

Otimização do Sistema Experimental para a Calibração de Acelerómetros-Padrão em Regime de Alta-Frequência

Copyright, 2013, Carla Silva Pereira, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

No decorrer do estágio pude contar com o apoio e a orientação de diversas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento da dissertação, bem como para a motivação com que a realizei.

Agradeço aos meus pais pelo apoio constante que me ajudou a ter a força de vontade e os meios para realizar não só a dissertação mas todo o curso de Engenharia Mecânica.

Em segundo lugar agradeço à minha irmã e aos meus amigos pela grande força que me transmitiram sempre dando-me inspiração, partilha de conhecimentos e apoio nas alturas de maior trabalho.

Agradeço à Professora Doutora Helena Navas a orientação desta dissertação e a oportunidade de a inserir num estágio no IPQ, por acreditar nas minhas capacidades e por estar sempre disponível para me ajudar.

Agradeço à Doutora Isabel Godinho e ao Engenheiro Luís Ribeiro pela orientação do estágio, pela simpatia com que me receberam e com que me integraram no IPQ, pelos conhecimentos transmitidos ao nível da Metrologia, da Ótica entre outras áreas do conhecimento que foram de relevo para o trabalho, e pela disponibilidade para me ajudarem sempre que foi necessário.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à FCT-UNL e ao IPQ pelos conhecimentos de carácter teórico e pelos meios experimentais que me permitiram a obtenção de competências e formação.

Resumo

A dissertação foi enquadrada no âmbito do estágio realizado no Instituto Português da Qualidade, na área de Metrologia, no Laboratório de Aceleração e Vibrações, LAV.

O LAV tem como objetivos garantir a rastreabilidade da unidade de aceleração, possibilitando a sua disseminação a nível nacional, participar e coordenar projetos de investigação e desenvolvimento, através de comparações interlaboratoriais e apoiar a Metrologia legal.

Demonstra-se a relevância desta dissertação, ao nível de Metrologia num contexto global, através da exigência de qualidade e evolução por parte das entidades de Metrologia internacionais, do setor industrial e ao nível do consumidor. O tema do estudo surgiu da necessidade constante do LAV em melhorar as suas capacidades de calibração de acelerómetros-padrão por interferometria laser, bem como realizar a disseminação constante da unidade de aceleração.

A dissertação teve como objetivo utilizar o sistema interferométrico para a calibração de acelerómetros-padrão, em regime de alta frequência, considerando valores de frequência ≥ 1 kHz e amplitudes de aceleração entre $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Para este efeito pretendeu-se validar o método da Diferença de Fase, adequado às altas frequências, em comparação com o método da Contagem de Franjas, que constitui o método padrão para a calibração de acelerómetros.

Foi efetuada a calibração de dois sensores de aceleração, considerando 4 métodos de medição distintos, nomeadamente, o método da Contagem de Franjas, o método da Diferença de Fase, o qual se pretende validar, e ainda outros dois métodos, com vista a comparar os resultados obtidos. Considerou-se valores de amplitude de aceleração de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, no intervalo de frequências entre 40 Hz e 3 kHz. Foi efetuada a comparação e a validação dos resultados obtidos para a sensibilidade dos dois acelerómetros, com os dois métodos principais, e tendo em consideração o respetivo cálculo das incertezas de medição.

Palavras-chave

Aceleração

Acelerómetro-padrão

Calibração

Interferometria Laser

Incerteza

Abstract

The dissertation was framed within the internship performed at the Portuguese Institute of Quality, in the Metrology area, in the Acceleration and Vibration Laboratory, LAV.

The LAV aims to ensure the traceability of the acceleration unit, allowing its propagation in a national level, participate and coordinate research and development projects, though interlaboratory comparisons and further support the legal Metrology.

The relevance of this dissertation is demonstrated, to the level of Metrology, in a global context, as there is a demand for quality and evolution from the international Metrology entities, from the industry sector and at the consumer level. The theme of the study came from the LAV's constant need of improvement of its calibration capabilities of standard-accelerometers by laser interferometer as well as the constant propagation of acceleration unit.

The dissertation aimed to use the interferometry system for calibration of standard accelerometers in high-frequency regime, considering frequency values ≥ 1 kHz and amplitudes of acceleration between $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. For this purpose was performed the validation of the Phase Difference method, suitable for high frequencies, in comparison with the Fringe Counting method, which is the standard method for accelerometers calibration.

It was carried out the calibration of two acceleration sensors through 4 methods, namely the Fringe Counting method, the Phase Difference method, which is the object of validation, and other two methods, with the purpose of comparing the obtained results. It was considered acceleration amplitude values of $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ and $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ in the frequency range between 40 Hz and 3 kHz. It was performed the comparison and validation of the sensibility obtained results of the two accelerometers for the main methods and taking into account the calculation of the respective measurement uncertainty.

Key-Words

Acceleration

Standard Accelerometer

Calibration

Laser Interferometry

Uncertainty

Índice de Matérias

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	2
1.2	Objetivos da Dissertação.....	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Metrologia e as Principais Entidades	5
2.1	Metrologia.....	5
2.2	Instituto Português da Qualidade (IPQ).....	7
2.2.1	Laboratório Nacional de Metrologia (LNM).....	7
2.3	Associação Europeia de Institutos Nacionais de Metrologia (EURAMET)	9
2.3.1	Programa Europeu de Investigação Metrológica (EMRP).....	10
2.4	Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)	10
2.4.1	Comité International des Poids et Mesures (CIPM)	10
2.4.2	Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)	10
2.4.3	Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV).....	11
2.5	European Committee for Standardization (CEN).....	11
2.6	International Organization for Standardization (ISO)	11
3	Fundamentos Teóricos para a Calibração de Acelerómetros.....	13
3.1	Acelerómetros	13
3.1.1	Tipos de Acelerómetros	13
3.1.2	Efeito Piezoelétrico.....	14
3.1.3	Norma ISO 16063 - 11.....	15
3.2	Interferometria Laser	15
3.2.1	Princípio Físico da Interferometria Laser.....	15
3.2.2	Interferómetro de Michelson	16
3.2.3	Equipamento Utilizado no Interferómetro de Michelson.....	18
4	Métodos de Calibração de Acelerómetros-Padrão	23
4.1	Introdução	23
4.2	Método da Contagem de Franjas	24
4.3	Método da Razão de Frequências do Contador.....	25
4.4	Método do Ajuste das Velocidades	26
4.5	Método da Diferença de Fase.....	27
5	Procedimento Experimental.....	31

5.1	Introdução	31
5.2	Diferenças nos Sistemas Experimentais dos Acelerómetros.....	35
5.3	Sistema Experimental	36
5.4	Interferómetro de Michelson Modificado	38
5.5	Excitação do Movimento	40
5.5.1	Programa de Controlo de Vibração.....	41
5.6	Aquisição e Processamento de Dados	45
5.6.1	Parametrização e Aquisição de Dados	46
5.6.2	Processamento e Análise de Dados.....	49
5.7	Calibração dos Pré-Amplificadores de Carga	51
5.7.1	Importância da Calibração do B&K2626 e do B&K2635.....	52
5.7.2	Objetivo.....	53
5.7.3	Equipamento utilizado	54
5.7.4	Procedimento Realizado.....	54
5.7.5	Apresentação e Discussão de Resultados	54
5.7.6	Valores de Erro Médio	56
5.7.7	Conclusões	57
5.8	Calibração do Controlador de Vibração	58
5.8.1	Importância desta Calibração	59
5.8.2	Características do VR-8500.....	60
5.8.3	Equipamento Utilizado.....	60
5.8.4	Procedimento Realizado.....	61
5.8.5	Conclusões	62
6	Incertezas de Medição	63
6.1	Importância do Cálculo de Incertezas de Medição	63
6.2	Fundamentos Teóricos para o Cálculo de Incertezas.....	64
6.3	Tabelas Auxiliares Utilizadas no Balanço de Incertezas	71
6.4	Balanço de Incertezas e Cálculo da Incerteza Expandida	74
7	Apresentação e Discussão de Resultados	79
7.1	Acelerómetro B&K8305S.....	80
7.1.1	Síntese dos Resultados para o Acelerómetro B&K8305S.....	80
7.1.2	Variação da Sensibilidade do B&K8305S para os 3 valores de Aceleração	83
7.1.3	Variação dos Valores de Aceleração do B&K8305S.....	86
7.1.4	Comparação dos Valores de Incerteza para o Acelerómetro B&K8305S	88
7.1.5	Comparação dos 3 Métodos com o da Contagem de Franjas, B&K8305S	91

7.1.6	Comparação dos 3 Métodos com o da Diferença de Fase, B&K8305S	94
7.2	Acelerómetro Endevco7254A	97
7.2.1	Síntese dos Resultados para o Acelerómetro Endevco7254A	98
7.2.2	Varição da Sensibilidade do Endevco7254A para os 3 valores de Aceleração	99
7.2.3	Varição dos Valores de Aceleração do Endevco7254A	101
7.2.4	Comparação dos Valores de Incerteza para o Acelerómetro Endevco7254A	103
7.2.5	Comparação dos 3 Métodos com o da Contagem de Franjas, Endevco7254A	106
7.2.6	Comparação dos 3 Métodos com da Diferença de Fase, Endevco7254A	109
7.3	Comparação das 3 acelerações para o Método da Diferença de Fase.....	112
7.4	Comparação dos 2 Acelerómetros	113
8	Conclusões.....	117
	Bibliografia:	119

Índice de Figuras

Figura 2-1 Instituto Português da Qualidade [34].	7
Figura 2-2 Unidade de Metrologia Científica e Aplicada [34].	8
Figura 2-3 Laboratório de Aceleração e Vibrações [35].	9
Figura 3-1 Acelerómetro Piezoelétrico [45].	14
Figura 3-2 Interferómetro de Michelson.	17
Figura 4-1 Contador em Operação durante a Aquisição de Dados.	25
Figura 4-2 Interferómetro de Michelson ilustrando a Detecção Heterodina.	29
Figura 4-3 Sinal de Excitação e Sinais Óticos obtidos na Detecção Heterodina [44].	29
Figura 4-4 Figura de <i>Lissajous</i> [44].	30
Figura 5-1 Acelerómetro B&K8605S.	34
Figura 5-2 Acelerómetro Endevco7254A.	35
Figura 5-3 <i>Dummy mass</i> [10].	36
Figura 5-4 Sistema Experimental implementado.	37
Figura 5-5 Fotografia do Sistema Experimental.	38
Figura 5-6 Interferómetro de Michelson Modificado no Sistema Experimental.	39
Figura 5-7 Esquema de Blocos do Interferómetro de Michelson no Sistema.	39
Figura 5-8 Sistema de Excitação do Movimento.	41
Figura 5-9 Condições de Aceleração e Frequência do movimento.	43
Figura 5-10 Escolha da Invariabilidade do movimento.	44
Figura 5-11 Painel Frontal do Teste “seno”.	45
Figura 5-12 Placa de Aquisição e Processamento de Dados.	45
Figura 5-13 Programa de Parametrização e Aquisição de Dados.	47
Figura 5-14 Programa de Processamento e Análise de Dados.	49
Figura 5-15 Pré-Amplificador B&K2635.	52
Figura 5-16 Pré-Amplificador na Calibração de Acelerómetros.	53
Figura 5-17 Sistema Experimental de Calibração dos Pré-Amplificadores.	54
Figura 5-18 Gráfico Obtido para o B&K2626.	57
Figura 5-19 Gráfico Obtido para o B&K2635.	58
Figura 5-20 Controlador de Vibração.	59
Figura 5-21 Sistema Experimental de Calibração do Controlador de Vibração.	60
Figura 5-22 Ligações Frontais no Manual de Calibração do Controlador de Excitação.	61
Figura 5-23 Ligações Traseiras no Manual de Calibração do Controlador de Excitação.	61
Figura 7-1 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	84
Figura 7-2 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	85

Figura 7-3 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	85
Figura 7-4 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	86
Figura 7-5 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	87
Figura 7-6 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	87
Figura 7-7 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	90
Figura 7-8 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	90
Figura 7-9 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	91
Figura 7-10 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	93
Figura 7-11 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	93
Figura 7-12 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	94
Figura 7-13 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	96
Figura 7-14 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	96
Figura 7-15 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	97
Figura 7-16 Gráfico de Sensibilidade para o Endevco7254A com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	99
Figura 7-17 Gráfico de Sensibilidade para o Endevco7254A com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	100
Figura 7-18 Gráfico de Sensibilidade para o Endevco7254A com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	100
Figura 7-19 Gráfico de Aceleração do Endevco7254A com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	101
Figura 7-20 Gráfico de Aceleração do Endevco7254A com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	102
Figura 7-21 Gráfico de Aceleração do Endevco7254A com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	102
Figura 7-22 Gráfico da Incerteza obtida para o Endevco7254A para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	105
Figura 7-23 Gráfico da Incerteza obtida para o Endevco7254A para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	105
Figura 7-24 Gráfico da Incerteza obtida para o Endevco7254A para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	106
Figura 7-25 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	108
Figura 7-26 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	108
Figura 7-27 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	109
Figura 7-28 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.	111
Figura 7-29 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.	111
Figura 7-30 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.	112
Figura 7-31 Gráfico das 3 acelerações para o Método da Diferença de Fase.	113
Figura 7-32 Comparação dos 2 Acelerómetros para o Método da Diferença de Fase.	115
Figura 7-33 Comparação dos 2 Acelerómetros para o Método da Contagem de Franjas.	116

Índice de Tabelas

Tabela 5-1 Resumo dos Ensaios Efetuados.	32
Tabela 5-2 Caraterísticas de Medição do Acelerómetro B&K8305S.	33
Tabela 5-3 Caraterísticas de Medição do Acelerómetro Endevco7254A.	34
Tabela 5-4 Valores obtidos para o B&K2626 com Ganho 1 e 10.	56
Tabela 5-5 Valores obtidos para o B&K2635 com Ganho 1 e 10.	56
Tabela 5-6 Valores do Erro para o Pré-Amplificador B&K2626.	56
Tabela 5-7 Valores do Erro para o Pré-Amplificador B&K2635.	57
Tabela 6-1 Primeiros Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.	72
Tabela 6-2 Segundos Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.	72
Tabela 6-3 Terceiros Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.	73
Tabela 6-4 Quartos Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.	73
Tabela 6-5 Balanço de Incerteza para o Método da CF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$	75
Tabela 6-6 Incerteza Expandida para o Método da CF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$	76
Tabela 6-7 Balanço de Incerteza para o Método da DF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$	77
Tabela 6-8 Incerteza Expandida para o Método da DF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$	78
Tabela 7-1 Síntese dos 4 métodos para o B&K8305S.	81
Tabela 7-2 Síntese das Incertezas para o B&K8305S.	89
Tabela 7-3 Comparação face ao Método da CF, B&K8305S.	92
Tabela 7-4 Comparação face ao Método da DF, B&K8305S.	95
Tabela 7-5 Síntese dos 4 Métodos para o Endevco7254A.	98
Tabela 7-6 Síntese das Incertezas calculadas para o Endevco7254A.	104
Tabela 7-7 Comparação face ao Método da CF, Endevco7254A.	107
Tabela 7-8 Comparação face ao Método da DF, Endevco7254A.	110
Tabela 7-9 Comparação das 3 acelerações para o método da Diferença de Fase.	112
Tabela 7-10 Comparação dos dois Acelerómetros para o Método da DF.	114
Tabela 7-11 Comparação dos dois acelerómetros para o Método da CF.	115

Abreviaturas

- AETA – Área de Eletricidade, Temperatura e Acústica
- AV – Ajuste das Velocidades
- BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures*
- CCAUV – *Comité Consultatif de l'Acoustique, des Ultrasons et des Vibrations*
- CEN – *European Committee for Standardization*
- CENELEC – *European Committee for Electro Technical Standardization*
- CF – Contagem de Franjas
- CGPM – *Conférence Générale des Poids et Mesures*
- CIPM – *International Committee for Weights and Measures*
- CMC – Capacidades de Medição e de Calibração
- DF – Diferença de Fase
- DMET – Departamento de Metrologia
- EA – *European Accreditation*
- EMRP – *European Metrology Research Programme*
- EN – *European Standards*
- EURAMET – *European Association of National Metrology Institutes*
- FCT – UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- IPAC – Instituto Português de Acreditação
- IPQ – Instituto Português da Qualidade
- ISO – *International Organization for Standardization*
- LAV – Laboratório de Aceleração e Vibrações
- LabView® – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
- LNM – Laboratório Nacional de Metrologia
- LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

RFC – Razão de Frequências do Contador

SPQ – Sistema Português da Qualidade

SI – Sistema Internacional

SNM – Subsistema Nacional de Metrologia

UE – União Europeia

UMCA – Unidade de Metrologia Científica e Aplicada

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

Simbologia

a = Aceleração

$\Delta\phi$ = Amplitude de Fase

ξ = Amplitude de Deslocamento

θ_{ij} = Ângulo de Desvio do Raio

k = Campo Elétrico

c_i = Coeficiente de Sensibilidade

λ_0 = Comprimento de Onda de Afastamento dos Espelhos

λ = Comprimento de Onda da Radiação Laser

$s(q)$ = Desvio Padrão

Δy = Desfasamento Relativo de uma Onda

δ = Desvio Total

D = Densidade do Deslocamento de Carga Elétrica

ε = Diferença de Fase entre Duas Ondas Harmónicas

Δd = Distância Percorrida pelo Espelho

k = Fator de Expansão

f_e = Frequência de Excitação

f_0 = Frequência Ótica

G = Ganho

x_i = Grandeza de Entrada

y = Grandeza de Saída

GDL = Graus de Liberdade

v_{eff} = Graus de Liberdade Efetivos

U_c = Incerteza Combinada

U = Incerteza Expandida

u_i = Incerteza Padrão

$u(y)$ = Incerteza Padrão da Grandeza de Saída

$u(x_i)$ = Incerteza Padrão da Grandeza de Entrada

n = Índice do Prisma

\bar{q} = Média dos Valores Adquiridos

N = Número de Franjas de Interferência

ε_0 = Permissividade Elétrica

E = Plano Fixo

R_f = Razão de Frequências

S = Sensibilidade

V = Tensão

e = Tensão Longitudinal

q_j = Valor de uma Aquisição

1 Introdução

A dissertação de Mestrado em questão foi realizada no contexto do estágio decorrido no Instituto Português da Qualidade, IPQ, no Laboratório de Aceleração e Vibrações, LAV, integrado no Laboratório Nacional de Metrologia, LNM.

O estágio realizado, teve como tema de dissertação a Otimização do Sistema Experimental para a Calibração de Acelerómetros-Padrão em Regime de Alta-Frequência.

A Dissertação teve como orientadora na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, FCT-UNL, a Professora Doutora Helena Navas e como orientadora no IPQ a Doutora Isabel Godinho.

A Metrologia científica tem como objetivo assegurar a rastreabilidade das unidades de medida, a sua disseminação, o desenvolvimento de novos métodos de medição e a melhoria contínua das suas capacidades, contribuindo para o aumento da qualidade dos equipamentos, ensaios, produtos e serviços [36], os quais se inserem num contexto de carácter social. A participação em projetos de investigação e desenvolvimento científico, de cooperação e de comparação interlaboratorial promovem a partilha e a validação de capacidades e de competências, contribuindo para o desenvolvimento técnico-científico da sociedade. Neste sentido, o estudo desenvolvido no IPQ forneceu o seu contributo para a melhoria da qualidade da medição num contexto aplicável ao nível social.

