O intervalo de confiança define o limite inferior e superior de um conjunto de valores que tem certa probabilidade (95%) de conter no seu interior os valores de parâmetros populacionais desconhecidos, tais como média, desvio padrão, proporções, entre outros.

Neste tipo de estimativa tem-se um intervalo de valores em torno do parâmetro amostral, no qual se julga, com um risco conhecido de erro, estar o parâmetro da população. A esse intervalo chama-se intervalo de confiança (UVB, 2011).

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos necessários para desenvolvimento do trabalho. Assim sendo, são apresentados o acelerômetro ADXL321, alguns conceitos de estatística básica, análise de variância e incerteza de medição.

3.1. Acelerômetro ADXL321

O acelerômetro, ADXL321, é do tipo capacitivo, com sensibilidade em duas direções ortonormais, de custo relativamente baixo, manufaturado pela Analog Devices com tecnologia de fabricação conhecida por Sistemas Microeletromecânicos.

Para seu funcionamento, o sistema massa-mola é implementado utilizando-se uma barra de silício e 4 âncoras conectadas a cada canto dessa barra. Quando essa massa sofre uma aceleração, se desloca em relação às âncoras que a sustentam (GOMES, et al., 2004).

Para medir o deslocamento da barra, é utilizado um sistema com capacitores, cuja capacitância é dada pela Eq. (3.1).

$$C = \frac{kpm}{x} \quad (3.1)$$

onde x é a distância entre as placas que formam os capacitores e kpm é uma propriedade do material chamada dielétrico colocado entre as placas. Portanto, se a capacitância C e a constante kpm forem conhecidas, pode-se determinar a distância entre as placas.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 são mostrados o esquema simplificado do sensor capacitivo e o sistema massa-mola em conjunto com os capacitores, respectivamente.

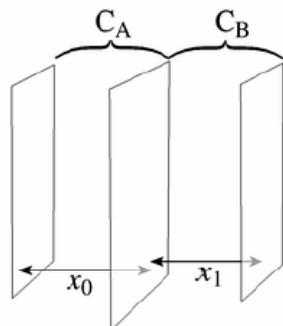


Figura 3.1 - Esquema simplificado do sensor capacitivo

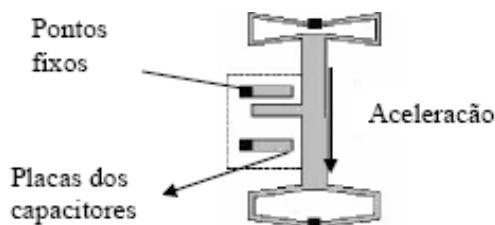


Figura 3.2 - Sistema massa-mola em conjunto com os capacitores

O acelerômetro ADXL321 utiliza um sistema formado por dois capacitores. As duas placas externas estão fixas, e a placa interna está conectada à massa do sistema massa mola. Quando a massa está em repouso, as distâncias entre as placas são iguais, então ambos os capacitores possuem a mesma capacidade. Quando o sistema desloca devido às vibrações a capacidade de cada capacitor varia proporcionalmente (GOMES, et al., 2004).

O esquema funcional do acelerômetro ADXL321 é apresentado na Fig. 3.3. Por sua vez, a Fig. 3.4 mostra uma foto do acelerômetro capacitivo ADXL321, montado em uma placa de circuito impresso. O gráfico da sensibilidade (Fig. 3.4) mostra que o comportamento do mesmo é aproximadamente linear.

O grande atrativo do acelerômetro ADXL321 é o baixo custo, o que permite sua utilização em diversas situações. Ainda, pode-se destacar a possibilidade de montagem adequada para obtenção de um acelerômetro com sensibilidade em três eixos, assim, com duas unidades sensoras é possível monitorar até três direções.

Este acelerômetro possui outras características que o destacam, dentre elas: pequena área e espessura; boa exatidão; faixa de medição ± 18 g (aceleração da gravidade); boa estabilidade para tensão de offset; vasta gama de tensão de alimentação de 2,4 a 6 V; baixo consumo de energia de 350 mA para uma voltagem de 2,4 V; temperatura de trabalho de - 20 a +70°C; baixo nível de ruídos indesejáveis e aceleração máxima de 10.000 g (m/s^2). Resumindo, a Tabela 3.1 mostra as características técnicas do acelerômetro capacitivo.

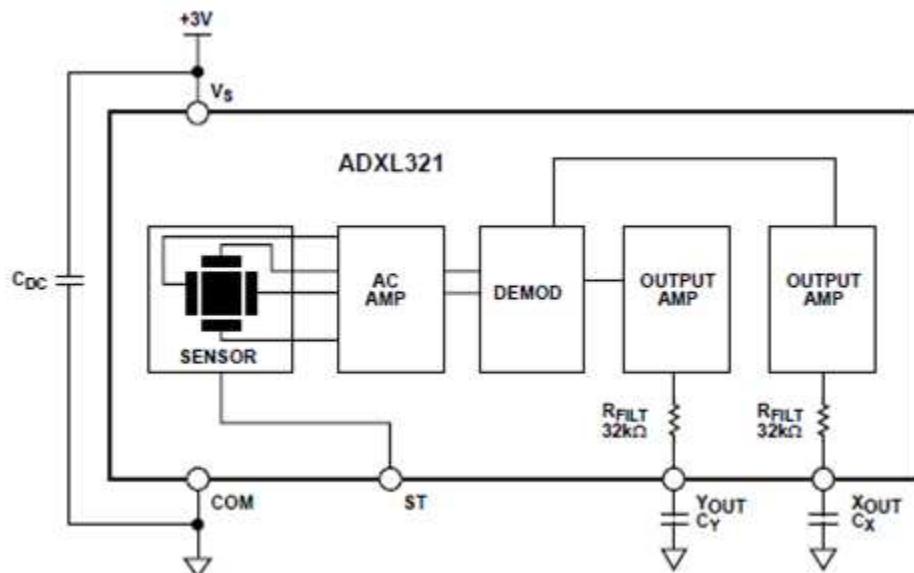


Figura 3.3 - Esquema funcional do acelerômetro ADXL321

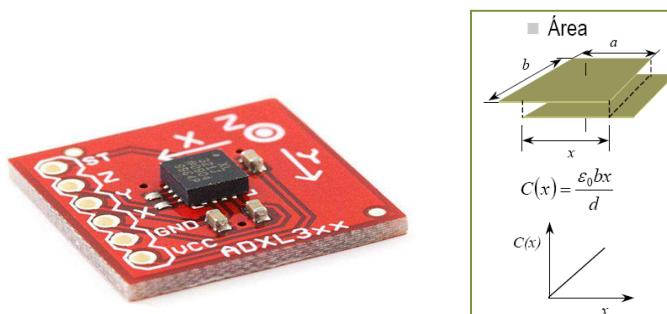


Figura 3.4 - Acelerômetro capacitivo ADXL321 montado em uma placa

O ADXL321 pode ser usado tanto para medir aceleração dinâmica como estática (gravidade). Por ser um circuito integrado montado em uma única estrutura (monolítico) com 16 pinos é compatível para brasagem com estanho (Sn) ou chumbo (Pb). Dentre as principais aplicações tem-se: monitoramento de vibrações, eventos inesperados de impactos, típico no acionamento de abertura de airbag automotivo e equipamentos esportivos (Catálogo da Analog Devices, 2007).

Tabela 3.1 - Características técnicas do acelerômetro ADXL321 (Catálogo da Analog Devices, 2007)

Fabricante	Analog Devices – USA. Modelo ADXL321. 2 eixos.
Dimensões	4 x 4 x 1,45 mm.
Resolução	0,03 m/s ² em 50 Hz.
Sensibilidade	57 mV/g ($g = 10 \text{ m/s}^2$).
Faixa de medição	$\pm 18 \text{ g}$ ou 180 m/s^2 .
Não linearidade	$\pm 0,2\%$ faixa de medição.
Erro de montagem	$\pm 1^\circ$
Erro de alinhamento	$\pm 0,1^\circ$
Sensibilidade em eixos	$\pm 2\%$ faixa de medição.
Faixa de freqüência	0,5 Hz a 2,5 kHz.
Freqüência de ressonância	5,5 kHz.

3.1.1. Modelo dinâmico de um grau de liberdade

O modelo dinâmico mais simples é composto por massa-mola-amortecedor oscilando em apenas uma direção (um grau de liberdade), como mostra a Fig. 3.5, onde m , k_{eq} e c são, respectivamente, a massa equivalente, a rigidez equivalente e o amortecimento viscoso equivalente (SILVA, 2009).

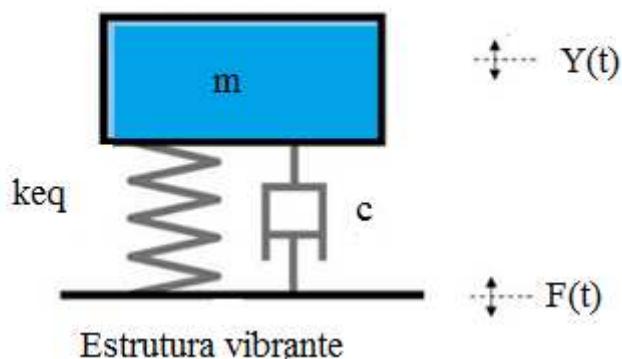


Figura 3.5 - Modelo dinâmico de um grau de liberdade

Considere a equação de equilíbrio de um sistema massa-mola-amortecedor, com 1 grau de liberdade com uma força de excitação $F(t)$ agindo sobre ele, tem-se:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + keq x = F(t) \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) é uma equação diferencial ordinária linear e não-homogênea. No caso considerado nesta seção assume-se que a força $F(t)$ seja do tipo harmônica e descrita por

$$F = F_e \operatorname{sen}(\omega t) \quad (3.3)$$

sendo F_e a amplitude de excitação em [N], e ω a freqüência de excitação. Com isto a Eq. (3.2) torna-se

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + keq x = F_e \operatorname{sen}(\omega t) \quad (3.4)$$

Resolvendo a Eq. (3.4) obtém-se a amplitude de resposta X_p do sistema dada pela Eq. (3.5), que na forma adimensional, fica como mostra a Eq. (3.6).

$$X_p = \frac{\frac{F_e}{keq}}{\sqrt{\left(1 - m\frac{\omega^2}{keq}\right)^2 + \left(c\frac{\omega}{keq}\right)^2}} \quad (3.5)$$

$$H(\tau, \zeta) = \frac{X_p k e q}{F_e} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \tau^2)^2 + (2\zeta\tau)^2}} \quad (3.6)$$

onde $\tau = \omega/\omega_n$ é a razão entre as freqüências de excitação e natural não amortecida.

Cabe ressaltar que ω_n é a freqüência natural e pode ser calculada pela Eq. (3.7).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{keq}{m}} \quad (3.7)$$

Por sua vez, ζ é o fator de amortecimento e sua Eq. (3.8).

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (3.8)$$

Assim, $M(\tau, \zeta)$ é o fator de amplificação, que é função da razão τ e do fator de amortecimento ζ . Já o ângulo de fase ou fase φ pode ser escrito como (SILVA, 2009).

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta\tau}{1-\tau^2}\right) \quad (3.9)$$

A Figura 3.6 ilustra como o valor da razão de freqüência τ e do fator de amortecimento ζ afetam as amplitudes na condição de ressonância, quando $\tau = 1$. Esta figura ilustra o fator de amplificação $M(\tau; \zeta)$ para vários valores de ζ . Note que existe uma faixa próxima a $\tau = 1$ onde há uma amplificação nas amplitudes de vibração, esta região é conhecida como faixa de ressonância. É interessante também observar pela Eq. (3.9) que quando $\zeta = 0$ e $\tau = 1$ o valor de X_p tende a um valor muito grande (∞) (SILVA, 2009).

O modelo dinâmico relativo ao sensor desenvolvido é de grande importância para a análise dos resultados da calibração do sistema de medição estudado e, que serão relatados nos capítulos seguintes. Tendo em vista a obtenção das funções de resposta em freqüência e de suas respectivas incertezas.

Os métodos utilizados para determinação do fator de amortecimento ζ são diversos, sendo que entre os mais utilizados estão: o do decremento logarítmico (THOMSON, 1988) e o de banda de meia potência. A escolha do método a ser utilizado depende principalmente da faixa de amortecimento e da freqüência de vibração (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Neste trabalho será utilizado o método de banda de meia potência onde a determinação do fator de amortecimento é baseada na função resposta em freqüência. A largura da banda de meia potência é definida como a largura da curva da FRF quando a amplitude é igual $Q/\sqrt{2}$ como mostrado na Fig. 3.7. Na Figura 3.7, $\Delta w = \omega_2 - \omega_1$.

O valor de Δw pode ser relacionado com o fator de amortecimento conforme a Eq. (3.10).

$$\Delta\omega = 2\xi\omega = 2\xi\omega_n \quad (3.10)$$

e portanto, o fator de amortecimento pode ser estimado através da largura de banda, usando a relação

$$\xi = \frac{I}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_n} \quad (3.11)$$

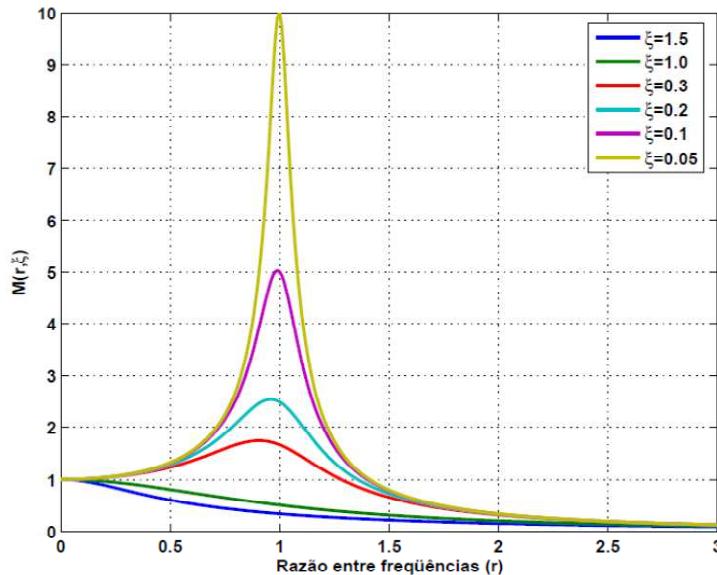


Figura 3.6 - Curvas de amplificação de amplitudes para sistema com 1 grau de liberdade

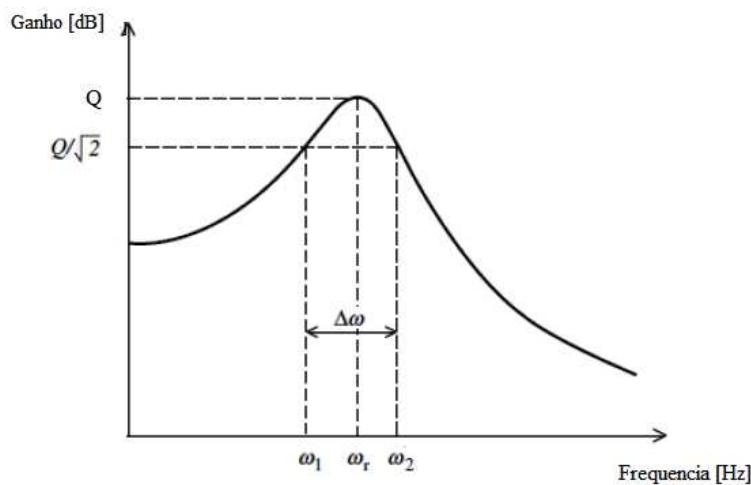


Figura 3.7 - Método da largura de banda de meia potência para determinar ξ

3.2. Estatística básica

A estatística é a ciência interessada nos métodos científicos para coleta, organização, resumo, apresentação, análise e interpretação de dados experimentais, bem como na obtenção de conclusões válidas e na tomada de decisões razoáveis baseadas em tais análises. Por isso desempenha um papel muito importante nas pesquisas de todo gênero.

Na área de metrologia a estatística desempenha um papel muito importante. Isto porque os dados coletados durante uma medição (dados brutos) oferecem pouca informação sobre o processo ou fenômeno em estudo. Assim sendo, torna-se necessário resumir esses dados através da determinação de diversas estatísticas (amplitude, média aritmética, desvio padrão, etc.). Em alguns casos é conveniente o uso de técnicas estatísticas mais sofisticadas como os testes de hipóteses, a análise de variância (ANOVA) e as técnicas de regressão, dentre outras.

Sabe-se que o ponto de partida para todo estudo estatístico é a amostragem. Uma amostra se diz representativa da população se ela for escolhida aleatoriamente. Assim, as conclusões obtidas a partir da análise da amostra podem ser generalizadas para a população, que agrupa a totalidade dos dados.

Média aritmética: A medida mais comum da tendência central de um conjunto de dados ou amostra é a média aritmética. Para uma amostra, esta média é dada pela Eq. (3.12).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.12)$$

Em que x_i representa os valores observados e n o número de observações ou tamanho amostral.

O valor da média expressa a parcela sistemática dos erros obtidos numa calibração. Enquanto que para um ensaio, a média representa um dos tantos valores que podem ser atribuídos a um determinado mensurando.

Os possíveis valores do mensurando encontram-se dispersos em torno de seu valor médio e, para medir essa dispersão, são utilizados diferentes parâmetros estatísticos, dentre eles o desvio padrão.

O desvio padrão é considerado como sendo o melhor indicador da dispersão dos dados, pois oferece informações sobre como os valores individuais se agrupam com relação à tendência central.

Para uma amostra, (x_1, x_2, \dots, x_n) , onde \bar{x} representa a média dos valores observados, o desvio padrão define-se como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.13)$$

No caso de uma população, tem-se que a média populacional e o desvio padrão populacional são calculados, respectivamente, pelas Eq. (3.14) e (3.15), onde n tende a infinito ($n \rightarrow \infty$).

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (3.15)$$

O caráter aleatório do processo de medição permite que o mensurando seja considerado como sendo uma variável aleatória. Entende-se por variável aleatória aquela variável da qual se desconhece o valor exato, porém se conhecem os valores que a mesma pode assumir e, também, a probabilidade de uns ou outros valores.

Assim resulta impossível prever com precisão o resultado de uma prova relacionada com uma variável aleatória, porém podem-se prever com segurança os resultados de um número grande de provas. Quanto maior o número de provas, maior exatidão terão as previsões.

Existem muitas funções de distribuição, dentre elas pode-se destacar a função de distribuição gaussiana ou normal, que representa um bom modelo para uma série de dados experimentais em diversas áreas do conhecimento humano.

A expressão matemática da função de distribuição normal ou Gaussiana para a população é dada na Eq. (3.16).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < +\infty \quad (3.16)$$

onde o fator μ corresponde à média e o valor σ , ao desvio padrão da população de tamanho n .

Os parâmetros estatísticos, média e desvio padrão, devem satisfazer as seguintes condições: $-\infty < \mu < \infty$ e $\sigma > 0$.

A curva de distribuição Gaussiana tem o aspecto de um sino, sendo simétrica em relação a μ (Fig. 3.8). Pode-se afirmar com um nível de confiança de 68,27 % que a média μ está no intervalo $\mu \pm \sigma$. Este nível aumenta para 95,45 % no intervalo $\mu \pm 2\sigma$ e para 99,74 % para $\mu \pm 3\sigma$.

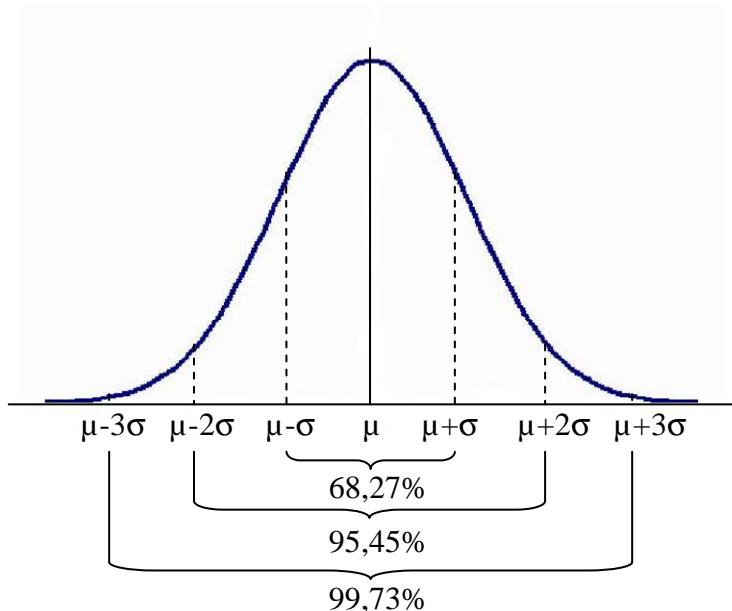


Figura 3.8 - Curva de distribuição normal de probabilidade

Conhecidos os parâmetros μ e σ , a probabilidade de encontrar valores em um intervalo qualquer no eixo das abscissas é dada pela área sob a curva normal (Fig. 3.9).

A área compreendida entre o eixo x e a curva Gaussiana é sempre finita e representa, para um intervalo (a, b) , a probabilidade de ocorrência de um determinado evento. A área total sob a curva é unitária, permitindo expressar a porcentagem de ocorrência do erro.

Pode-se observar que a curva é simétrica com relação ao eixo de freqüência de ocorrência dos erros. Isto permite estabelecer que para uma distância de média zero tem-se que os erros maiores em grandeza têm menor possibilidade de ocorrer que os menores e existe a mesma probabilidade para que um certo erro seja positivo ou negativo.

A área sob a curva compreendida entre duas coordenadas a e b , onde $a < b$, representa a probabilidade de que o valor x , resultado de uma medição, se encontre entre a e b . Esta probabilidade é definida por:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) \quad (3.17)$$

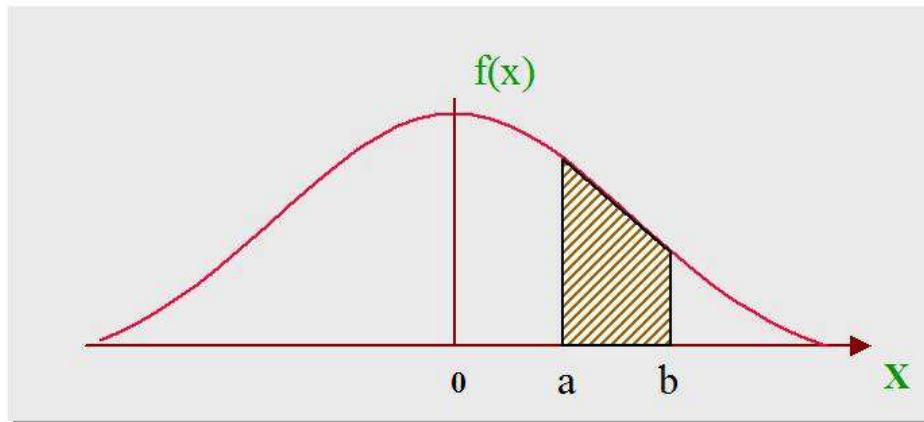


Figura 3.9 - Probabilidade de x pertencer ao intervalo (a, b)

Freqüentemente, a variável x pode ser expressa em termos de unidade reduzida. Neste caso, a Eq. (3.18), assume a denominada forma padrão, dada por:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad (3.18)$$

com

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.19)$$

Assim, fala-se que z é normalmente distribuído, com média zero e variância igual a um (1). Para comparar duas curvas de distribuição normal e para tabelar as probabilidades foi desenvolvida uma distribuição reduzida denominada distribuição normal padrão.

A distribuição normal padrão apresenta média igual a zero e desvio padrão igual a um. Ela é obtida a partir da distribuição normal, fazendo uma transformação denotada por z e calculada pelo parâmetro dado a seguir:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (3.20)$$

A distribuição normal padrão pode ser aplicada sempre que o número de observações excede trinta (estas amostras são denominadas amostras grandes).

3.2.1. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é, provavelmente, o método estatístico de maior repercussão na pesquisa científica. Ela visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Dessa forma, permite que vários grupos sejam comparados ao mesmo tempo, esses fatores podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente deverá necessariamente ser contínua. O teste é paramétrico (a variável de interesse deve ter distribuição normal) e os grupos têm que ser independentes.

Existem muitas variações da ANOVA devido aos diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados.

O modelo e análise de variância em um experimento cada observação Y_{ij} deve ser decomposta conforme o modelo a seguir:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i=1, \dots, I \quad e \quad j=1, \dots, J \quad (3.21)$$

em que:

Y_{ij} é a observação do i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental ou parcela;

μ é o efeito constante (média geral);

τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento;

ε_{ij} é o erro associado ao i -ésimo tratamento na j -ésima unidade experimental ou parcela

assumido como: $\varepsilon_{ij} \stackrel{IID}{\sim} N(0, \sigma^2)$.

IID significa que os erros devem ser independentes e identicamente distribuídos.

Para testar se há diferenças entre as médias dos tratamentos, devem-se testar as seguintes hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_{i'} \text{ para pelo menos um par } (i, i') \text{ com } i \neq i' \end{cases} \quad (3.22)$$

em que:

$$\mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3.23)$$

De forma equivalente, podem-se escrever as hipóteses dadas na Eq. (3.23) da seguinte forma:

$$\begin{cases} H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_I = 0 \\ H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i \end{cases} \quad (3.24)$$

Se a hipótese nula for verdadeira, então, todos os tratamentos terão uma média comum μ .

A análise de variância baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos (variância entre) e ao erro experimental (variância dentro). Essa variação pode ser medida por meio das somas de quadrados definidas para cada um dos seguintes componentes:

$$SQT_{Total} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C, \text{ em que } C = \frac{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij} \right)^2}{IJ} \quad (3.25)$$

$$SQT_{Trat} = \frac{\left(\sum_{i=1}^I y_i^2 \right)^2}{J} - C \quad (3.26)$$

onde I é no número de tratamentos e J é o número de réplica do tratamento.

A soma de quadrados dos resíduos pode ser obtida por:

$$SQRes = SQTotal - SQTrat \quad (3.27)$$

A $SQTrat$ também é chamada de variação Entre, que é a variação existente entre os diferentes tratamentos e a $SQRes$ é chamada de variação Dentro que é função das diferenças existentes entre as repetições de um mesmo tratamento.

As somas de quadrados podem ser organizadas em uma tabela, denominada tabela da análise de variância, como apresentado na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela da análise de variância.

Causas de variação	Graus de liberdade	Somas de Quadrados	Quadrados médios	F calculado
Tratamentos	I-1	SQTrat	QMTrat	QMTrat/QMRes
Resíduos	I(J-1)	SQRes	QMRes	
Total	IJ-1	SQTotal		

Para testar a hipótese H_0 , utiliza-se o teste F apresentado na tabela da Análise de Variância (Tab. 3.2). Convém lembrar que esse teste é válido se os pressupostos assumidos para os erros do modelo estiverem satisfeitos. Em que:

$$QMTrat \neq SQTrat(I-1) \quad (3.28)$$

$$QMRes = SQRes / (I(J-1)) \quad (3.29)$$

Pode-se mostrar que o quociente $QMTrat/QMRes$ tem distribuição F com $(I-1)$ e $I(J-1)$ graus de liberdade, supondo que, y_{ij} são variáveis aleatórias independentes, todos os tratamentos têm variâncias iguais a σ^2 e $Y_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma^2)$. Por esses motivos, os pressupostos da ANOVA devem ser testados ou avaliados em qualquer análise.