No âmbito da Metrologia, o LAV tem por missão realizar a materialização, a manutenção e a disseminação da unidade de aceleração, bem como o desenvolvimento e a implementação de novos métodos e capacidades de medição, sendo a unidade de estudo de acelerómetros o $m \cdot s^{-2}$ [35].

Para o efeito utilizou-se a técnica experimental de interferometria laser, indicada atualmente como a metodologia padrão que apresenta maior rigor e exatidão ao nível da calibração de acelerómetros-padrão.

Acelerómetros, ou sensores de aceleração, consistem em transdutores tipicamente utilizados para medir amplitudes de movimento [1]. Verifica-se a sua aplicabilidade industrial, ao nível da Engenharia Mecânica, em diversas áreas de desenvolvimento, nomeadamente, a automação e a robótica. Estas vertentes de engenharia constituem áreas de aplicabilidade de acelerómetros ao demonstrar-se a capacidade de medir inclinações e rotações por meio de sistemas eletrónicos. Neste estudo foram considerados acelerómetros do tipo piezoelétrico [45].

Conforme mencionado, a calibração absoluta de acelerómetros-padrão pode ser efetuada por interferometria laser. Ao nível da dissertação este sistema experimental consiste num interferómetro de Michelson, o qual foi modificado com vista a utilizar não apenas um mas dois detetores óticos para

a aquisição do sinal. No interferómetro de Michelson mais elementar é usado apenas um detetor ótico, deteção homodina, o que permite usar o método da Contagem de Franjas. Este método primário permite a calibração de acelerómetros-padrão até um valor de frequência de excitação da ordem de 1 kHz [28], o que limita muito a sua aplicabilidade. Neste sentido, o LAV teve a necessidade de alargar o intervalo de medição de frequências para valores mais elevados, da ordem dos 3 kHz [27]. Para este efeito, foi necessário modificar o sistema interferométrico com vista a efetuar a deteção de dois sinais óticos, deteção heterodina. Esta modificação teve como objetivo validar o método da Diferença de Fase, método de calibração de acelerómetros-padrão em regime de alta frequência. A aplicação deste método permite estender o intervalo de medição de frequências acima de 1 kHz [18].

O método da Diferença de Fase permite a determinação do valor do deslocamento em função da amplitude de fase de dois sinais óticos, considerando a diferença de fase entre dois extremos do deslocamento [16]. Por dupla derivação absoluta do deslocamento em ordem ao tempo, obtém-se a respetiva amplitude de aceleração.

Através do sistema de calibração absoluto de acelerómetros-padrão procurou-se obter o deslocamento relativo em função do comprimento de onda da radiação laser e da frequência de excitação do movimento imposto [17]. Para o efeito o sistema experimental implementado é constituído por um interferómetro de Michelson modificado, um sistema de excitação de movimento, instrumentação associada e por um sistema de aquisição e tratamento de dados. Numa fase inicial procurou-se alcançar a otimização do sistema experimental através do alinhamento do sistema interferométrico e da obtenção de padrões óticos recombinados que melhor traduzem o movimento em estudo.

Neste documento, pretendeu-se dar a conhecer os pressupostos do tema escolhido para a dissertação de Mestrado, demonstrar a relevância científica da temática, descrever os procedimentos realizados, fazer a apresentação dos resultados obtidos, discuti-los, compará-los e validar o pretendido.

A nível global quis-se elaborar um estudo dedicado com vista a contribuir para a sustentabilidade social ao nível da qualidade tecnológica de equipamentos no sentido de fornecer um contributo no desenvolvimento científico que é constante nesta área.

1.1 Enquadramento

A Metrologia científica constitui um pilar fundamental da sociedade global ao nível da evolução tecnológica atual, sendo esta cada vez mais exigente em termos de qualidade dos equipamentos e instrumentação de medida. Esta vertente da qualidade suporta as políticas de inovação e investigação [34], existindo uma procura constante do melhoramento das técnicas associadas à calibração. Neste sentido, a Metrologia tem um grande impacto na economia e na sociedade em geral,

nas mais diversas áreas do conhecimento, em particular nos setores da indústria, comércio, telecomunicações, transportes, segurança, saúde, ambiente, etc. Atualmente existe uma ampla cooperação entre organismos nacionais e internacionais para o desenvolvimento e a partilha de conhecimentos e consequente crescimento tecnológico e científico de cada estado membro.

Com relação ao tema concreto desta dissertação, estudou-se o comportamento de transdutores piezoelétricos em termos do seu movimento. Desenvolveu-se o conhecimento dos instrumentos, das metodologias padrão, realizou-se o estudo das suas limitações bem como das incertezas de medição associadas.

Dada a limitação associada ao método da Contagem de Franjas utilizado na calibração primária de acelerómetros-padrão por interferometria laser, da ordem de $\lambda/2$, [31] utilizou-se o método da Diferença de Fase, tendo por base a interferometria relativa com deteção heterodina [19]. Enquanto na deteção homodina é suficiente a utilização de um detetor para a aquisição do sinal ótico, para a deteção da amplitude de fase são necessários dois detetores óticos para o processamento dos feixes interferométricos.

O estudo dos acelerómetros enquadra-se na Engenharia Mecânica em áreas de desenvolvimento como são os ensaios de vibração e choque, por exemplo em veios de transmissão e aplicados em situações onde ocorre o impacto mecânico.

1.2 Objetivos da Dissertação

De um modo geral pretendeu-se otimizar o sistema experimental, implementado no laboratório, para a medição e caracterização de acelerómetros-padrão, no que se refere à instrumentação utilizada. Seguidamente pretendeu-se efetuar a análise e a validação dos resultados, considerando a respetiva incerteza de medição calculada.

Não foi objetivo do trabalho realizar o desenvolvimento do sistema ótico.

Para fundamentar o estudo de carácter prático fundamentou-se a análise, de forma consistente, através de uma vasta pesquisa bibliográfica. Esta fase assentou em livros, manuais dos equipamentos e artigos científicos.

Numa segunda fase, procurou-se otimizar o sistema experimental para a calibração de acelerómetros-padrão em regime de alta frequência, fazendo o alinhamento dos componentes óticos bem como da parte elétrica.

Numa terceira fase, considerando valores de frequência num intervalo de medição entre os 40 Hz e os 3 kHz, bem como amplitudes de aceleração entre $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, procedeu-se à

aquisição e processamento dos dados. Foram realizadas diversas medições para cada valor de frequência e aceleração escolhidos.

Seguiu-se o tratamento dos dados através dos princípios da análise estatística dos resultados obtidos, fazendo a síntese dos mesmos. Tendo como cerne da questão cada um dos dois transdutores piezoelétricos. Teve-se como objetivo final realizar um estudo acerca do seu comportamento em operação. Procedeu-se à sua análise em termos dos quatro métodos de estudo.

Seguidamente determinou-se as incertezas-padrão associadas às medições realizadas de acordo com os respetivos modelos matemáticos e considerando a metodologia GUM - Guia para a Expressão de Incertezas de Medição [4]. O cálculo deste intervalo de valores associado a uma medição consiste atualmente numa necessidade dos laboratórios ao nível da calibração metrológica.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento está organizado de forma a apresentar os assuntos em 9 capítulos fundamentais.

No primeiro capítulo, de carácter introdutório, procedeu-se à apresentação da dissertação, ao nível do local de realização da mesma, dos seus intervenientes e pressupostos de carácter teórico. Explicou-se a importância do tema em estudo, descreveu-se os objetivos principais e por fim apresentou-se a estrutura organizacional do documento.

No segundo capítulo fez-se uma contextualização do tema no qual foram apresentados os principais organismos institucionais de Metrologia ao nível nacional bem como internacional.

No terceiro capítulo realizou-se uma abordagem acerca dos fundamentos teóricos nos quais se baseou o estudo. Nesta parte descreveu-se de forma teórica as principais temáticas relevantes neste contexto.

No quarto capítulo procedeu-se à descrição dos métodos utilizados para a calibração de acelerómetros-padrão por interferometria laser. Estes métodos foram objeto de estudo constante e de grande importância para a realização da dissertação.

No quinto capítulo deu-se a conhecer os procedimentos experimentais realizados para a montagem e aquisição de dados, com vista ao cumprimento dos pressupostos do tema. Fez-se a descrição de procedimentos auxiliares aos procedimentos do tema da dissertação. Foram ainda apresentados procedimentos auxiliares ao tema.

No sexto capítulo foram apresentados os pressupostos subjacentes ao cálculo de incertezas de medição, a sua adaptação ao contexto da dissertação e por fim o exemplo para uma dada frequência

e aceleração, de todos os balanços de incerteza de medição associados aos métodos utilizados, os quais foram realizados para toda a extensão de frequência e aceleração consideradas.

No sétimo capítulo foram apresentados e discutidos os resultados experimentais resultantes da aquisição, análise e comparação dos dados obtidos com vista ao cumprimento do pressuposto da dissertação.

No oitavo capítulo foram apresentadas sucintamente as conclusões acerca dos resultados obtidos e da validade dos métodos utilizados para o estudo.

2 Metrologia e as Principais Entidades

O tema em estudo assentou em normas e metodologias definidas por diversas organizações de Metrologia, à escala mundial. Neste capítulo encontra-se, em termos de Metrologia científica, os temas e as instituições de maior relevância. De acordo com o tema da dissertação e com as relações nacionais e internacionais do IPQ, procurou-se integrar o desenvolvimento desta dissertação numa sólida base de credibilidade institucional.

No contexto da Metrologia científica, o IPQ assegura a representação nacional em inúmeras estruturas internacionais relevantes para a sua missão, nomeadamente, tais como as que se indicam a seguir:

- Associação Europeia de Institutos Nacionais de Metrologia (EURAMET);
- Programa Europeu de Investigação Metrológica (EURAMET-EMRP);
- *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM);
- *Comité International des Poids et Mesures* (BIPM-CIPM);
- *Conférence Générale des Poids et Mesures* (BIPM-CGPM);
- *Comité Consultatif de l'Acoustique, des Ultrasons et des Vibrations* (BIPM-CCAUV);
- *European Committee for Standardization* (CEN);
- *International Organization for Standardization* (ISO).

2.1 Metrologia

A Metrologia é a ciência da medição. Esta divide-se em três vertentes principais [24]:

- Metrologia científica ou fundamental;
- Metrologia aplicada ou industrial;

- Metrologia legal.

Metrologia científica ou fundamental:

Este é o tipo de Metrologia no qual se insere a dissertação e neste sentido deu-se maior ênfase à sua descrição. Esta vertente da Metrologia constitui o mais alto nível devido à exigência de rigor e exatidão dos métodos e resultados de medição. A Metrologia científica abrange três áreas de aplicabilidade [24]:

- A definição das unidades de medida reconhecidas internacionalmente;
- A realização de unidades de medida através de métodos científicos;
- O estabelecimento de cadeias de rastreabilidade [38] através da determinação do valor de uma medição com a respetiva incerteza associada [33], documentação da mesma e disseminação desse conhecimento.

Os objetivos desta vertente de Metrologia são [34]:

- A definição, realização, desenvolvimento e manutenção das unidades de medida das grandezas de base e suas derivadas;
- A disseminação dos padrões das unidades de medida;
- O desenvolvimento e a implementação de novos métodos e capacidades de medição;
- Garantir a rastreabilidade das unidades de medida que lhe estão atribuídas, possibilitando a sua disseminação;
- Realizar a organização e desenvolvimento de medições, manutenção das mesmas e sua normalização.

Metrologia aplicada ou industrial:

A Metrologia aplicada ou industrial visa garantir o funcionamento adequado dos instrumentos de medição utilizados na indústria, com vista a assegurar a qualidade dos mesmos num contexto social.

Metrologia legal:

A Metrologia legal abrange:

- A forma como a Metrologia influencia a transparência constitucional e económica;
- As aplicações comerciais, fiscais, de proteção do ambiente, da conservação da energia, da saúde, da segurança, etc., que cada Estado entende regulamentar no seu território;
- A aprovação de modelos de instrumentos de medição;
- A legislação metrológica e a promoção da sua aplicação;
- Realização de ações de formação.

2.2 Instituto Português da Qualidade (IPQ)

Apresenta-se o IPQ, sendo dado ênfase ao seu funcionamento bem como à importância do mesmo enquanto organismo integrado na sociedade.

O Instituto Português da Qualidade, I. P., é um instituto público que, nos termos da sua lei orgânica aprovada pelo Decreto-Lei 71/2012, de 21 de março, tem por missão a coordenação do Sistema Português da Qualidade, SPQ, e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e a coordenação de atividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da ação dos agentes económicos, bem como o desenvolvimento das atividades inerentes à sua função de laboratório nacional de metrologia [32]. De seguida apresenta-se o edifício principal do IPQ.



Figura 2-1 Instituto Português da Qualidade [34].

2.2.1 Laboratório Nacional de Metrologia (LNM)

O LNM, em conformidade com o disposto na Portaria nº 23/2013, de 24 de janeiro, tem a seu cargo a Metrologia científica e aplicada do IPQ e é responsável pelo desenvolvimento do Subsistema Nacional de Metrologia no respeitante aos padrões metrológicos nacionais [34]. Compete-lhe designadamente:

- Exercer as funções de Instituição Nacional de Metrologia, representando o IPQ, nos órgãos de coordenação técnica das organizações europeias e internacionais de metrologia;
- Promover a dinamização do subsistema de Metrologia;

- Realizar e manter os padrões nacionais das unidades de medida da responsabilidade direta do IPQ;
- Promover e coordenar a realização dos padrões nacionais descentralizados;
- Assegurar a sua rastreabilidade ao sistema internacional de unidades;
- Desenvolver e participar em projetos europeus e internacionais de investigação e desenvolvimento metrológico;
- Organizar e participar em comparações interlaboratoriais de padrões e instrumentos de medição;
- Calibrar padrões de referência e instrumentos de medição dos laboratórios acreditados e de outras entidades;
- Realizar ensaios de controlo metrológico de instrumentos de medição, produzir e certificar materiais de referência.

Na figura seguinte apresenta-se uma vista panorâmica do IPQ.



Figura 2-2 Unidade de Metrologia Científica e Aplicada [34].

2.2.1.1 Laboratório de Aceleração e Vibrações (LAV)

De seguida faz-se uma descrição sucinta do LAV, laboratório onde é realizada a componente prática da dissertação, descrevendo os seus objetivos e pressupostos.

O LAV tem como objetivos essenciais [35]:

- Garantir a rastreabilidade da unidade de aceleração, $m \cdot s^{-2}$, possibilitando a sua disseminação a nível nacional;
- Participar ou coordenar projetos de I&D e comparações interlaboratoriais;
- Apoiar a Metrologia legal;

- Melhorar continuamente as suas capacidades de medição através da implementação de novos métodos experimentais;
- Realizar a calibração primária permitindo assegurar e disseminar a rastreabilidade nacional da unidade;
- Efetuar a realização de ensaios de vibração para o estudo e a determinação de características de equipamentos, componentes eletrónicos, elétricos e mecânicos.

O metro é a unidade de base do Sistema Internacional, SI, para a medição do deslocamento, tendo como unidades derivadas da anterior, o metro por segundo e o metro por segundo quadrado.

Esta é a unidade de medida que se pretendeu disseminar no LAV, dado que o sensor a calibrar é sujeito a uma amplitude de movimento. A unidade de aceleração no SI para a aceleração é o $m \cdot s^{-2}$, tendo sido esta a unidade de medida com maior importância neste estudo.

As relações matemáticas entre deslocamento, velocidade e aceleração permitem obter experimentalmente uma unidade SI de medida do deslocamento e convertê-la posteriormente na unidade que se pretende medir ao nível da aceleração. Este é o caso que surgiu no âmbito desta dissertação, na qual se obteve a aceleração por dupla derivação do deslocamento em relação ao tempo.

Seguidamente são apresentadas algumas imagens ilustrativas do trabalho realizado pelo LAV do IPQ.

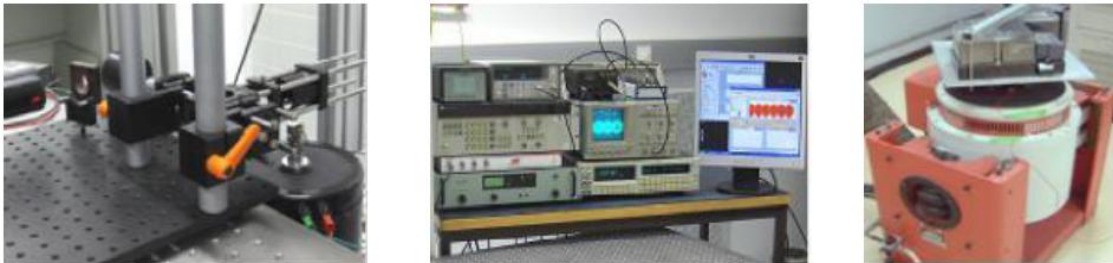


Figura 2-3 Laboratório de Aceleração e Vibrações [35].

2.3 Associação Europeia de Institutos Nacionais de Metrologia (EURAMET)

A EURAMET, enquanto organização de Metrologia num contexto Europeu, visa coordenar a promoção e a cooperação entre os laboratórios nacionais de Metrologia e os institutos designados dos países membros [22]. Ao nível metrológico esta organização tem um papel fundamental no desenvolvimento, na investigação e na cooperação técnico-científica nos diversos domínios de intervenção. A EURAMET incentiva e dinamiza a transferência de conhecimentos entre os seus membros.

2.3.1 Programa Europeu de Investigação Metrológica (EMRP)

O EMRP visa proporcionar aos institutos nacionais de metrologia europeus, bem como a organizações industriais e académicas, a cooperação em projetos conjuntos de pesquisa nas diversas áreas de investigação metrológica [25]. Esta iniciativa permite acelerar os processos de inovação nas áreas em que os recursos e tomadas de decisão são necessários. O EMRP foi dinamizado pela EURAMET e é apoiado pela União Europeia, UE.

2.4 Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

O BIPM, foi criado pela Convenção do Metro e tem a sede em Paris, França [6]. Esta instituição opera sob a supervisão do CIPM tendo como objetivo fornecer os alicerces para um sistema de medidas sólido e coerente a nível mundial. Estabelece e define a cadeia hierarquizada de padrões de medida, rastreáveis ao SI, sendo efetuada a disseminação direta das unidades, sustentada pela realização de comparações internacionais de padrões de medição. O BIPM tem uma equipa internacional com cerca de 70 anos, tendo o estatuto nacional de organização francesa intergovernamental.

2.4.1 Comité International des Poids et Mesures (CIPM)

O CIPM, é composto por 18 pessoas, uma de cada nacionalidade diferente [3]. A sua tarefa principal consiste em promover em todo o mundo a uniformidade em unidades de medida por ação direta ou através de projetos de resoluções da *Conférence Générale des Poids et Mesures*. Desde 2011 que o CIPM se reúne todos os anos, em duas sessões por ano com vista a discutir os relatórios que lhes são apresentados pelos seus organismos consultores.

2.4.2 Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

A CGPM é composta por delegados dos governos dos estados membros e por observadores da CGPM [5].

A CGPM recebe anualmente o relatório do CIPM sobre o trabalho desenvolvido e discute as medidas necessárias para assegurar a evolução e o aperfeiçoamento do SI. A CGPM avalia os resultados das determinações metrológicas fundamentais bem como de diversas organizações científicas internacionais. Assim esta instituição decide todas as grandes questões relativas à organização e ao desenvolvimento do BIPM. A CGPM reúne-se em Paris, geralmente uma vez a cada 4 anos.

2.4.3 Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV)

O CCAUV foi criado em 1998. Tem por objetivo realizar o seu trabalho na organização de comparações-chave nos domínios da acústica, ultra-sons e vibração [2].

2.5 European Committee for Standardization (CEN)

O CEN constitui uma associação internacional sem fins lucrativos com sede em Bruxelas. Visa facilitar negócios num contexto europeu, remover barreiras comerciais para a indústria, oferecendo uma plataforma de desenvolvimento de normas europeias bem como de especificações técnicas [20].

O CEN é a única organização europeia reconhecida, de acordo com a Diretiva 98/34/CE, para o planeamento, elaboração e adoção de normas Europeias em todas as áreas com atividade económica. O novo regulamento da UE relativo à normalização europeia foi adotado pelo Parlamento Europeu e pelo Conselho da União Europeia, tendo entrado em vigor em 1 de janeiro de 2013.

Estas normas têm um estatuto único uma vez que são normas nacionais para cada um dos 33 países membros. Em termos de um mundo global, a necessidade de existir normas internacionais é fundamental [20].

2.6 International Organization for Standardization (ISO)

A ISO é a instituição mais importante do mundo ao nível do desenvolvimento de normas. As normas internacionais conferem estatuto na arte de atribuir especificações aos produtos, serviços e boas práticas de trabalho. Contribui ainda para tornar a indústria mais eficiente e eficaz [39].

A ISO foi fundada em 1947 e desde essa altura que tem publicado mais de 19500 normas internacionais, cobrindo quase todos os aspetos tecnológicos e de negócios.

3 Fundamentos Teóricos para a Calibração de Acelerómetros

3.1 Acelerómetros

A diversidade de acelerómetros existente no mercado resulta da sua grande aplicabilidade em diversas funções, como a medição do alcance, da frequência natural e do amortecimento. A principal diferença entre os acelerómetros dos diferentes tipos reside no método de deslocamento da massa. As principais variáveis de interesse no estudo de acelerómetros são a frequência natural, o coeficiente de amortecimento e a sensibilidade [10].

3.1.1 Tipos de Acelerómetros

Existem 4 tipos distintos de acelerómetros [42]:

- Acelerómetros Potenciométricos;
- Acelerómetros LVDT;
- Acelerómetros de Relutância Variável;
- Acelerómetros Piezoelétricos.

3.1.1.1 Acelerómetros Potenciométricos

Os acelerómetros potenciométricos medem o movimento da massa e transmitem-na sob a forma de uma resistência variável. Utilizam frequências baixas, normalmente abaixo dos 30 Hz, o que limita a sua utilização.

3.1.1.2 Acelerómetros para Medição do Deslocamento Linear-LVDT

Os acelerómetros LVDT medem o deslocamento da massa sob a forma de deslocamento linear. Neste tipo de acelerómetros o núcleo constitui a massa sísmica e os seus deslocamentos são convertidos em valores de tensão. Estes acelerómetros trabalham com uma frequência natural inferior a 80 Hz e são geralmente usados para vibrações em estado estacionário ou de baixa frequência.

3.1.1.3 Acelerómetros de Relutância Variável

Os acelerómetros de relutância variável têm como base um princípio indutivo, sendo a sua medição realizada a partir da tensão induzida. Este acelerómetro é usado apenas em estudos de vibração e choque, dado que produz um sinal de saída quando a massa se encontra em movimento. A sua frequência natural é inferior a 100 Hz. Este tipo de acelerómetro, é muitas vezes utilizado em explorações petrolíferas para captar vibrações provenientes de rochas subterrâneas.

3.1.1.4 Acelerómetros Piezoelétricos

Os acelerómetros piezoelétricos baseiam-se na propriedade piezoelétrica exibida por determinados cristais, onde é gerada uma tensão no cristal quando este é sujeito a uma força [23]. Quando exposto a uma aceleração, a massa do acelerómetro ativa o cristal através de uma força, resultando numa tensão gerada através do cristal. Estes cristais, uma vez sujeitos a um valor de tensão, acumulam iões carregados na sua superfície. Assim, os eléctrodos que estão em contacto com os cristais recolhem os iões formando um sinal eléctrico. O cristal consiste numa fonte de muito alta impedância, requerendo conseqüentemente uma elevada impedância de entrada. Os valores típicos de tensão são da ordem do milivolt. A frequência natural destes dispositivos pode ser superior a 5 kHz, de modo que eles podem ser utilizados para medições de vibração e de choque.



Figura 3-1 Acelerómetro Piezoelétrico [45].

3.1.2 Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico consiste na capacidade, que determinados cristais possuem, de gerar uma tensão eléctrica como resposta a um movimento ou estímulo mecânico [9]. Este efeito cristalino pode ser explicado matematicamente pela seguinte expressão:

Equação 1:

$$D = \varepsilon_0 \times k + e \times S$$

Onde:

- D = Densidade do deslocamento de carga eléctrica (C/m²);
- ε_0 = Permissividade eléctrica (F/m);
- k = Campo eléctrico (F);
- e = Tensão longitudinal aplicada (C);

- S = Constante de excitação elétrica.

3.1.3 Norma ISO 16063 - 11

A Norma ISO 16063 - 11 do ano de 1999 foi criada pela ISO e tem como propósito estabelecer os principais métodos para a calibração de acelerómetros padrão por interferometria laser.

Este documento aborda os principais métodos para a calibração de acelerómetros-padrão piezoelétricos por interferometria laser, explicando o funcionamento dos mesmos. Esta norma especifica quais os instrumentos e procedimentos que devem ser utilizados, com vista a estudar a resposta a uma excitação sinusoidal, bem como os intervalos de valores em que o procedimento deve estar enquadrado.

Segundo a Norma ISO 16063 - 11, a frequência do sinal de excitação imposta ao acelerómetro deve estar compreendida entre 1 Hz e 10 kHz numa gama dinâmica de amplitude de aceleração entre $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [41].

3.2 Interferometria Laser

Neste capítulo procurou-se abordar a interferometria laser que é considerada a metodologia experimental de base para o desenvolvimento deste estudo. A componente interferométrica do sistema experimental é fundamental para o desenvolvimento do trabalho. O sistema é constituído por um interferómetro de Michelson, o qual tem, neste caso, na sua essência um feixe de luz emitido por um laser. O interferómetro de Michelson é utilizado para medir distâncias com grande exatidão. É devido à emissão de um feixe de luz polarizado com um comprimento de onda bem definido e uma direção estrategicamente colocada que se inicia o estudo do comportamento do acelerómetro face a um sinal de excitação imposto.

A interferometria laser consiste numa técnica experimental de sobreposição de duas ou mais ondas provenientes de uma fonte de luz. Em todos os casos o princípio físico utilizado é o de que duas ondas de luz que coincidem em fase se amplificam enquanto duas ondas em oposição de fase se cancelam. Obtém-se a interferência quando são recombinaos os 2 feixes e dessa interferência resulta um sinal que permite medir a distância percorrida por um dos espelhos.

3.2.1 Princípio Físico da Interferometria Laser

O princípio básico do feixe ótico que percorre este interferómetro é a Polarização Linear. O campo resultante da sobreposição das duas ondas constitui uma onda polarizada linearmente.

A luz pode ser modelada em ondas eletromagnéticas transversas. Neste caso considera-se a luz polarizada linearmente, ou seja, a orientação do seu campo elétrico é constante, sendo a amplitude e o sentido variáveis no tempo. O campo elétrico mantém-se no plano de polarização.

Seguidamente apresenta-se a formulação matemática demonstrativa deste fenómeno físico. Consiste em duas ondas luminosas harmónicas, com a mesma frequência, que se propagam na mesma região do espaço e na mesma direcção.

Os dois campos luminosos são representados nas duas equações seguintes:

Equação 2:

$$E_x(z, t) = iE_{0x} \cos(kz - \omega t)$$

Equação 3:

$$E_y(z, t) = jE_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon)$$

Onde:

- E = Plano fixo;
- k = Campo eléctrico;
- ε = Diferença de fase entre 2 ondas harmónicas.

Destes dois campos polarizados linear e perpendicularmente, resulta uma onda cujo comportamento é demonstrado através da soma dos dois planos fixos na equação seguinte:

Equação 4:

$$E(z, t) = E_x(z, t) + E_y(z, t)$$

Quando ε é zero ou um múltiplo inteiro de 2π , as ondas dizem-se em fase, tomando a equação a forma:

Equação 5:

$$E = (iE_{0x} + jE_{0y}) \cos(kz - \omega t)$$

3.2.2 Interferómetro de Michelson

O interferómetro de Michelson é o interferómetro mais estudado e historicamente o mais importante [3]. Existem várias adaptações deste tipo de interferómetro que foram rearranjadas com vista a satisfazer as necessidades e objetivos do sistema ótico.

Este interferómetro de divisão de amplitude de feixe ótico é composto por diversos componentes da Ótica cujos princípios individuais, quando colocados em conjunto, permitem montar

o sistema de maior exatidão possível na área da calibração de acelerómetros. Segue-se a apresentação do esquema representativo do interferómetro:



Figura 3-2 Interferómetro de Michelson.

Este interferómetro é constituído por:

- Fonte de energia ótica;
- Duas lâminas óticas;
- Divisor de feixe polarizado;
- Dois espelhos óticos polidos;
- Fotodetetor.

Ao nível da sua funcionalidade, este sistema pode ser utilizado para realizar medições de distâncias com elevada exatidão. Quando um dos espelhos se afasta meio comprimento de onda, cada franja ótica desloca-se de uma interfranja e ocupa o lugar da franja adjacente.

Contando as que passam em frente de uma posição de referência, é possível determinar a distância Δd percorrida pelo espelho. A expressão que se segue descreve este fenómeno:

Equação 6:

$$\Delta d = N \left(\frac{\lambda_0}{2} \right)$$

Onde:

- Δd = Distância percorrida pelo espelho;

- N = Número de franjas de interferência;
- λ_0 = Comprimento de onda de afastamento dos espelhos.

Michelson utilizou este sistema para determinar o número de comprimentos de onda que corresponde ao metro padrão, numa experiência realizada em *Sèvres*, França.

A introdução de polarizadores em cada braço do interferómetro permitiu variar a polarização de cada feixe, mantendo invariante a diferença entre os percursos óticos.

Neste sentido, a primeira versão do sistema consistiu num equipamento ótico que inicia o percurso do feixe por uma fonte de luz. Esta origina uma onda que se propaga da esquerda para a direita. Por sua vez, o divisor de feixe encarrega-se de dividir esta onda em duas, que se propagam em direções perpendiculares [30].

Existem dois espelhos que refletem as ondas obrigando-as a regressar novamente ao divisor. Parte da onda refletida por um dos espelhos atravessa o divisor de feixe em direção ao detetor ótico e parte da onda refletida pelo outro espelho atravessa o divisor de feixe sobrepondo-se à anterior. As condições de interferência surgem da sobreposição das duas ondas. Para que cada feixe atravesse a mesma espessura de vidro é necessário introduzir uma lâmina de compensação entre o divisor de feixe e o primeiro espelho.

3.2.3 Equipamento Utilizado no Interferómetro de Michelson

Laser de He-Ne:

Um laser constitui a fonte de luz sob a forma de feixe de fótons que origina a propagação da radiação no interferómetro de Michelson. Dada a sua importância, procura-se descrever este equipamento tão relevante para o sistema interferométrico utilizado no sistema experimental da dissertação.

O laser consiste num dispositivo que produz radiação eletromagnética monocromática, ou seja, possui um comprimento de onda muito bem definido. Verifica-se que é coerente na medida em que todas as ondas dos fótons que compõem o feixe estão em fase. Em termos da forma de propagação propaga-se como um feixe de ondas praticamente paralelas.

Ao nível da sua definição, “laser” significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. Este feixe de fótons consiste num conjunto de átomos de um gás, líquido ou sólido. Por sua vez, cada átomo possui uma certa quantidade de energia interna e tende a manter-se numa configuração que minimiza a energia total, nomeadamente, o estado fundamental do átomo [30]. Cada átomo pode ainda apresentar-se noutras configurações de energias superiores à do estado fundamental, os chamados estados excitados. No caso dos lasers, pretende-se que os fótons constituam um feixe de luz constante, uma vez que a fase não deve variar, para que se obtenha um feixe de luz contínuo.

Atualmente a variedade de lasers abrange todo o espectro luminoso, desde o infravermelho até ao ultravioleta, verificando-se a sua utilidade nas mais diversas áreas.

Assim, com a frequência apropriada, consegue-se produzir a libertação constante de um fóton cuja energia é igual à diferença entre a energia do estado inicial mais elevada e a energia do estado final mais reduzida. O feixe de luz que é emitido pelo laser tem todos os fótons com a mesma fase, a mesma polarização e a mesma direção de propagação da radiação estimulante. O fóton emitido participa para o mesmo modo de radiação da onda incidente e aumenta a densidade de fluxo, dando origem a uma avalanche de fótons todos em fase, constituindo o feixe de luz proveniente do laser.

O laser funciona com base no princípio da Emissão Estimulada, ou seja, a emissão de um fóton é proporcionada pela presença de radiação eletromagnética com a frequência apropriada. Os fótons emitidos por Emissão Estimulada têm a mesma fase, polarização e direção de propagação da radiação estimulante. Este equipamento está ligado à corrente elétrica, a qual proporciona que o feixe luminoso se mantenha estável no tempo.

O laser escolhido para este estudo é um laser de He-Ne. Este tipo de laser, que surgiu pela primeira vez na década de 60, é atualmente o mais utilizado, funcionando quase sempre no espetro do visível e com um comprimento de onda de 632,8 nm. O seu feixe de luz é polarizado linearmente devido à presença de lâminas colocadas nos extremos do tubo de descarga e orientadas segundo o ângulo de polarização [30]. Desta forma, a transmissão é de 100 % para as ondas cujo campo elétrico é paralelo ao plano de incidência.

Com vista a tornar os lasers de He-Ne totalmente estanques, o tubo é soldado diretamente à estrutura metálica que suporta os espelhos interiores do tubo. Os espelhos são revestidos por filmes resistentes e suportam a descarga interior do tubo.

O laser escolhido para fazer parte integrante do sistema experimental deste estudo é montado numa caixa de alumínio resistente e vem com uma fonte de alimentação correspondente. Tem uma potência de 5 mW e emite um feixe ótico contínuo polarizado de Hélio e Néon com o comprimento de onda da ordem dos 632,8 nm, correspondente à cor vermelha no espetro do visível.

Prisma de Wollaston:

Os prismas óticos assumem funções de divisores de feixe polarizadores e interferométricos. Pode servir como elemento dispersivo, sendo usado em analisadores espectrais devido à sua capacidade de separar frequências que constituem um feixe de luz policromática. Também pode servir como controlo da direção de propagação de um feixe, como é o caso dos prismas de dispersão.

Neste tipo de prismas, se um raio incide num prisma de dispersão, este é defletido relativamente à sua direção de incidência pelo ângulo de desvio.

Na primeira refração o raio é desviado de um ângulo de: $(\theta_{i1} - \theta_{t1})$.

Na segunda refração o raio é defletido de um ângulo de: $(\theta_{t1} - \theta_{i2})$.

O desvio total é então:

Equação 7:

$$\delta = (\theta_{i1} - \theta_{t1}) + (\theta_{t2} - \theta_{i2})$$

Onde:

- δ = Desvio total (rad);
- $\theta_{ij} - \theta_{ij} = \hat{\text{Ângulo de desvio do raio}}$ (rad).

Pela Lei de *Snell* a equação anterior é transformada para a seguinte forma:

Equação 8:

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}(n \sin \theta_{i2}) = \sin^{-1}(n \sin(\alpha - \theta_{i2}))$$

Onde:

- n = índice do prisma;
- $n_0 = 1$ (o prisma está imerso no ar).

Verifica-se a seguinte equação para o ângulo de desvio:

Equação 9:

$$\theta_{t1} = (1 - \sin^2 \theta_{i1})^{1/2}$$

Equação 10:

$$\theta_{t2} = \sin^{-1}[(\sin \alpha)(n^2 - \sin^2 \theta_{i1})^{1/2} - \sin \theta_{t1} \cos \alpha]$$

Logo, o desvio total corresponde é:

Equação 11:

$$\delta = (\theta_{i1} + \sin^{-1}[(\sin \alpha)(n^2 - \sin^2 \theta_{i1})^{1/2} - \sin \theta_{i1} \cos \alpha])$$

Sendo n função da frequência o desvio total aumenta com o aumento de n , logo o desvio total também é função da frequência e representa-se por $\delta(\lambda)$. No visível, para a maioria dos dielétricos transparentes, $n(\lambda)$ diminui à medida que o comprimento de onda λ aumenta. Assim, o desvio que um feixe monocromático sofre quando atravessa um prisma, considerando n e α constantes, depende unicamente do ângulo de incidência na primeira superfície θ_{i1} .

O prisma de *Wollaston* é um tipo de prisma ótico que separa a luz incidente na sua superfície em dois feixes de luz polarizados ortogonalmente. Este prisma foi inventado pelo químico *William Hyde Wollaston*, que uniu dois prismas óticos triangulares pela sua hipotenusa.

A luz passa através de uma das faces laterais do prisma e é dividida em dois feixes óticos. Os feixes de saída do prisma divergem segundo um ângulo que depende do ângulo de corte dos prismas e do comprimento de onda da luz.

Lâmina de $\frac{1}{4}$ de onda:

A lâmina de quarto de onda consiste num elemento ótico que visa introduzir um desfasamento relativo de $\Delta\gamma = \pi/2$ entre as componentes ortogonais de uma onda. Um desfasamento de 90° converte luz com polarização linear em elítica e vice-versa. A luz incidente polarizada linearmente segundo uma direção paralela a um dos eixos principais não é afetada por nenhuma lâmina de atraso, pois são necessárias duas componentes para que haja desfasamento relativo.

As lâminas de quarto de onda são quase sempre feitas de quartzo, mica ou polímeros orgânicos.

Espelhos:

A utilização dos espelhos nos sistemas óticos tem vindo a crescer devido à sua aplicabilidade nos domínios do infravermelho, ultravioleta e raio-X. Reflete razoavelmente bem numa vasta gama de valores de frequência, sendo considerado como espelho tanto um pedaço de vidro preto como uma superfície metálica polida. A escolha deste tipo de material deve-se à necessidade de que a variação do poder refletor com o ângulo de incidência seja a menor possível.

Habitualmente os espelhos óticos são revestidos com alumínio com deposições adicionais de monóxido de silício ou fluoreto de magnésio com vista a proteger o revestimento.

Neste estudo, são utilizados espelhos planos, ou seja, espelhos em que a superfície de reflexão é totalmente plana, em que ocorre simetria entre o objeto e a imagem e que a maioria da reflexão é regular.

Lei da Reflexão:

Sendo: $\theta_i = \theta_r \leftrightarrow |s_o| = |s_i|$, ou seja, a imagem e o objeto encontram-se à mesma distância da superfície.

4 Métodos de Calibração de Acelerómetros-Padrão

Por calibração entende-se um conjunto de operações que estabelecem, sob condições previamente especificadas, uma relação entre os valores fornecidos por padrões de medição bem como as indicações correspondentes com às incertezas associadas.

São utilizados 4 métodos para a caracterização e calibração de acelerómetros-padrão.

- Método da Contagem de Franjas;
- Método do Ajuste de Velocidades;
- Método da Razão de Frequências do Contador;
- Método da Diferença de Fase.