Se $F_{calculado}$ for maior que o $F_{tabelado}$, rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de

nulidade H_0 , ou seja, não há evidências de diferença significativa entre tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

Outra maneira de avaliar a significância da estatística F é utilizando o p -valor. Se o p -valor for menor que α , rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 . Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

3.3. Incerteza de medição

O resultado de todo processo de medição é apenas uma estimativa do valor verdadeiro. Isto devido à influência de diversos fatores que interferem no processo de medição, tais como: variações associadas ao instrumento de medição; ao operador e às condições ambientes, entre outros.

A necessidade de indicar quantitativamente a qualidade do resultado de uma medição levou ao estabelecimento de critérios para determinar o valor que representa a incerteza de medição. A incerteza pode ser considerada um indicador do desempenho dos instrumentos de medição (NIST Technical Note 1297, 1994).

Com a publicação do “Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement” (GUM), em 1993, ficaram estabelecidos, internacionalmente, critérios e regras gerais para expressar e combinar as diferentes componentes da incerteza de medição. Assim sendo, o GUM (1993) constitui-se no mais importante trabalho produzido nas últimas décadas sobre incerteza de medição, permitindo que nações possam discutir uma nova lógica para declarar a equivalência de seus padrões nacionais e dos certificados de calibração emitidos por seus respectivos laboratórios de metrologia.

A origem da incerteza de medição pode ser atribuída à existência de erros sistemáticos e aleatórios em todo processo de medição. Os erros sistemáticos permanecem constantes em grandeza e sinal ou variam, de acordo com uma lei definida, quando um número considerável de medições de um mesmo mensurando é efetuado sob as mesmas condições. Estes erros podem ser calculados e seus efeitos reduzidos a través de correções nos resultados finais da medição. Por sua vez, os erros aleatórios são o resultado de influências externas e internas, não controladas, que provocam o surgimento de erros não repetitivos. Em geral, diferem a cada leitura, podendo-se apenas ter noção dos seus limites.

A correção dos erros sistemáticos não é total, permanecendo uma dúvida sobre o quanto correto é o valor obtido em uma medição. Somando a esta dúvida aquela proveniente dos efeitos aleatórios, obtém-se o que se convencionou chamar de incerteza de medição ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

Segundo o INMETRO (2009), a incerteza de medição pode ser definida como sendo um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

O ISO/TAG 4/WG 3 (2008) relata que é obrigatório que todo resultado de medição esteja acompanhado da indicação quantitativa da qualidade do mesmo, de tal forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos em uma especificação ou norma.

No cálculo da incerteza de medição deverão estar contidos os efeitos de todos os fatores que influenciam o resultado da medição, dentre elas: definição incompleta do mensurando; amostragem não representativa; realização imperfeita da definição do mensurando; desconhecimento dos efeitos das condições ambientais; erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência; valores inexatos de constantes matemáticas e de outros parâmetros obtidos de fontes externas; aproximações e suposições ao método e procedimento de medição e variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Segundo o ISO/TAG 4/WG 3 (2008) a avaliação da incerteza de medição pressupõe a estimativa da incerteza padrão, da incerteza padrão combinada e da incerteza expandida.

3.3.1. Incerteza padrão

Toda medição é um conjunto de operações que têm por objetivo determinar o valor de uma grandeza. Esta grandeza, geralmente, pode ser medida diretamente ou ainda, determinada a partir de N outras grandezas (X_1, X_2, \dots, X_N), denominadas grandezas de entrada, através de uma relação funcional f , como mostra a Eq. (3.30).

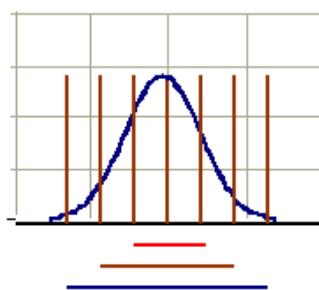
$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.30)$$

As grandezas de entrada, por sua vez, podem também ser consideradas mensurandos que dependem de outras grandezas. Seus valores e respectivas incertezas podem ser obtidos a

partir de uma única observação ou de repetidas observações, de dados fornecidos pelos fabricantes dos instrumentos, da experiência do observador, da literatura, de medições realizadas anteriormente, de padrões de calibração, de materiais de referência ou de certificados de calibração, etc.

Assim sendo, a incerteza associada ao resultado da medição deve levar em consideração as incertezas individuais das variáveis que afetam o processo de medição. A função f deve ser interpretada como sendo aquela função que contém todas as grandezas, incluindo todas as correções e fatores de correção que possam contribuir com um componente significativo da incerteza para o resultado de medição.

A avaliação da incerteza padrão pode ser classificada em avaliação do tipo A e do tipo B. A avaliação do tipo A é obtida estatisticamente a partir de medições ou observações repetidas de uma dada grandeza, assumindo uma distribuição normal (Fig. 3.10) ou outra qualquer.



68,26% => um desvio padrão

95,45% => dois desvios padrão

99,73% => três desvios padrão

Figura 3.10 - Distribuição normal

Sabe-se que a média aritmética Eq. (3.31) é a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza X que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes foram obtidas sob as mesmas condições de medição.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (3.31)$$

As n observações da grandeza X diferem em valor devido a efeitos aleatórios. Assim sendo, a variância experimental das observações é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.32)$$

Desta forma, para uma grandeza de entrada X_i determinada por n observações repetidas independentes $X_{i,k}$ a incerteza padrão $u(x_i)$ de sua estimativa x_i é dada por:

$$u(x_i) = s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{s^2(x_i)}{n}} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.33)$$

Por sua vez, uma avaliação do tipo B da incerteza é feita a partir de um julgamento científico baseado em todas as informações relevantes disponíveis sobre o instrumento e o processo de medição ISO/TAG 4/WG 3 (2008). O conjunto de informações pode incluir: dados de medições prévias; experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes; especificações do fabricante; dados fornecidos em certificados de calibração ou outros certificados e incertezas relacionadas a dados de referências extraídos de manuais.

Existem diferentes maneiras para a avaliação do tipo B da incerteza, dependendo da informação disponível e da forma como ela é oferecida.

Quando a estimativa de uma grandeza x_i for obtida de uma especificação do fabricante, certificado de calibração, manual técnico ou de outra fonte e a incerteza declarada como um múltiplo do desvio padrão, então, a incerteza padrão $u(x_i)$ é a incerteza citada dividida pelo multiplicador ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

Se a incerteza declarada de x_i é um parâmetro ao qual está associado um dado nível de confiança de 90, 95 ou 99 %, o cálculo da incerteza padrão só será efetuado se a distribuição de probabilidade caracterizada pela estimativa do mensurando e sua incerteza for conhecida. Neste caso, a incerteza padrão é a incerteza citada dividida pelo fator de abrangência apropriado para a distribuição adotada. Tal fator é encontrado nas tabelas de distribuições de probabilidades (DRAPER; SMITH, 1966). Se não for especificado o tipo de distribuição pode-se assumir uma distribuição normal.

Quando o intervalo é bem definido, mas a distribuição de erros não é bem conhecida, deve-se admitir uma distribuição diferente da normal, tal como a retangular, trapezoidal ou triangular ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

A seguir são apresentadas as distribuições de probabilidades mais utilizadas para avaliações do tipo B.

Distribuição retangular: A distribuição retangular é utilizada quando não há nenhum conhecimento sobre os possíveis valores do mensurando dentro do intervalo.

Em alguns casos é possível estimar apenas os limites, superior e inferior, para X_i e estabelecer que a probabilidade de que o valor X_i pertença ao intervalo $[a_-, a_+]$ é um e a probabilidade para que o valor de X_i esteja fora desse intervalo é zero. Se não houver conhecimento específico de possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer ponto dele. Neste caso assume-se uma distribuição uniforme ou retangular (Fig. 3.11) e consequentemente o seu grau de liberdade é infinito (LINK, 1997).

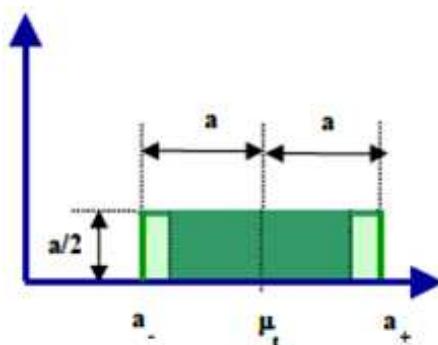


Figura 3.11 - Distribuição retangular (adaptado GUM, 1999)

Neste caso x_i (estimativa ou valor esperado de X_i) é o ponto médio do intervalo e pode ser expresso como:

$$x_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \quad (3.34)$$

E a variância associada a x_i é dada por:

$$s^2(x_i) = \frac{(a_- + a_+)^2}{12} \quad (3.35)$$

Se a diferença entre os limites $a_i + a_s$ for designada por $2a$, tem-se que a incerteza padrão é dada pela Eq. (3.36).

$$u^2(x_i) = s^2(x_i) = \frac{a^2}{3} \quad (3.36)$$

Dentre as variáveis com este tipo de distribuição está a resolução dos instrumentos de medição.

Distribuição trapezoidal: Nem sempre a adoção de uma distribuição de probabilidades com funções escalonadas é adequada. Nestes casos, é mais realista admitir que valores juntos às bordas são menos prováveis que valores próximos do centro. É, portanto razoável substituir a distribuição triangular simétrica por uma trapezoidal simétrica com base maior $a_s - a_i = 2a$ e base menor $2\beta a$, com $0 \leq \beta a \leq 1$ (LINK, 1997).

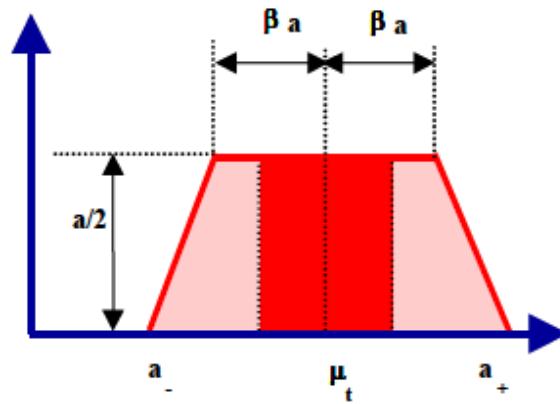


Figura 3.12 - Distribuição trapezoidal (adaptado GUM, 1999)

Assumindo a distribuição trapezoidal para X_i tem-se que a variância associada a x_i é dada pela Eq. (3.37) enquanto que a incerteza padrão pode ser estimada pela Eq. (3.38).

$$u(x_i) = s^2(x_i) = \frac{a^2(1 + \beta)}{6} \quad (3.37)$$

Neste caso, o grau de liberdade, também, é infinito porque dentro do intervalo a estimativa pode assumir infinitos valores.

Se $\beta \rightarrow 1$, a distribuição trapezoidal se aproxima da distribuição retangular, enquanto que para $\beta=0$ tem-se a distribuição triangular.

Distribuição triangular: A distribuição triangular (Fig. 3.12) é utilizada quando a probabilidade de que o valor do mensurando esteja em um dado intervalo $[a_-, a_+]$ é igual a 1 e a probabilidade que ele esteja fora é praticamente zero. Além disso, é mais provável que ele esteja próximo do ponto médio do que dos limites do intervalo.

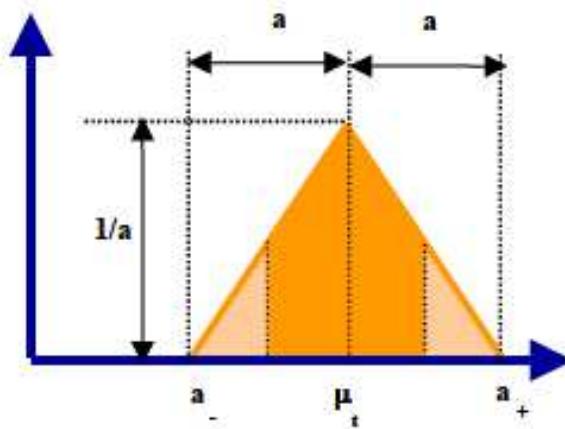


Figura 3.13 - Distribuição triangular (adaptado GUM, 1999)

Neste caso, a incerteza pode ser calculada pela Eq. (3.38).

$$u(x_i) = s^2(x_i) = \frac{a^2}{6} \quad (3.38)$$

Dentre as variáveis para as quais pode ser atribuída uma distribuição trapezoidal estão os desvios de forma, tais como: planeza, circularidade, cilindricidade e retitude.

Dentre as variáveis com este tipo de distribuição está a resolução dos instrumentos de medição.

3.3.2. Incerteza padrão combinada

A incerteza padrão combinada pode ser calculada a partir das incertezas padrões individuais, para cada uma das variáveis que interferem no processo de medição, através de uma lei conhecida como “Lei de Propagação de Incertezas”. A incerteza, assim determinada,

é definida como incerteza padrão combinada e é designada por u_c . Neste caso, a incerteza padrão combinada, $u_c(y)$, é dada pela raiz quadrada positiva da Eq. (3.39).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (3.39)$$

onde y é a estimativa da variável resposta Y , x_i é a estimativa da variável X_i , $u^2(x_i)$ é a variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N , N é o número de variáveis que afetam a variável resposta Y , $u(x_i)$ é a incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i e $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j .

A Lei de Propagação de Incertezas, porém, somente pode ser aplicada quando o modelo matemático que relaciona a variável resposta da medição com as variáveis que afetam o seu comportamento for conhecido.

A Equação (3.39), referenciada como a Lei de Propagação de Incerteza, é baseada numa aproximação da série de Taylor de primeira ordem de $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$.

As derivadas parciais em função de cada variável x_i com $i=1, \dots, n$ que aparecem na Eq. (3.39) são denominadas coeficientes de sensibilidade. A grandeza desses coeficientes descreve a contribuição de cada fonte de incerteza no valor final da incerteza de medição. Por sua vez, o segundo termo da referida equação expressa a correlação existente entre duas fontes de incertezas x_i , x_j com $i \neq j$.

O coeficiente r , Eq. (3.40), fornece uma medida do grau de correlação entre as variáveis x_i e x_j .

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^M (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (3.40)$$

onde M é o número de valores atribuídos às variáveis x_i e x_j e \bar{x}_i e \bar{x}_j são, respectivamente, as médias aritméticas dos M valores atribuídos à x_i e x_j .

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1 . Quando esse valor se aproxima dos extremos significa que as variáveis x_i e x_j são altamente correlacionadas. Por outro lado, se o coeficiente de correlação é zero significa que não há correlação entre as variáveis, o segundo termo da Eq. (3.39) desaparece obtendo-se a Eq. (3.41).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3.41)$$

Portanto, se as estimativas x_i , x_j são independentes entre si, o coeficiente de correlação é igual a zero diminuindo-se, assim, o número de cálculos necessários para determinar a incerteza padrão combinada.

3.3.3. Incerteza expandida

Porém, a incerteza padrão combinada, calculada através da Lei de Propagação de Incertezas apresenta uma probabilidade de abrangência de 68,27% sendo muito pequena para a maioria das aplicações da engenharia mecânica. Assim sendo, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas propõe descrever a incerteza de medição através de intervalos que representam os valores esperados para os erros de medição, com uma probabilidade maior, geralmente de 95,45%. Esta incerteza recebe o nome de incerteza expandida (U) e pode ser estimada pela Eq. (3.42).

$$U = k \cdot u_c \quad (3.42)$$

onde u_c é a incerteza padrão combinada e $k > 0$ é o fator de abrangência.

O fator k está associado à distribuição de probabilidades dos valores obtidos na medição, que geralmente apresentam uma distribuição normal. É escolhido com base no nível de abrangência requerido para o intervalo $y-U$ a $y+U$. Geralmente, assume valores entre 2 e 3, mas, para aplicações especiais k pode assumir valores fora desta faixa.

A incerteza expandida é uma maneira de apresentar a informação para satisfazer requisitos de algumas aplicações comerciais e industriais, que necessitam de um intervalo de valores em torno do resultado de medição ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

Ela deve ser apresentada junto com o valor médio das medidas conforme indica a Eq. (3.43).

$$\bar{y} \pm U \quad (3.43)$$

Quando não for conveniente esta aproximação utiliza-se o teorema do valor central junto com a distribuição t-student para fornecer um fator de abrangência baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição.

O grau de liberdade efetivo v_{eff} é obtido através da fórmula de Welch-Satterthwaite, Eq. (3.44).

$$v_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3.44)$$

onde v_i é o grau de liberdade associado a cada variável de entrada.

O valor do fator de abrangência pode ser, neste caso, menor ou igual a 14.

Para avaliar a incerteza conforme recomendado pelo ISO/TAG 4/WG 3 (2008) é necessário o desenvolvimento das seguintes etapas;

- ✓ Estudo minucioso do sistema de medição;
- ✓ Identificação das fontes de incerteza (X_i) que afetam a medição do mensurando em questão;
- ✓ Expressão do mensurando em função das grandezas X_i ;
- ✓ Determinação de x_i estatisticamente ou por outros meios;
- ✓ Identificação do tipo de avaliação A ou B para cada X_i ;
- ✓ Identificação da distribuição de probabilidade e o número de graus de liberdade de cada variável X_i ;
- ✓ Avaliação das covariâncias associadas com quaisquer estimativas de entrada que sejam correlacionadas;
- ✓ Estimação das incertezas-padrão de cada variável de entrada X_i ;
- ✓ Aplicação da Lei de Propagação de Incertezas no modelo proposto;
- ✓ Determinação da incerteza padrão combinada do resultado da medição;

- ✓ Determinação da incerteza expandida;
- ✓ Relatar o resultado da medição conjuntamente com sua incerteza padrão combinada ou expandida.

A maioria dos trabalhos científicos ou publicações sobre medições com acelerômetros não estimam a avaliação da incerteza. Muito provavelmente pela complexidade dos sistemas de medição envolvendo este tipo de sensores.

Licht e Zaveri (1981) publicaram um artigo onde mostraram como uma cadeia de rastreabilidade de acelerômetros padrão é estabelecida, de tal forma que os transdutores de trabalho podem ser rastreados até os padrões primários. Os autores estudaram, também, os métodos para garantir a exatidão dos resultados e destacaram que todos os equipamentos pertencentes à cadeia apresentavam suas respectivas exatidões. Ainda, apresentaram uma equação similar à proposta pelo ISO/TAG 4/WG 3 (2008) para avaliação da incerteza expandida.

Nogueira et al. (2006) estimaram a incerteza de medição de um acelerômetro de um único eixo de fibra óptica projetado para o monitoramento de vibrações em cabos de energia e linhas de transmissão aplicando o ISO/TAG 4/WG 3 (2008). As variáveis consideradas foram: a incerteza padrão associada ao interferômetro laser; a incerteza padrão da curva de calibração; a incerteza padrão do condicionador de sinais e o coeficiente de sensibilidade da curva de calibração. O valor de incerteza expandida encontrado foi de $0,6 \text{ m/s}^2$ o qual foi considerado adequado para a finalidade do acelerômetro para 95,45% de probabilidade de abrangência.

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PARA VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDAÇÃO PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado o sistema de medição baseado no acelerômetro de baixo custo ADXL321, desenvolvido especialmente para monitoramento de vibrações. De forma detalhada, é descrita a metodologia para validação da aplicabilidade e eficácia do referido sistema. Objetivando uma melhor compreensão, o conteúdo do mesmo foi dividido em dois itens. O primeiro item contém um detalhamento do sistema de medição proposto. O segundo item relata a calibração do sistema, isto é, o planejamento de todos os experimentos e seus objetivos, bem como, os equipamentos utilizados, os padrões e a aquisição em tempo real dos dados necessários. Ainda, é efetuada a avaliação da incerteza de medição conforme requisitado no ISO/TAG 4/WG 3 (2008). As principais fontes de erros e incertezas de cada um dos arranjos experimentais, em cada etapa da calibração, são identificadas e os modelos matemáticos obtidos.

Para facilitar a compreensão deste capítulo é apresentada uma breve descrição das dez montagens experimentais, denominadas, neste trabalho, de Sistemas 1 a 10.

O Sistema 1 (padrão) foi calibrado pontualmente, isto é, a uma excitação harmônica a freqüência nominal de 160 Hz e aceleração de 10 m/s². Este Sistema foi utilizado para analisar a freqüência (Hz) e a sensibilidade (V/m/s²) do sistema de medição padrão (grandezas de saída). Possibilitou, ainda, a verificação do desempenho do programa computacional desenvolvido.

O sistema 2 também foi calibrado pontualmente, para analisar a freqüência (Hz) e a sensibilidade (V/m/s²) e posteriormente comparar os resultados com aqueles encontrados na

calibração do Sistema 1. Ainda, possibilitou avaliar o desempenho do condicionador de sinais desenvolvido e a estabilidade usando o sensor de geometria sextavada.

O Sistema 3 (sistema de medição desenvolvido completo) foi calibrado na freqüência nominal de 160 Hz para analisar a estabilidade, a freqüência e a sensibilidade de saída, para os ganhos de 1, 2 e 5, usando o sensor de geometria sextavada.

O Sistema 4 foi calibrado dinamicamente, utilizando um ruído branco na faixa de 2 Hz a 20 kHz. Para tanto foi efetuada uma calibração direta por comparação para analisar o sistema de medição desenvolvido em relação ao padrão, usando o sensor de geometria sextavada. Foram analisadas as FRFs em relação ao ganho e o ângulo de fase.

O Sistema 5 foi calibrado pontualmente, usando três sensores de geometrias diferentes (quadrada, cilíndrica e sextavada) para analisar, ao longo de alguns meses e sob condições ambientes diferentes, a estabilidade em relação à sensibilidade. Foram avaliadas duas direções do sensor quadrado, duas do cilíndrico e uma do sextavado, escolhidas aleatoriamente.

O Sistema 6 foi calibrado pontualmente, usando os três sensores desenvolvidos, para analisar a sensibilidade de cinco direções dos sensores desenvolvidos, sendo utilizado um analisador digital como mostrador. Os resultados obtidos na calibração deste sistema foram comparados com os dados da calibração efetuada pelo fabricante em relação ao sensor capacitivo ADXL321.

O Sistema 7 foi também calibrado na freqüência nominal de 160 Hz para analisar a sensibilidade de dois acelerômetros-padrão (B&K) usando também o analisador digital como mostrador.

O Sistema 8 foi calibrado dinamicamente, utilizando-se um ruído branco na faixa de 2 Hz a 20 kHz, para avaliar dois acelerômetros-padrão B&K quanto a: efeitos cruzados observando as FRFs; ganhos; ângulos de fase e coerência. Foram, também, calibrados dinamicamente os dois acelerômetros-padrão B&K, usados durante as calibrações dos sistemas, com outro acelerômetro B&K (calibrado a laser) para garantir a rastreabilidade.

O Sistema 9 foi calibrado dinamicamente, com um ruído branco na faixa de 2 Hz a 20 kHz, para analisar os respectivos efeitos cruzados dos três sensores desenvolvidos observando as FRFs, além dos ganhos, ângulos de fase, coerência e erros máximos de ganho e fase.

O Sistema 10 foi calibrado dinamicamente, com um ruído branco na faixa de 2 Hz a 20 kHz, para analisar e determinar respectivamente as faixas dinâmicas dos três sensores desenvolvidos.

4.1. Detalhamento do sistema de medição desenvolvido

O sistema de medição proposto e desenvolvido, neste trabalho, para o monitoramento de vibrações está apresentado na Fig. 4.1. Por sua vez a Fig. 4.2 mostra a configuração inicial do sistema de medição proposto.

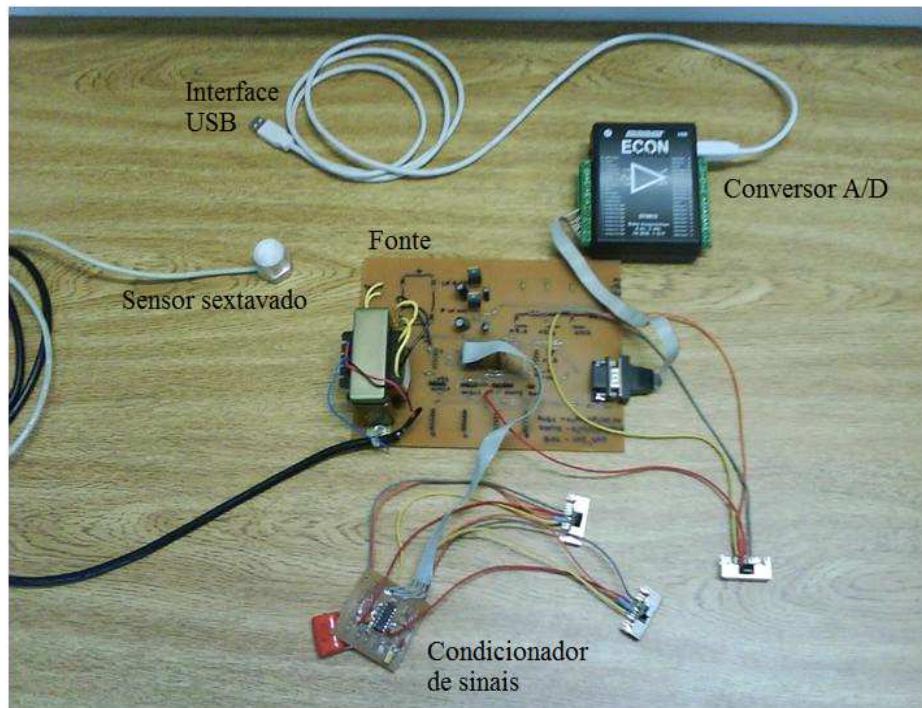


Figura 4.1 - Sistema de medição proposto

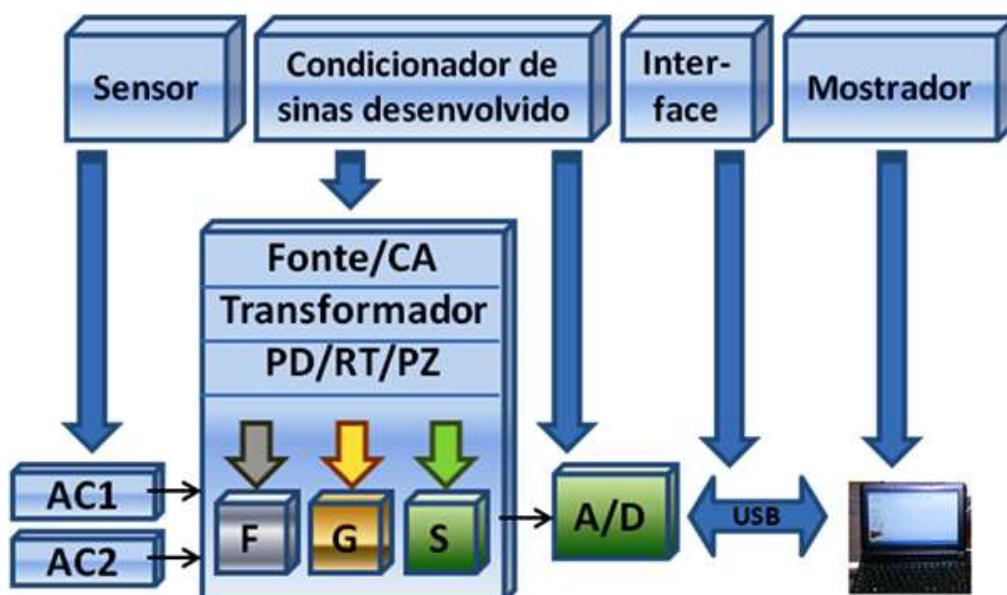


Figura 4.2 - Componentes básicos do sistema de medição proposto

Este sistema pode trabalhar, simultaneamente, com uma ou duas unidades sensoras (AC1 e AC2), com sensibilidade triaxial. Estes sensores são obtidos montando-se adequadamente dois acelerômetros biaxiais (ADXL321) em uma carcaça de alumínio blindada (ABRÃO et al., 2008). Totalizando seis canais independentes de sinais. Formam parte do sistema, também, uma fonte de alimentação, uma fonte retificadora, uma fonte reguladora e, para cada canal de entrada, um filtro do tipo passa baixa, para freqüências acima de 2 kHz. Além um conversor de sinais do tipo análogo-digital digital (A/D), um computador e programas dedicados para o armazenando e análise dos resultados. Pelo exposto, pode-se dizer que o sistema de medição proposto é complexo, devido, principalmente, à quantidade de elementos que o compõem.