Os resultados experimentais obtidos através do método da Diferença de Fase foram comparados e validados através do método da Contagem de Franjas, considerando uma zona comum de funcionamento, e que permitiu a passagem de um método para o outro face a diferentes valores de amplitude de aceleração e frequência de excitação.

4.1 Introdução

A técnica de calibração primária de acelerómetros-padrão, a qual foi aplicada na dissertação, baseia-se na aplicação de uma excitação sinusoidal ao acelerómetro com uma determinada frequência [29], e na determinação da variação temporal do seu deslocamento por interferometria laser. O valor da aceleração é obtido derivando o deslocamento em ordem ao tempo. Para frequências superiores a 1 kHz a amplitude do deslocamento atinge valores inferiores ao micrómetro. A interferometria ótica com deteção heterodina surge da necessidade de alargar o intervalo de medição de frequência para valores da ordem do kHz, tendo sido aplicadas nesta dissertação frequências de excitação até aos 3 kHz. A deteção heterodina apresenta-se como o método mais eficaz neste regime [15].

Após implementar a deteção heterodina em termos do sistema experimental, procedeu-se à aquisição dos dados resultantes do movimento do acelerómetro e consequente estudo dos mesmos. Este estudo foi realizado utilizando 4 métodos distintos de calibração de acelerómetros. Para cada um destes métodos, foram definidas as respetivas equações, que descrevem e relacionam as variáveis intervenientes no processo. Estas equações estão implementadas no sistema de tratamento e processamento de dados utilizado, em linguagem de programação gráfica LabView®, segundo um módulo aplicacional, no qual são feitos o ajuste dos valores, aplicação de filtros entre outras ações de análise e tratamento dos dados.

Na calibração de acelerómetros-padrão é induzida uma vibração do tipo sinusoidal, através de um sistema de excitação do movimento [43], para criar a amplitude de deslocamento que se pretende medir.

Dada a limitação associada ao método da Contagem de Franjas, utilizado para a calibração primária de acelerómetros-padrão por interferometria laser, da ordem de $\lambda/2$, [19], foi utilizado o método da Diferença de Fase, tendo por base a interferometria relativa com deteção heterodina. Enquanto na deteção homodina é suficiente a utilização de um detetor para a aquisição do sinal ótico, [37] para a deteção da amplitude de fase são necessários dois detetores óticos para o processamento dos feixes interferométricos. O valor do deslocamento é assim proporcional à amplitude de fase, determinada com base nestes dois sinais óticos e considerando a diferença de fase entre os dois sinais sobrepostos.

Tendo como objetivo aumentar o intervalo de medição para valores de frequência superiores a 1 kHz foi utilizado o método da Diferença de Fase, cuja validação tem como referência os resultados e as incertezas associadas ao método da Contagem de Franjas.

4.2 Método da Contagem de Franjas

O método da Contagem de Franjas, com uma zona de funcionamento correspondente ao intervalo de frequências de excitação, aproximadamente entre 20 Hz e 1 kHz [44], baseia-se fundamentalmente na deteção homodina para a determinação do valor do deslocamento em função do número de máximos ou mínimos de intensidade representada pelo padrão de franjas de interferência.

Dispondo dos dados resultantes da interferometria laser, adquiridos pelo sistema de aquisição e processamento de dados, é determinada a razão entre a frequência ótica da franja e a frequência do sinal de excitação, considerando um determinado número de ciclos.

Neste sentido, a razão de frequências, ou seja, o número de máximos, é dada pela expressão matemática que se segue:

Equação 12:

$$R_f = 4\xi / (\lambda/2)$$

Onde:

- R_f = Razão de frequências (adimensional);
- ξ = Amplitude de deslocamento (m);
- λ = Comprimento de onda da radiação laser (m).

Os pares de valores tempo-intensidade são utilizados para determinar os valores de amplitude de aceleração, calculada pelo método da Contagem de Franjas, através da expressão que se segue [15]:

Equação 13:

$$a = \frac{\pi^2 \times \lambda}{2} \times f_0 \times f_e$$

De acordo com a expressão da amplitude de aceleração, a sensibilidade S do acelerómetro-padrão é dada pela equação seguinte:

Equação 14:

$$S = \frac{2V}{\pi^2 \times \lambda \times f_0 \times f_e} = \frac{V}{a}$$

- S = Sensibilidade do acelerómetro ($V/m \cdot s^{-2}$) ou ($pC/m \cdot s^{-2}$) consoante seja, respetivamente, a sensibilidade em tensão ou a sensibilidade em carga;
- V = Tensão de pico (V);
- f_0 = Frequência ótica (Hz);
- f_e = Frequência de excitação (Hz);
- a = Aceleração calculada pelo método da Contagem de Franjas ($m \cdot s^{-2}$).

4.3 Método da Razão de Frequências do Contador

No método da razão de frequências, a medição da razão entre a frequência ótica e a frequência de excitação é efetuada através de um contador de frequência.

Dada a importância deste equipamento, apresenta-se de seguida o contador em funcionamento durante a aquisição de dados no contexto da dissertação.



Figura 4-1 Contador em Operação durante a Aquisição de Dados.

Neste método calcula-se a razão de frequências dada pelo contador de frequências através da seguinte expressão:

Equação 15:

$$R_f = \frac{f_o}{f_e}$$

Este método é semelhante ao da Contagem de Franjas em termos do cálculo matemático da aceleração e da sensibilidade do acelerómetro, pelo que as expressões que definem estes dois parâmetros se apresentam de seguida.

Equação 16:

$$a = \frac{\pi^2 \times \lambda}{2} \times f_o \times f_e$$

Equação 17:

$$S = \frac{2V}{\pi^2 \times \lambda \times f_o \times f_e} = \frac{V}{a}$$

A frequência de excitação, f_e , corresponde ao sinal sinusoidal que é imposto ao excitador de vibração, e ao acelerómetro a si acoplado, através de um controlador de movimento e de um amplificador. A frequência ótica da franja, f_o , resulta do respetivo sinal ótico, adquirido por um dos fotodetetores.

4.4 Método do Ajuste das Velocidades

Este método, também denominado método da Aproximação do Seno, deve ser usado em calibrações cujo intervalo de frequências esteja compreendido entre 1 Hz e 10 kHz, tendo como princípio um sinal de excitação sinusoidal que resulta do movimento do acelerómetro.

Os pares de valores tempo-intensidade são usados para demonstrar graficamente o deslocamento obtido pelo método da contagem de franjas e da velocidade com base em intervalos entre franjas muito próximas. Os passos para o efeito são:

- Análise espectral para determinar a frequência máxima do sinal de excitação de entrada;
- Uso do valor anterior para definir os parâmetros de aplicação do filtro, cujos resultados são imediatamente visíveis;
- Contagem do número de vezes em que o flanco positivo do sinal filtrado atravessa o zero, a uma contagem de franjas constante;

- Cálculo dos intervalos de tempo: $\Delta(t_i) = \Delta(t_{i+1})$ por estimativa da velocidade instantânea: $(\lambda/2)/\Delta(t_i)$ cujo gráfico tem a forma de um seno retificado;
- Processamento do sinal com um algoritmo que fornece o valor simétrico para os pontos apropriados das meias sinusoides;
- Aplicação de um ajuste do seno, do tipo *Levenberg-Marquardt*, aos pontos processados removendo ambiguidades no sinal e proporcionando valores de amplitude e de frequência relativos à velocidade do movimento medida.

As amplitudes de velocidade e aceleração são calculadas usando o método da contagem de franjas usando o valor da frequência de excitação do movimento.

Com este método para a calibração de acelerómetros-padrão é possível aplicar filtros como o filtro passa-baixo, muito útil para melhorar a qualidade do sinal adquirido, ação que foi realizada na dissertação [41].

4.5 Método da Diferença de Fase

O método da Diferença de Fase é essencialmente utilizado para a calibração de acelerómetros-padrão em regime de elevada frequência, ou seja, para valores de frequência ≥ 1 kHz. Este método tem por base a deteção heterodina e a utilização dois detetores óticos.

Baseia-se na análise do desfasamento entre os dois sinais óticos adquiridos pelos dois detetores. A avaliação das componentes fracionárias relativas à contagem de franjas óticas é efetuada através do processamento destes dois sinais.

No método da Diferença de Fase a amplitude do deslocamento é determinada em função da amplitude de fase, através da equação seguinte:

Equação 18:

$$d = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \lambda/4$$

Onde:

- $\Delta\phi$ = Amplitude de fase entre os extremos de cada ciclo de oscilação (rad);
- λ = Comprimento de onda da radiação proveniente do laser de He-Ne;

A amplitude de fase entre os extremos de cada ciclo de oscilação é dada pela equação.

Equação 19:

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{senal ótico 1}}{\text{senal ótico 2}}\right)$$

A aceleração do movimento é calculada através da seguinte expressão:

Equação 20:

$$a = \frac{\Delta\phi \times \pi \times \lambda \times f_e^2}{2}$$

A sensibilidade S do acelerómetro-padrão é, neste caso, calculada pela razão entre a amplitude do sinal de tensão medido à saída do condicionador e a amplitude de aceleração determinada de modo absoluto:

Equação 21:

$$S = \frac{V}{a} = \frac{2 \times V}{\Delta\phi \times \pi \times \lambda \times f_e^2}$$

Onde:

- $\Delta\phi$ = Amplitude de fase.

O interferómetro deve estar alinhado, permitindo a obtenção de 2 sinais de saída de tensão em quadratura de fase, ou seja, duas formas de onda cuja diferença de fase corresponde ao período da sua saída.

Para valores de frequência superiores a 1 kHz, dependendo do valor de amplitude de aceleração escolhido, a amplitude de deslocamento pode ser inferior a 1 μm . Apesar de a deteção homodina poder fornecer valores aceitáveis acima de 1 kHz, a diminuição da amplitude do deslocamento limita a aplicabilidade desta técnica de deteção à medida que a frequência aumenta.

Neste sentido, para permitir a calibração de acelerómetros para valores de frequência de excitação superiores a 1 kHz com maior exatidão e menor incerteza associada à calibração [19], foi utilizado o interferómetro de Michelson modificado, capaz de realizar a deteção heterodina [21], combinando os dois sinais óticos. Este sistema ótico permite medir variações de deslocamento muito menores do que o comprimento de onda do feixe ótico proveniente do laser de He-Ne, nomeadamente, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$.

Na figura seguinte encontra-se uma fotografia do interferómetro de Michelson modificado, no qual é possível observar os fotodetetores em funcionamento, para o método da Diferença de Fase, através da aquisição do sinal vermelho proveniente do laser:

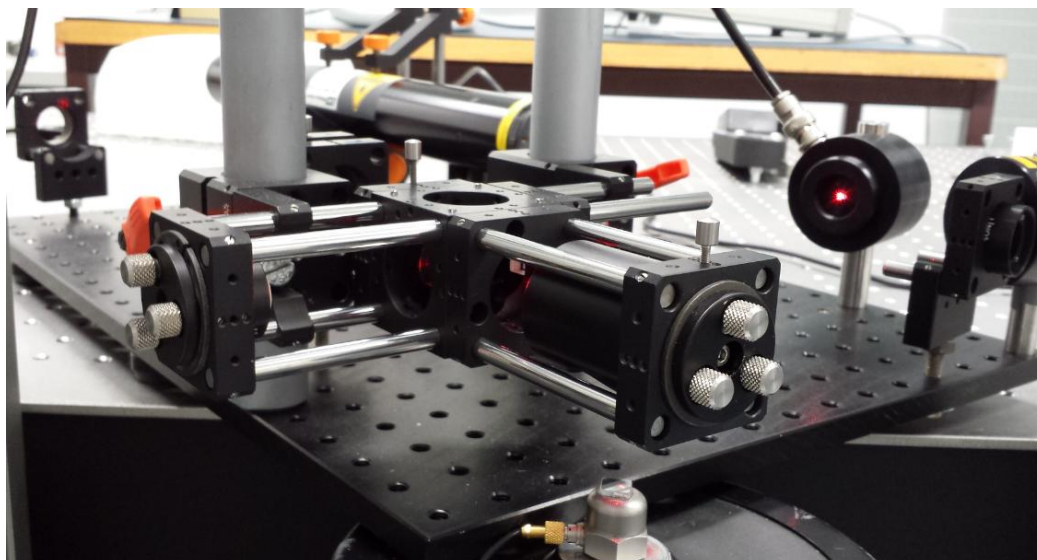


Figura 4-2 Interferómetro de Michelson ilustrando a Deteção Heterodina.

Neste estudo, revela-se de grande utilidade a utilização de um osciloscópio para a análise das respetivas figuras de *Lissajous*, permitindo assim, a otimização do alinhamento do interferómetro e, numa análise prévia, um estudo mais rápido da diferença de fase e da intensidade dos dois sinais óticos.

Este procedimento permite analisar de forma expedita o desfasamento entre os dois sinais e determinar qual a melhor posição associada à colocação dos detetores [44]. Para isso, faz-se o ajuste dos parafusos do interferómetro regulando assim a figura de *Lissajous*, elipse, para que esta atinja uma forma o mais circunferencial possível.

Esta aproximação da elipse a uma circunferência traduz numa maior amplitude dos sinais, com variação entre picos repetitivos, diminuição do ruído bem como sobreposição dos sinais de forma a melhorar a qualidade dos resultados em termos de aceleração e sensibilidade obtidos.

De seguida apresenta-se os sinais óticos em estudo e a comparação com base na deteção heterodina:

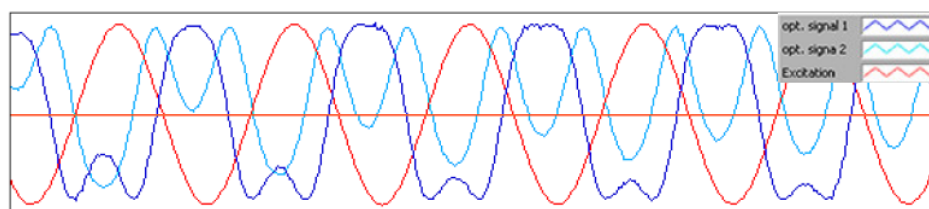


Figura 4-3 Sinal de Excitação e Sinais Óticos obtidos na Deteção Heterodina [44].

Seguidamente apresenta-se uma ilustração da figura de *Lissajous* obtida no osciloscópio aquando da deteção heterodina, para uma amplitude de aceleração de $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e uma frequência de excitação de 3 kHz:

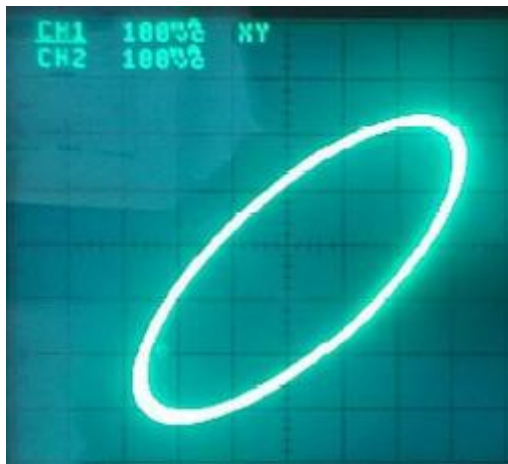


Figura 4-4 Figura de *Lissajous* [44].

5 Procedimento Experimental

5.1 Introdução

O procedimento experimental realizado na dissertação para a calibração de acelerómetros-padrão divide-se em três componentes fundamentais:

- Interferómetro de Michelson modificado;
- Excitação de movimento;
- Aquisição e processamento de dados.

Estes três subsistemas, que serão descritos pormenorizadamente nos capítulos que se seguem, permitiram o controlo da excitação a aplicar ao acelerómetro a calibrar, a leitura dos sinais óticos associados ao sistema interferométrico, bem como a leitura da resposta do acelerómetro, para posterior tratamento.

Uma vez que foram calibrados dois acelerómetros-padrão por interferometria laser, para cada um deles, de um modo geral, foi realizado o procedimento descrito nos 3 grandes blocos.

Para cada acelerómetro, este foi colocado no sistema experimental com o objetivo de produzir um sinal elétrico de saída proporcional ao valor de amplitude de aceleração a que é sujeito. Esta amplitude de aceleração resulta do movimento que é imposto ao acelerómetro, por meio de um excitador de movimento.

O excitador de movimento simula um movimento de vibração com vista a fazer a analogia com as aplicações reais a que estes acelerómetros estão sujeitos.

Apresenta-se de seguida a tabela ilustrativa dos ensaios realizados com vista à calibração dos dois acelerómetros-padrão. Para cada valor de aceleração e frequência foram realizadas 5 aquisições:

Tabela 5-1 Resumo dos Ensaios Efetuados.

Calibração dos dois Acelerómetros-Padrão					
B&K 8305 S			ENDEVCO 7254A		
a = 100 m.s ⁻²	a = 50 m.s ⁻²	a=10m.s ⁻²	a = 100 m.s ⁻²	a= 50 m.s ⁻²	a=10m.s ⁻²
F(Hz)	F(Hz)	F(Hz)	F(Hz)	F(Hz)	F(Hz)
80	40	40	100	100	100
100	100	100	200	200	160
200	200	160	400	400	400
400	400	400	600	600	600
600	600	600	800	800	800
800	800	800	900	1000	
900	1000	1000	1000	1200	
1000	1200	1200	1200	1700	
1200	1500	1500	1500	2000	
1500	1700		1700	2200	
1700	2000		2000	2500	
2000	2200		2200	2800	
2200	2500		2500	3000	
2500	2800		2800		
2800	3000		3000		
3000					

As condições ambientais essenciais para uma boa calibração elétrica sem prejuízo da mesma foram respeitadas. Neste sentido, a calibração dos dois acelerómetros foi realizada nas condições seguintes:

- Temperatura: (23 ± 2) °C;
- Humidade Relativa: (50 ± 10) %.

Através da equação que se segue calculou-se o erro percentual resultante da comparação entre a aceleração média e a aceleração transmitida ao excitador de vibração:

Equação 22:

$$Erro(\%) = \frac{a_{média} - a_{pico}}{a_{pico}} \times 100$$

Onde:

$a_{média}$ = Aceleração resultante da média das 5 aquisições de cada ensaio (m·s⁻²);

a_{pico} = Aceleração resultante do movimento do excitador de vibração (m·s⁻²).

Calculou-se ainda o desvio-padrão associado aos 5 valores obtidos para cada ensaio de aceleração e frequência constantes.

Procedeu-se ao cálculo dos valores adimensionais de sensibilidade calculada através da relação entre a tensão de pico, lida no voltímetro digital de elevada exatidão, a aceleração média obtida para o método em estudo e o valor do ganho escolhido no pré-amplificador de carga.

Equação 23:

$$S_{calculada} = \frac{V}{\frac{a_{média}}{G}}$$

Onde:

$S_{calculada}$ = Sensibilidade calculada para o acelerómetro (adimensional);

V = Tensão de pico (V);

G = Ganho do pré-amplificador ($V/m \cdot s^{-2}$).

O valor de sensibilidade final é obtido por multiplicação da sensibilidade calculada pela sensibilidade nominal do acelerómetro a calibrar.

Equação 24:

$$S = S_{calculada} \times S_{nominal}$$

Onde:

S = Sensibilidade da medição ($pC/ m \cdot s^{-2}$) ou ($V/m \cdot s^{-2}$);

$S_{nominal}$ = Sensibilidade nominal do acelerómetro ($pC/ m \cdot s^{-2}$) ou ($V/m \cdot s^{-2}$).

Acelerómetro B&K8305S:

O acelerómetro-padrão B&K8305S, do tipo piezoelétrico [7], foi o primeiro acelerómetro a ser calibrado nesta dissertação.

Algumas características deste sensor, bem como condições de realização dos ensaios, são apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 5-2 Características de Medição do Acelerómetro B&K8305S.

Características e Condições de medição:
Agilent N°Série 22433388
Sensibilidade Nominal = $0,1289PC/m \cdot s^{-2}$
Ganho do pré-amplificador 2635 = $0,01V/m \cdot s^{-2}$
Temperatura de medição = $21,2 \text{ }^{\circ}C$
Humidade relativa = 60%

Na figura que se segue ilustra-se o acelerómetro B&K8305S durante o procedimento de calibração.



Figura 5-1 Acelerómetro B&K8605S.

Acelerómetro Endevco 7254A [23]:

O segundo acelerómetro calibrado na dissertação foi o Endevco7254A.

Na tabela que se segue são apresentadas algumas características deste sensor, bem como condições de realização dos ensaios:

Tabela 5-3 Características de Medição do Acelerómetro Endevco7254A.

Características e Condições de medição:
ENDEVCO - Modelo 7254A -100 NºSérie 11187
Sensibilidade nominal = 105,1 mV/g
Ganho_pré-amplificador = 1 mV/m*s ² = 0,001V/m*s ²
Temperatura de medição = 21,2 °C
Humidade relativa = 60%

Na figura seguinte apresenta-se o acelerómetro Endevco7254A durante o procedimento de calibração.

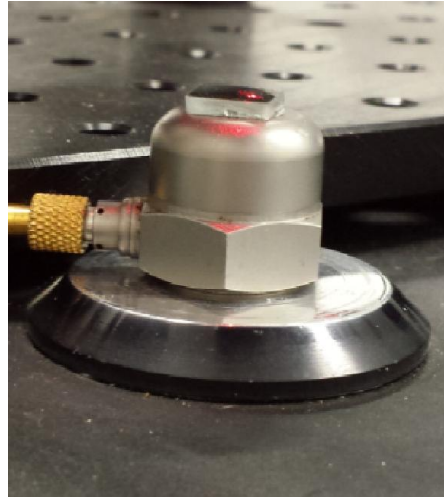


Figura 5-2 Acelerómetro Endevco7254A.

5.2 Diferenças nos Sistemas Experimentais dos Acelerómetros

Ao nível do sistema experimental, este é aproximadamente o mesmo para os dois acelerómetros uma vez que se usou para ambos a deteção heterodina.

O interferómetro de Michelson modificado manteve a mesma configuração, tendo sido alinhado com especial cuidado na fase inicial, nomeadamente, na montagem do acelerómetro sobre o *shaker*. O alinhamento do interferómetro foi otimizado a cada aquisição de valores de frequência bem como para cada amplitude de aceleração, de forma mais expedita em comparação com o primeiro alinhamento.

Relativamente aos elementos constituintes do sistema experimental, estes variaram em duas situações a referir:

Para o acelerómetro B&K8305S usou-se um pré-amplificador de carga para converter a carga em tensão, dado que este é um acelerómetro de carga, ao passo que para o acelerómetro Endevco7254A não foi utilizado o pré-amplificador, dado que este acelerómetro apresenta a sua sensibilidade em tensão [12].

No caso do acelerómetro B&K8305S usou-se um filtro acoplado ao mesmo na sua parte superior, denominado *dummy mass*, com vista a protegê-lo contra movimentos que não o movimento vertical pretendido, contra o fenómeno de ressonância e contra elevadas frequências [10]. Este filtro possui acoplado um espelho polido de origem, por parte da *Bruel&Kjaer*®, concebido para este acelerómetro, estabelecendo uma superfície de elevado polimento. Na figura seguinte mostra-se uma *dummy mass*:



Figura 5-3 *Dummy mass* [10].

Para o acelerómetro Endevco7254A utilizou-se um espelho simples, cortado de acordo com a área superior do acelerómetro, polido no LAV, o qual foi colado na sua superfície.

Esta diferença é relevante na medida em que o espelho ligado ao acelerómetro constituiu a superfície onde incidiu o feixe de luz proveniente do PBS, feixe que quando refletido novamente para o PBS vai ter uma característica do sinal relacionada com a superfície de incidência do feixe no espelho.

5.3 Sistema Experimental

O sistema experimental que se apresenta neste subcapítulo engloba os 3 grandes blocos referidos. Este sistema foi usado para a calibração absoluta de acelerómetros-padrão por interferometria laser, tendo sido efetuada a deteção dos sinais óticos por dois fotodetetores, tornando assim a deteção heterodina.

A vantagem de fazer a deteção heterodina em detrimento da deteção homodina consiste fundamentalmente na expansão do intervalo de frequências atingido [27]. Ao invés de 1 kHz de frequência máxima pode-se atingir valores da ordem das dezenas de kHz com incertezas expandidas associadas da ordem de 1 %.

A interferometria laser baseia-se numa excitação sinusoidal e num interferómetro de Michelson modificado, permitindo determinar o valor de aceleração em função do número de máximos ou mínimos de intensidade do sinal ótico [31].

A sensibilidade de um acelerómetro-padrão é calculada pela razão entre a amplitude do sinal de saída de um amplificador de carga, sinal em tensão, e a amplitude da aceleração.

O método utilizado permitiu determinar o valor da sensibilidade de carga e da sensibilidade de tensão de acelerómetros-padrão no intervalo de medição entre 40 Hz e 3 kHz.

Na figura seguinte apresenta-se o esquema de blocos do sistema experimental, com os seus componentes essenciais, bem como as ligações entre os mesmos.

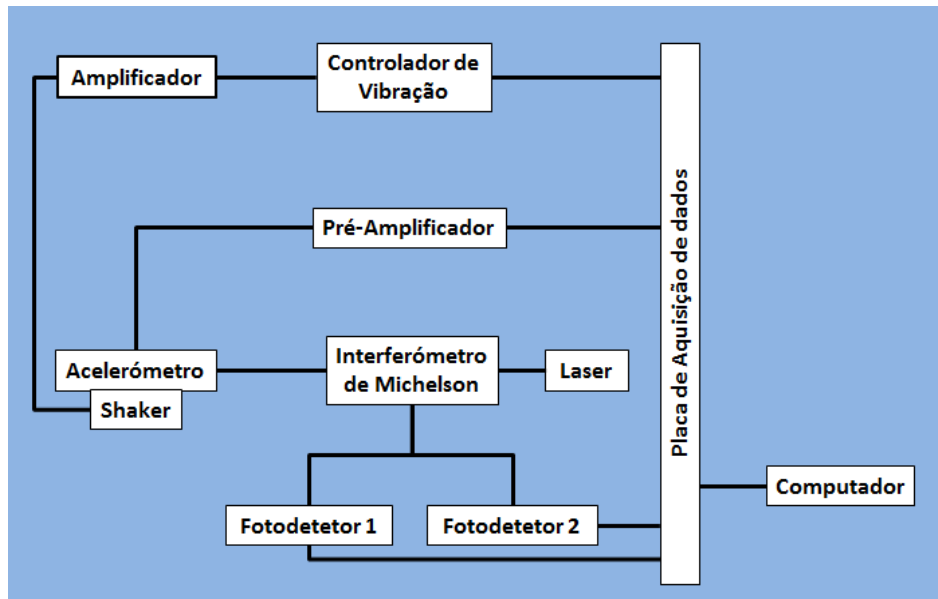


Figura 5-4 Sistema Experimental implementado.

Foi efetuada a aquisição dos sinais óticos, provenientes dos fotodetetores, do sinal de excitação, proveniente do controlador de vibração e da amplitude do sinal de aceleração, à saída do pré-amplificador de carga, através de um voltímetro digital de elevada exatidão.

De seguida apresenta-se uma fotografia do sistema experimental onde se observa o interferómetro de Michelson ligado à parte elétrica do sistema:

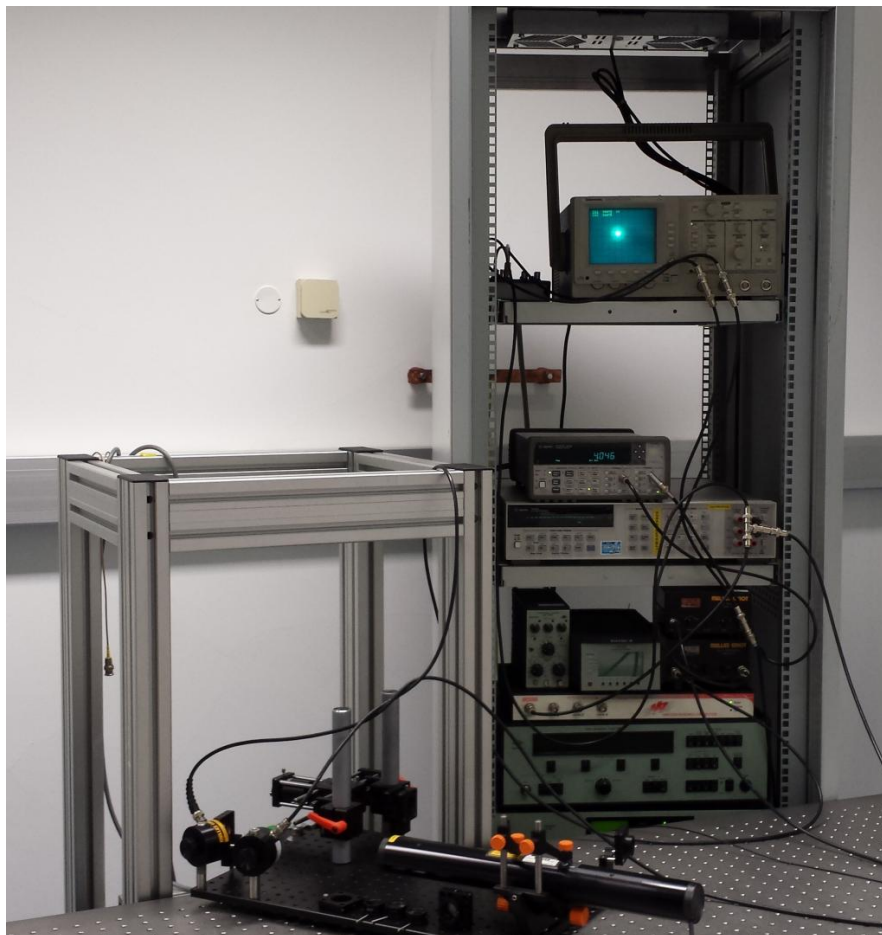


Figura 5-5 Fotografia do Sistema Experimental.

Todo o sistema experimental foi controlado através de um computador pessoal equipado com uma placa de aquisição de dados [44].

A aplicação informática *LabView®* proporcionou a aquisição, tratamento e análise de dados desenvolvidos.

Após a aquisição de dados, foi efetuado o seu processamento para a determinação da amplitude do deslocamento e da aceleração, considerando os 4 métodos descritos.

5.4 Interferómetro de Michelson Modificado

O sistema interferométrico, parte constituinte do esquema experimental, é constituído por diversos equipamentos, os quais são apresentados de seguida:

- Laser de He-Ne;
- Espelho de referência;
- Divisor de feixe polarizado, PBS;

- Lâminas de quarto de onda;
- Espelho móvel (ligado ao acelerómetro);
- Fotodetetores.

Apresenta-se de seguida uma ilustração do interferómetro de Michelson modificado:

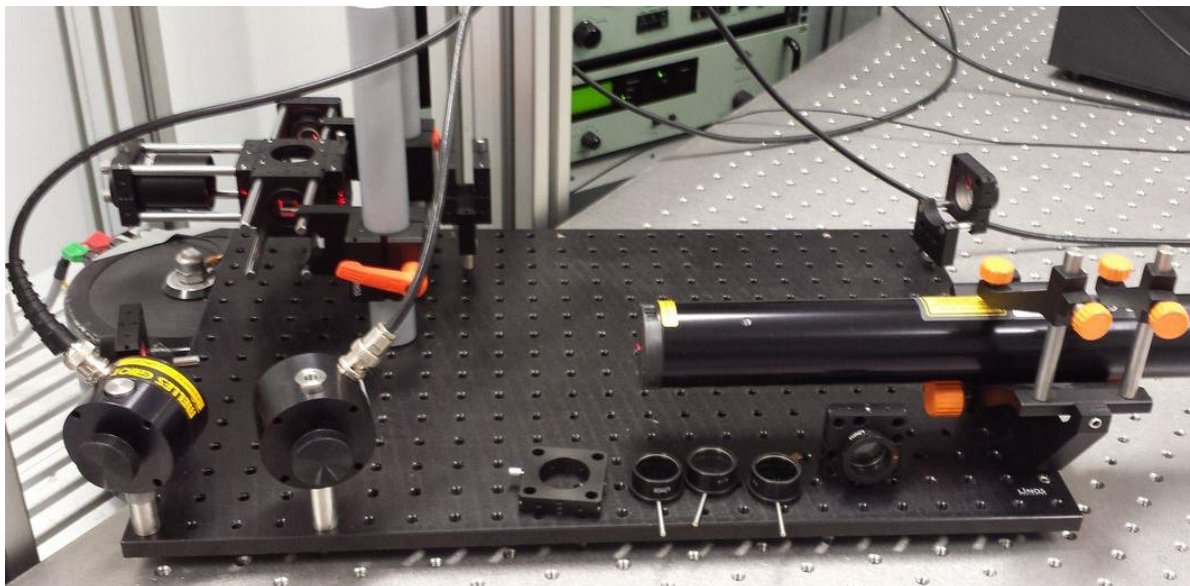


Figura 5-6 Interferómetro de Michelson Modificado no Sistema Experimental.

Na figura seguinte apresenta-se o diagrama de blocos do interferómetro de Michelson modificado ilustrando os seus componentes bem como o feixe ótico que passa por cada um deles:

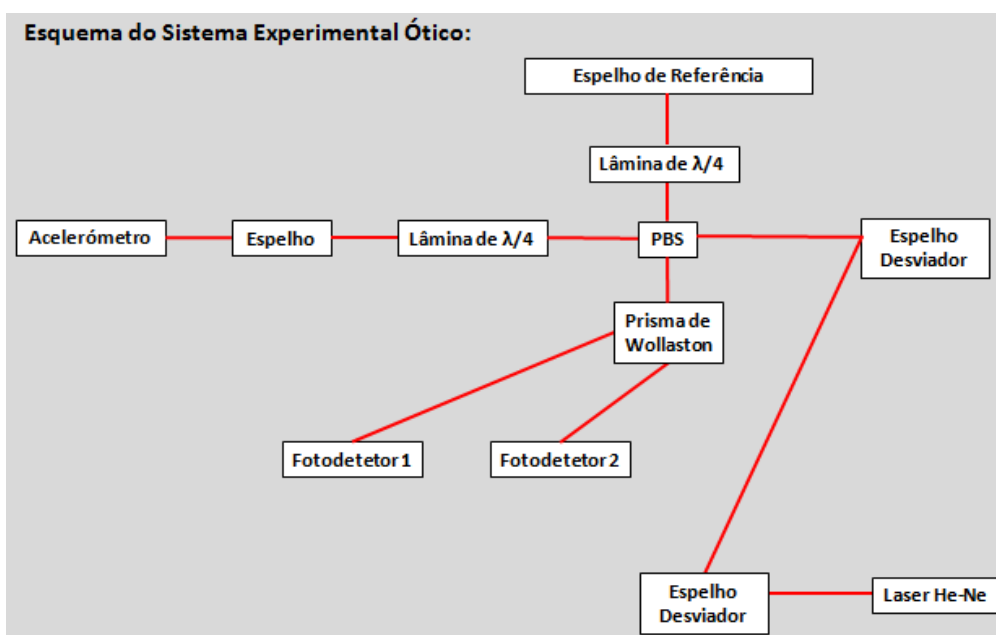


Figura 5-7 Esquema de Blocos do Interferómetro de Michelson no Sistema.

O sistema interferométrico foi montado e alinhado de forma a fazer incidir o feixe laser no PBS. Este por sua vez divide o feixe em dois feixes desfasados de 45° entre si.

O primeiro feixe passa por uma lâmina de quarto de onda e incide no espelho acoplado ao acelerómetro.

O segundo feixe passa através de uma segunda lâmina de quarto de onda e incide num espelho fixo, espelho de referência.

Posteriormente, os dois feixes retornam ao PBS e são recombinados.

Uma vez recombinados, os dois feixes passam por um prisma de *Wollaston*, que divide o feixe recombinado, separando as duas polarizações ortogonais, obtendo-se assim dois sinais óticos aproximadamente iguais em amplitude mas desfasados de 90° .

Através do alinhamento constante do interferómetro, conseguiu-se que os dois feixes incidissem cada um num dos dois fotodetetores.

Os sinais óticos provenientes dos fotodetetores foram adquiridos e processados pelo sistema de aquisição de dados.

A otimização deste sistema foi efetuada através do alinhamento constante do interferómetro de acordo com a figura de *Lissajous* [44], observada no osciloscópio, e da obtenção de padrões óticos recombinados que melhor traduziram o movimento em estudo.

O osciloscópio não faz parte diretamente do sistema experimental uma vez que não é um equipamento fundamental para o funcionamento do mesmo. Apesar desta questão o osciloscópio foi ligado aos detetores óticos para permitir a visualização do padrão de interferências dos dois sinais, otimizar o seu ajustamento em tamanho e sobreposição, bem como verificar o aspeto circunferencial da figura de *Lissajous*.

5.5 Excitação do Movimento

A imposição de um movimento ao acelerómetro, com características bem definidas, traduzido por uma amplitude de aceleração e uma frequência de vibração, foi efetuada utilizando um excitador de vibração, *shaker* [16] para o efeito.

O movimento foi estimulado por uma excitação do tipo sinusoidal, assumindo-se, em primeira aproximação, que tem características harmónicas e lineares.

No sentido de criar um movimento controlado, procedeu-se à montagem do sistema de excitação do movimento, o qual é constituído pelos seguintes componentes:

- Excitador de vibração, *shaker*;

- Controlador de vibração, *VibrationView*®;
- Amplificador;
- Placa de aquisição de dados.

Este sistema foi controlado pelo *software* de automação *VibrationView*®, cujo objetivo foi impor um movimento ao excitador de vibração.

O excitador de vibração teve como objetivo deslocar o acelerómetro a calibrar com um movimento correspondente a um sinal sinusoidal estável e de baixa distorção durante as medições [28]. O movimento sinusoidal foi realizado segundo um eixo bem definido, uma vez que o objetivo foi impor ao acelerómetro um deslocamento vertical, de modo que a amplitude dos deslocamentos laterais fosse desprezável.

O objetivo do amplificador foi amplificar o sinal de excitação aplicado ao *shaker*, provocando um deslocamento mecânico do excitador de vibração [8] e do acelerómetro a si acoplado.

Na figura seguinte mostra-se a forma como os equipamentos descritos foram ligados, com vista a comandar o excitador de vibração:



Figura 5-8 Sistema de Excitação do Movimento.

5.5.1 Programa de Controlo de Vibração

O objetivo de um controlador de vibração é assegurar que o movimento descrito pelo equipamento mecânico, que é colocado a vibrar, descreva um movimento o mais aproximado quanto possível ao que foi programado no controlador [1], tendo em consideração a incerteza associada a qualquer equipamento elétrico.

Nestes programas de controlo de vibração o movimento é traduzido por um teste específico associado a parâmetros bem definidos. Estes foram escolhidos no controlador de vibração por forma a obter o resultado pretendido no excitador de vibração. O teste a escolher pode ser de vários tipos, podendo este ser escolhido, o tipo de sinal e a sua variação ao longo do tempo ou da frequência.