4.1.1. Unidade sensora ou transdutor

No sistema de medição proposto, a unidade sensora é composta por até dois sensores desenvolvidos (AC1 e AC2). Na Figura 4.3 podem ser observadas as montagens blindadas feitas em alumínio para obtenção de um sensor com sensibilidade em três direções.



Figura 4.3 - Montagens blindadas em alumínio dos acelerômetros ADXL321 (ABRÃO et al., 2008).

Durante a usinagem das estruturas em alumínio foram observadas, cuidadosamente, duas bases perpendiculares onde foram montados dois acelerômetros ADXL321 (sem o circuito impresso), como ilustra a Fig. 4.4. Tal procedimento garante que o sensor tenha sensibilidade em três direções. A montagem, mesmo que contenha alguns pequenos desvios de posição, garante que não exista correlação entre a sensibilidade dos dois circuitos integrados, visto que os mesmos atuam em planos distintos e perpendiculares.

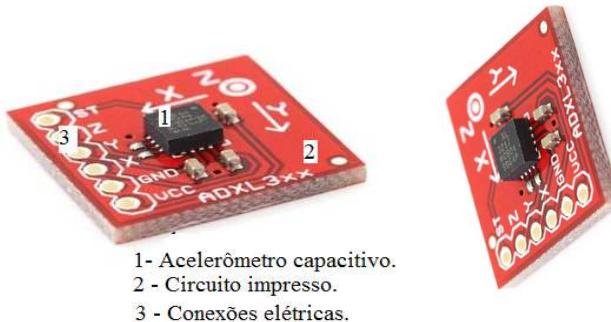


Figura 4.4 - Ilustração da montagem de cada sensor (Analog Devices, 2007)

4.1.2. Unidade de tratamento do sinal

A unidade de tratamento de sinal é composta por um transformador comercial, do tipo 220 V/12 V, que na seqüência é retificada (-12 V/+12 V) e posteriormente passa por um regulador de tensão comercial, do tipo LM7812 e LM7912.

Amplificadores operacionais do tipo LM 348, garantem que o pequeno sinal de saída do sensor possa ser filtrado e amplificado (ganho de 1, 2 ou 5) antes de ser capturado por um conversor/multiplexador análogo-digital de sinal (A/D) comercial.

Os sensores desenvolvidos podem ser alimentados em 2,7, 4,7 ou 5,7 V (Fig. 4.5). Um filtro ativo tipo passa baixa, analógico de dois pólos determina uma freqüência de corte de 6,0 kHz, visto que a freqüência de ressonância do acelerômetro é de 5,5 kHz.

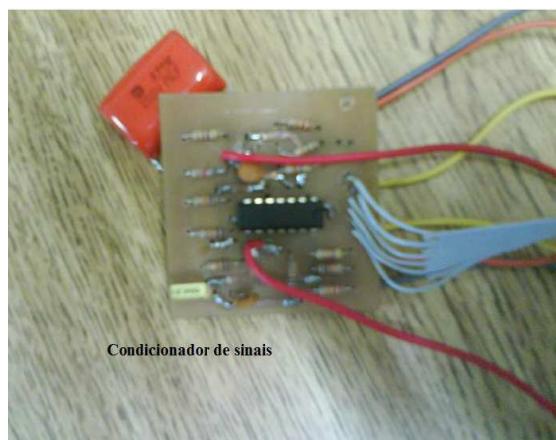


Figura 4.5 - Condicionador de sinais

O conversor/multiplexador A/D (Fig. 4.6) é do fabricante Data Translation/USA, Econ/Série, modelo DT9812, 12 bits, programável, alimentado com 2,5 V. Possui oito canais

de entradas e dois de saídas, cinco faixas de ganho, sistema binário de codificação de dados e freqüência de chaveamento (varredura) de 6,3 kHz, isto é, 6.250 leituras/s para cada canal.

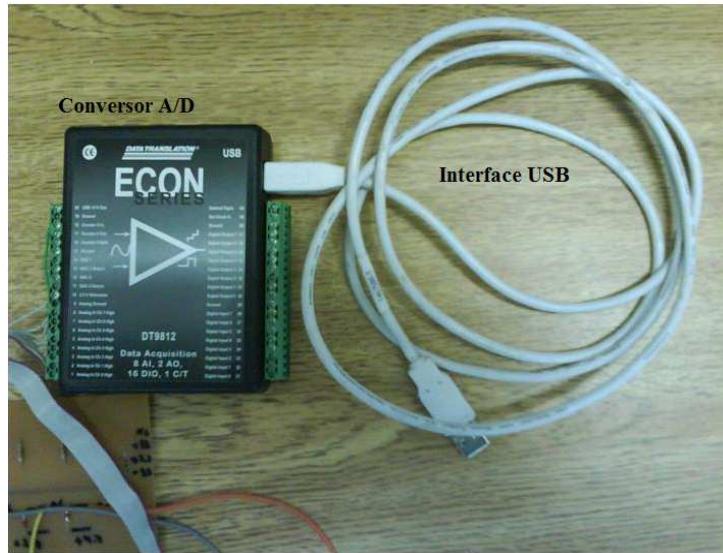


Figura 4.6 - Conversor/Multiplexador A/D

Dentre as principais características tem-se:

- 1) faixa de medição (ganho 1) = 0 a 2,44 V
- 2) precisão para ganho 1 = 0,04% da faixa de medição
- 3) não linearidade = 0,05% da faixa de medição
- 4) tempo de resposta/estabilização antes da conversão A/D = 0,020 segundos (0,01% da faixa de medição).

Muito embora os erros sejam relativamente pequenos quando comparados aos erros dos outros componentes do sistema de medição, as principais fontes, neste caso, estão, respectivamente, na entrada do sinal, no chaveamento entre os oito canais e na saída do sinal para o computador.

A Figura 4.7 mostra o transformador e o regulador de tensão.

4.1.3. Unidade mostradora

A unidade mostradora está composta por um Notebook fabricado por InfoWay, processador Intel ATOM N270, 1,60 GHz, 800 MHz e RAM 2 GB; um programa computacional, em linguagem C++, especialmente desenvolvido para leitura, armazenamento e processamento 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 computacional. Estas informações são enviadas através de uma interface universal (USB) para o computador.

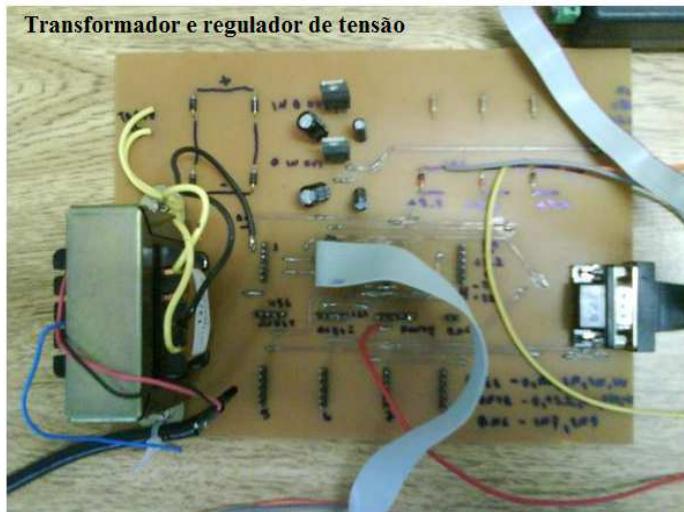


Figura 4.7 – Transformador e regulador de tensão

Praticamente no mesmo instante o sinal é transformado para a base binária e amplificado até 16 vezes, em relação ao sinal de entrada, previamente filtrado e amplificado milhares de vezes pelos amplificadores operacionais da unidade de tratamento de sinais. Paralelamente, o conversor A/D, também, está chaveando, cada canal, do sinal de entrada, a uma velocidade de 6.200 leituras/s. E novamente o ciclo de medição se repete.

Alguns sistemas ou placas de aquisição de dados fazem o chaveamento do conversor A/D, que poderá digitalizar ruídos também. Este armazena o sinal digital para depois escolher um novo canal do sinal de entrada. Isto causa uma aquisição relativamente lenta, provocando congestionamento nas informações entre computador e as demais unidades do sistema. Observando ainda que, o valor nominal do mensurando, poderá flutuar e o computador não registrar esta flutuação.

O sistema de medição proposto reduz significativamente este efeito, pois a unidade de tratamento de sinal garante um sinal de entrada estabilizado, filtrado e amplificado para em seguida digitalizá-lo.

Através do programa é definido, ainda, o número de pontos a coletar e o intervalo de aquisição (tempo) para cada canal. Além da possibilidade de monitorar a temperatura ambiente e a temperatura da estrutura onde o sensor está montado.

Resumindo, dentre as características do sistema de medição proposto, podem-se citar: baixo custo; portabilidade, permitindo seu uso em pequenas bancadas no chão de fábrica; sensibilidade em três eixos e o monitoramento automático dos sinais de vibrações em tempo real. Ainda, uma pesquisa desenvolvida por Abrão et al., (2008) comprovou que o comprimento dos cabos elétricos, que fazem as ligações entre os módulos do sistema, não interferem na resposta do mesmo.

4.2. Calibração do Sistema de Medição

A calibração de um transdutor de vibrações tem como principal objetivo a determinação de suas características estáticas e dinâmicas, tais como sua sensibilidade e freqüências de interesse (RIPPER et al., 2006).

Neste trabalho, a calibração do sistema proposto foi efetuada de acordo com as recomendações da norma técnica ISO 16063-21 (2003), a qual inclui métodos primários de calibração, métodos de calibração por comparação, testes comparativos para determinar as características adicionais de transdutores de vibração e choques e, expressões para o cálculo da incerteza de medição. Ainda, foram considerados os requisitos estabelecidos na NBR ISO/IEC 17025 (2005).

Um exemplo típico de calibração, para montagem em laboratório, é ilustrado na Fig. 4.8 (ISO 16063-21, 2003). Onde pode ser observado um excitador (1), amplificadores e/ou condicionadores de sinais (2 e 3), um gerador de sinais (4), um acelerômetro padrão ou de referência (5), sensor a calibrar (6), medidor de tensão (corrente contínua) (7), medidor de distorção de amplitude e freqüência (8), osciloscópio (opcional) (9) e um medidor de ângulo de fase (opcional) (10).

Neste trabalho, os equipamentos de 7 a 10 foram substituídos por um analisador digital que constituiu o mostrador de referência (padrão). Foi ainda inserido um computador dedicado para armazenamento de dados e outros processamentos complementares.

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica e no Laboratório de Sistemas Mecânicos, ambos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A temperatura e a umidade relativa do ar, nas proximidades da bancada de ensaios, foram monitoradas durante a realização de todos os experimentos. 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%.

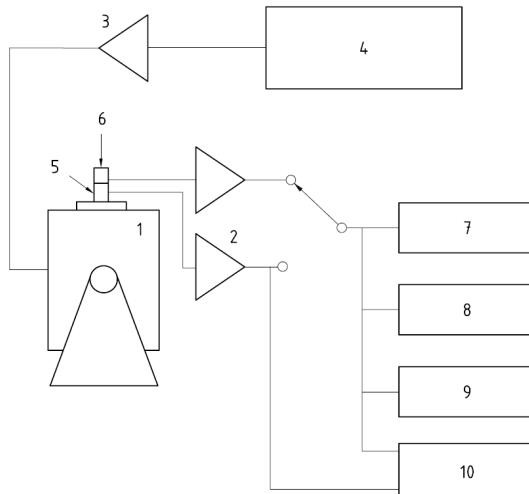


Figura 4.8 - Esquema da montagem da calibração direta por comparação

4.2.1. Calibração direta por comparação (Sistema 1)

Inicialmente, uma calibração direta, por comparação, foi efetuada conforme recomendado por ISO 16063-21 (2003). A mesma foi conduzida em duas etapas.

A primeira etapa consistiu da calibração do sistema de medição padrão (Sistema 1) composto por um acelerômetro piezoelétrico, B&K, modelo 4371, um condicionador de sinais, B&K, modelo Nexus e um conversor A/D, National, modelo NI USB 9162. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram o esquema da montagem e uma foto do sistema 1, respectivamente.

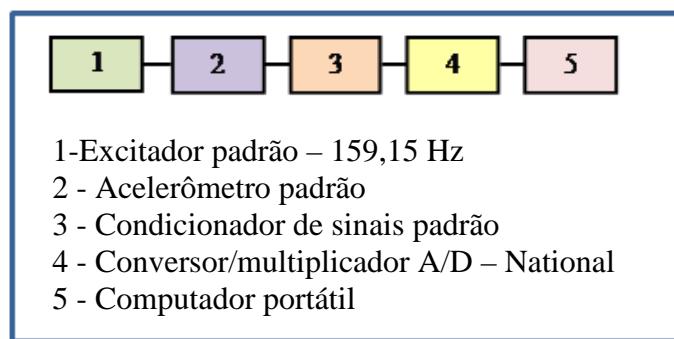


Figura 4.9 - Esquema da montagem do Sistema 1

O acelerômetro B&K, modelo 4371, foi calibrado utilizando-se um acelerômetro padrão B&K, modelo 83 305S, calibrado pelo método da interferometria a laser. Por sua vez, o Sistema 1 foi calibrado na freqüência pontual de 159,15 Hz usando o excitador padrão fabricado pela Brüel & Kjaer (B&K), modelo 4294, freqüência de 159,15 Hz.



Figura 4.10 - Sistema 1 (acelerômetro piezoelétrico (B&K), condicionador de sinais (B&K) e conversor A/D (NI USB 9162)) - Sistema padrão

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.

A seguir foi efetuada a avaliação da incerteza associada às medições realizadas com o Sistema 1. Para tanto foi aplicada a metodologia proposta no ISO/TAG 4/WG 3 (2008). Cabe ressaltar que a avaliação da incerteza associada às medições efetuadas com os dez Sistemas é similar, entretanto, os padrões utilizados, os instrumentos, as variáveis de entrada e de saída, bem como, as fontes de erros diferem de um sistema para outro e, portanto, os modelos matemáticos são diferentes. Ainda, o cálculo da incerteza deve ser conduzido no domínio da freqüência, onde as informações são mais condensadas. Portanto, serão apresentados, dois ou mais, modelos matemáticos para cada um dos sistemas.

O Sistema 1 foi utilizado para obtenção da freqüência (Hz) e da sensibilidade ($V/m/s^2$), estas representam as variáveis de saída do sistema de medição padrão. Por sua vez, as variáveis que afetam o resultado da medição do Sistema 1 (variáveis de entrada) são:

a) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 24 Bits referente ao conversor A/D

b) ΔE – Correção devida à incerteza da calibração do excitador: 3% (159,15 Hz)

c) ΔAP – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro: 2% (159,20 Hz)

d) ΔCS – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais: 0,04% (159,20 Hz)

e) $\Delta A/DN$ – Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D: 1% (159,20 Hz)

f) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (16 384 l/s)

g) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional

Os valores das correções para as variáveis (a) a (f) foram extraídos dos certificados de calibração, catálogos de fabricantes e manuais técnicos (avaliação do tipo B).

Os modelos matemáticos para cálculo da incerteza, neste caso, são dados pelas Eq. (4.1) e (4.2). A Equação (4.1) é relativa à freqüência (Hz) e a Eq. (4.2) à sensibilidade ($V/m/s^2$). As variáveis $s(Leit.)$ e ΔPC podem ser desprezadas, pois a amostragem do sinal foi efetuada com um número grande de leituras. E o programa computacional mostrou boa qualidade de programação, além dos sinais já digitalizados, apresentarem erros de arredondamento muito pequenos.

$$Freq = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AP + \Delta CS + \Delta A/DN \quad (4.1)$$

$$S = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AP + \Delta CS + \Delta A/DN \quad (4.2)$$

Aplicando a Lei de Propagação de Incerteza nas Eq. (4.1) e (4.2) obtém-se as Eq. (4.3) e (4.4) que permitem calcular a incerteza padrão combinada associada à freqüência e à sensibilidade, respectivamente.

$$\begin{aligned} u_c^2(Freq) &= \left(\frac{\partial Freq}{\partial s(Leit.)} \right)^2 \cdot [u(s(Leit.))]^2 + \left(\frac{\partial Freq}{\partial R} \right)^2 \cdot [u(R)]^2 + \left(\frac{\partial Freq}{\partial \Delta E} \right)^2 \cdot [u(\Delta E)]^2 + \\ &+ \left(\frac{\partial Freq}{\partial \Delta AP} \right)^2 \cdot [u(\Delta AP)]^2 + \left(\frac{\partial Freq}{\partial \Delta CS} \right)^2 \cdot [u(\Delta CS)]^2 + \left(\frac{\partial Freq}{\partial \Delta A/DN} \right)^2 \cdot [u(\Delta A/DN)]^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
u_c^2(S) = & \left(\frac{\partial S}{\partial s(\text{Leit.})} \right)^2 \cdot [u(s(\text{Leit.}))]^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial R} \right)^2 \cdot [u(R)]^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \Delta E} \right)^2 \cdot [u(\Delta E)]^2 + \\
& + \left(\frac{\partial S}{\partial \Delta AP} \right)^2 \cdot [u(\Delta AP)]^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \Delta CS} \right)^2 \cdot [u(\Delta CS)]^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \Delta(A/DN)} \right)^2 \cdot [u(\Delta(A/DN))]^2
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Para estimar a incerteza padrão combinada resulta necessário calcular a incerteza padrão de cada variável individual, para tanto deve ser efetuada uma avaliação do Tipo A ou do Tipo B.

Das variáveis de entrada, somente a incerteza padrão associada às leituras pode ser estimada através de uma avaliação do Tipo A, pela Eq. (4.5).

$$u(s(\text{Leit.})) = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{4.5}$$

onde n representa o número de leituras e s o desvio padrão das leituras.

Para a variável (a) foi adotada uma avaliação do Tipo B, assumindo-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade. A equação para o cálculo é similar à Eq. (4.6), onde X é a razão entre a tensão contínua do conversor A/D (5 V) e o número dois elevado a vigésima quarta potência, isto é, o número de bits do conversor A/D (BONFIM, 2002).

Para as variáveis de (b) até (e) foi adotada uma avaliação do Tipo B, assumindo-se uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade Eq. (4.6).

$$u(x_i) = \frac{x}{\sqrt{3}} \tag{4.6}$$

onde x é o valor de cada variável de entrada (x_i).

4.2.2. Calibração direta por comparação (Sistema 2)

O procedimento experimental apresentado para o Sistema 1 foi repetido substituindo-se tanto o conversor A/D da National, pelo condicionador de sinais desenvolvido, quanto o conversor A/D DT-9812 obtendo-se o Sistema 2. O esquema da montagem do Sistema 2 é apresentado na Fig. 4.11, enquanto que a Fig. 4.12 mostra uma foto do mesmo.

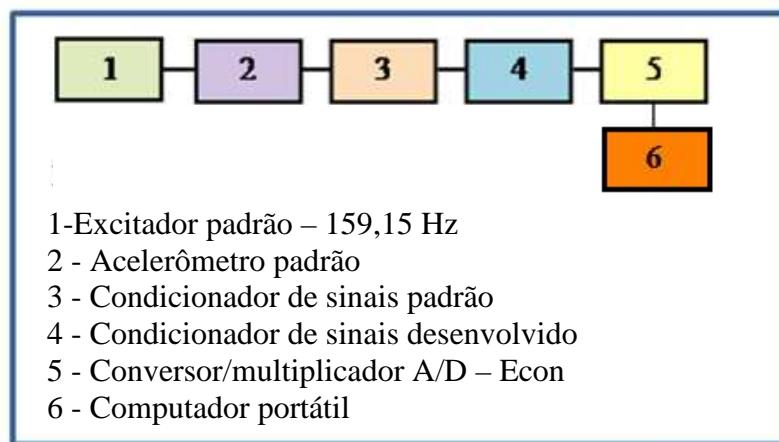


Figura 4.11 - Esquema da montagem do Sistema 2



Figura 4.12 - Sistema 2 (acelerômetro piezoelétrico (B&K), condicionador de sinais, (B&K), condicionador desenvolvido e conversor A/D_{ECON})

Para o Sistema 2, o procedimento acima foi repetido efetuando-se 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 de calibração foi efetuado novamente para ambos os sistemas.

Para avaliação da incerteza, neste caso, foram consideradas as variáveis de saída freqüência (Hz) e sensibilidade ($V/m/s^2$). Assim, as variáveis que afetam o resultado da calibração do Sistema 2 são:

- a) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 12 Bits referente ao conversor A/D
- b) ΔE – Correção devida à incerteza da calibração do excitador: 3%
- c) ΔAP – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro: 2%

- d) ΔCS – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais padrão: 0,04%
- e) ΔCSD – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais desenvolvido: 1%
- f) $\Delta A/DE$ – Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D: 0,24% (159,20 Hz)
- g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (16 384/s)
- h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional

Os modelos matemáticos para a avaliação da incerteza, neste caso, são dados pelas Eq. (4.7) e (4.8), respectivamente, freqüência (Hz) e sensibilidade ($V/m/s^2$).

$$Freq = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AP + \Delta CSP + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.7)$$

$$S = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AP + \Delta CSP + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.8)$$

A seguir deve ser aplicada a Lei de Propagação de Incerteza nas Eq. (4.7) e (4.8) obtém-se as equações para estimar a incerteza padrão combinada como efetuado para o Sistema 1.

É importante ressaltar que os únicos equipamentos substituídos, em relação ao Sistema 1, foram o condicionador de sinais desenvolvido e o conversor A/D_{ECON} . Comparando esses resultados pode-se afirmar que a unidade de tratamento de sinal desenvolvida e testada satisfez as expectativas quanto a seu funcionamento e desempenho. 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. Portanto é bastante razoável estimar a incerteza padrão, deste módulo, entre 0,7 a 1,0%.

Além disso, as variáveis que mais contribuem para a avaliação da incerteza final, nos dois casos, são a do excitador padrão e a do acelerômetro padrão.

4.2.3. Calibração direta por comparação (Sistema 3)

Ainda, novos testes foram realizados somente com o sistema de medição desenvolvido, utilizando o sensor de geometria sextavada (Sistema 3). O esquema da montagem do Sistema 3 é apresentado na Fig. 4.13, enquanto que a Fig. 4.14 mostra uma foto do mesmo.

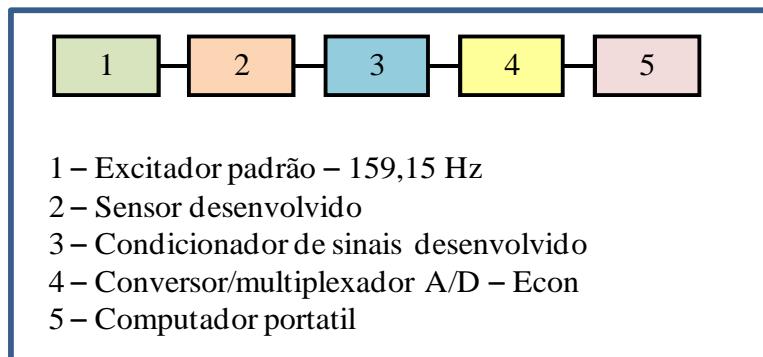


Figura 4.13 - Esboço da montagem para o Sistema 3



Figura 4.14 - Sistema 3 (Sistema de medição desenvolvido)

Como o condicionador desenvolvido pode trabalhar com três diferentes ganhos: 1, 2 e 5, foram realizados experimentos para todos os respectivos ganhos.

Para o Sistema 3 as variáveis de saída são a freqüência (Hz) e a sensibilidade ($V/m/s^2$). Enquanto que as variáveis de entrada, que afetam o resultado da calibração são:

- a) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 12 Bits referente ao conversor A/D
- b) ΔE – Correção devida à incerteza da calibração do excitador padrão: 3%
- c) ΔAX – Correção devida à incerteza da calibração dos sensores ADXL321: 4,4%
- d) ΔCSD – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais desenvolvido: 1%
- e) $\Delta A/DE$ – Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D: 0,24% (159,20 Hz)
- g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (16 384/s)
- h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional

O modelo matemático para cálculo da incerteza, neste caso, é dado pelas Eq. (4.9) e (4.10), respectivamente, para a freqüência e a sensibilidade.

$$Freq = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.9)$$

$$S = s(Leit.) + \Delta R + \Delta E + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.10)$$

4.2.4. Calibração direta por comparação (Sistema 4)

Em uma segunda etapa, uma nova calibração, por comparação direta, foi efetuada acoplando, ambos os sistemas de medição (Sistema 4), a um excitador B&K, modelo 4808. Nas Figuras 4.15 e 4.16 são mostrados o esquema funcional e uma foto do Sistema 4, respectivamente.