Foi necessário ter em consideração as especificações técnicas do excitador de vibração, pois qualquer destes equipamentos tem valores máximos que não devem ser excedidos sob prejuízo de danificar o equipamento.

O controlador de vibração escolhido para controlar o movimento do *Shaker* foi o VR8500 da marca *VibrationView*®. Antes de proceder à imposição do movimento foram tidas em consideração algumas situações:

- Foi realizada a calibração deste equipamento com vista a verificar se o mesmo estava apto a proceder às suas funções da forma pretendida;
- Foram verificadas as suas ligações aos cabos conetores para o efeito, verificando-se se estes estavam corretamente ligados e se eram os cabos adequados [13];
- Verificou-se as capacidades máximas de movimento do sistema por questões de segurança. Neste sentido, a frequência de excitação não pôde sair fora do intervalo entre 0,1 e 20 kHz, de acordo com as especificações de segurança e bom funcionamento do equipamento.

Após iniciar o sistema *VibrationView*®, na interface computacional foi escolhido um teste do tipo “seno”.

Neste teste foi definido qual o valor de amplitude de aceleração e de frequência de excitação que se pretendia. Para cada valor de aceleração e frequência bem definidos foi realizado um teste no *VibrationView*®, de forma a colocar o *shaker* a vibrar de acordo com esta instrução.

Apresenta-se na seguinte figura um exemplo da interface computacional do *VibrationView*®, na qual foram escolhidos e variados os valores de aceleração e frequência. Neste caso, escolheu-se uma aceleração de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e uma frequência de 1200 Hz:

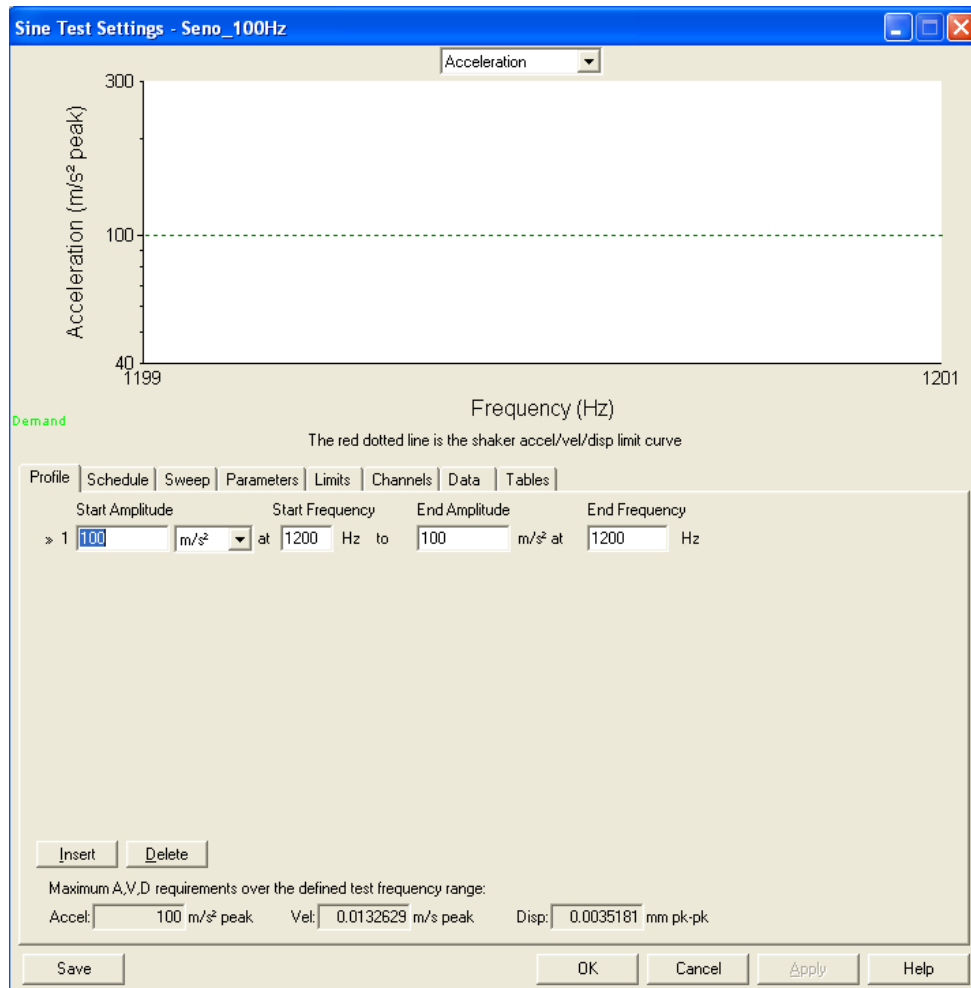


Figura 5-9 Condições de Aceleração e Frequência do movimento.

Antes de se proceder ao início da vibração, foi necessário definir que o movimento teria de se manter constante, uma vez que para a calibração de acelerómetros pretendida esta condição de invariabilidade do movimento foi fundamental.

Na figura seguinte apresenta-se um exemplo ilustrativo da interface computacional do *VibrationView*®, na qual é definida a invariabilidade do movimento:

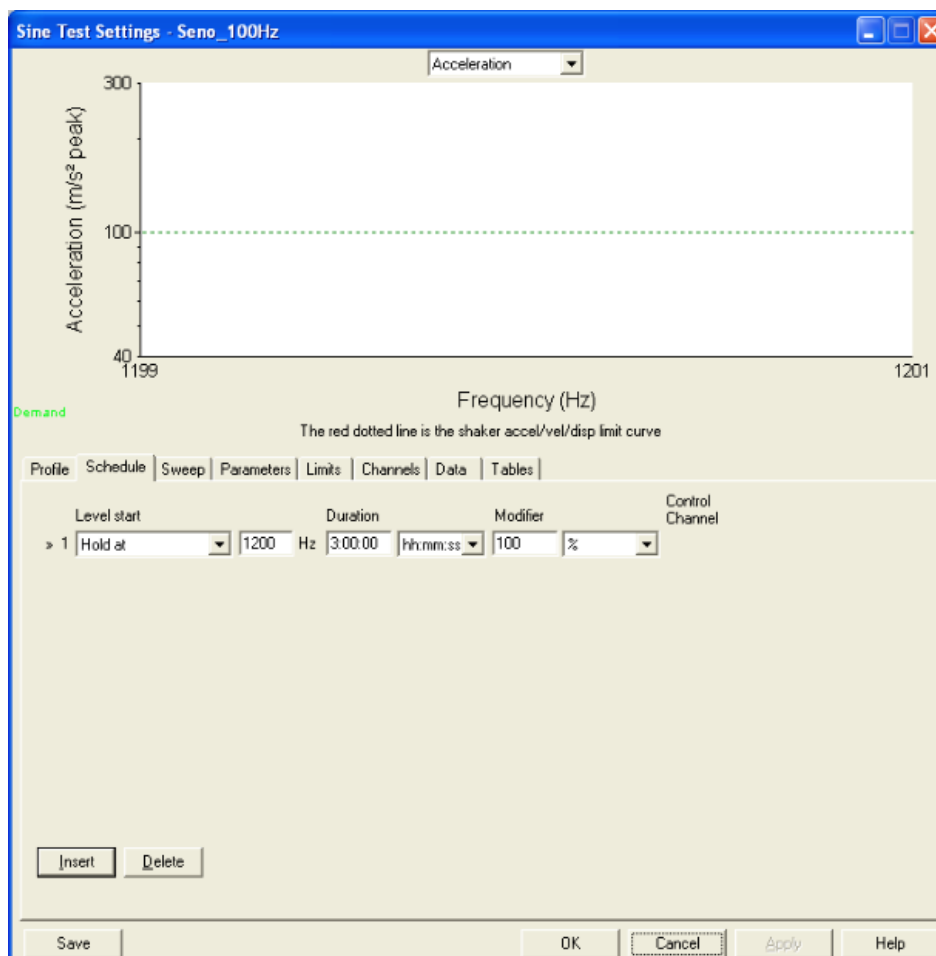


Figura 5-10 Escolha da Invariabilidade do movimento.

Observa-se que foi indicado ao sistema que deixasse o *shaker* a vibrar a uma frequência de 1200 Hz por 3 horas sem qualquer modificação. Este procedimento foi realizado para todos os valores de frequência e aceleração realizados.

Na figura que se segue mostra-se o painel frontal do *VibrationView*®, que mostra o comportamento do sinal de aceleração em função do tempo, bem como o estabelecimento das condições de frequência, aceleração, velocidade, deslocamento, tensão de pico, entre outras. Neste painel, foi possível parar o teste rapidamente, interrompendo-se imediatamente o movimento do excitador de vibração que, por questões de segurança e rapidez da mudança das condições dos ensaios, constitui um fator importante:

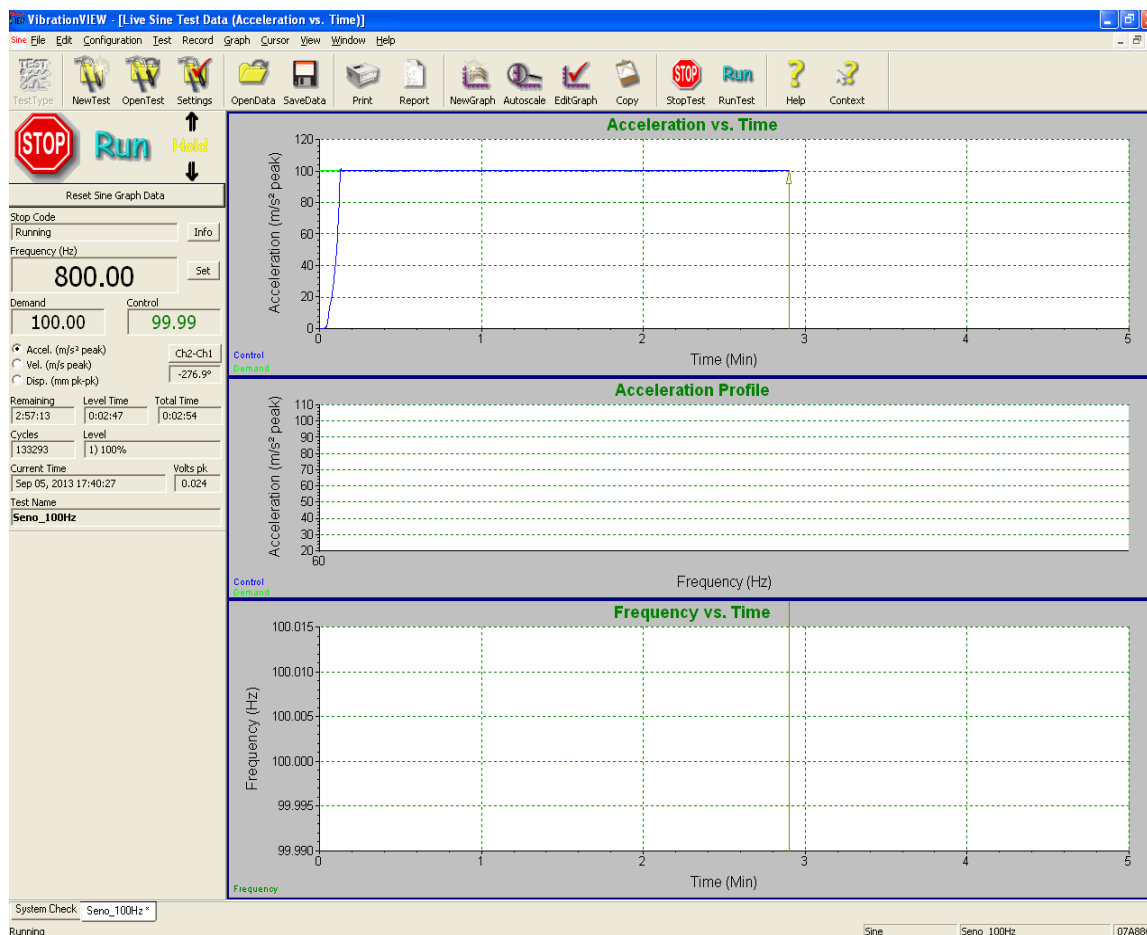


Figura 5-11 Painel Frontal do Teste “seno”.

5.6 Aquisição e Processamento de Dados

O sistema experimental foi automaticamente controlado através de um computador pessoal equipado com uma placa de aquisição PCI de 12-bit com taxa de amostragem de 5 MS/s e 4 canais [28], dispondo da interface de comunicação GPIB-120A e de algoritmos criados em linguagem de programação gráfica *LabView*®. O objetivo deste terceiro grande bloco do sistema experimental consistiu em parametrizar e controlar a instrumentação, aquisição, análise e processamento de dados [44]. Na figura que se segue apresenta-se a placa de aquisição e processamento de dados:



Figura 5-12 Placa de Aquisição e Processamento de Dados.

Neste sentido, usou-se o sistema *LabView*® para o uso de dois módulos computacionais, nomeadamente, um para a parametrização e aquisição de dados e outra para o processamento e análise de dados.

Em termos de aplicabilidade, o sistema *LabView*® revela-se de grande utilidade ao nível da parametrização e controlo da instrumentação, aquisição de dados, análise e processamento de sinal, bem como do controlo industrial.

Uma vez colocado o controlador de vibração em funcionamento, proporcionando ao acelerómetro uma amplitude de aceleração e uma frequência de vibração bem definidas, procedeu-se à parametrização e aquisição de dados. Neste programa, para cada aquisição com um valor de amplitude de aceleração e frequência bem definidos, guardou-se os ficheiros com os dados obtidos.

Na segunda parte, através do módulo aplicacional para o processamento e análise de dados, foi feita a análise e tratamento inicial dos dados adquiridos no programa de aquisição, para cada ficheiro obtido. Neste módulo de estudos foi possível visualizar e analisar os dados referentes aos 4 métodos, tirar conclusões acerca dos mesmos e tratar o sinal obtido através da utilização de filtros.

5.6.1 Parametrização e Aquisição de Dados

O programa de parametrização e aquisição de dados consiste num módulo criado em *LabView*® para comandar e parametrizar a instrumentação utilizada, bem como para efetuar a aquisição de dados durante o movimento do *shaker*. Este foi usado da mesma forma para os 2 acelerómetros. Neste sentido, uma vez iniciado o movimento de excitação do *shaker*, correspondente a uma aceleração e frequência bem definidas, esperados alguns segundos até este movimento estabilizar, e tendo de seguida alinhado o interferómetro com vista à obtenção da figura de *Lissajous*, o mais circular possível, procedeu-se à aquisição de 5 aquisições.

Na figura seguinte apresenta-se a interface gráfica do programa de parametrização e aquisição de dados utilizado em todos os ensaios para cada amplitude de aceleração e frequência bem definidas:

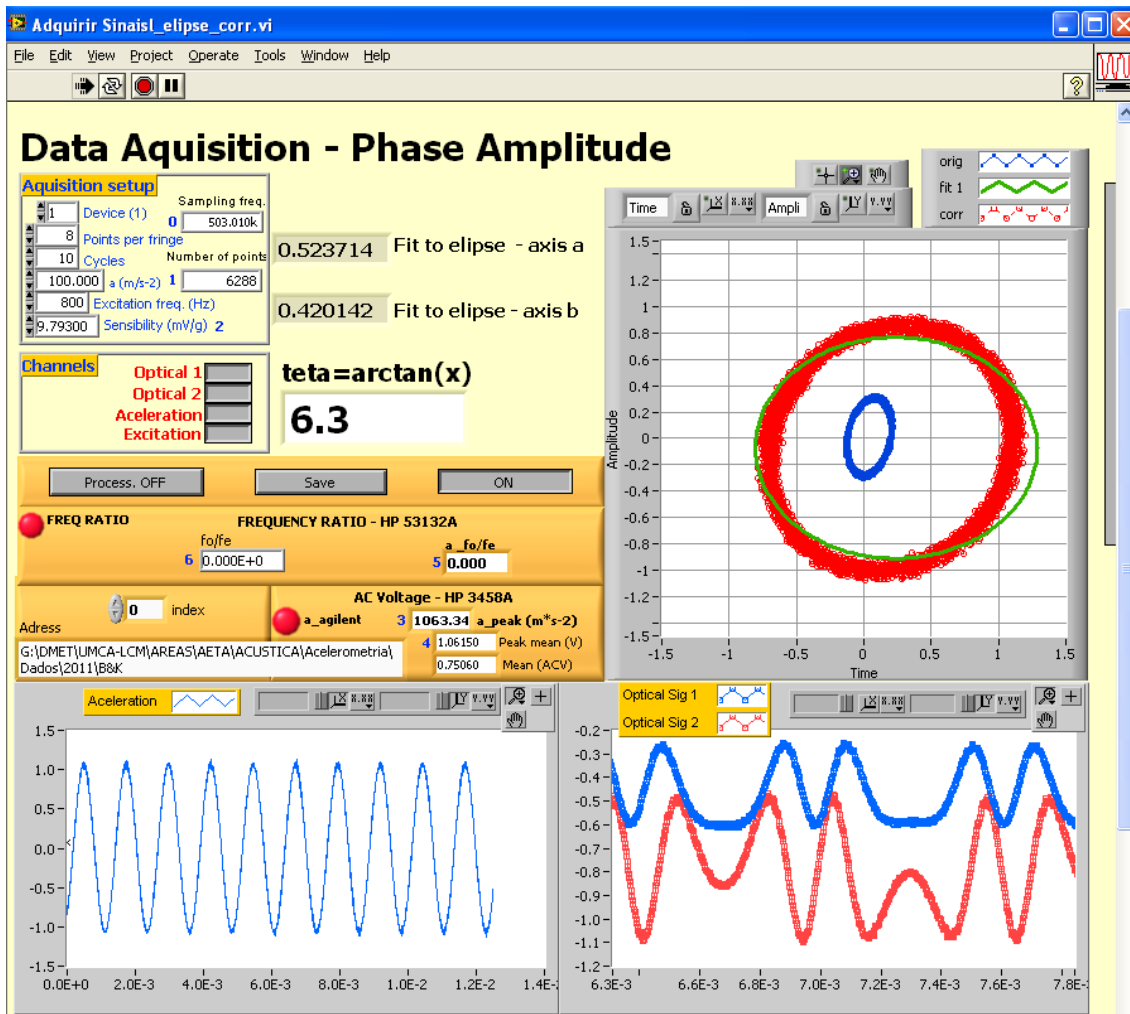


Figura 5-13 Programa de Parametrização e Aquisição de Dados.

Para cada ensaio os parâmetros a apresentar nas respetivas janelas do programa de parametrização e aquisição de dados, foram os seguintes:

- Pontos por franja (adimensional);
- Ciclos (adimensional);
- Aceleração à entrada ($m \cdot s^{-2}$);
- Sensibilidade do pré-amplificador de carga (mV/g);
- Índice do ficheiro para diferenciar ficheiros com os mesmos parâmetros;
- Endereço de pastas no computador onde se pretende guardar o ficheiro resultante da aquisição;
- Figura de *Lissajous* que surge em função do alinhamento do interferómetro e está de acordo com a figura de *Lissajous* observada no osciloscópio;

- Sinal de excitação sob a forma gráfica através do qual se observa se o sistema está a produzir um sinal em forma de senoide bem definida;
- Sinais óticos provenientes dos dois detetores óticos;
- Aceleração de pico ($m \cdot s^{-2}$);
- Tensão de pico (V).