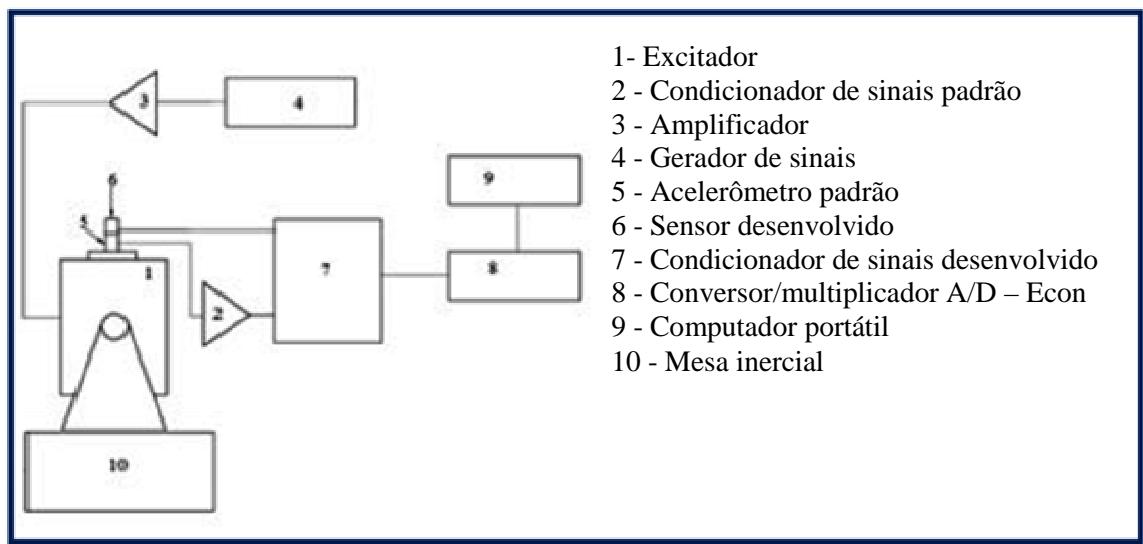


Figura 4.15 - Esquema da montagem do Sistema 4

A saída do gerador de sinais, modelo 1049 é amplificada por um condicionador, modelo 2712, que por sua vez, alimenta o excitador 4808. Todos os equipamentos e dispositivos foram montados em uma mesa inercial para que a influência das vibrações indesejadas fosse minimizada durante a aquisição dos sinais. Sinais estes monitorados e armazenados para posterior análise.

Um programa computacional foi desenvolvido, em linguagem C++, especialmente para aquisição automatizada dos dados. Os sinais foram amostrados com uma freqüência de 16 384

Hz, durante 20 s, obtendo-se 250.000 leituras para cada ensaio. Para a realização do processamento e análise da Função Resposta em Freqüência foi utilizado o aplicativo Matlab.



Figura 4.16 - Sistema 4 (Sistema 1 e 2 acoplados ao excitador 4808)

Para determinar a Função Resposta em Freqüência (FRF) e ângulo de fase entre o acelerômetro padrão (B&K 4371), calibrado com um laser Doppler Vibrometer da Polytec (MARQUES e SOUZA, 2007) e o sensor de baixo custo, uma freqüência de aquisição de 16,384 kHz foi ajustada, durante 20 segundos. Para garantir a aquisição mesmo com ciclos periódicos incompletos, a janela Hanning foi aplicada, com número de pontos atribuídos de 16 384 (FFT – Transformada Rápida de Fourier) ($df = 1$ Hz) e sobreposição de 50%, resultando em um erro máximo de 1,58% (BENDAT e PIERSOL, 2000) em amplitude para o estimador H1.

Foram adquiridos três conjuntos de dados para diferentes níveis de aceleração para avaliar a linearidade, a saber: 3,0; 6,0 e 9,0 m/s² (RMS) considerando-se a faixa de 2 a 4.000 Hz, para a obtenção da Função Resposta em Freqüência. Foi realizado o levantamento da FRF tanto na direção da excitação como na direção perpendicular (cruzada).

Estes experimentos visavam, também, a avaliação do programa computacional desenvolvido para a aquisição de sinais e análise de dados.

Para determinação da incerteza associada ao ϕ (ângulo de fase em graus) e G (ganho em dB) foram consideradas as seguintes variáveis de influência:

- a) ΔGS – Correção associada à incerteza do gerador de sinais: 0,05%
- b) ΔAS – Correção devida à incerteza da calibração do amplificador de sinais: 0,5%
- c) ΔAX – Correção devida à incerteza da calibração dos sensores ADXL321: 4,4%

- d) ΔAP – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão: 2%
- e) ΔCSD – Correção devida à incerteza do condicionador de sinais desenvolvido: 1%
- f) $\Delta A/DE$ – Correção devida à incerteza da calibração do conversor A/D: 0,24%
- g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (16 384/s)
- h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
- i) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 12 Bits referente ao conversor A/D

Os modelos matemáticos para o cálculo da incerteza, para este sistema, são dados pelas Eq. (4.11) e (4.12).

$$\varphi = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AX + \Delta AP + \Delta CSD + \Delta A/DE + \Delta R \quad (4.11)$$

$$G = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AX + \Delta AP + \Delta CSD + \Delta A/DE + \Delta R \quad (4.12)$$

4.2.5. Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistema 5)

Uma nova calibração direta por comparação foi realizada para determinar a estabilidade e a sensibilidade do sistema de medição proposto. Neste caso, foi monitorado o funcionamento de três sensores, utilizando o ADXL321, montados em estruturas com geometrias diferentes, sendo que dois deles foram avaliados em duas direções e o terceiro em uma direção, totalizando cinco direções. Completam o arranjo experimental o excitador padrão, o condicionador de sinais desenvolvido e o conversor A/D fabricado pela Data Translation obtendo-se, assim, o Sistema 5. Nas Figuras 4.17 e 4.18 são mostrados o esquema funcional e uma foto do Sistema 5, respectivamente.

A avaliação da estabilidade se iniciou com uma calibração pontual do sistema, na freqüência nominal de 159,15 Hz gerada pelo excitador padrão, conforme recomendado pela norma ISO 16063-21 (2003).

Durante a calibração foi efetuada a medição da sensibilidade do sistema provocada pelo excitador padrão em cada um dos sensores sob teste. Para cada direção foram coletadas três amostras.

Em seguida o sistema de medição foi acoplado a um refrigerador, conforme Fig. 4.19, para ser excitado durante o seu funcionamento. O procedimento experimental se estendeu durante 4 dias e a coleta dos dados foi efetuada de forma automatizada pelo computador, através do software especificamente desenvolvido. Transcorridas 24 h uma nova calibração

foi efetuada com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema ao longo do tempo. O tempo médio de cada calibração foi de, aproximadamente, 30 min.

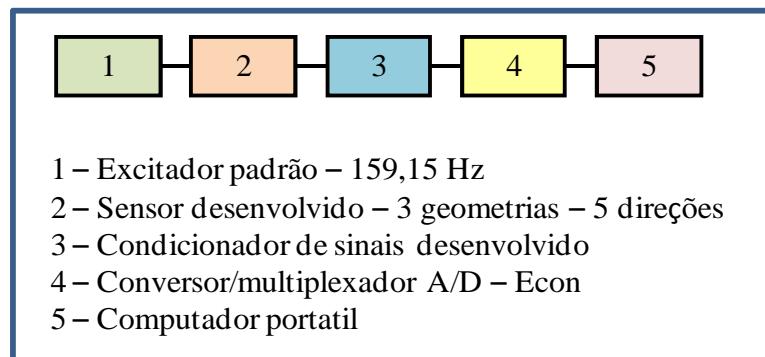


Figura 4.17 - Esquema da montagem do Sistema 5

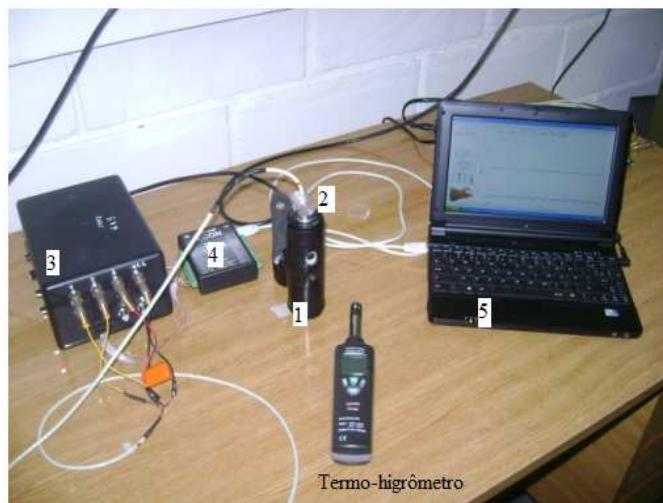


Figura 4.18 - Sistema 5 (sensor ADXL321, condicionador e conversor A/D_{ECON})

A análise dos dados coletados foi efetuada através do cálculo dos parâmetros estatísticos dados pela média, o desvio padrão, o intervalo de confiança e, uma análise de variância, para um nível de confiança de 95% para os fatores de calibração dos sensores.

Para uma avaliação mais completa da estabilidade do sistema de medição proposto, os experimentos descritos nesta etapa foram repetidos a cada trinta dias, aproximadamente, totalizando quatro amostragens em datas diferentes.

O Sistema 5 é similar ao Sistema 3, isto é, o que muda são os três sensores, de geometrias diferentes, sendo estudados quanto ao parâmetro estabilidade. Foram avaliadas as variáveis de saída, freqüência (Hz) e sensibilidade ($V/m/s^2$), que afetam o resultado da calibração, para cinco direções escolhidas aleatoriamente, entre os três sensores estudados.

Visando facilitar o armazenamento dos dados, bem como seus processamentos, foi denominada, cada direção, da seguinte maneira: i , j e k ; onde (i) caracteriza a direção, (j) o número da amostragem e (k) o dia do experimento. Totalizando sessenta amostragens. A avaliação da incerteza expandida em relação à estabilidade foi obtida durante quatro dias e em diferentes datas.

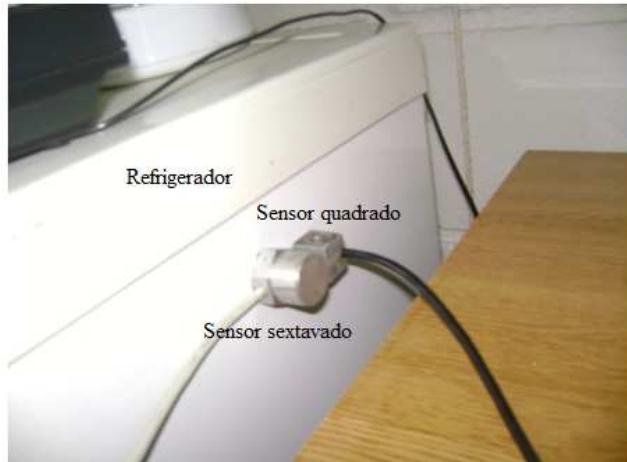


Figura 4.19 - Sensores acoplados a um refrigerador

O modelo matemático para o cálculo da incerteza, para este sistema, é dado pelas Eq. (4.13) e (4.14).

$$Freq_{l_j_k} = s(Leit) + \Delta R + \Delta E + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.13)$$

$$S_{(l_j_k)} = s(Leit) + \Delta R + \Delta E + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta A/DE \quad (4.14)$$

4.2.6. Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistemas 6)

O esquema da montagem do Sistema 6 é apresentado na Fig. 4.20. Com este sistema foram realizados testes com o intuito de verificar o comportamento do sinal de saída, para as diversas geometrias, da unidade sensora. Para tanto foi usado o excitador padrão (159,15 Hz), o condicionador desenvolvido e o analisador digital, Spectral Dynamics SD 380 Analyzer da Scientifics-Atlanta, como mostrador.

O objetivo foi alcançado, os resultados obtidos foram satisfatórios, tendo em vista que as sensibilidades dos sensores estudados apresentaram valores nominais equivalentes aos especificados pelos fabricantes.

Outros experimentos foram realizados para a determinação das freqüências de ressonância e das faixas lineares de resposta dos sensores, avaliando-se as cinco direções consideradas. O critério utilizado foi a análise das Funções Repostas em Freqüência (FRF's) tendo como entrada os sinais de um acelerômetro padrão piezoelétrico da B&K, modelo 4371, e como saída os sinais dos sensores avaliados. Os sensores foram utilizados, simultaneamente, para aquisição de um sinal do tipo ruído branco.

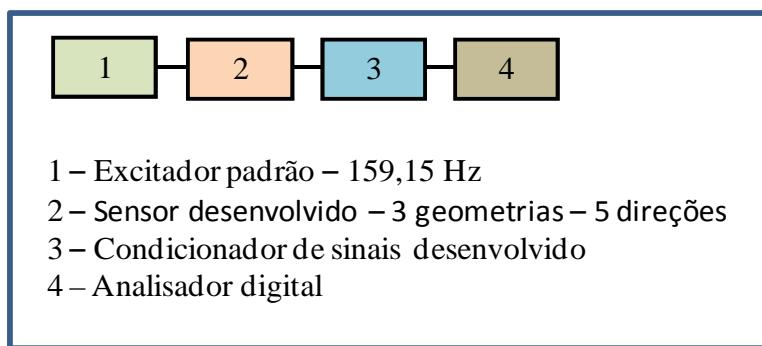


Figura 4.20 - Esquema da montagem do Sistema 6

Para realização dos testes foi utilizado um acelerômetro padrão B&K, modelo 4371 ligado ao condicionador de sinais Nexus (B&K), outro acelerômetro padrão com um condicionador de sinal B&K, modelo 2635, um analisador digital (Spectral Dynamics SD 380 Analyzer da Scientifics-Atlanta), um gerador de sinais modelo 1049 (com faixa de funcionamento entre 2 Hz e 20 kHz, e 1,25 V de amplitude), um amplificador 2712 (ganho de até 4 vezes, com baixa impedância de saída), um excitador 4808 e uma mesa inercial para evitar influências de vibrações indesejadas.

Os sinais foram amostrados até 10 kHz, com uma resolução em freqüência de 10 Hz.

Com os dados coletados foi possível obter gráficos de ganho ou função resposta em freqüência (FRF), ângulo de fase e função coerência das FRF's, bem como, montar tabelas contendo os valores de freqüência de ressonância, faixa de operação linear, média, desvio padrão e intervalo de confiança (95%), considerando-se os valores obtidos para as cinco direções de sensibilidade.

Para o Sistema 6 a variável de saída é a sensibilidade ($V/m/s^2$). Enquanto que as variáveis de influências são:

- a) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 0,0006 V
 - b) ΔE – Correção devida à incerteza da calibração do excitador padrão: 3%
 - c) ΔAX – Correção devida à incerteza da calibração dos sensores ADXL321: 4,4%
 - d) ΔCSD – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais desenvolvido: 1%
 - e) ΔFFT – Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital: 0,025%
 - g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (102 400 1/s)
 - h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
- O modelo matemático, neste caso, é dado pela Eq. (4.15).

$$S = \Delta E + \Delta AX + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (4.15)$$

As correções $s(Leit.)$, ΔPC e ΔR são desprezíveis.

4.2.7. Avaliação da estabilidade e da sensibilidade (Sistemas 7)

A montagem do Sistema 7 (Fig. 4.21) teve como objetivo avaliar o comportamento do sinal de saída de dois acelerômetros B&K. Para tanto foi utilizado um excitador padrão (159,15 Hz), dois acelerômetros B&K modelo 4371, o condicionador de sinal padrão B&K modelo Nexus e o analisador digital, Spectral Dynamics SD 380 Analyzer da Scientifics-Atlanta, como mostrador.

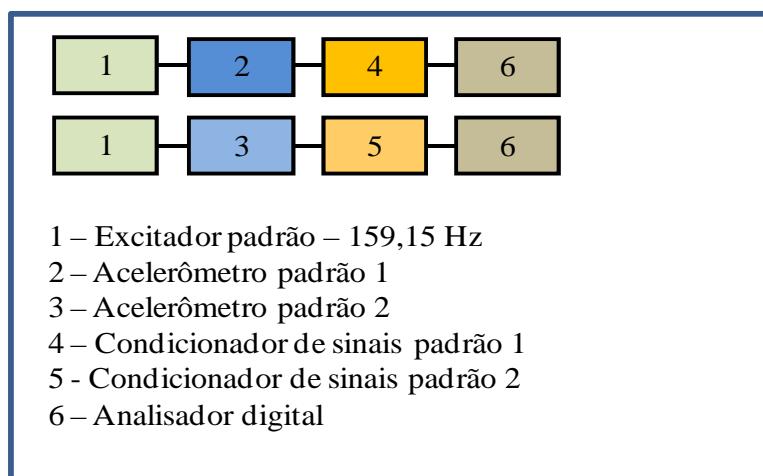


Figura 4.21 - Esquema da montagem do Sistema 7

Os resultados obtidos mostraram que a sensibilidade dos dois acelerômetros-padrão, apresentou valores similares aos especificados pelos fabricantes.

A variável de saída para o Sistema 7 é a sensibilidade ($V/m/s^2$). Por sua vez, as variáveis de influência são:

- a) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 0,0006 V
- b) ΔE – Correção devida à incerteza da calibração do excitador: 3% (159,15 Hz)
- c) $\Delta AP1$ – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 1: 2% (159,20 Hz)
- d) $\Delta AP2$ – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 2: 2% (159,2 Hz)
- e) ΔCS – Correção devida à incerteza da calibração do condicionador de sinais: 0,04% (159,20 Hz)
- f) ΔFFT – Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital: 0,025%
- g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (102 400/s)
- h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional

Os modelos matemáticos são apresentados nas Eq. (4.16) e (4.17).

$$S_1 = \Delta E + \Delta AP1 + \Delta CS + \Delta FFT \quad (4.16)$$

$$S_2 = \Delta E + \Delta AP2 + \Delta CS + \Delta FFT \quad (4.17)$$

4.2.8. Calibrações complementares (Sistema 8)

Deseja-se que um sensor bidirecional, ou mesmo um tridirecional, 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.

Testes experimentais complementares foram conduzidos para avaliar a sensibilidade, consistência e coerência do sistema de medição proposto. Para tanto foi utilizada uma mesa inercial, o excitador, o gerador de sinais, amplificadores, o analisador de sinais digital e um bloco padrão de 22,8 mm de comprimento, de classe K, rastreado ao padrão nacional. Apresentando, conforme certificado de calibração, incerteza expandida de 0,1 mm, para k=2,0 e probabilidade de abrangência de 95,45 %.

Durante os ensaios, um acelerômetro padrão foi acoplado em uma das superfícies de medição do bloco padrão e o segundo acelerômetro padrão acoplado na superfície lateral e perpendicular do bloco. O objetivo desta montagem foi avaliar possíveis efeitos cruzados do próprio excitador. O bloco padrão teve a função de uma superfície de referência para o apoio, dos sensores desenvolvidos, sobre o excitador em outros testes.

A seguir foi utilizado o gerador de sinais 1049. O sinal de saída deste gerador passa pelo amplificador de sinais, modelo 2712, que por sua vez alimenta o excitador, modelo 4808. Completando a primeira montagem, dois acelerômetros piezelétricos padrão são fixados ao excitador (modelo 4371), com os respectivos condicionadores de sinais, cujas saídas serão automaticamente analisadas e gravadas pelo analisador digital. Todo este conjunto foi montado em cima da mesa inercial (Sistema 8), conforme Fig. 4.22 e 4.23.

Este arranjo permitiu coletar os dados referentes ao sistema de medição padrão. Os quais foram posteriormente comparados com os dados obtidos, nas mesmas condições, com o sistema de medição proposto. Cabe ressaltar, que uma segunda coleta de dados foi efetuada utilizando-se os sensores e o condicionador desenvolvidos (Sistema 9).

Destes experimentos resultaram os dados para a avaliação da existência de efeitos cruzados entre os eixos. Possibilitou também a coleta de dados para avaliar o comportamento do excitador 4808, pois o mesmo funciona somente com excitação em uma única direção.

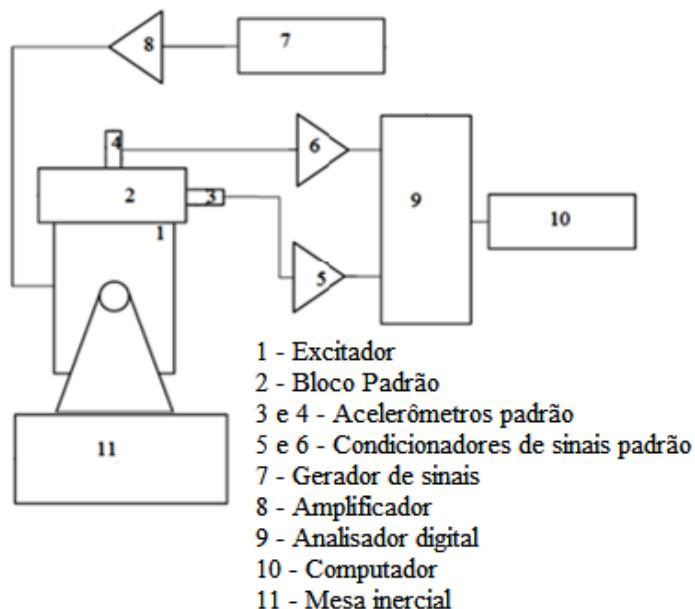


Figura 4.22 – Esquema da montagem do Sistema 8



Figura 4.23 - Sistema 8 usado para determinação das Freqüências de Ressonância, Função Resposta em Freqüência, Função Coerência e Ângulo de Fase

Na avaliação da incerteza de medição com o Sistema 8 foram consideradas as seguintes variáveis de saída: ângulo de fase (ϕ) em graus, ganho (G) em dB, coerência (C) e efeito cruzado (EC) em dB entre as direções: de excitação e perpendicular. As variáveis de entrada são:

- a) ΔGS – Correção associada à incerteza do gerador de sinais: 0,05%
- b) ΔAS – Correção devida à incerteza da calibração do amplificador de sinais: 0,5%
- c) ΔAPI – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 1: 2%
- d) $\Delta AP2$ – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão 2: 2%
- e) $\Delta CS1$ – Correção devida à incerteza do condicionador de sinais do acelerômetro 1: 0,04%
- f) $\Delta CS2$ – Correção devida à incerteza do condicionador de sinais do acelerômetro 2: 0,04%
- g) ΔFFT – Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital: 0,025%
- h) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (102 400/s)
- i) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
- j) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 1 dB para o ganho e 1 grau para o ângulo de fase
- k) $\Delta PIBP$ – Correção devida ao desvio de planeza das superfícies de medição do bloco padrão de comprimento nominal de 22,8 mm

I) $\Delta P2BP$ – Correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição do bloco padrão

m) $\Delta P3BP$ – Correção devido ao desvio de perpendicularidade entre a superfície de medição e a superfície lateral

Os modelos matemáticos para o cálculo da incerteza, para este sistema, são dados pelas Eq. (4.18) a (4.21). As incertezas, relativas aos desvios de forma e posição do bloco padrão, além de apresentarem valores muito pequenos, não são comumente relatadas em certificados de calibração, portanto, serão desprezadas. As incertezas relacionadas ao desvio padrão das leituras e aos programas computacionais, também, podem ser desprezadas.

As correções $s(Leit.)$ e ΔR são desprezíveis, enquanto que $\Delta P1B1$, $\Delta P2BP$ e $\Delta P3BP$ não constam no certificado de calibração e, portanto, não serão considerados nos modelos.

$$G = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AP1 + \Delta AP2 + \Delta CS1 + \Delta CS2 + \Delta FFT \quad (4.18)$$

$$\varphi = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AP1 + \Delta AP2 + \Delta CS1 + \Delta CS2 + \Delta FFT \quad (4.19)$$

$$C = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AP1 + \Delta AP2 + \Delta CS1 + \Delta CS2 + \Delta FFT \quad (4.20)$$

$$EC = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AP1 + \Delta AP2 + \Delta CS1 + \Delta CS2 + \Delta FFT \quad (4.21)$$

4.2.9. Determinação das freqüências de ressonância e avaliação dos efeitos cruzados (Sistema 9)

Outra calibração foi realizada com os três modelos de sensores (Sistema 9). A função resposta em freqüência, função coerência, ângulo de fase e a faixa dinâmica do sistema desenvolvido foram comparados com os do sistema padrão.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram, respectivamente, o esquema de uma das montagens e a foto do Sistema 9 com o sensor cilíndrico em cima do bloco padrão e, montado sobre o excitador 4808. Os sinais nas duas direções de saída foram monitorados pelo analisador digital. Sendo a direção vertical a de excitação e a outra direção na horizontal.

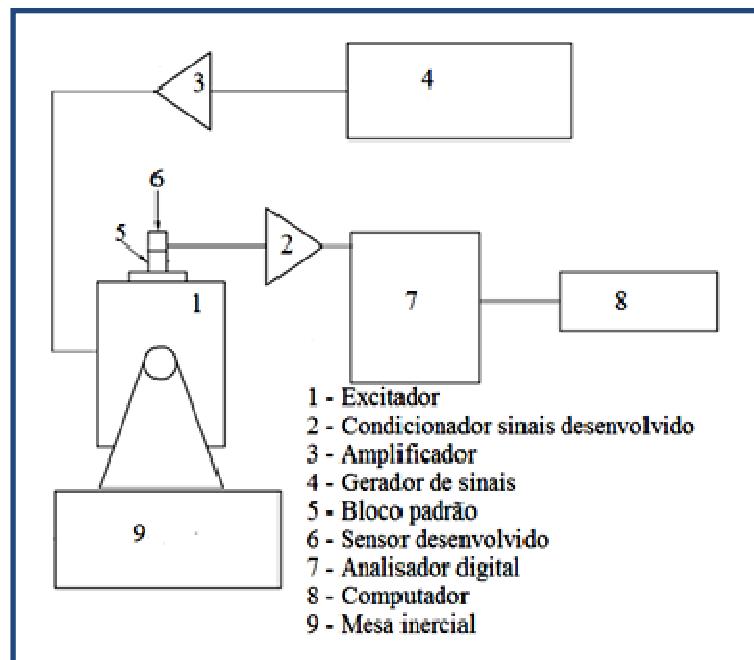


Figura 4.24 - Esquema da montagem do Sistema 9



Figura 4.25 - Montagem do acelerômetro cilíndrico sobre o bloco padrão

Para avaliação da incerteza das medições efetuadas com o Sistema 9 foram consideradas as seguintes variáveis de influência:

- 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%

- f) ΔFFT – Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital: 0,025%
- g) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (102 400/s)
- h) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
- i) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 1 dB para o ganho e 1 grau para o ângulo de fase
- j) $\Delta P1BP$ – Correção devido ao desvio de planeza das superfícies de medição do bloco padrão de comprimento nominal de 22,8 mm
- k) $\Delta P2BP$ – Correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição do bloco padrão
- l) $\Delta P3BP$ – Correção devido ao desvio de perpendicularidade entre a superfície de medição e a superfície lateral

Os modelos matemáticos para o cálculo da incerteza, para este sistema, são dados pelas Eq. (4.22) a (4.25).

$$G = \Delta GS + \Delta AS + \Delta A + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (4.22)$$

$$\varphi = \Delta GS + \Delta AS + \Delta A + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (4.23)$$

$$C = \Delta GS + \Delta AS + \Delta A + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (4.24)$$

$$EC = \Delta GS + \Delta AS + \Delta A + \Delta CSD + \Delta FFT \quad (4.25)$$

Onde φ ângulo de fase em graus, G ganho (dB), C é a Coerência e EC efeito cruzado (dB) entre as direções: 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 o Sistema 8 (padrão).