Ao escolher o número de pontos por franja bem como o número de ciclos da amostra variou-se o seu tamanho. Este teve de ser cautelosamente escolhido procurando encontrar uma aproximação entre o tamanho da amostra que demonstra bem o sinal e o tamanho da amostra que permitiu fazer a aquisição em tempo útil e sem sobrecarregar a placa PCI. Procurou-se não ultrapassar muito as 700 kS/s dadas as limitações de capacidade de aquisição da placa. Aquisições acima de 1 MS/s foram possíveis mas tornaram o processo de aquisição muito lento, pelo que apenas foram realizadas quando realmente necessário.

Isto aconteceu para as baixas frequências de excitação, em que foi necessário ter amostras com um tamanho muito elevado, correspondente ao maior número de ciclos e de pontos por franja possível, que melhor traduzisse o movimento a estudar. Uma vez que a aquisição de dados, nem sempre corresponde na prática à obtenção de um número inteiro de ciclos, procurou-se ter sempre pelo menos 2 ciclos, mesmo para baixos valores de frequência, pois foi necessário, no mínimo, um ciclo completo de excitação para um melhor estudo do comportamento do sinal. Quanto maior o número de pontos por franja e de ciclos melhor se verificou ser a qualidade dos sinais observados.

Nesta interface colocou-se a sensibilidade do pré-amplificador de carga, ou do acelerómetro consoante seja o caso do acelerómetro da *Bruel&Kjaer*® ou do acelerómetro da *Endevco*® a calibrar.

É também efetuada a aquisição da razão de frequências do contador, que estabelece o quociente entre a frequência ótica e a frequência de excitação, bem como a aceleração de pico e a tensão de pico, as quais resultam do movimento do *shaker*. Dado que o sistema de excitação do movimento possui também uma incerteza associada, o valor da aceleração de pico não correspondeu ao valor da aceleração imposta ao *shaker*.

Através da observação dos dois sinais óticos estes puderam ser comparados com vista a verificar o seu comportamento em conjunto. Uma situação favorável à calibração de acelerómetros por deteção heterodina foi a sobreposição dos dois sinais tanto quanto possível, a sua definição aproximada ao seno e o tamanho em termos de amplitude de fase semelhante entre ambos os sinais. Estas condições favoreceram a deteção heterodina.

5.6.2 Processamento e Análise de Dados

Na figura seguinte apresenta-se o programa de processamento e análise de dados, para a análise correspondente aos 4 métodos de calibração de acelerómetros-padrão por interferometria laser:

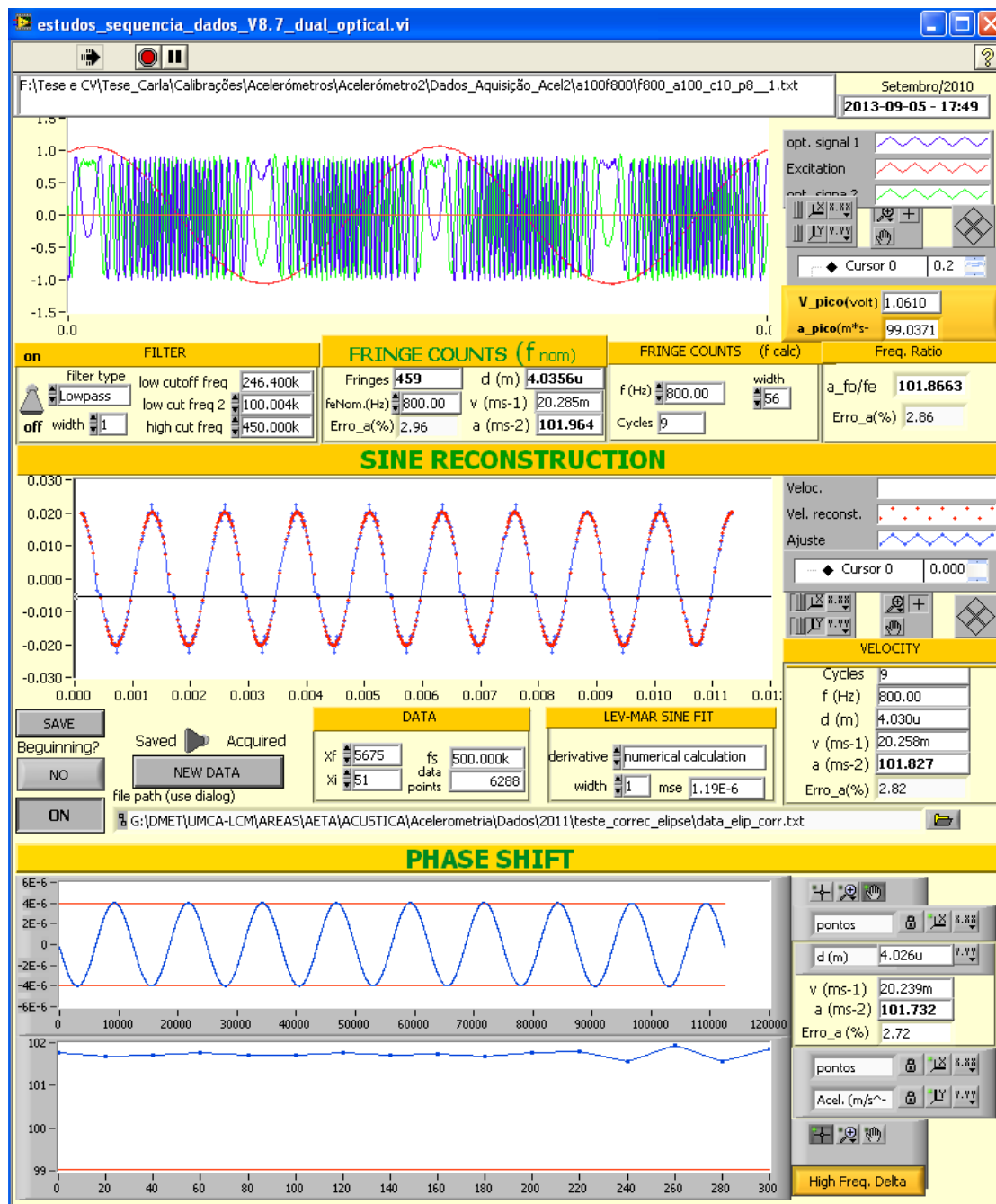


Figura 5-14 Programa de Processamento e Análise de Dados.

Para um dado acelerómetro, após realizar a parametrização e aquisição de dados de um ensaio, estando estes sob a forma de um ficheiro de texto, este é aberto no programa de processamento e análise de dados. Este está desenhado de forma a processar os fundamentos matemáticos associados a cada método, demonstrando os resultados obtidos para cada aquisição.

Para cada ensaio, os parâmetros que estavam na forma de comando, os quais puderam ser alterados com vista a melhorar as condições de visualização e ajuste dos resultados foram os seguintes:

- Uso ou não de um filtro para melhorar o sinal;
- Tipo de filtro, sua largura de banda e valor escolhido;
- Ajuste de *Levenberg-Marquardt* com a escolha dos parâmetros associados ao mesmo;
- Escolha da visualização pelas altas ou baixas frequências.

Para cada ensaio, os parâmetros que foram calculados pelo programa de processamento e análise de dados são apresentados de seguida:

- Gráfico demonstrativo do padrão de interferência dos dois sinais óticos e do sinal de excitação;
- Tensão de pico (V);
- Aceleração de pico ($m \cdot s^{-2}$).

Para o Método da Contagem de Franjas:

- Número de Franjas (adimensional);
- Frequência Nominal (Hz);
- Deslocamento (m);
- Velocidade ($m \cdot s^{-1}$);
- Aceleração ($m \cdot s^{-2}$);
- Erro associado à medição (%).

Para o Método da Razão de Frequências do Contador:

- Razão de frequências à saída do contador (adimensional);
- Erro associado à medição (%).

Para o Método do Ajuste de Velocidades:

- Gráfico demonstrativo do comportamento do sinal ótico e da função que faz o ajuste da senoide através da reconstrução do seno;
- Número de Ciclos (adimensional);
- Frequência (Hz);
- Deslocamento (m);

- Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Aceleração ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);
- Erro associado à medição (%).

Para o Método da Diferença de Fase:

- Deslocamento (m);
- Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Aceleração ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);
- Erro associado à medição (%).

Os dados obtidos neste estudo, para cada 5 ensaios realizados, cada um correspondente a uma combinação de valores de aceleração e frequência, foram colocados num ficheiro *Excel*®, com vista a fazer o tratamento e análise dos mesmos ao nível de cálculos estatísticos conclusivos.

5.7 Calibração dos Pré-Amplificadores de Carga

Os pré-amplificadores de carga, da *Bruel&Kjaer*®, modelos 2626 e 2635, são amplificadores condicionados totalmente equipados [14], com aplicabilidade no estudo de vibrações e ruído.

A sua saída pode ser ligada a gravadores de som, voltímetros, amplificadores de medição [11] e analisadores de frequência. Podem ser alimentados por baterias internas ou por uma fonte de alimentação externa DC.

Ao trabalhar com transdutores de elevada sensibilidade à temperatura, existe a possibilidade de, na entrada do aparelho, ligar o filtro passa-alto num intervalo entre 0,1 Hz e 1 Hz (-3 dB), com vista a reduzir a interferência de sinais provenientes de baixas flutuações de frequência provocadas pela variação da temperatura.

O filtro passa-baixo, cuja função é limitar a faixa de frequência em 100 Hz (-10 %), é usado durante a gravação de sinais de vibração para posterior análise, de acordo com a norma ISO 2631 (Guia para a avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro) [40]. Estas medições são realizadas em veículos de passageiros, tratores e outras máquinas onde o corpo humano na sua totalidade é submetido a vibrações.

O limite de baixa frequência é estendido até 0,1 Hz (-3 dB) no modo linear para tirar partido da sensibilidade à temperatura muito baixa de alguns acelerómetros e de transdutores de força nestas baixas frequências.

O amplificador de saída dispõe de uma rede de 3 dígitos para o ajuste da sensibilidade, o que permite o condicionamento do amplificador de carga de acordo com a sensibilidade do transdutor entre 0,1 e 11 pC/unidade. Este recurso simplifica a calibração e leitura de um sistema de medição, especialmente quando se utilizam transdutores que têm valores de sensibilidade muito característicos. Apresenta-se a figura seguinte ilustrativa de um dos dois pré-amplificadores, nomeadamente o 2635:



Figura 5-15 Pré-Amplificador B&K2635.

5.7.1 Importância da Calibração do B&K2626 e do B&K2635

Os dois pré-amplificadores em estudo constituem amplificadores de controlo que preparam o sinal eletrónico para a posterior amplificação que fica a cargo do amplificador de sinal. Assim, o sinal é amplificado de baixo nível à saída do acelerómetro/entrada do pré-amplificador para um sinal de nível de linha à saída do pré-amplificador de carga, de acordo com o ganho escolhido.

Os pré-amplificadores alvo de estudo são amplificadores de quatro estágios pelos quais passa o sinal, um amplificador de entrada, um filtro passa-baixo, um integrador e por fim um amplificador de saída.

De acordo com o sistema experimental para a calibração de acelerómetros, existe um pré-amplificador que liga a placa de aquisição de dados e o acelerómetro. Este equipamento, colocado neste contexto, tem como objetivo a medição de vibrações na forma de aceleração, velocidade e

deslocamento do acelerómetro com efeito piezoelétrico, quando combinado com o amplificador de sinal. Segue-se a ilustração da aplicabilidade do pré-amplificador no âmbito da calibração de acelerómetros, ao nível do sistema experimental:

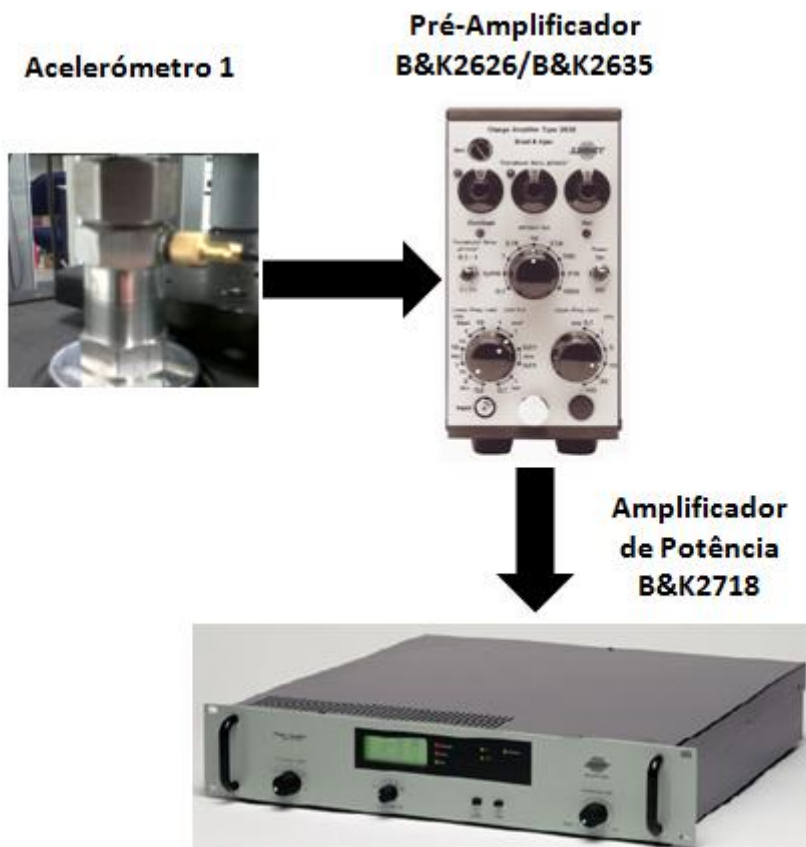


Figura 5-16 Pré-Amplificador na Calibração de Acelerómetros.

A calibração deste equipamento tem a sua importância na calibração de acelerómetros pois é essencial que os equipamentos com influência direta no resultado a obter sejam previamente calibrados. Neste sentido, a calibração dos pré-amplificadores de carga contribuiu para a melhoria dos resultados obtidos na calibração dos acelerómetros. Caso o pré-amplificador não funcione corretamente e tal não seja detetado, os resultados da calibração de equipamentos em que este intervenha, nomeadamente os acelerómetros objeto deste estudo, não serão confiáveis.

5.7.2 Objetivo

Este procedimento teve como objetivo verificar se os pré-amplificadores se encontravam em correto funcionamento, através da determinação do ganho 1 e 10 para os mesmos.

Pretendeu-se determinar qual a margem de erro que surgiu associada, com vista a garantir a exatidão dos valores calculados por este equipamento em operação.

5.7.3 Equipamento utilizado

- Condensador-padrão *Andeen Hagerling*®, modelo AH11A, de 100 pF;
- Gerador de sinais *TEGAM*®, modelo 2411B;
- Multímetro digital *Fluke*®, modelo 8508A.

5.7.4 Procedimento Realizado

Para cada um dos dois pré-amplificadores de carga realizou-se a mesma sequência de operações, a qual se descreve. A calibração consistiu em criar um circuito fechado em AC, dispondo de um multímetro, um gerador de sinal, um condensador e cabos BNC.

- Ligou-se à entrada frontal do multímetro, uma resistência de 50Ω;
- Ligou-se o gerador ao terminal *Hi* do condensador;
- A entrada *Low* do condensador foi ligada à entrada do pré-amplificador de carga;
- A saída do pré-amplificador foi ligada a uma das entradas traseiras do multímetro.



Figura 5-17 Sistema Experimental de Calibração dos Pré-Amplificadores.

5.7.5 Apresentação e Discussão de Resultados

Após colocar o sistema em funcionamento, para cada um dos pré-amplificadores de carga, foram feitas várias aquisições de dados.

Foram realizadas duas fases de ensaios, uma para o B&K2626 e outra para o B&K2635.

Para cada fase de ensaio foram realizados respetivamente dois ensaios, um para o Ganho1 e outro para o Ganho10.

Para cada ensaio de ganho constante foram adquiridos cerca de 160 valores do ganho, que por sua vez corresponde ao quociente entre o sinal de saída do pré-amplificador e o sinal de entrada do mesmo.

Durante a aquisição destes valores fez-se variar a frequência de onda do sinal gerado, à entrada do amplificador, entre 9 valores distintos, nomeadamente $f = 40, 80, 160, 315, 630, 800, 1250, 2500$ e 5000 Hz.

Através do programa de aquisição de dados, criado para o efeito em *LabView®*, foram adquiridos os valores obtidos para o ganho.

Os dados obtidos foram analisados através do sistema de tratamento de dados *Excel®* no qual, dos 160 valores obtidos para o ganho, se escolheu cerca de 11 para cada frequência. Respetivamente para cada 11 valores obtidos calculou-se a média das aquisições, obtendo-se assim um valor médio do ganho para cada uma das 9 frequências testadas.

Calculou-se o erro associado à medição através da equação:

Equação 25:

$$Erro(\%) = \frac{(Ganho_{obtido} - Ganho_{teórico})}{Ganho_{teórico}} \times 100$$

Obteve-se o erro associado à calibração de cada pré-amplificador de carga, para cada valor do ganho, calculando a média dos erros associados a cada valor do ganho associado a cada frequência.

B&K2626 com ganho 1 e 10

Apresenta-se de seguida a tabela ilustrativa dos valores de erro percentual obtidos para as 9 variações de frequência do pré-amplificador B&K2626:

Tabela 5-4 Valores obtidos para o B&K2626 com Ganho 1 e 10.

Freq. (Hz)	Ganho 1	Erro (%)	Ganho 10	Erro (%)
40	1,0033	0,33	9,9959	-0,04
80	1,0009	0,09	10,0055	0,05
160	1,0002	0,02	10,0092	0,09
315	1,0001	0,01	10,0115	0,11
630	1,0000	0,00	10,0153	0,15
800	0,9999	-0,01	10,0095	0,10
1250	0,9998	-0,02	10,0095	0,09
2500	0,9996	-0,04	10,0011	0,01
5000	1,0004	0,04	10,0008	0,01

B&K2635 com ganho 1 e 10:

Apresenta-se de seguida a tabela ilustrativa dos valores de erro percentual obtidos para as 9 variações de frequência do pré-amplificador B&K2635:

Tabela 5-5 Valores obtidos para o B&K2635 com Ganho 1 e 10.

Freq. (Hz)	Ganho 1	Erro (%)	Ganho 10	Erro (%)
40	0,9994	-0,06	10,029	0,29
80	0,9994	-0,06	10,029	0,29
160	0,9994	-0,06	10,034	0,34
315	0,9994	-0,06	10,040	0,40
630	0,9994	-0,06	10,044	0,44
800	0,9994	-0,06	10,045	0,45
1250	0,9995	-0,05	10,046	0,46
2500	1,0005	0,05	10,044	0,44
5000	1,0083	0,83	10,035	0,35

5.7.6 Valores de Erro Médio

Apresenta-se de seguida os valores obtidos para o erro médio calculado para o pré-amplificador B&K2626 para o ganho 1 e 10:

Tabela 5-6 Valores do Erro para o Pré-Amplificador B&K2626.

Pré-Amplificador	B&K2626_G=1	B&K2626_G=10
Erro_médio (%)	0,0465	0,0647

Apresenta-se de seguida os valores obtidos para o erro médio calculado para o pré-amplificador B&K2635 para o ganho 1 e 10:

Tabela 5-7 Valores do Erro para o Pré-Amplificador B&K2635.