4.2.10. Determinação da faixa dinâmica (Sistema 10)

Para avaliar a faixa dinâmica do sistema de medição (Sistema 10) foi utilizado o filtro passa banda (2 kHz e 23 %), modelo 1621 (B&K), na saída do gerador de sinais. Um ruído branco foi gerado, filtrado, amplificado e aplicado ao excitador 4808. Sobre o último, montados e posicionados, simultaneamente, um sensor padrão e um dos sensores estudados, conforme Fig. 4.26 e 4.27. Espera-se que o comportamento do sistema de medição estudado,

ao adquirir um sinal filtrado, se mantenha igual ao do sistema padrão dentro de sua faixa dinâmica de operação. Os testes foram repetidos para todas as direções dos sensores.

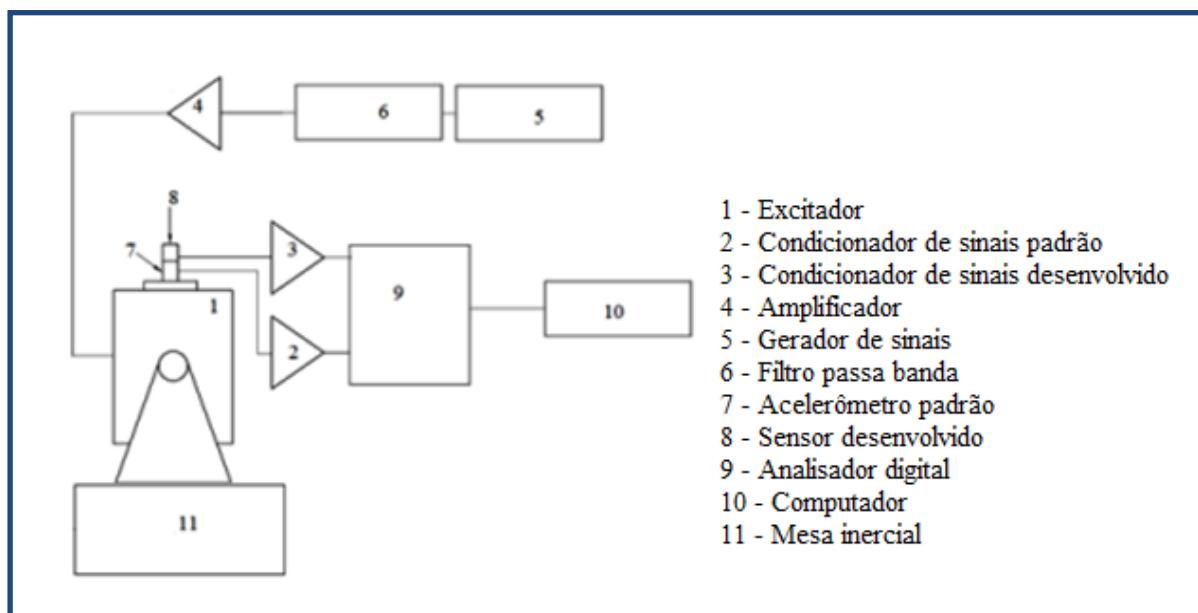


Figura 4.26 - Esquema da montagem do Sistema 10

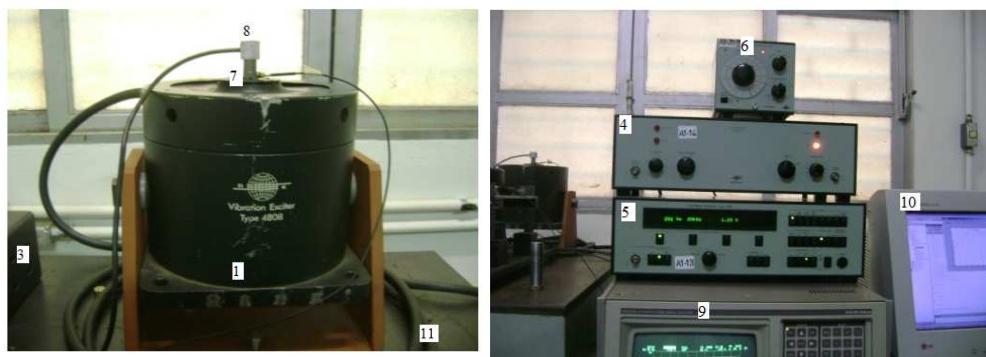


Figura 4.27 – Fotos da montagem do Sistema 10

As variáveis de saída consideradas para a avaliação da incerteza associada à calibração do Sistema 10 são:

- 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%
- ΔAP – Correção devida à incerteza da calibração do acelerômetro padrão: 2%
- ΔCSD – Correção devida à incerteza do condicionador de sinais desenvolvido: 1%

- f) ΔCS – Correção devida à incerteza do condicionador de sinais padrão: 0,04%
- g) ΔFFT – Correção devida à incerteza da calibração do analisador digital: 0,025%
- h) $s(Leit.)$ – Desvio padrão das leituras (102 400 l/s)
- i) ΔPC – Correção devida à incerteza relacionada ao programa computacional
- j) ΔR – Correção associada à resolução do sistema de medição: 1 dB para o ganho e 1 grau para o ângulo de fase
- k) ΔFPB – Correção devida à incerteza da calibração do filtro passa banda: 1,5%

O modelo matemático para o cálculo da incerteza, em relação ao transdutor estudado, é dado pelas Eq. (4.26) e (4.27).

$$G_{min} = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AX + \Delta AP + \Delta CSD + \Delta CS + \Delta FFT + \Delta FPB \quad (4.26)$$

$$FD = \Delta GS + \Delta AS + \Delta AX + \Delta AP + \Delta CSD + \Delta CS + \Delta FFT + \Delta FPB \quad (4.27)$$

Onde G_{min} é o ganho mínimo (dB) e FD a faixa dinâmica (dB), para sensor estudado, de geometria quadrada. Ambas as grandezas foram comparadas com o acelerômetro padrão.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a aplicação da metodologia para validação do sistema de medição proposto neste trabalho, cabe fazer a apresentação e discussão dos resultados. Para tanto, este capítulo está dividido por sistemas conforme apresentado no Capítulo IV. Assim sendo, são apresentados os resultados obtidos durante a realização dos experimentos com cada sistema e aqueles decorrentes da avaliação da incerteza de medição.

5.1. Resultados da calibração do Sistema 1

A Tabela 5.1 mostra os valores de sensibilidade obtidos para o Sistema 1 (padrão) calibrado pontualmente, na freqüência nominal de 159,15 Hz. A freqüência de avaliação, neste caso, foi de 159,15 Hz e ganho de 1.

Tabela 5.1 - Resultados da calibração pontual do Sistema 1

	Sensibilidade ($V/m/s^2$)				Média	Desvio Padrão (s)	IC 95%			
	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 5.1, *E1* representa um experimento inicial e o *E2* um experimento efetuado, nas mesmas condições, duas horas mais tarde. Todos os valores são expressos em V/m/s², onde *s* representa o desvio padrão e *IC* o intervalo de confiança (95%).

Durante os experimentos *E1* e *E2* verificou-se que a freqüência indicada pelo Sistema 1 apresentou um valor médio de 159,50 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. Os intervalos de confiança tanto para *E1*, quanto *E2* apresentam valores iguais ou menores que os desvios padrão, caracterizando que as amostras pertencem à mesma população. O mesmo comportamento acontece em relação a oito amostras.

5.2. Resultados da calibração do Sistema 2

A seguir são apresentados os resultados da calibração pontual do Sistema 2 e a comparação dos mesmos com aqueles encontrados para o Sistema 1. O sistema 2 foi calibrado pontualmente, para analisar a freqüência (Hz) e a sensibilidade (V/m/s²), bem como, para avaliar o desempenho do condicionador de sinais desenvolvido e a estabilidade usando o sensor sextavado.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de sensibilidade encontrados durante a calibração do Sistema 2 para o ganho de 1.

Tabela 5.2 - Resultados da calibração pontual do Sistema 2 para ganho de 1

	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média	Desvio Padrão (s)	IC 95%			
	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				

Os experimentos conduzidos com o Sistema 2 tiveram como objetivo analisar o comportamento do condicionador de sinais desenvolvido e do conversor análogo-digital (A/D) em relação ao sistema padrão. Estes mostraram que o Sistema 2 apresentou uma freqüência média de 159,50 Hz.

A sensibilidade do Sistema 1, para ganho de 1, considerando as oito amostras coletadas foi de $(1,1659 \pm 0,0076)$ V/m/s² e o intervalo de confiança de 0,0053 V/m/s² (95%). Enquanto que para o Sistema 2 tem-se, respectivamente $(1,1658 \pm 0,0026)$ V/m/s² e 0,0018 V/m/s².

A Figura 5.1 mostra os valores de desvios-padrão associados aos valores de sensibilidade para os dois experimentos realizados com ambos os sistemas.

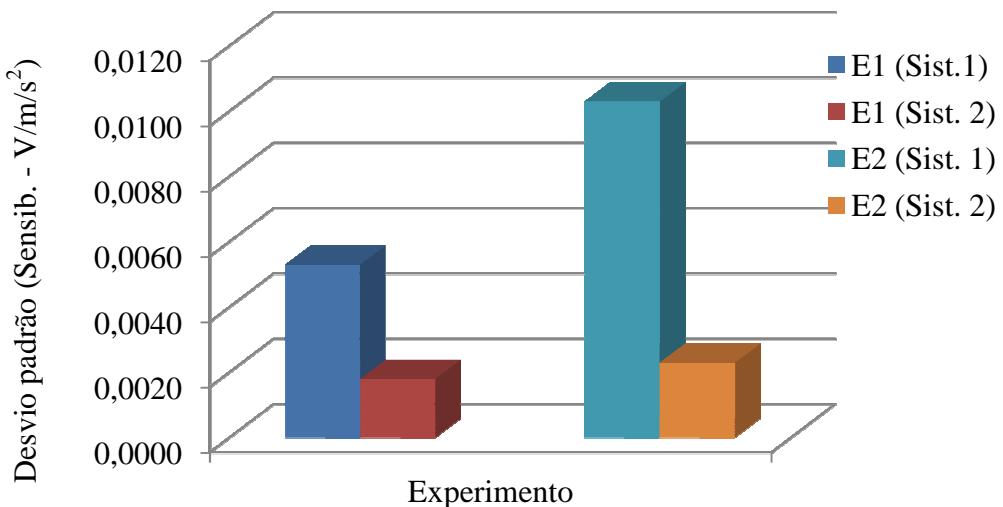


Figura 5.1 - Desvios-padrão associados à Sensibilidade (Sistemas 1 e 2)

Pode-se observar, na Fig. 5.1, que o valor do desvio padrão encontrado durante a realização do Experimento 1 para o Sistema 2 é sensivelmente menor (em 0,0080 V/m/s²) que aquele encontrado para o Sistema 1. Já para o Experimento 2, o desvio padrão do Sistema 2 é 0,0013 V/m/s² menor.

Quando comparadas as médias dos valores do desvio padrão encontradas para ambos os sistemas, considerando 8 amostras, a diferença encontrada foi de 0,0050 V/m/s². Em outras palavras, o valor médio do desvio padrão do Sistema 2 representa 34% do desvio padrão médio apresentado pelo Sistema 1. Isto denota que em termos de precisão o Sistema 2 é melhor que o Sistema 1.

A Figura 5.2 mostra os valores dos intervalos de confiança encontrados para os dois experimentos realizados para ambos os sistemas. Observe que os intervalos de confiança

referentes aos dois experimentos realizados com o Sistema 2 apresentam valores menores que os encontrados para o Sistema 1. No primeiro experimento a diferença encontrada foi de $0,0035 \text{ V/m/s}^2$, enquanto que para o segundo foi de $0,0080 \text{ V/m/s}^2$.

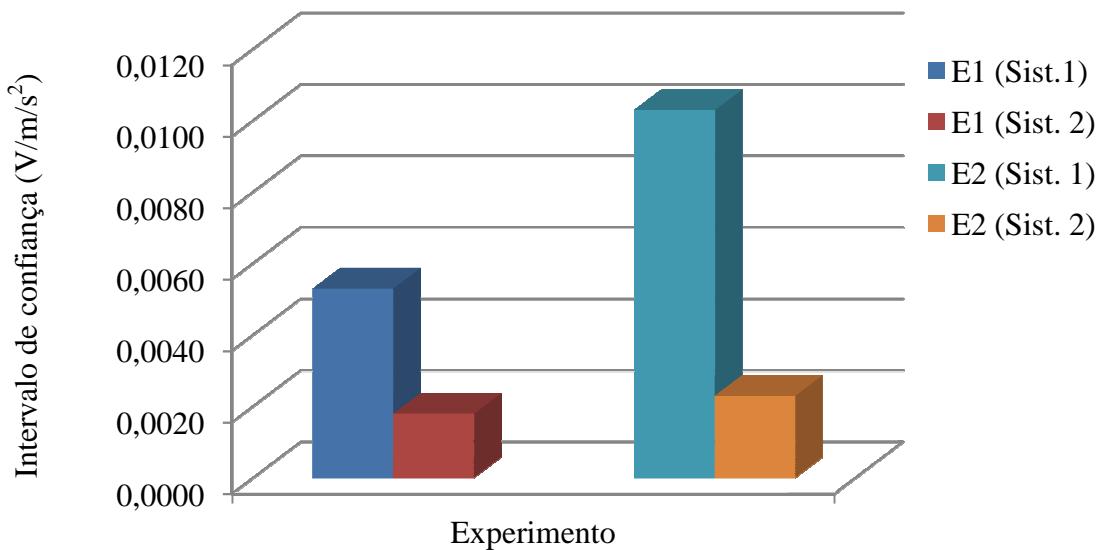


Figura 5.2 - Intervalos de confiança associados à sensibilidade (Sistemas 1 e 2)

A seguir foi efetuada a avaliação da incerteza, todas as informações referentes ao cálculo da mesma são apresentadas de forma resumida nas Tab. 5.3 e 5.4. 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. Ainda, na coluna da distribuição de probabilidades, N representa a distribuição normal e R a retangular.

Cabe ressaltar que os valores das incertezas-padrão foram apresentados com um número de algarismos maior que as leituras com o objetivo de diminuir os erros de arredondamento. Estas observações são válidas para todas as tabelas que mostram os cálculos da incerteza.

A avaliação da incerteza mostrou, para o Sistema 1, que a freqüência de vibração possui uma incerteza expandida de 3,73% em relação a 159,50 Hz para $k = 2,0$ e 95,45% de abrangência. Com relação à sensibilidade a incerteza expandida foi de 3,77% em relação a $1,1659 \text{ V/m/s}^2$ para $k = 2,0$ 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 (2,3872 Hz) para a freqüência e ($0,0175 \text{ V/m/s}^2$) para a sensibilidade, conforme mostrado nas Tab. 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 - Incerteza da calibração - Sistema 1 (Freqüência, Hz)

Grandeza X_i	Estimativa X_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (Hz)
$s(Leit.)$	0,01 Hz	N	1	3	0
ΔR	0,01 Hz	R	95×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3,0% (159,15Hz)	N	1	∞	2,3872500
ΔAP	2% (159,20 Hz)	N	1	∞	1,5926000
ΔCS	0,04% (159,20 Hz)	N	1	∞	0,0318400
$\Delta A/DN$	1,0% (159,20 Hz)	N	1	∞	0,7960000
Incerteza padrão combinada (u_c) em Hz					2,9779
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em Hz					5,9558
Incerteza da freqüência (159,50 Hz)					3,73%

Tabela 5.4 - Incerteza da calibração - Sistema 1 (Sensibilidade, V/m/s²)

Grandeza X_i	Estimativa X_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (V/m/s ²)
$s(Leit.)$	0,0076 V/m/s ²	N	1	3	0,0026870
ΔR	0,0000003	R	1×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3,0%	N	1	∞	0,0174885
ΔAP	2%	N	1	∞	0,0116590
ΔCS	0,04%	N	1	∞	0,0002332
$\Delta A/DN$	1,0%	N	1	∞	0,0058295
Incerteza padrão combinada (u_c) em V/m/s ²					0,0220
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k = 2,0
Incerteza expandida (U) em V/m/s ²					0,0440
Incerteza da sensibilidade (1,1659 V/m/s ²)					3,77%

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os resultados da avaliação da incerteza para o Sistema 2, com ganho de 1, tanto para a freqüência (Hz) quanto para a sensibilidade (V/m/s²).

Tabela 5.5 - Incerteza da calibração do Sistema 2 (ganho 1) para a freqüência

Grandezza X_i	Estimativa X_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (Hz)
$s(Leit.)$	0,01 Hz	N	1	3	0
ΔR	0,01 Hz	R	95×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3,0% (159,15Hz)	N	1	∞	2,3872500
ΔAP	2% (159,20 Hz)	N	1	∞	1,5915000
ΔCS	0,04% (159,20 Hz)	N	1	∞	0,0318300
ΔCSD	1,0% (159,20 Hz)	R	1	∞	0,9188530
$\Delta A/DN$	0,24% (159,20 Hz)	N	1	∞	0,1914000
Incerteza padrão combinada (u_c) em Hz					3,0189
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em Hz					6,0379
Incerteza da freqüência a 159,50 Hz					3,78%

Tabela 5.6 - Incerteza da calibração do Sistema 2 (ganho 1) para a sensibilidade

Grandezza X_i	Estimativa X_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (V/m/s ²)
$s(Leit.)$	0,0026 V/m/s ²	N	1	3	0,0009192
ΔR	0,0000003	R	1×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3,0%	N	1	∞	0,0174870
ΔAP	2%	N	1	∞	0,0116580
ΔCS	0,04%	N	1	∞	0,0002332
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	0,0041150
$\Delta A/DN$	0,24%	N	1	∞	0,0013990
Incerteza padrão combinada (u_c) em V/m/s ²					0,0216
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k = 2,0
Incerteza expandida (U) em V/m/s ²					0,0432
Incerteza da sensibilidade a 1,1658 V/m/s ²					3,71%

A incerteza expandida para a freqüência de vibração é de 3,78% em 159,50 Hz e para a sensibilidade é de 3,71% em 1,1658 V/m/s². Em ambos os casos o fator de abrangência é igual a dois e a probabilidade de abrangência de 95,45%. A variável que mais contribuiu em para a incerteza final, foi a componente associada à calibração do excitador, sendo de 2,3872 Hz em relação à freqüência e de 0,0175 V/m/s² para a sensibilidade.

5.3. Resultados da calibração do Sistema 3 (Sistema desenvolvido)

A Tabela 5.7 mostra os resultados da calibração do sistema de medição desenvolvido (Sistema 3), referente ao quesito estabilidade, para os ganhos de 1, 2 e 5, realizados durante dois dias. A calibração foi efetuada na freqüência de 159,15 Hz usando o sensor sextavado.

Tabela 5.7 - Resultados da calibração pontual do Sistema 3 (Estabilidade)

Ganho 1	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média Padrão (s)	Desvio Padrão (s)	IC 95%			
	Amostra									
	1	2	3	4						
E1	1,2975	1,2980	1,2987	1,2990	1,2984	0,0007	0,0007			
E2	1,3321	1,3326	1,3324	1,3326	1,3325	0,0003	0,0002			
Para 8 amostras					1,3156	0,0182	0,0126			
Ganho 2	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média Padrão (s)	Desvio Padrão (s)	IC 95%			
	Amostra									
	1	2	3	4						
E1	2,9028	2,9044	2,9061	2,9028	2,9036	0,0016	0,0016			
E2	2,8289	2,8289	2,8273	2,8281	2,8285	0,0008	0,0008			
Para 8 amostras					2,8658	0,0405	0,0281			
Ganho 5	Sensibilidade (V/m/s ²)				Média Padrão (s)	Desvio Padrão (s)	IC 95%			
	Amostra									
	1	2	3	4						
E1	6,1350	6,1312	6,1200	6,1200	6,1256	0,0077	0,0076			
E2	6,2735	6,2814	6,2814	6,2814	6,2814	0,0039	0,0039			
Para 8 amostras					6,2042	0,0819	0,0568			

A calibração pontual realizada demonstrou que o Sistema 3 funciona corretamente. O programa computacional desenvolvido para a aquisição de sinais e análise dos dados, também, mostrou consistência e bom desempenho. Assim, o objetivo inicial deste trabalho foi alcançado, ou seja, o sistema de medição proposto, baseado no acelerômetro de baixo custo ADXL321 funciona corretamente.

O sistema de medição desenvolvido, em oito amostras, apresentou uma média de 159,50 Hz e desvio padrão igual a zero. Considerando que a freqüência de referência (valor verdadeiro convencional) é de 159,15 Hz pode-se dizer que o sistema proposto possui boa exatidão. O erro, neste caso é de 0,35 Hz e pode ser considerado adequado.

Uma comparação entre o Sistema 1 (padrão) e o Sistema 3 (desenvolvido), para ganho de 1, mostrou que o Sistema 1 apresentou respectivamente, em oito amostras, valores de sensibilidade de $(1,1659 \pm 0,0076)$ V/m/s² e intervalo de confiança (95%) de 0,0053 V/m/s². Enquanto que para o Sistema 3 os valores foram de $(1,3156 \pm 0,0182)$ V/m/s² e intervalo de confiança (95%) de 0,0126 V/m/s². Cabe lembrar que o Sistema 1 somente funciona com o ganho de 1.

A Tabela 5.7, também, mostrou que o Sistema 3, em oito amostras para o ganho de 2 possui sensibilidade de $(2,8658 \pm 0,0405)$ V/m/s² e intervalo de confiança (95%) de 0,0281 V/m/s². Por sua vez, para o ganho de 5 tem-se valores de sensibilidade de $(6,2042 \pm 0,0082)$ V/m/s² e intervalo de confiança (95%) de 0,0568 V/m/s², sendo alimentado com tensão elétrica de 5,7 VDC. Este procedimento é o correto, uma vez que para valores maiores de ganhos em um condicionador de sinal ideal reduz correntes parasitas e ruídos indesejados.

Pode-se afirmar que o Sistema 3 apresentou uma boa estabilidade para o período analisado e nas condições impostas. Os resultados obtidos são consistentes para os ganhos de 1, 2 e 5, com poucas flutuações.

A Figura 5.3 mostra o comportamento, aproximadamente, linear dos valores médios de sensibilidade na medida em que o ganho cresce e assume os valores de 1, 2 e 5, respectivamente. Por sua vez a Fig. 5.4 apresenta os valores de desvio padrão e do intervalo de confiança (95%) correspondente.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram que na medida em que o ganho aumenta os valores do desvio padrão e do intervalo de confiança (95%) associados crescem.

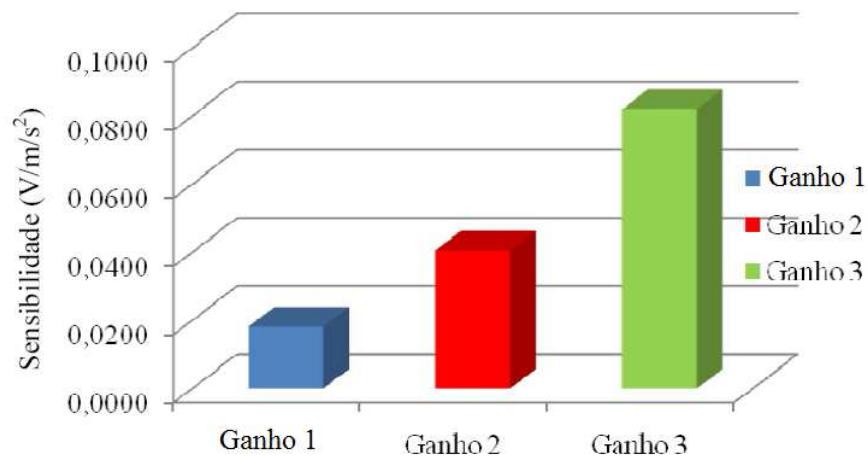


Figura 5.3 - Valores médios de sensibilidade para o Sistema 3

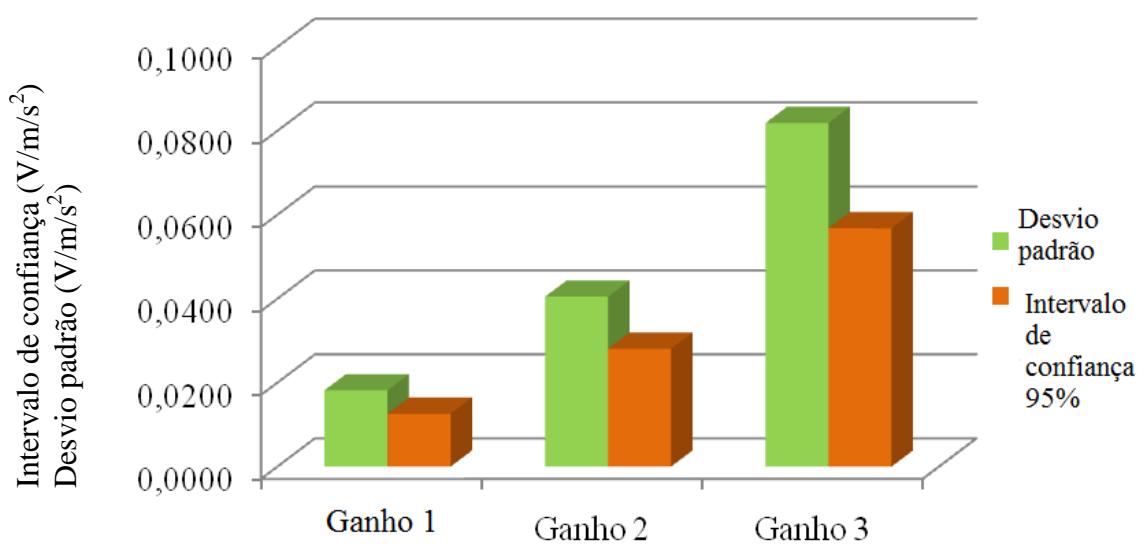


Figura 5.4 - Desvio padrão e intervalo de confiança (95%) para o Sistema 3

A Tabela 5.8 apresenta o cálculo da incerteza relativo aos valores de freqüência encontrados durante a calibração do Sistema 3 considerando os ganhos de 1, 2 e 5. Cabe lembrar que os valores médios relativos à freqüência para os três ganhos foram iguais, bem como, os desvios-padrão encontrados.

Tabela 5.8 - Incerteza da calibração - Sistema 3 (freqüência)

Estabilidade (Hz)					
Ganhos de 1, 2 e 3					
Primeiro e Segundo dia					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (Hz)
s(Leit.)	0,01 Hz	N	1	3	0
ΔR	0,01 Hz	R	95×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3% (159,15 Hz)	N	1	∞	2,3925000
ΔAX	4,4% (159,15 Hz)	N	1	∞	3,5090000
ΔCSD	1,0% (159,15 Hz)	R	1	∞	0,9208737
$\Delta A/DE$	0,24% (159,15 Hz)	N	1	∞	0,1914000
Incerteza padrão combinada (u_c) em					4,3500
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em Hz					8,7000
Incerteza do ganho em relação a 159,50 Hz					5,46%

Em relação à freqüência de vibração, para todos os ganhos, a incerteza expandida é de 5,46% em 159,50 Hz, para k=2,0 e 95,45% de confiabilidade. A variável que mais contribuiu foi a incerteza associada à calibração da unidade sensora com uma incerteza padrão de 3,5090 Hz.

A seguir foram calculadas as incertezas expandidas associadas à estabilidade para os três ganhos considerados. Os resultados encontrados para o primeiro dia e ganho de 1, são mostrados na Tab. 5.9.

De forma similar foram avaliadas as incertezas associadas aos testes de estabilidade durante o primeiro dia, considerando os ganhos de 2 e 5 e, também, aos testes durante o segundo dia para os três ganhos. Os resultados são mostrados na Tab. 5.10. Para todos os casos a probabilidade de abrangência é de 95,45% e k igual a 2.

Como esperado, o valor da incerteza padrão combinada cresce na medida em que o ganho aumenta, isto porque os valores do desvio padrão apresentaram esse mesmo comportamento. Entretanto, se observados os valores de incerteza expandida em porcentagem

pode-se verificar que os mesmos variam muito pouco em termos de porcentagem, assumindo valores de 5,45% e 5,46%. Isto demonstra boa estabilidade do sistema desenvolvido.

Tabela 5.9 - Incerteza associada à calibração do Sistema 3 (estabilidade)

Estabilidade - primeiro dia – ganho 1 - sensibilidade em V/m/s ²					
Grandeza	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (V/m/s ²)
Xi					
	0,0007 (V/m/s ²)	N	1	3	0,0003500
ΔR	0,0000003	R	1×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3%	N	1	∞	0,019476
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0,028565
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	0,007496
$\Delta A/DE$	0,24%	N	1	∞	0,001558
Incerteza padrão combinada (u_c) em V/m/s ²					0,0354
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em V/m/s ²					0,0708
Incerteza da sensibilidade em relação a 1,2984 V/m/s ²					5,45%

Tabela 5.10 - Incerteza da calibração - Sistema 3 (estabilidade)

	Ganho	Incerteza padrão combinada (V/m/s ²)	Incerteza expandida (V/m/s ²)	Incerteza expandida em %
1º Dia	1	0,0354	0,0708	5,45% de 1,2984 V/m/s ²
	2	0,0792	0,1584	5,45% de 2,9036 V/m/s ²
	5	0,1671	0,3342	5,46% de 6,1256 V/m/s ²
2º Dia	1	0,0364	0,0728	5,46% de 1,3325 V/m/s ²
	2	0,0771	0,1543	5,45% de 2,8285 V/m/s ²
	5	0,1713	0,3427	5,45% de 6,2814 V/m/s ²

5.4. Resultados da calibração do Sistema 4

A seguir são mostrados os resultados obtidos durante a calibração dinâmica do Sistema 4, utilizando o sensor sextavado.

A Figura 5.5 mostra os ganhos das Funções de Resposta em Freqüência (FRFs) na direção de excitação (—) e na direção transversal (—). Também é mostrada a resposta de fase no sentido da excitação.

Da Figura 5.5 se conclui que a FRF na direção de excitação apresenta uma variação máxima de 0,5 dB no intervalo considerado de 2,0 Hz a 5,0 kHz. A resposta em fase é linear na banda de 2,0 Hz a 4,0 kHz com queda também linear, justificada pela constante de tempo do capacitor montado no condicionador de sinais desenvolvido. O ganho da FRF cruzada é em média 8 dB menor que a apresentada na direção da excitação, a qual pode ser considerada adequada para as aplicações pretendidas para o sistema proposto.

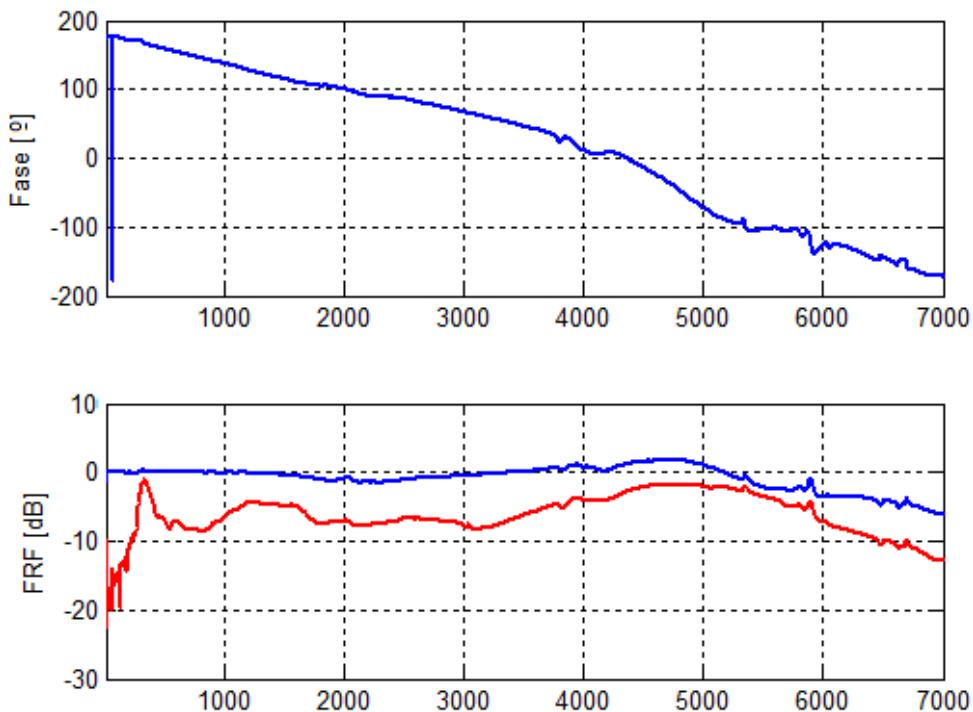


Figura 5.5 - FRFs na direção de excitação (—) e na direção transversal (—)

As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram os valores de incertezas encontrados para a calibração do Sistema 4.

Tabela 5.11 - Incerteza da calibração do Sistema 4 para o ganho (dB)

Grandeza Xi	Estimativa x_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0002500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0025000
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0,0220000
ΔAP	2%	N	1	∞	0,0105000
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	0,0057735
ΔCS	0,04%	N	1	∞	0,0002000
$\Delta A/DE$	0,24%	N	1	∞	0,0012000
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,0250
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,0500
Incerteza da sensibilidade em relação a 1 dB					5,00%

Na Tabela 5.11 se observa que a incerteza expandida associada ao ganho é de 0,0500 dB para k=2 e 95,45% de abrangência. Esta incerteza representa 5,00% de 1 dB. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza padrão associada ao sensor desenvolvido, sendo de 0,0220 dB.

A medição do ângulo de fase apresenta uma incerteza expandida muito pequena, não sendo significativa para a exatidão requerida na medição.

Tabela 5.12 - Incerteza da calibração do Sistema 4 para o ângulo de fase (graus)

Grandeza	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão
X_i					
ΔGS	0,05%	N	1	∞	$0^\circ 0' 1''$
ΔAS	0,5%	N	1	∞	$0^\circ 0' 9''$
ΔAX	4,4%	N	1	∞	$0^\circ 1' 19''$
ΔAP	2%	N	1	∞	$0^\circ 1' 38''$
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	$0^\circ 0' 21''$
ΔCS	0,04%	N	1	∞	$0^\circ 0' 1''$
$\Delta A/DE$	0,24%	N	1	∞	$0^\circ 0' 4''$
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	$0^\circ 0' 0''$
ΔR	0	R	1	∞	$0^\circ 0' 1''$
Incerteza padrão combinada (u_c) em graus					0°
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)					> 100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em graus					0°
Incerteza da sensibilidade em relação a 1°					0%

5.5. Resultados da calibração do Sistema 5

Os resultados da calibração pontual do Sistema 5 são mostrados a seguir. Lembrando que efetuada uma calibração ao longo do tempo, foram utilizados três sensores desenvolvidos e cinco direções foram consideradas.

A Tabela 5.13 mostra os valores de sensibilidade encontrados durante quatro calibrações do Sistema 5, executadas em 4 dias diferentes. Neste caso foi efetuado apenas o Experimento 1. Em cada calibração foram obtidas três amostras para cada direção, totalizando quinze amostras para as cinco direções consideradas.

Tabela 5.13 - Valores de sensibilidade para o Sistema 5 (Experimento 1)

	Sensibilidade nas 5 direções – V/m/s ²			
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
Direção 1				
Amostra 1	5,8951	5,8512	5,8273	5,8249
Amostra 2	5,8990	5,8555	5,8261	5,8275
Amostra 3	5,9014	5,8588	5,8261	5,8276
Média	5,8985	5,8552	5,8265	5,8267
Desvio padrão	0,0032	0,0038	0,0007	0,0015
Direção 2				
Amostra 1	5,6967	5,7243	5,7072	5,6890
Amostra 2	5,6973	5,7252	5,7060	5,6891
Amostra 3	5,6969	5,7261	5,7083	5,6871
Média	5,6970	5,7252	5,7072	5,6884
Desvio padrão	0,0003	0,0009	0,0012	0,0011
Direção 3				
Amostra 1	6,1751	6,2001	6,1871	6,1911
Amostra 2	6,1815	6,2018	6,1912	6,1956
Amostra 3	6,1851	6,2018	6,1939	6,1976
Média	6,1806	6,2012	6,1907	6,1948
Desvio padrão	0,0051	0,0010	0,0034	0,0033
Direção 4				
Amostra 1	6,1290	6,2052	6,2028	6,1863
Amostra 2	6,1319	6,1966	6,2069	6,1855
Amostra 3	6,1329	6,1944	6,2079	6,1854
Média	6,1313	6,1987	6,2059	6,1857
Desvio padrão	0,0020	0,0057	0,0027	0,0005
Direção 5				
Amostra 1	6,1886	6,1548	6,1941	6,1808
Amostra 2	6,1948	6,1554	6,1944	6,1772
Amostra 3	6,1962	6,1580	6,1945	6,1801
Média	6,1932	6,1561	6,1943	6,1794
Desvio padrão	0,0040	0,0017	0,0002	0,0019

Para facilitar a comparação dos resultados foi elaborado um gráfico com os valores de sensibilidade, Fig. 5.6. Com base nesta figura pode-se afirmar que o Sistema 5 tem excelente estabilidade nas cinco direções estudadas e, escolhidas entre três unidades sensoras de geometrias diferentes. Observe que a variação para uma mesma direção, considerando os 4 dias é menor que $0,1 \text{ V/m/s}^2$.

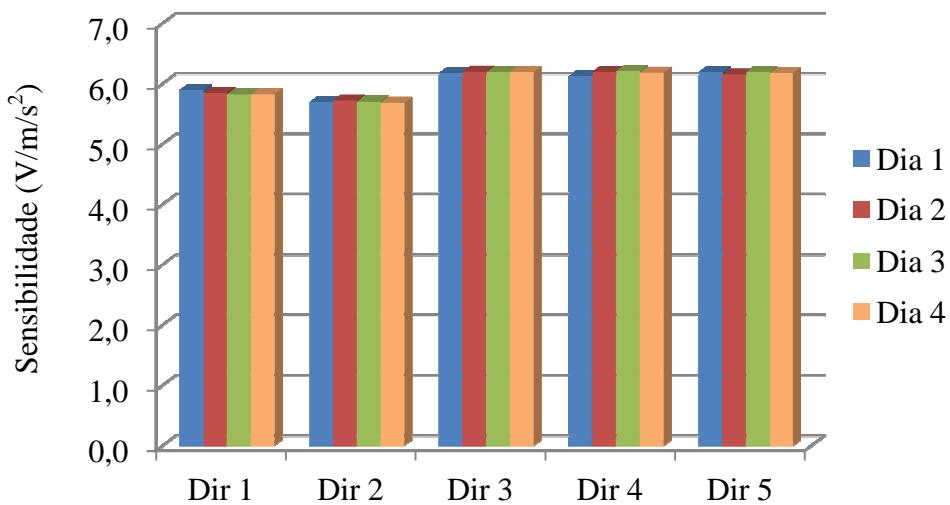


Figura 5.6 - Valores médios de sensibilidade

Uma comparação entre as direções avaliadas revela que as direções 3, 4 e 5 apresentaram valores similares de sensibilidade, sendo em média de $6,1918 \text{ V/m/s}^2$, $6,1804 \text{ V/m/s}^2$, $6,1808 \text{ V/m/s}^2$, respectivamente. Estas direções correspondem aos sensores com formato cilíndrico (direções 3 e 4) e sextavado (direção 5). Por sua vez, a direção 1 e 2 do sensor com formato quadrado apresentou valores de sensibilidade $5,8517 \text{ V/m/s}^2$ e $5,7044 \text{ V/m/s}^2$, respectivamente.

De forma geral a sensibilidade nas 5 direções apresentou valores entre $5,7044 \text{ V/m/s}^2$ e $6,1918 \text{ V/m/s}^2$, com desvios-padrão de até $0,0055 \text{ V/m/s}^2$ como mostrado na Fig. (5.7). Isto pode ser atribuído às variações decorrentes da montagem dos acelerômetros ADXL321 em suas estruturas ou ainda às formas geométricas de cada unidade sensora, bem como, às diferenças na massa das mesmas.

As Tabelas 5.14 a 5.17 mostram os valores de sensibilidade e as incertezas associadas à calibração pontual do Sistema 5, onde foi avaliada a estabilidade durante, aproximadamente, cinco meses, considerando diferentes valores de temperatura ambiente e de umidade relativa do ar. Para todos os casos o $v_{eff} > 100$, consequentemente, o fator de abrangência é igual a 2.

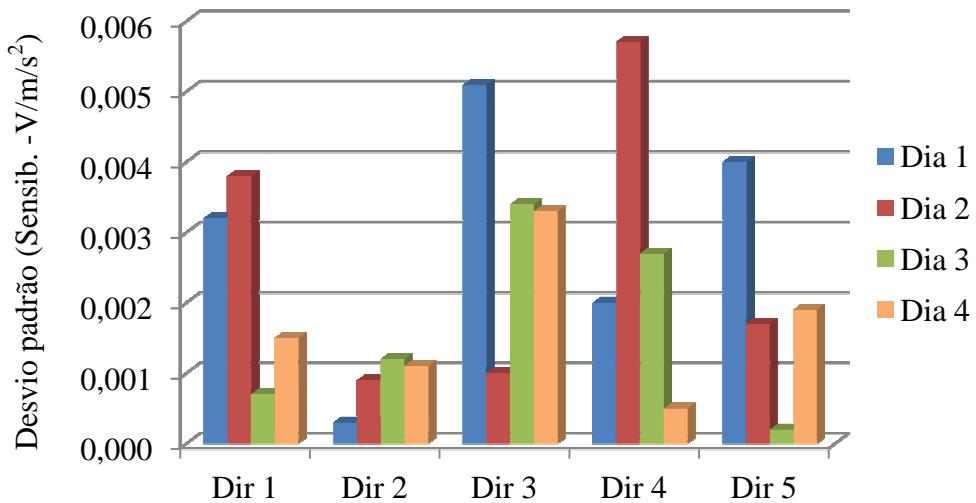


Figura 5.7 - Valores médios de desvio padrão associados à sensibilidade

Tabela 5.14 - Resultados da calibração incerteza (Sistema 5, experimento 1, data 09/02/11)

Sensibilidade – (V/m/s ²)					
Temperatura (28,0 ± 0,5) °C – Umidade relativa (42,0 ± 1,0) %					
Dia	Média	s	u _c	U	%
D1	5,8990	0,0032	0,1608	0,3217	5,45
D2	5,6969	0,0003	0,1553	0,3107	5,45
D3	6,1815	0,0051	0,1647	0,3295	5,33
D4	6,1319	0,0020	0,1634	0,3268	5,33
D5	6,1948	0,0040	0,1651	0,3302	5,33

Tabela 5.15 - Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 1, data 10/02/11)

Estabilidade – Sensibilidade – (V/m/s ²)					
Temperatura (26,0 ± 1,0) °C – Umidade relativa (45,0 ± 2,0) %					
Dia	Media	s	u _c	U	%
D1	5,8555	0,0038	0,1561	0,3122	5,33
D2	5,7252	0,0009	0,1526	0,3052	5,33
D3	6,2018	0,0010	0,1653	0,3306	5,33
D4	6,1966	0,0159	0,1654	0,3308	5,34
D5	6,1554	0,0017	0,1641	0,3281	5,33

Tabela 5.16 - Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 1, data 14/02/11)

Estabilidade - Sensibilidade – (V/m/s ²)					
Temperatura (27,0 ± 1,0) °C – Umidade relativa (42,0 ± 1,0)%					
Dia	Media	s	u _c	U	%
D1	5,8261	0,0007	0,1553	0,3106	5,33
D2	5,7072	0,0012	0,1521	0,3042	5,33
D3	6,1912	0,0034	0,1650	0,3301	5,33
D4	6,2069	0,0027	0,1654	0,3309	5,33
D5	6,1944	0,0002	0,1651	0,3302	5,33

Tabela 5.17 - Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 1, data 15/02/11)

Estabilidade - Sensibilidade – (V/m/s ²)					
Temperatura (28,0 ± 0,5) °C – Umidade relativa (53,0 ± 1,0)%					
Dia	Media	s	u _c	U	%
D1	5,8275	0,0015	0,1553	0,3107	5,33
D2	5,6890	0,0011	0,1516	0,3033	5,33
D3	6,1956	0,0033	0,1652	0,3303	5,33
D4	6,1855	0,0005	0,1649	0,3297	5,33
D5	6,1801	0,0019	0,1647	0,3295	5,33

A Tabela 5.18 apresenta os parâmetros estatísticos da análise da variância. Existem inúmeros programas computacionais e planilhas que calculam tais parâmetros. Nesta análise optou-se pelo aplicativo Matlab/Anova de um parâmetro (sensibilidade) e quatro tratamentos (dias).

Tabela 5.18 - Resultado da análise de variância Sistema 5, experimento 1

Parâmetro (sensibilidade) e quatro tratamentos (dias)						
Causas de variação	Somas de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F _{calculado}	valor-P	F _{tabelado}
Entre grupos	0,00114	3	0,00038	0,01	0,9989	2,774
Dentro dos grupos	2,52684	56	0,04512			
Total	2,52797	59				

A Figura 5.8 mostra o Diagrama de Caixa ou Desenho Esquemático para o Sistema 5 (experimento 1).

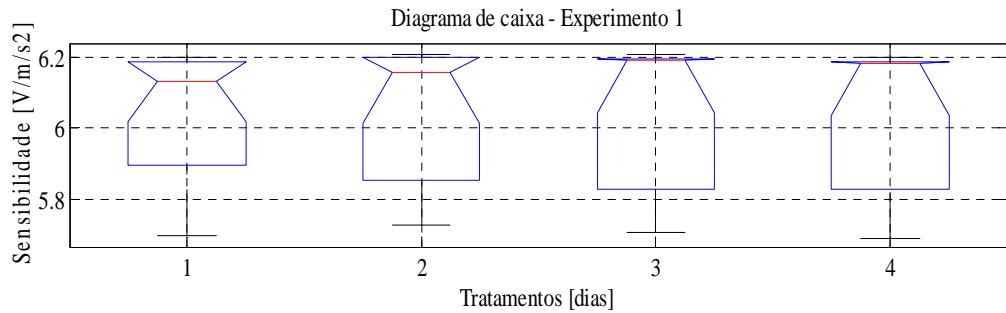


Figura 5.8 - Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 1

A Figura 5.8 fornece informações sobre os valores típicos, a assimetria, a dispersão e os dados discrepantes do conjunto de dados referentes à sensibilidade (V/m^2).

O programa computacional traçou dois retângulos (duas caixas): uma representa a “distância” entre a mediana (linha em cor vermelha), tanto para o quartil superior, quanto para o inferior.

A partir do quartil superior e do inferior foram desenhadas as linhas verticais até os últimos valores não discrepantes, tanto acima, quanto abaixo. A análise de variância mostra uma confiabilidade de 99,89% e fator calculado bem menor que o fator tabelado (2,774). As amostragens podem ser consideradas como pertencentes a uma mesma população.

Tabela 5.19 - Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 23/03/11)

Estabilidade - Sensibilidade – (V/m^2)					
Temperatura ($25,0 \pm 1,0$)°C – Umidade relativa ($44,0 \pm 1,0$)%					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,8204	0,0028	0,1551	0,3103	5,33
D2	5,6975	0,0002	0,1519	0,3037	5,33
D3	6,1470	0,0013	0,1638	0,3277	5,33
D4	6,0941	0,0007	0,1624	0,3249	5,33
D5	6,1678	0,0008	0,1644	0,3288	5,33

Tabela 5.20 - Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 24/03/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura ($26,0 \pm 0,1$) °C – Umidade relativa ($48,0 \pm 3,0$)%					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,8760	0,0017	0,1566	0,3133	5,33
D2	5,8052	0,0013	0,1547	0,3095	5,33
D3	6,1620	0,0016	0,1642	0,3285	5,33
D4	6,1343	0,0021	0,1635	0,3270	5,33
D5	6,0899	0,0039	0,1623	0,3247	5,33

Tabela 5.21 - Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 25/03/11)

Estabilidade – Ganho 5 - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura ($27,0 \pm 1,0$) °C – Umidade relativa ($53,0 \pm 5,0$)%					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,9067	0,0008	0,1574	0,3149	5,33
D2	5,8187	0,0046	0,1551	0,3102	5,33
D3	6,0770	0,0088	0,1621	0,3241	5,33
D4	6,0699	0,0015	0,1618	0,3236	5,33
D5	6,1948	0,0003	0,1651	0,3302	5,33

Tabela 5.22 - Resultados da calibração e incertezas (Sistema 5, experimento 2, data 26/03/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura ($2,0 \pm 1,0$) °C – Umidade relativa ($54,0 \pm 6,0$)%					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,9227	0,0002	0,1579	0,3157	5,33
D2	5,6837	0,0008	0,1515	0,3030	5,33
D3	6,0897	0,0151	0,1626	0,3251	5,34
D4	6,0790	0,0038	0,1620	0,3241	5,33
D5	6,1892	0,0017	0,1650	0,3299	5,33

A seguir são mostrados os resultados da ANOVA para o Sistema 5 (experimento 2).

Tabela 5.23 - Análise de variância Sistema 5, experimento 2

1 (um) parâmetro(sensibilidade) e 4 (quatro) tratamentos (dias)						
Fonte	Somas de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{calculado}$	valor-P	$F_{tabelado}$
Entre grupos	0,00919	3	0,00306	0,11	0,9552	2,774
Dentro dos grupos	1,59265	56	0,02844			
Total	1,60184	59				

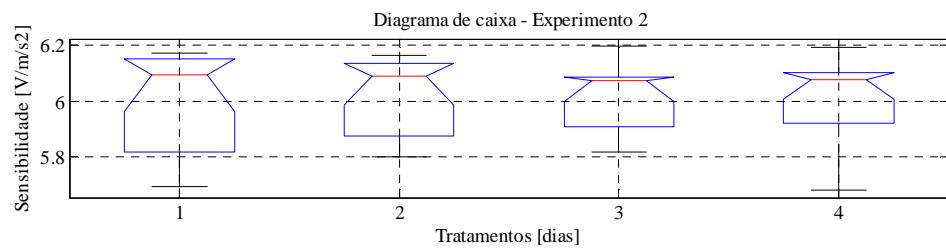


Figura 5.9 - Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 2

A análise de variância mostra uma confiabilidade de 95,52% e fator calculado menor que o fator tabelado (2,774) para o experimento 2.

Tabela 5.24 - Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 3, data 11/05/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura ($18,0 \pm 0,5^\circ C$) – Umidade relativa ($49,0 \pm 1,0\%$)					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,7997	0,0017	0,1546	0,3092	5,33
D2	5,6410	0,0016	0,1504	0,3007	5,33
D3	6,1379	0,0007	0,1636	0,3272	5,33
D4	6,0619	0,0069	0,1616	0,3233	5,33
D5	6,1147	0,0016	0,1630	0,3260	5,33

Tabela 5.25 - Resultados da calibração (Sistema 5, experimento 3, data 12/05/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura $(18,0 \pm 0,5)^\circ C$ – Umidade relativa $(64,0 \pm 0,5)\%$					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,8067	0,0040	0,1548	0,3096	5,33
D2	5,6426	0,0003	0,1504	0,3008	5,33
D3	6,0983	0,0010	0,1625	0,3251	5,33
D4	6,1038	0,0005	0,1627	0,3254	5,33
D5	6,1059	0,0066	0,1628	0,3256	5,33

Tabela 5.26 - Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 3, data – 13/05/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura $(16,0 \pm 1,0)^\circ C$ – Umidade relativa $(62,5 \pm 0,5)\%$					
Dia	Media	s	u_c	U	%
D1	5,8236	0,0017	0,1552	0,3105	5,33
D2	5,6336	0,0012	0,1502	0,3003	5,33
D3	6,0914	0,0042	0,1624	0,3248	5,33
D4	6,0404	0,0011	0,1610	0,3220	5,33
D5	6,1190	0,0023	0,1631	0,3262	5,33

Tabela 5.27 - Resultados da calibração e incerteza (Sistema 5, experimento 3, data 14/05/11)

Estabilidade - Sensibilidade – ($V/m/s^2$)					
Temperatura $(16,0 \pm 0,5)^\circ C$ – Umidade relativa $(64,0 \pm 1,5)\%$					
Di	Media	s	u_c	U	%
D1	5,7643	0,0015	0,1536	0,3073	5,33
D2	5,6344	0,0029	0,1502	0,3004	5,33
D3	6,0781	0,0008	0,1620	0,3240	5,33
D4	6,0382	0,0013	0,1609	0,3219	5,33
D5	6,0913	0,0032	0,1624	0,3247	5,33

A seguir são mostrados os resultados da ANOVA para o Sistema 5 (experimento 3).

Tabela 5.28 - Análise de variância Sistema 5, experimento 3

1 (um) parâmetro (sensibilidade) e 4 (quatro) tratamentos (dias)						
Fonte	Somas de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{calculado}$	valor-P	$F_{tabelado}$
Entre grupos	0,00868	3	0,00289	0,07	0,9733	2,774
Dentro dos grupos	2,16939	56	0,03874			
Total	2,17807	59				

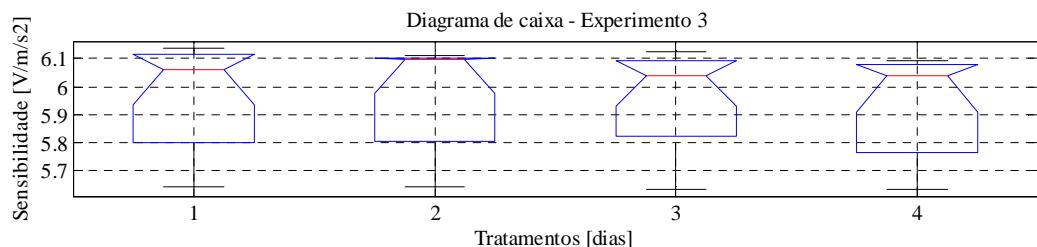


Figura 5.10 - Diagrama de caixa – Sistema 5, experimento 3

A análise de variância mostra uma confiabilidade de 97,33% e fator calculado bem menor que o fator tabelado (2,774) para o experimento 3.

A seguir são mostrados os resultados da ANOVA para o Sistema 5 e os três experimentos.

Tabela 5.29 - Análise de variância Sistema 5, experimentos 1, 2 e 3

1 (um) parâmetro(sensibilidade) e 12 (doze) tratamentos (dias)						
Fonte	Somas de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{calculado}$	valor-P	$F_{tabelado}$
Entre grupos	0,2282,	11	0,02075	0,55	0,8634	1,789
Dentro dos grupos	6,2887	168	0,03743			
Total	6,51708	179				

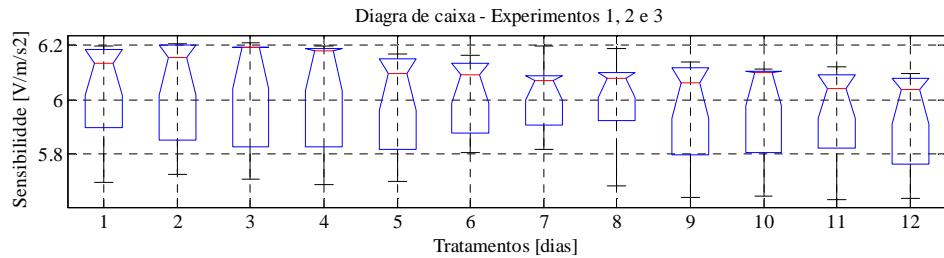


Figura 5.11 - Diagrama de caixa – Sistema 5, experimentos 1, 2 e 3

A análise de variância para os Experimentos 1, 2 e 3, ao longo de 12 dias, apresentou uma confiabilidade de 86,34% menor que 95% e fator calculado próximo do fator tabelado (1,789) para os experimentos 1, 2 e 3 analisados conjuntamente.

A hipótese nula sempre é rejeitada quando o fator calculado for maior que o fator tabelado ou se o quadrado médio entre grupos for maior que dentro dos grupos. Posteriormente foi constatado que um dos sensores desenvolvidos estava avariado.

Analizando os experimentos 1,2, e 3 em separado e durante 12 dias em datas bastante diferentes, nota-se uma boa estabilidade para os sensores estudados, embora suas geometrias sejam diferentes.

5.6. Resultados da calibração do Sistema 6

A seguir são apresentados os resultados da calibração dinâmica dos três sensores analisando as FRFs (Sistema 6) para os sinais no domínio do tempo e da freqüência, juntamente com a avaliação da incerteza. São apresentados, também, os resultados comparativos com as informações do fabricante relativas à calibração do ADXL321.

Durante os ensaios realizados com o Sistema 6, foram obtidos sinais no domínio do tempo e da freqüência para as cinco direções avaliadas durante os quatro dias de experimentos. A Figura 5.12 mostra os resultados obtidos no analisador digital para a direção 1 no primeiro dia. Os demais resultados, não são aqui apresentados, por serem similares.

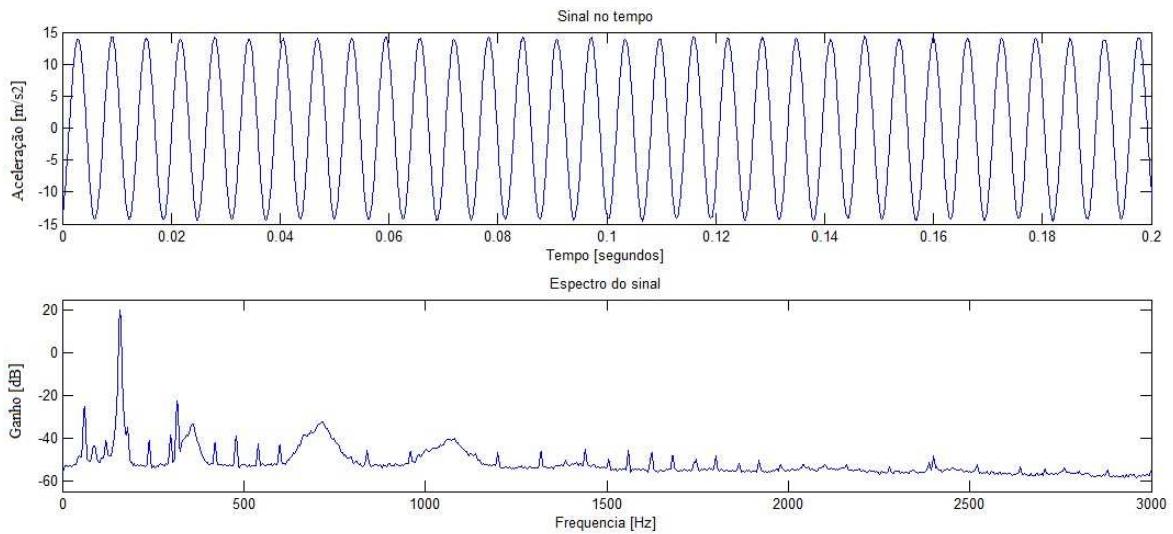


Figura 5.12 - Sinais no domínio do tempo e da freqüência para o Sistema 6 na direção 1 no primeiro dia

Os valores de referência fornecidos pelos respectivos fabricantes são: acelerômetro padrão B&K 8305S de sensibilidade $0,0998 \text{ V/m/s}^2$, excitador padrão B&K 4294 de freqüência $159,15 \text{ Hz}$, acelerômetro B&K 4371 de sensibilidades $0,997 \text{ V/m/s}^2$, acelerômetro capacitivo ADXL321 Analog divices de sensibilidade $0,05700 \text{ V/m/s}^2$.

Os resultados obtidos são: freqüência em todas as direções de $158,75 \text{ Hz}$, sensibilidade na direção 1 de $0,04761 \text{ V/m/s}^2$, direção 2 de $0,04928 \text{ V/m/s}^2$, direção 3 de $0,05155 \text{ V/m/s}^2$, direção 4 de $0,05104 \text{ V/m/s}^2$, direção 5 de $0,05203 \text{ V/m/s}^2$.

A calibração para o Sistema 6 mostra valores bem próximos aos fornecidos pelos fabricantes. Uma pequena diferença na freqüência de $0,4 \text{ Hz}$ e sensibilidade, nas cinco direções, um valor médio de $0,05104 \text{ V/m/s}^2$ e desvio padrão de $0,00183 \text{ V/m/s}^2$. Esta comprovação pode ser atribuída à montagem dos ADXL321 em suas estruturas ou ainda as formas geométricas de cada unidade sensora, bem como diferenças na massa das mesmas.

Entretanto nas Tabelas 5.30 e 5.31 pode-se também observar que o Sistema 6 se comporta de forma similar ao outros Sistemas já apresentados com precisão e exatidão adequadas.

Tabela 5.30 - Incerteza da calibração - Sistema 6 (freqüência)

Freqüência (Hz)					
Grandeza	Estimativa x_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (Hz)
X_i					
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	0,01 Hz	R	95×10^{-7}	∞	0,0000002
ΔE	3% (159,15 Hz)	N	1	∞	2,3812500
ΔAX	4,4% (159,15 Hz)	N	1	∞	3,4925000
ΔCSD	1,0% (159,15 Hz)	R	1	∞	0,9165436
ΔFFT	0,025% (159,15 Hz)	N	1	∞	0,0198438
Incerteza padrão combinada (u_c) em Hz					4,3253
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em Hz					8,6506
Incerteza do ganho em relação a 158,75 Hz					5,45%

A incerteza expandida associada à sensibilidade é de 5,45%, nas cinco direções, para k=2,0 e 95,45% de confiabilidade, tanto para a freqüência de vibração em relação a 158,75 Hz, quanto para a sensibilidade. A variável que mais contribuiu, em todos os casos, para a incerteza final, foi a incerteza associada à calibração dos ADXL321 com 3,4925 Hz em relação à freqüência e valor médio de 0,00113 V/m/s², desvio padrão de 0,00435 V/m/s² para a sensibilidade.

Tabela 5.31 - Incerteza da calibração - Sistema 6 Sensibilidade

Direção	(u_c) em V/m/s ²	(U) em V/m/s ²	Incerteza da sensibilidade em %
1	0,00130	0,00260	5,45% (0,04761 V/m/s ²)
2	0,00134	0,00268	5,45% (0,04928 V/m/s ²)
3	0,00140	0,00280	5,45% (0,05155 V/m/s ²)
4	0,00139	0,00278	5,45% (0,05104 V/m/s ²)
5	0,00142	0,00282	5,45% (0,05203 V/m/s ²)

5.7 - Resultados da calibração do Sistema 7

A calibração dinâmica do Sistema 7 permitiu avaliar: ganho, ângulo de fase e coerência analisando-se as FRFs entre o acelerômetro B&K padrão (calibrado a laser) e o acelerômetro B&K de referência usado durante as respectivas calibrações dos outros Sistemas. Os resultados obtidos são apresentados a seguir, bem como, uma comparação dos mesmos com os valores declarados no certificado de calibração do fabricante (B&K).

Os resultados da calibração para o Sistema 7 foram de 158,75 Hz em relação à freqüência e para a sensibilidade, respectivamente, de $0,09930 \text{ V/m/s}^2$ e $0,9931 \text{ V/m/s}^2$ para os dois acelerômetros-padrão B&K 4371. A avaliação da incerteza mostrou que para os acelerômetros-padrão B&K 4371 a incerteza expandida associada à freqüência foi de 5,7243 Hz, representando 3,61% de 158,75 Hz. Enquanto que os valores de incerteza para a sensibilidade foram de $0,00358 \text{ V/m/s}^2$ (3,61% em $0,09930 \text{ V/m/s}^2$), com probabilidade de abrangência de 95,45 % e $k = 2$.

A variável que mais contribuiu, em ambos os casos, para a incerteza final, foi a incerteza associada ao excitador padrão 2,3813 Hz em relação à freqüência e $0,00149 \text{ V/m/s}^2$ para a sensibilidade.

A Figura 5.13 mostra as FRF obtidas uma calibração direta por comparação, segundo recomendações da norma ISO 16063-22 (2003) do acelerômetro B&K 4371, usado durante as calibrações dos Sistemas, com o padrão B&K 8305S.

As FRFs demonstram que ambos os acelerômetros se comportaram de forma similar, haja vista que o comportamento linear apresentado por ambos até 4 000 Hz é idêntico, bem como a freqüência de ressonância (10 kHz), ângulo de fase de valor nominal próximo de 200° e coerência igual a 1.

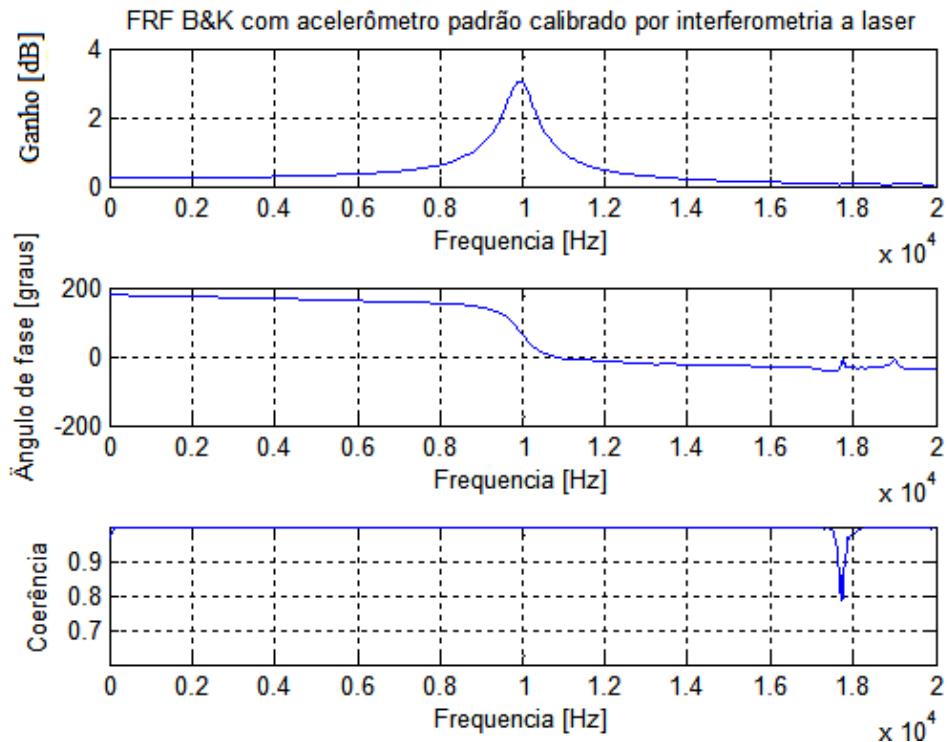


Figura 5.13 - FRF do Sistema 7

5.8 - Resultados da calibração do Sistema 8 e 9

A seguir são apresentados os resultados encontrados durante a calibração dinâmica do Sistema 8. Para efeito de comparação, também, são apresentados alguns resultados obtidos com o Sistema 9. Assim são apresentados resultados relativos aos efeitos cruzados, ganho, ângulo de fase e coerência analisando as FRFs entre o acelerômetro B&K padrão (calibrado a laser) e os três sensores. São apresentadas, também, análises estatísticas para as respectivas freqüências de ressonância para as cinco direções estudadas e a avaliação da incerteza.

Na Tabela 5.32 são apresentados os resultados obtidos após a realização dos testes que avaliaram a resposta em freqüência e as faixas de resposta linear de cada sensor.

Tabela 5.32 - Freqüência de ressonância e freqüência de operação linear dos sensores estudados

Direção	Freqüência de Ressonância [kHz]	Resposta Linear [kHz]
x1	5,40	3,70
y1	5,40	3,70
z1	5,30	3,50
x2	5,20	3,50
y2	5,20	3,50
Média [kHz]	5,30	3,50
Desvio Padrão[kHz]	0,10	0,11
IC [kHz] 95%	0,88	0,96

Observa-se através da análise dos resultados que os sensores estudados possuem uma freqüência de ressonância com valor em média de 5,30 Hz, com desvio padrão de 100 Hz e intervalo de confiança de 88 Hz e uma faixa de operação linear limitada em 3,5 kHz com desvio padrão de 110 Hz e intervalo de confiança de 96 Hz calculado com um nível de confiança de 95%.

A Figura 5.14 mostra a Função Resposta em Freqüência para o Sistema 9 (coluna à direita de 0 a 4 kHz) e de 0 a 10 kHz (coluna à esquerda) para a direção 1 no primeiro dia. Os demais resultados, não são apresentados, por serem similares.

Pela análise da FRF observa-se a região de ressonância e faixa linear para a direção y1 próximas às médias esperadas com uma coerência igual a 1 em freqüências de até 4 kHz.

Foram avaliados os efeitos cruzados para ambos os acelerômetros-padrão (primeira FRF), sensor de geometria quadrada (segunda FRF) e o sensor cilíndrico (terceira FRF). Comparando-se com os resultados obtidos com aqueles fornecidos pelo sistema padrão (Sistema 9) obteve-se a Fig. 5.15.

Observa-se pela análise das figuras que o comportamento nas direções principais e cruzadas é semelhante para os acelerômetros-padrão e os sensores estudados. Pode-se observar ainda que a diferença entre os sinais principais e cruzados para os sensores estudados, obteve-se maiores diferenças para o sensor 1 nas altas freqüências e melhores resultados nas médias e baixas freqüências; enquanto que para o sensor 2 obteve-se melhores resultados até mesmo nas altas freqüências.

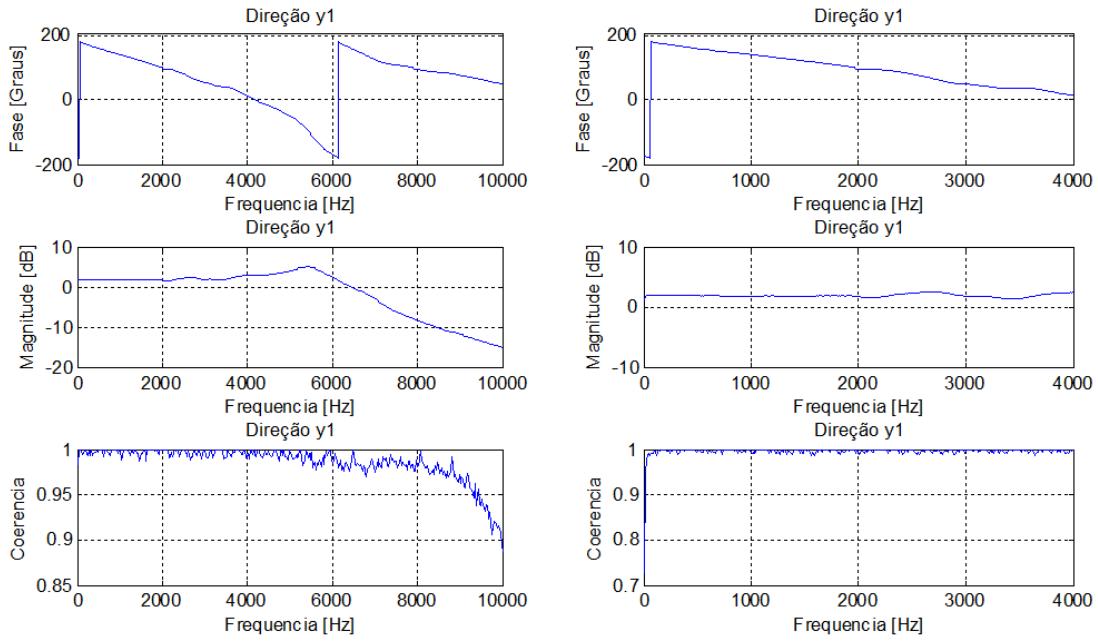


Figura 5.14 - FRFs dos Sistemas 9

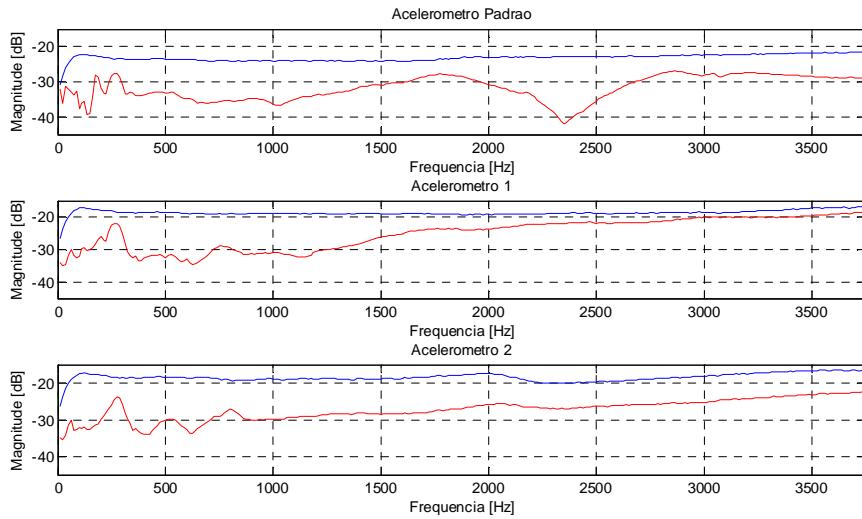


Figura 5.15 - Efeitos cruzados Sistemas 8 e 9

Os efeitos cruzados dos sensores avaliados ocorrem na medida em que os ADXL321 não são montados perfeitamente paralelos às estruturas metálicas dos sensores.

As Tabelas 5.33 à 5.36 mostram os resultados da avaliação da incerteza das medições efetuadas com o Sistema 8, referentes aos efeitos cruzados.

Tabela 5.33 - Incerteza da calibração - Sistema 8 - Ganco

Ganco (dB)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0002500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0025000
$\Delta API + \Delta AP2$	4%	N	1	∞	0,0200000
$\Delta CSI + \Delta CS2$	0,08%	N	1	∞	0,0004000
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0001250
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,0202
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,0403
Incerteza da sensibilidade em relação a 1 dB					4,03%

Tabela 5.34 - Incerteza da calibração - Sistema 8 – Ângulo de fase

Ângulo de fase (graus)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (°)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0° 0' 0"
ΔR	0	R	1	∞	0° 0' 1"
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0° 0' 1"
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0° 0' 9"
$\Delta API + \Delta AP2$	4%	N	1	∞	0° 1' 19"
$\Delta CSI + \Delta CS2$	0,08%	N	1	∞	0° 1' 38"
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0° 0' 18"
Incerteza padrão combinada (u_c) em graus					0° 0' 29"
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em graus					0°
Incerteza da sensibilidade em relação a 1°					0%

Tabela 5.35 - Incerteza da calibração - Sistema 8 - Coerência

Coerência (adimensional)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (adimensional)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	0,1	R	1	∞	0,0000141
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0002500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0025000
$\Delta API + \Delta AP2$	4%	N	1	∞	0,0210000
$CSI + \Delta CS2$	0,08%	N	1	∞	0,0004000
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0001250
Incerteza padrão combinada (u_c)					0,0202
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U)					0,0403
Incerteza da sensibilidade em relação a 1					4,03%

Tabela 5.36 - Incerteza da calibração - Sistema 8 – Efeito cruzado

Efeito cruzado (dB)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0025000
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0250000
$\Delta API + \Delta AP2$	4%	N	1	∞	0,2100000
$CSI + \Delta CS2$	0,08%	N	1	∞	0,0040000
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0012500
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,0202
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,0403
Incerteza da sensibilidade em relação a 10 dB					4,03%

Em todas as tabelas pode-se notar que a variável que mais contribuiu para as incertezas de medição associadas à ganho, fase, coerência e efeitos cruzados foi à incerteza do acelerômetro padrão.

5.9 - Resultados da calibração do Sistema 9

A calibração dinâmica do Sistema 9 avaliou os efeitos cruzados, a ganho, o ângulo de fase e a coerência através da análise das FRFs entre o acelerômetro B&K padrão (calibrado a laser) e os três sensores. São apresentadas, também, a determinação dos erros máximos do ganho e ângulo de fase, bem como, avaliação da incerteza.

A Figura 5.16 mostra as FRFs do sensor de geometria quadrada desenvolvido e do sensor padrão, Sistema 9. Mostra ainda, com uma resolução menor, a freqüência (Hz) para o eixo x. Este procedimento permitiu uma melhor análise dos parâmetros que foram coletados e usados na determinação do fator de amortecimento, utilizando-se o método da banda de meia potencia. Os três sensores desenvolvidos apresentaram valores de fator de amortecimento similares.

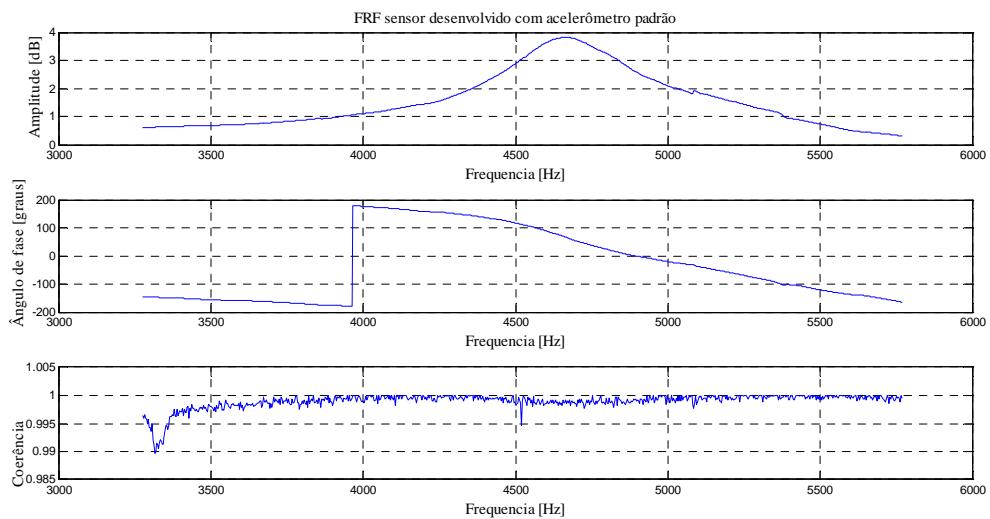


Figura 5.16 - FRFs do sensor geometria quadrada e padrão

Em seguida foram construídos os gráficos dos erros de ganho e ângulo de fase apresentados nas Fig. 5.17 e 5.18. Os referidos erros são o resultado da diferença entre os

ganhos e a fase de saída em repostas aos sinais de entrada, tanto para o sistema padrão, quanto para o sistema de medição desenvolvido. Estes erros são sistemáticos e, portanto, podem ser compensados.

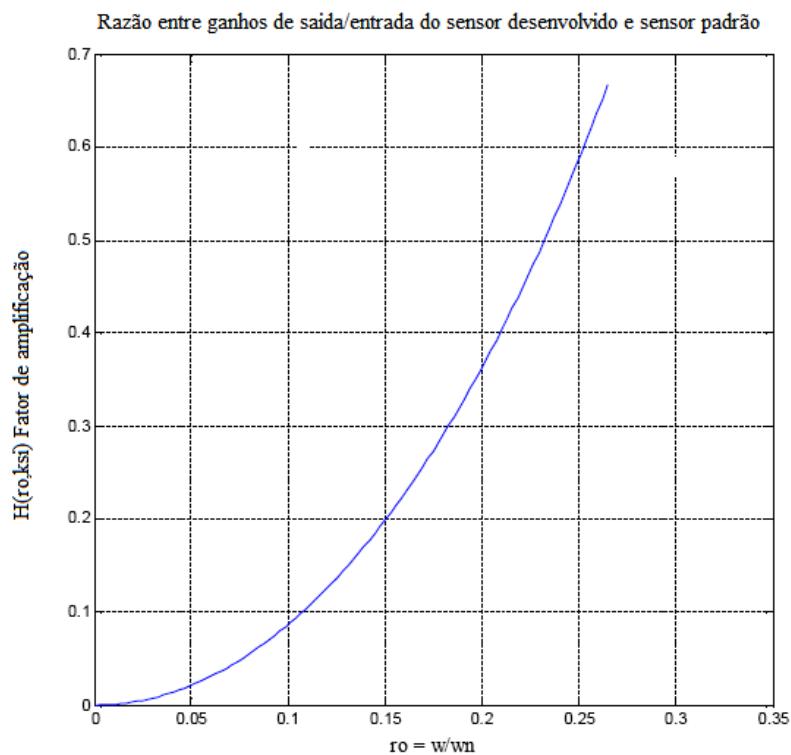


Figura 5.17 - Erro de ganho

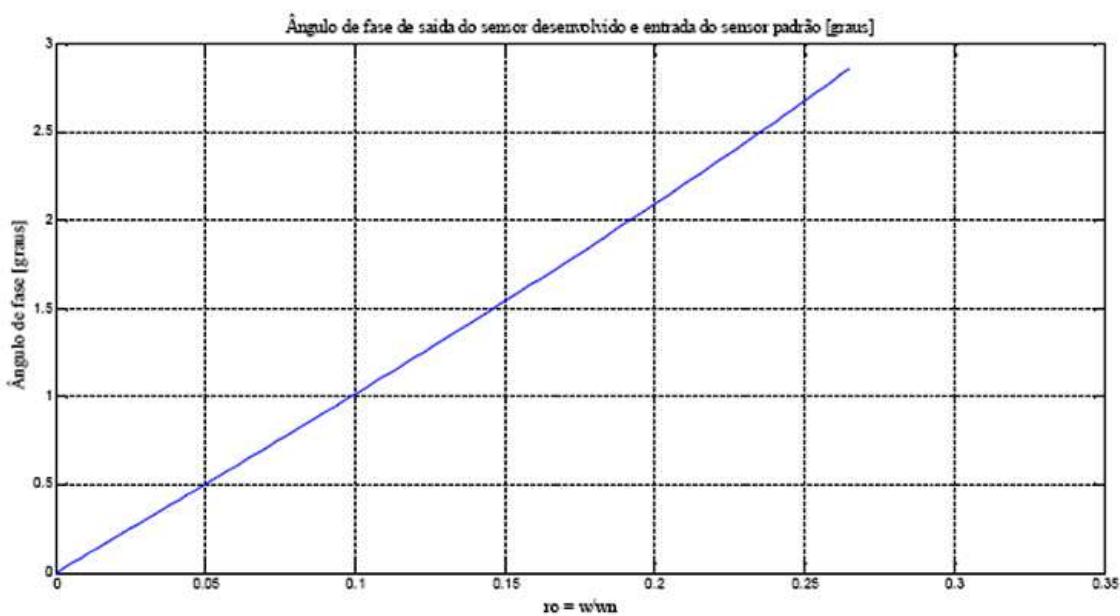


Figura 5.18 - Erro de fase do sistema de medição

É prudente e de bom senso que todos os acelerômetros, inclusive os comerciais operem até na faixa de um terço de sua freqüência natural; isto é, de 0 a 1,167 kHz no caso dos sensores desenvolvidos.

A fim de facilitar a compreensão, as figuras foram apresentadas na faixa correspondente a $\omega/\omega_n = 0,25$, que corresponde a um terço da freqüência natural. Analisando-se os gráficos pode-se identificar que o erro máximo para o ganho é de aproximadamente 0,6 dB e o erro máximo para a fase é linear e de aproximadamente de 2° . Erros muito embora desprezíveis, poderão ser compensados.

A Figura 5.19 mostra as FRFs do sensor quadrado com o acelerômetro padrão.

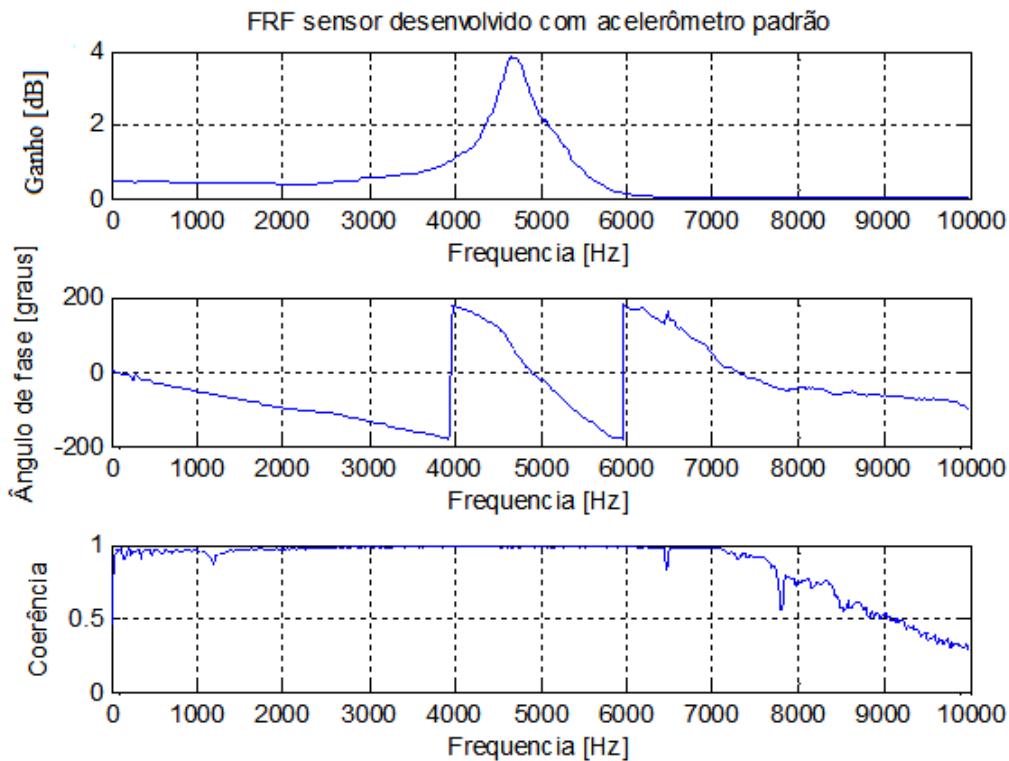


Figura 5.19 - FRFs do sensor quadrado

Pode-se observar e confirmar que o sensor desenvolvido e analisado tem boa linearidade até 3,5 kHz, coerência com pequenas variações, mas próxima de 1. O ângulo de fase é linear até o ponto de ressonância (4,0 kHz) com queda linear, justificada pela constante de tempo do capacitor; comportamento idêntico ao Sistema 4.

As Tabelas 5.37 a 5.40 mostram os resultados da avaliação da incerteza da calibração para o Sistema 9. Pode-se observar que o comportamento, o desempenho e os resultados são similares aos dos outros Sistemas. O mesmo foi observado para as cinco direções.

Tabela 5.37 - Incerteza da calibração - Sistema 9 - Ganho

Ganho (dB)					
Grandezas Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0002715
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0027150
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0,0238920
ΔCSD	1,0%	N	1	∞	0,0062700
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0001358
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB					0,0249
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em dB					0,0497
Incerteza da sensibilidade em relação a 1,086 dB					4,58%

Tabela 5.38 - Incerteza da calibração - Sistema 9 – Ângulo de fase

Ângulo de fase (graus)					
Grandezas Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (°)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0° 0' 0"
ΔR	0	R	1	∞	0° 0' 1"
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0° 0' 1"
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0° 0' 9"
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0° 1' 19"
ΔCSD	1,0%	N	1	∞	0° 0' 21"
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0° 0' 0"
Incerteza padrão combinada (u_c) em graus					0° 0' 29"
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100
Fator de abrangência (95,45%)					k=2,0
Incerteza expandida (U) em graus					0
Incerteza da sensibilidade em relação a 1°					0%

Tabela 5.39 - Incerteza da calibração - Sistema 9 - Coerência

Coerência (adimensional)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (adimensional)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	0,1	R	1	∞	0,0000141
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0002500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0025000
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0,0220000
ΔCSD	1,0%	N	1	∞	0,0057735
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0001250
Incerteza padrão combinada (u_c)				0,0229	
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)				>100	
Fator de abrangência (95,45%)				k=2,0	
Incerteza expandida (U)				0,0458	
Incerteza da sensibilidade em relação a 1				4,58%	

Tabela 5.40 - Incerteza da calibração - Sistema 9 – Efeito cruzado

Efeito cruzado (dB)					
Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0025000
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0250000
ΔAX	4,4%	N	1	∞	0,2200000
ΔCSD	1,0%	N	1	∞	0,0577350
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0012500
Incerteza padrão combinada (u_c) em dB				0,2288	
Grau de liberdade efetivo ($v_{eff.}$)				>100	
Fator de abrangência (95,45%)				k=2,0	
Incerteza expandida (U) em dB				0,4577	
Incerteza da sensibilidade em relação a 10 dB				4,58%	

Pode-se notar que a grandeza que mais contribui está relacionada com os sensores desenvolvidos. Entretanto, o Sistema 9 apresenta boa exatidão e precisão. Os demais resultados, não são apresentados, por serem similares.

5.10 - Resultados da calibração do Sistema 10

A calibração dinâmica do Sistema 10 foi efetuada para determinação da faixa dinâmica dos três sensores analisando as FRFs entre o acelerômetro B&K padrão e os três sensores.

A Figura 5.20 mostra os sinais de um ruído branco, filtrados em 2 kHz, 23%, que ao excitar, simultaneamente, o acelerômetro padrão e o sensor de geometria quadrada na direção x1, apresenta graficamente a faixa dinâmica para esta direção.

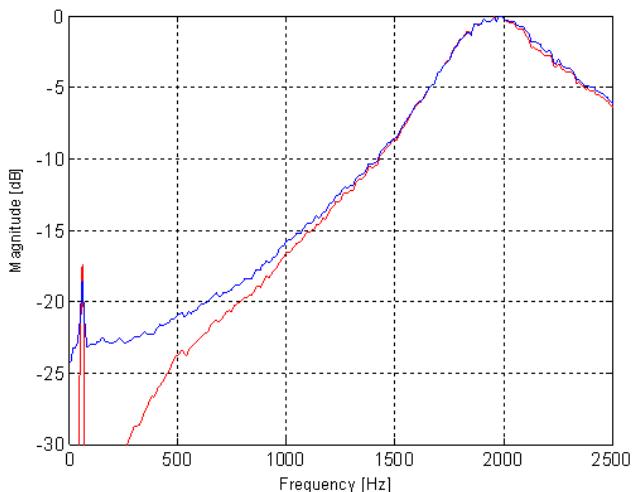


Figura 5.20 - Faixa dinâmica para direção x1

Observou-se que para uma freqüência próxima de 1 kHz, a variação de 2 dB teve uma queda em média de -19 dB, desvio padrão de 4 dB e intervalo de confiança de 3 dB (95%), entre os sinais adquiridos com os sistemas de medição padrão e desenvolvido. Ou ainda, sinais adquiridos com ganho abaixo de 21 dB, em relação ao sinal de referência do espectro, são considerados desprezíveis.

Espera-se que o comportamento do sistema de medição estudado, ao adquirir um sinal filtrado, se mantenha similar ao do sistema padrão dentro de sua faixa dinâmica de operação. Assim sendo, os testes foram repetidos para as outras direções e apresentaram resultados semelhantes como mostra a Tab. 5.41.

Tabela 5.41 - Faixa dinâmica para as diferentes direções

Direção	Faixa dinâmica (dB)
x1	21,328
y1	19,076
z1	17,341
x2	19,076
y2	26,692
Média (dB)	19,076
Desvio Padrão (dB)	3,6350
IC (db) 95%	3,1860

As Tabelas 5.42 e 5.43 mostram o cálculo da incerteza de medição para a ganho mínima e a faixa dinâmica medidas obtidas durante a calibração do Sistema 10.

Tabela 5.42 - Incerteza de medição - Sistema 10 (Ganho mínimo)

Grandeza X_i	Estimativa x_i	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0007500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0075000
ΔA	4,4%	N	1	∞	0,0660000
ΔA	2,1%	N	1	∞	0,0315000
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	0,0173205
ΔCS	0,04%	N	1	∞	0,0006000
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0003750
ΔFPB	1,5%	N	1	∞	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 sensibilidade em relação a 3 dB					5,25%

Tabela 5.43 - Incerteza da medição - Sistema 10 (faixa dinâmica, dB)

Grandeza Xi	Estimativa xi	DP	CS	GL	Incerteza padrão (dB)
$s(Leit.)$	0	N	1	∞	0
ΔR	1	R	1	∞	0,0001410
ΔGS	0,05%	N	1	∞	0,0047500
ΔAS	0,5%	N	1	∞	0,0475000
ΔA	4,4%	N	1	∞	0,4180000
ΔA	2,1%	N	1	∞	0,1999500
ΔCSD	1,0%	R	1	∞	0,1096966
ΔCS	0,04%	N	1	∞	0,0027500
ΔFFT	0,025%	N	1	∞	0,0026250
ΔFPB	1,5%	N	1	∞	0,1425000
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 sensibilidade em relação a 19 dB					5,25%

Pode-se notar que a grandeza que mais contribui para a incerteza de medição combinada é o sensor desenvolvido com 0,4180 dB. Entretanto com boa precisão e exatidão.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao término do trabalho, podem ser formuladas as seguintes conclusões:

- ✓ O Sistema desenvolvido, baseado no acelerômetro capacitivo ADXL321, funciona corretamente. O mesmo apresentou uma freqüência média de 159,50 Hz e desvio padrão igual a zero para os três ganhos avaliados (1, 2 e 5). Considerando que a freqüência de referência é de 159,15 Hz pode-se dizer que o sistema proposto possui boa exatidão. O erro, neste caso foi de 0,35 Hz, desprezível em relação ao valor verdadeiro convencional.
- ✓ O Sistema desenvolvido, para ganho de 1, apresentou valores de sensibilidade de $(1,3156 \pm 0,0182) \text{ V/m/s}^2$ e intervalo de confiança de $0,0126 \text{ V/m/s}^2$ (95%). Comparando estes valores com aqueles obtidos para o Sistema padrão, sensibilidade de $(1,1659 \pm 0,0076) \text{ V/m/s}^2$ e intervalo de confiança de $0,0053 \text{ V/m/s}^2$ (95%). Para o ganho de 2 apresentou valores de sensibilidade de $(2,8658 \pm 0,0405) \text{ V/m/s}^2$ e intervalo de confiança de $0,0281 \text{ V/m/s}^2$ (95%). Por sua vez, para o ganho de 5 a sensibilidade foi de $(6,2042 \pm 0,0082) \text{ V/m/s}^2$ e o intervalo de confiança de $0,0568 \text{ V/m/s}^2$ (95%). O Sistema apresentou boa estabilidade no período analisado e nas condições impostas.
- ✓ A incerteza expandida associada à freqüência de vibração, para todos os ganhos, foi de 5,46% em 159,50 Hz, para k=2,0 e 95,45% de abrangência. A variável

que mais contribuiu foi a incerteza associada à calibração da unidade sensora com 3,5090 Hz.

- ✓ A calibração dinâmica do Sistema desenvolvido mostrou que a FRF na direção de excitação apresentou uma variação máxima de 0,5 dB no intervalo considerado de 2,0 Hz a 5,0 kHz. A resposta em fase é linear na banda de 2,0 Hz a 4,0 kHz com queda linear, justificada pela constante de tempo do capacitor. O ganho da FRF cruzada é em média 8 dB menor que a apresentada na direção da excitação, a qual pode ser considerada adequada para as aplicações pretendidas para o sistema proposto.
- ✓ A incerteza expandida da calibração dinâmica é de 0,0500 dB para k=2 e 95,45% de abrangência. Esta incerteza representa 5,00% de 1 dB. A variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada ao sensor desenvolvido, sendo de 0,0220 dB.
- ✓ As três unidades sensoras, de geometrias diferentes, avaliadas durante quatro dias apresentaram valores médios de sensibilidade, que variaram entre 5,7044 V/m/s² e 6,1918 V/m/s², com desvios-padrão de até 0,0055 V/m/s². Isto pode ser atribuído à variações decorrentes da montagem dos ADXL321 em suas estruturas ou ainda às formas geométricas de cada unidade sensora, bem como, às diferenças na massa das mesmas.
- ✓ A freqüência para as cinco direções avaliadas foi de 158,75 Hz. Enquanto que a sensibilidade apresentou valores de 0,04761 V/m/s²; 0,04928 V/m/s²; 0,05155 V/m/s²; 0,05104 V/m/s² e 0,05203 V/m/s² para as direção 1, 2, 3 4 e 5, respectivamente. Estes valores são próximos aos fornecidos pelos fabricantes.
- ✓ A calibração dinâmica de dois acelerômetros-padrão, utilizando-se um ruído branco na faixa de 2 Hz a 20 kHz, mostrou que os sensores estudados possuem uma freqüência de ressonância com valor em média de 5,30 kHz, com desvio padrão de 100 Hz e intervalo de confiança de 88 Hz (95%). A faixa de operação

linear limitada em 3,5 kHz com desvio padrão de 110 Hz e intervalo de confiança de 96 Hz calculado com um nível de confiança de 95%.

- ✓ As análises das respectivas FRFs comprovam que o comportamento dos sensores desenvolvidos é similar ao padrão de referência, bem como a freqüência de ressonância é compatível com a do fabricante, isto é, 5,3 kHz.
- ✓ A avaliação dos efeitos cruzados para os acelerômetros-padrão, o sensor de geometria quadrada e o sensor cilíndrico 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.
- ✓ O fator de amortecimento (ζ) do sensor quadrado é de 8,77%. Os três sensores desenvolvidos apresentaram valores de fator de amortecimento similares.
- ✓ Os erros máximos respectivamente do ganho e ângulo de fase são: 0,6 dB e 2°.
- ✓ O sensor desenvolvido tem linearidade próxima a 3,5 kHz, coerência com pequenas variações, mas próxima de 1. O ângulo de fase é linear até o ponto de ressonância (4,0 kHz).
- ✓ A faixa dinâmica nominal do sensor de geometria quadrada na direção x1 é de 21 dB. Analisando-se todas as direções e comparando-se os sinais adquiridos com o sistema de medição padrão e o desenvolvido observou-se, para uma freqüência próxima de 1 kHz, que a variação de 2 dB ocorreu para uma queda em média de -19 dB, desvio padrão 3,6 dB e intervalo de confiança de 3,2 dB (95%). Ou ainda, sinais adquiridos com ganho nominal abaixo de 19 dB, em relação ao sinal de referência do espectro, são considerados desprezíveis. Pode-se afirmar então que a faixa dinâmica nominal para as cinco direções é de 19 dB, isto é, espera-se que o comportamento do sistema de medição estudado, ao adquirir um sinal filtrado, se mantenha igual ao do sistema padrão dentro de sua faixa dinâmica de operação.

- ✓ O programa computacional desenvolvido para a aquisição de sinais e análise dos dados apresentou bom desempenho.
- ✓ De forma resumida podem ser apresentadas as características do sistema desenvolvido: resolução de 0,0006 V; faixa dinâmica de 19 dB; sensibilidade $(6,1319 \pm 0,2169) \text{ V/m/s}^2$ e $\text{IC} = 0,1901 \text{ V/m/s}^2$; boa exatidão; precisão de $\pm 0,0183 \text{ V}$; incerteza expandida de aproximadamente 4,58% para 95,45 % de abrangência; resposta linear até 3,5 kHz; freqüência de ressonância ($\omega_n = 5,3 \text{ kHz}$); boa estabilidade; resposta em freqüência, ganho de 0,0497 dB, fase de zero grau, coerência de 0,0458 e efeitos cruzados de 0,4577 dB.

A partir destas observações e conclusões, algumas propostas de trabalhos futuros estão delineadas a seguir:

- ✓ Confecção de novos sensores com os acelerômetros capacitivos modelo ADXL321EB fornecido pelo fabricante em um circuito impresso facilitando a montagem e reduzindo significativamente os desvios de perpendicularidade e de paralelismo, tanto na usinagem de suas estruturas, quanto nas montagens e fixação dos mesmos.
- ✓ Melhorar o projeto eletroeletrônico do condicionador de sinais desenvolvido, visando a obtenção de um comportamento linear para o ângulo de fase.
- ✓ Aplicação do Método de Monte Carlo para a avaliação da incerteza, pois permitirá as comparações dos resultados para validação das metodologias propostas. Trata-se também de uma excelente ferramenta para a avaliação de incerteza de processos complexos de medição, além de não contradizer o ISO/TAG 4/WG 3 (2008).

CAPITULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, V. S. M.; MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V.; MORAIS SOUZA, M. Estudo da performance de um acelerômetro de baixo custo para aplicações industriais, V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM-2008, 25 a 28 de agosto de 2008, Salvador Bahia, Brasil. **Anais CONEM2008**, 7p.

ABRÃO, V. S. M.; MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V.; MORAIS SOUZA, M. Um acelerômetro de baixo custo para aplicações industriais, XV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 29/09 a 03/10/2008. Curitiba, PR. **Anais XV CREEM**, 6p.

ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUSA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. 2. ed. Editora Manole. 2010. 407p.

BARBARINI, F.; NATURESA, J. S.; GONÇALVES, L.; VON, R. Vibrações e Acelerômetros, novembro 2007, UNICAMP, 37 p.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Randon Data, Analysis and Measurements Procedures**, John Wiley & Sons Inc, 2000.

BONFIM, M. Medidas Elétricas, Conversores Digital/Analógico (D/A) e Analógico/Digital (A/D), DELT, UFPR, 2002, 4 p.

BRACKE, W.; PUERS, R.; HOOF, C. V. **Ultra low Power capacitive sensor interfaces**, Published by Springer, 2007, 110 p, <http://www.avaxhome.ws>, acessado em 13/11/2010.

BRAGA, N. C., 2011 www.newtoncbraga.com.br, acessado em 19/07/2011.

CAMBRIDGE, **International Dictionary of English**, University of Cambridge, New York, 1995, 1.774 p.

Catálogo da Analog Devices, 2007, 16 p.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Amortecimento: classificação e métodos de determinação**, 2010, ATCP, Engenharia Física São Carlos, SP, 14 p.

DRAPEL, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**, New York: Wiley, 1966. 407 p.

FIGUEIREDO, L. J.; GATANIZ, A. R.; LOPES, G. S.; PEREIRA, R. **Aplicações de Acelerómetros**, Monografia, IAS, Lisboa, Portugal, 2007, 12 p.

FILHO, S. N **Fundamentos sobre Ruídos parte III – Ruído branco e Ruído Rosa**, UFSC, www.ufsc.br, acessado em 19/07/2011, 4p.

FRAGA, D. F. **Projeto de um Equipamento para Ensaios de Vibração de Máquinas Rotativas**, dezembro 2009, Canoas, RS, Universidade Luterana do Brasil, TCC, 85 p.

FRANCHINI, D. **Análise do nível de vibrações verticais no assento de um trator agrícola**, 2007, Dissertação de Mestrado, Santa Maria, RS, 139 p.

FRUETT, F. **Introdução aos Sensores Microeletrônicos**, 2008, FEEC, CCS, UNICAMP, Campinas, SP, 36 p.

GOMES, D. W.; SANTOS, R. G.; QUINTINO, M. V., BRANDÃO, G. W., ARRUDA, C. **Acelerômetro**, Universidade de Caxias do Sul (UCS), 2004, 4.p.

INMETRO, **Guia para Expressão da Incerteza de Medição**, Rio de Janeiro, 3^a Edição Brasileira, 2003. 120p.

INMETRO. **Sistema internacional de Unidades – SI** janeiro 2007. 116p.

INMETRO, **Vocabulário Internacional de Metrologia Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados - VIM**, 2009. 77p.

ISO/TAG 4/WG 3: **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, Geneva, 2008, 131p.

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 16063-12, 2002/Cor 1:2008, ABNT, 2011.

ISO 16063-12:2002 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 12: Primary vibration calibration by the reciprocity method, ABNT, 2011.

ISO 16063-13:2001 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 13: Primary shock calibration using laser Interferometry, ABNT, 2011.

ISO 16063-15:2006 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry, ABNT, 2011.

ISO 16063-21, 2003/Cor 1:2009, ABNT, 2011.

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 16063-31:2009 Methods for the calibration of vibration and shock transducers- Part 31: Testing of transverse vibration sensitivity, ABNT, 2011.

LAVIERI, R. S. Métodos de navegação inercial aplicados a lançamentos submarinos, Dissertação de Mestrado, USP, 2011, 292 p.

LICHT, T. R.; ZAVERI, K., Calibration and Standards Vibration and Shock Measurements, 1981, publicação da B&K 36 p.

LIMA, S. R. S.; FREITAS, S. R. C.; KRUEGER, C. P. Perspectivas de utilização de sistemas microeletromecânicos (MEMS) visando a integração GPS/INS de baixo custo, UFPR, CPGCG, 2002, Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, p.082-087.

LINK, W. **Metrologia mecânica: Expressão da incerteza de medição.** 1997, 174 p.

NBR ISO/IEC 17025 “**Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**”. Janeiro 2005.

NEVES, R. S., 2003, <http://www.uninova.pt/i-control/rns/index.html>, acessado em 19/07/2011.

NIST TECNICAL NOTE 1297 **Guide lines for evaluating and expressing the uncertainty of measurement results**, National Institute of standards and technology. 1994.

NOGUEIRA, M. M.; MORIKAWA, S. R. K.; VALENTE, L. C.G.; BRAGA, A. M. B. **Metrological evaluation of an optical fiber accelerometer for Power transmission lines monitoring**, September 2006, ANAIS XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brasil, 5 p.

Oilfied Glossary, 2011, www.glossary.oilfield.slb.com/, acessado em 19/07/2011.

PAIVA, R. N. **Análise de resposta em freqüência**, aula 7, 2009, <http://xa.yimg.com/kq/group>, acessado em 19/05/2011.

PICCOLI, H. C. **Introdução ao estudo de vibração**, Unidade I, 2005, UFRG, Rio Grande, RS, 12 p.

REZENDE, C. R., **Correlação entre modelagem numérica e resultados experimentais na análise de estabilidade dinâmica do torneamento de ações**, 2006, Dissertação de mestrado, PUC/MG, 235 p.

RIPPER, G. P., DIAS, R. S.; GARCIA. G. A. **A importância da calibração de acelerômetros para a indústria automobilística**, DIAVI – Divisão de Metrologia em Acústica e Vibrações/Lavib - Laboratório de Vibrações, Duque de Caxias, RJ, 2006, **trabalho do INMETRO** 15p.

SANTOS, V. M. **Instrumentação e Medida, Transdução e Condicionamento Elétrico**, outubro 2003, Universidade de Aveiro, 35 p.

SCHMIDT V.; PEREIRA, M. M.; RIBAS, R. P.; ITURRIOZ, I.; FONSECA, J.J. **CADMEMS para geração automática e análise de estruturas comb-drive**, UFRS, 2009, 6 p.

SCHUHLI, L. A., **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**, 2007, Dissertação de mestrado, USP, São Carlos, SP, 119 p.

SEQUEIRA, F. V. H. **Monitoreo remoto para las cámaras de choque térmico de los laboratorios de estrés de Componentes Intel de Costa Rica**, Noviembre 2006, Informe final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Electrónica, 119 p.

SILVA, S., **Vibrações Mecânicas**, 2009, UNIOESTE, Foz do Iguaçu, PR, 151 p.

THOMSON, W. T. **Theory of vibration with applications**, third edition, Prentice Hall, 1988, 461 p.

UNIVATES Ferramentas de Análise: Aplicações da FFT, acessado em 19/07/2011, http://ensino.univates.br/~chaet/Materiais/Cap%EDtulo_12_Bloch.pdf,

UVB Estimação e Intervalo de Confiança, Aula 10, Faculdade On-line UVB, <http://www.uvb.br/main/index.html>, acessado em 19/07/2011.

VILLALOBOS, D. J.; CORREA, J. C. J; PÉREZ, A. M.; ZARATE, J. E.; GORDILHO, A. J. O. e MORALES, J. R. N. Modelado matemático de una viga en voladizo por la ecuación de Euller-Bernoull, 2009, **Memorias del XV Congreso Internaciona Anual de la SOMIM**, Obregón, Sonora, México, 366 p.