Pré-Amplificador	B&K2635_G=1	B&K2635_G=10
Erro_médio (%)	0,0523	0,3843

5.7.7 Conclusões

Relativamente ao erro obtido verifica-se que, para os pré-amplificadores de carga estudados, se obtém um intervalo de $Erro \leq \pm 1\%$ para todos os valores de frequência. Uma vez que existe sempre um erro associado a toda a instrumentação, este é um valor que se considera aceitável face à respetiva especificação técnica.

Analisando o gráfico obtido para o pré-amplificador B&K2626, para o ganho 1, este apresenta uma descida até aos 2500 Hz, sendo esta a frequência de menor ganho. A partir deste ponto o gráfico apresenta-se crescente até aos 5000 Hz. Para o ganho 10, este apresenta um decaimento entre os 1000 Hz e os 4000 Hz, sendo o ganho máximo obtido para a frequência de 1000 Hz e o ganho mínimo obtido para a frequência de 4000 Hz:

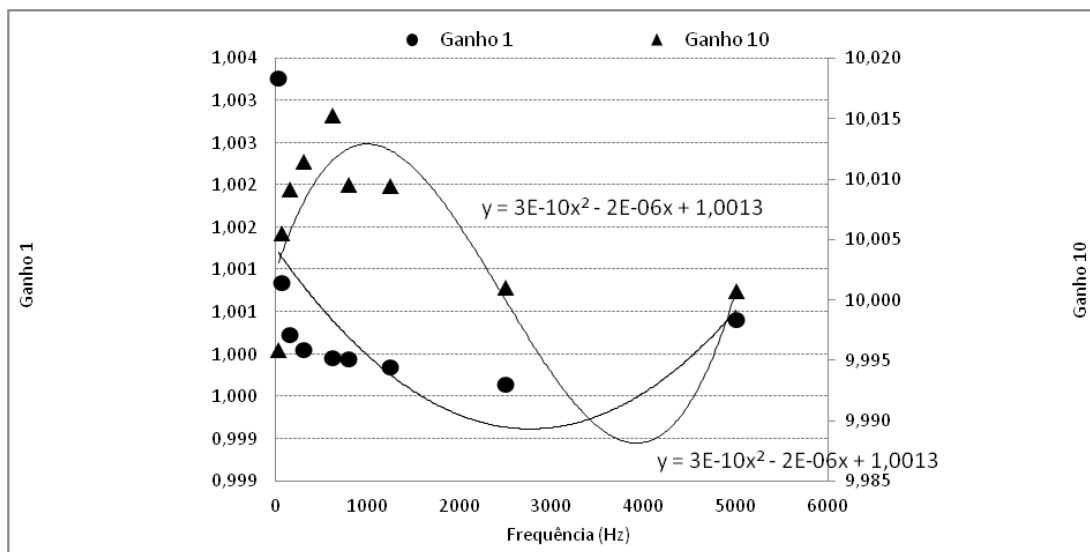


Figura 5-18 Gráfico Obtido para o B&K2626.

Procedendo à análise do gráfico que representa o comportamento do pré-amplificador B&K2635, para o ganho1, este apresenta um comportamento crescente em toda a sua extensão, sendo o maior valor associado à frequência 5000 Hz. Para o ganho 10, o pré-amplificador traduz um ganho crescente até aos 2500 Hz sendo decrescente a partir desse valor até aos 5000 Hz, que traduz o valor máximo do ganho:

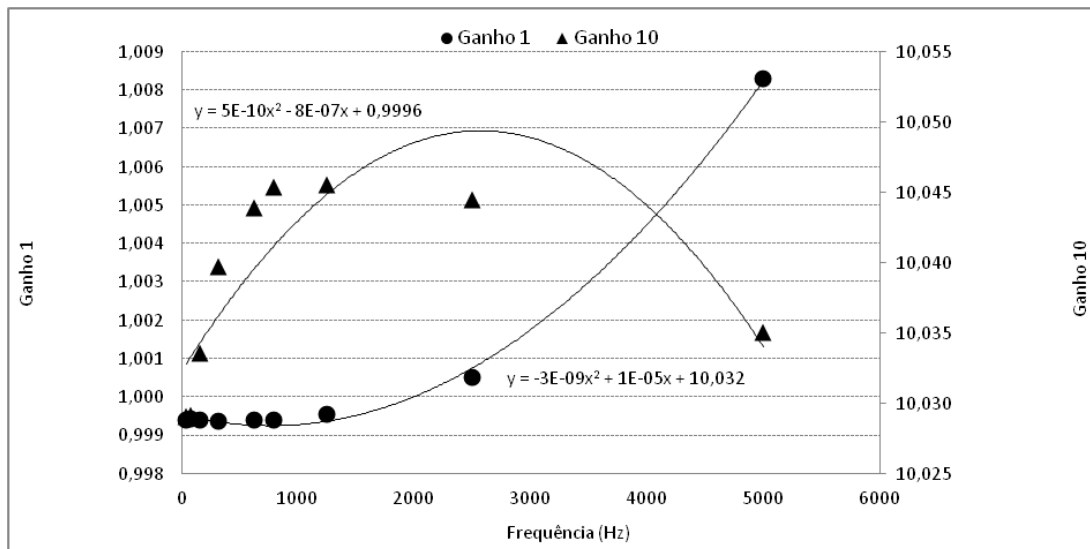


Figura 5-19 Gráfico Obtido para o B&K2635.

Ambos os pré-amplificadores apresentam um erro médio menor quando é escolhido o ganho1, sendo o erro maior quando é escolhido o ganho10.

O pré-amplificador B&K2635 apresenta, para o ganho 10, um erro médio com uma ordem de grandeza acima do erro médio obtido para o ganho 1, sendo o ganho obtido para o B&K2626 com ganho1 da mesma ordem de grandeza do erro obtido para o pré-amplificador B&K2635 para ambos os ganhos.

De acordo com o critério de avaliação escolhido, verifica-se que, para ambos os ganhos testados, o pré-amplificador B&K2626 apresenta menor valor de erro médio. Neste sentido, os seus valores do ganho em operação são mais confiáveis do que os valores obtidos através do pré-amplificador B&K2635.

Ambos os pré-amplificadores apresentam um *Erro Médio* $\leq \pm 1\%$, logo têm um bom funcionamento, estando a diferença de erro apresentada dentro do intervalo de confiança de $\pm 1\%$ em todos os casos considerados.

5.8 Calibração do Controlador de Vibração

O Controlador de Vibração VR-8500 é um equipamento laboratorial composto por duas partes fundamentais, a parte física e a parte computacional [8].

De acordo com a figura a seguir apresentada, a parte física consiste num dispositivo que possui entradas e saídas elétricas para dados, que permitem ligá-lo ao sistema de aquisição, análise e processamento de dados bem como a um equipamento elétrico. A componente computacional consiste num sistema de *software*, onde o utilizador, através da interface informática, pode indicar os valores de deslocamento, velocidade ou aceleração bem como de frequência de excitação, que pretende

introduzir num dado sistema experimental, criando assim um movimento real a partir de um comando eletrónico.

O objetivo deste equipamento consiste na geração de movimentos de vibração a um dado sistema, com vista a criar ou induzir um movimento a analisar, com valores de entrada exatos e confiáveis.



Figura 5-20 Controlador de Vibração.

5.8.1 Importância desta Calibração

A calibração deste equipamento deve ser realizada anualmente, de acordo com a recomendação dada pelo fabricante pelo que se procedeu à sua execução.

A inserção do controlador de vibração nos sistemas experimentais do LAV é muito frequente uma vez que a geração de movimento se revela muito útil. Neste sentido, é importante ter uma garantia do seu correto funcionamento. A falta de manutenção do mesmo poderá causar problemas na calibração ou testes de equipamentos que lhe estejam associados.

Na calibração dos acelerómetros desta dissertação, o controlador de excitação surgiu como um dos elementos fundamentais constituintes do sistema experimental. Assim, a sua calibração foi realizada antes de se proceder à calibração dos acelerómetros, com vista a melhorar a qualidade dos resultados obtidos, bem como reduzir a incerteza associada à calibração dos mesmos.

Na calibração dos acelerómetros o controlador de vibração surgiu ligado de acordo com a figura apresentada:

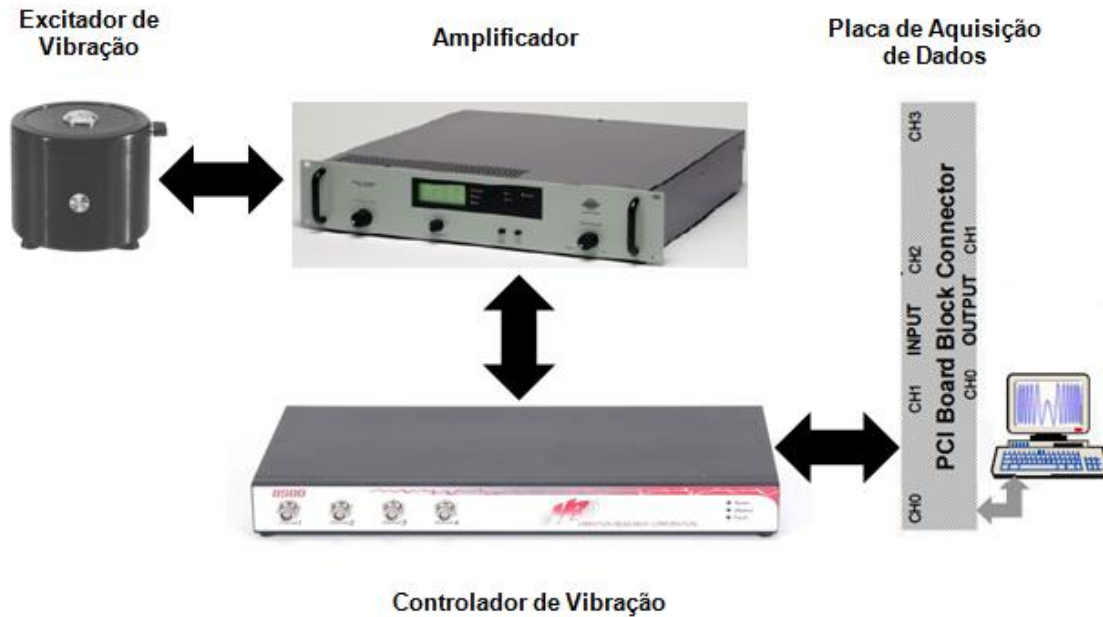


Figura 5-21 Sistema Experimental de Calibração do Controlador de Vibração.

5.8.2 Características do VR-8500

O Controlador de Vibração VR-8500 vem de série com amostragens de entrada A/D de 24 bits com alcance dinâmico de 100 dB. A impedância de entrada é de 100 Ω .

O sistema possui dois canais de saída com 24 bits D/A, numa razão de 100 dB entre sinal e ruído. As saídas são de baixa impedância, com um alcance de 20 V de pico a pico. Os conversores de 24 bits A/D e D/A no VR-8500 dão-lhe a capacidade de resolver os sinais da ordem de 120 dB. O sistema comunica com o PC através de uma porta *Ethernet*. Desta forma, é eliminada a necessidade de cabos especiais e cartões, obtendo-se uma maior flexibilidade.

5.8.3 Equipamento Utilizado

Os elementos necessários para efetuar a calibração foram:

- Cabos BNC;
- Conectores T BNC;
- Fonte de tensão DC estável, previamente calibrada.

5.8.4 Procedimento Realizado

Começou-se por ligar um cabo de alimentação ao VR8500, seguindo-se a ligação do aparelho e a sua estabilização durante uma hora para permitir que a temperatura estabilizasse antes de iniciar a calibração.

Ligaram-se 4 cabos coaxiais juntamente com os três conectores em T. Ligaram-se os conectores nos canais 1 a 4 do VR8500 conforme mostra a figura:



Figura 5-22 Ligações Frontais no Manual de Calibração do Controlador de Excitação.

Ligou-se um cabo BNC entre o conector de saída e o canal 1 e um segundo cabo entre o conector de saída COLA / AUX e o Canal 2. Procedeu-se ao avanço do procedimento novamente.



Figura 5-23 Ligações Traseiras no Manual de Calibração do Controlador de Excitação.

O VR8500 percorreu todas as frequências de amostragem e calibrou todos os canais de entrada e de saídas. Quando a calibração terminou seleccionou-se a calibração permanente de forma a substituir a calibração anterior.

Deu-se a instrução para aplicar a novas configurações. Colocou-se a tensão de referência DC calibrada, que vem da fonte de alimentação, na caixa de diálogo e prosseguiu-se.

5.8.5 Conclusões

Finalizou-se a calibração do controlador de vibração com sucesso.

A calibração deste equipamento foi feita de forma diferente das outras calibrações efetuadas neste estudo, uma vez que apenas foi necessário proceder a uma série de passos bem definidos no manual do fabricante. Após a introdução de valores de referência, o equipamento procedeu à sua calibração interna, através de uma rotina e de um *software* próprio, reconfigurando novos valores a determinados parâmetros e constantes internas. Não foram obtidos valores desta calibração mas sim uma confirmação de que a calibração foi realizada com sucesso.

A calibração deste equipamento constituiu mais uma forma de melhorar a qualidade e fiabilidade dos resultados obtidos para a calibração dos acelerómetros alvo deste estudo.

6 Incertezas de Medição

Qualquer medição realizada surge com uma incerteza associada, ou seja um intervalo de valores no interior do qual se encontra o verdadeiro valor da mensuranda. A mensuranda é a grandeza que se pretende medir aquando da medição. A incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado da medição e que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos à mensuranda. A expressão do resultado de uma medição consiste no valor atribuído à mensuranda em conjunto com a incerteza de medição associada a esse valor.

Uma das formas de avaliar a incerteza numa medição baseia-se nas recomendações do Guia para a Expressão da Incerteza na Medição, GUM, [4] publicado em 1995 por 7 organizações internacionais, nomeadamente o BIPM, a CEI, o IFCC, a ISO, A IUPAC, a IUPAP e a OIML.

O balanço das incertezas de medição foi realizado de acordo com o respetivo modelo matemático associado a cada método de medição, sob a forma de um quadro com vista a integrar a informação detalhada das respetivas componentes de incerteza [33], o qual inclui:

- Lista de todas as componentes de incerteza;
- Incertezas-padrão associadas;
- Métodos de avaliação;
- Número de observações no caso de medições repetidas;
- Contribuição para a incerteza;
- Dimensão das grandezas;
- Incerteza de medição expandida.

6.1 Importância do Cálculo de Incertezas de Medição

O procedimento de calibração de qualquer equipamento pressupõe não apenas a aquisição e tratamento dos seus dados mas também o cálculo da incerteza associada a essa medição. Só desta forma se consegue avaliar a exatidão das medidas e o que esperar do equipamento em operação.

A melhor capacidade de medição, referida à mensuranda, consiste na menor incerteza de medição obtida por um laboratório, no contexto das suas calibrações de padrões de medição destinados à definição, realização, conservação ou reprodução dos seus valores [33].

Quando se avalia a melhor capacidade de medição de um laboratório, face a uma determinada mensuranda, devem ser tomados em consideração todas as componentes que contribuem significativamente para a incerteza de medição.

Desta forma, ao nível desta dissertação, após terem sido obtidos os resultados de medição, bem como realizados os cálculos estatísticos dos mesmos, procedeu-se ao respetivo cálculo das incertezas associadas às medições realizadas.

6.2 Fundamentos Teóricos para o Cálculo de Incertezas

No cálculo de incertezas para a calibração de acelerómetros-padrão, realizada nesta dissertação, considerou-se apenas uma mensuranda. Esta grandeza de saída, a mensuranda y , corresponde à sensibilidade S , do acelerómetro. O cálculo da grandeza y dependeu de um conjunto de grandezas de entrada x_i . Desta forma, apresenta-se a expressão da função f , representativa da variação de y em função dos parâmetros de x_i :

Equação 26:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Onde:

- Grandeza de saída y = Sensibilidade do acelerómetro;
- Grandezas de entrada $x_i = V$ e a , tal como indicado pela relação matemática que define a sensibilidade do acelerómetro.

Equação 27:

$$S = \frac{V}{a}$$

Onde:

- S = Sensibilidade ($V/m \cdot s^{-2}$) ou ($pC/m \cdot s^{-2}$);
- V = Tensão de pico lida no voltímetro, resultante do movimento do shaker (V);
- a = Amplitude de aceleração calculada através de cada método de medição ($m \cdot s^{-2}$).

Conforme foi apresentado, para o método da Contagem de Franjas, a amplitude de aceleração é calculada segundo a equação:

Equação 28:

$$a = \frac{\pi^2 \times \lambda \times f_e \times f_o}{2}$$

Onde:

- λ = Comprimento de onda do laser de He-Ne (m);
- f_e = Frequência de excitação (Hz);

- f_o = Frequência ótica (Hz).

Neste sentido, a sensibilidade do acelerómetro, pelo método da Contagem de Franjas, traduz-se pela seguinte expressão:

Equação 29:

$$S = \frac{2 \times V}{\pi^2 \times \lambda \times f_e \times f_o}$$

Da mesma forma, conforme foi apresentado, para o método da Diferença de Fase, a amplitude de aceleração é calculada segundo a equação:

Equação 30:

$$a = \frac{\Delta\phi \times \pi \times \lambda \times f_e^2}{2}$$

Onde:

- $\Delta\phi$ = Amplitude de fase (rad).

Neste sentido, a sensibilidade do acelerómetro, pelo método da Diferença de Fase, traduz-se pela seguinte expressão:

Equação 31:

$$S = \frac{2 \times V}{\Delta\phi \times \pi \times \lambda \times f_e^2}$$

Nesta dissertação, a função f é a expressão analítica que tem como objetivo modelar o procedimento de medição e o método de avaliação de incertezas. No caso concreto da calibração de acelerómetros-padrão, a função f descreveu como foram obtidos os valores de sensibilidade dos acelerómetros, através da combinação dos valores de entrada correspondente aos parâmetros que originaram incerteza durante o procedimento experimental de aquisição dos mesmos.

Em termos de grandezas de entrada x_i , estas foram agrupadas em dois grandes grupos:

- Grandezas do tipo A;
- Grandezas do tipo B.

Grandezas do Tipo A:

As grandezas do tipo A são grandezas cuja estimativa e incerteza associada foram determinadas diretamente pela medição através observações repetidas.

A avaliação das incerteza-padrão de grandezas do tipo A consistiu no método de avaliação pela análise estatística de séries de observações. Neste caso, a incerteza-padrão correspondeu ao desvio-padrão experimental da média do conjunto de 5 aquisições por ensaio, ao qual foi associado o procedimento de cálculo da média das 5 aquisições.

É importante salientar que cada grandeza de entrada x_i foi repetidamente medida para n observações estatisticamente independentes, tendo sido os respetivos valores individualmente observados.

No contexto do cálculo das incertezas de medição, para as grandezas do tipo A, foi necessário numa primeira fase obter uma média aritmética de alguns dos valores adquiridos [4]. Neste sentido, os parâmetros sujeitos ao cálculo da média aritmética foram:

- Velocidade de pico, V (V);
- Aceleração de Pico, a_{pico} ($m \cdot s^{-2}$);
- Frequência ótica, f_o (Hz);
- Aceleração para cada um dos 4 métodos, a ($m \cdot s^{-2}$);
- Amplitude de Fase, $\Delta\phi$ (rad).

Distribuição de Probabilidade Normal:

A distribuição de probabilidade normal foi utilizada para as grandezas do tipo A.

Esta distribuição de probabilidade normal definiu-se no sentido em que o valor da incerteza padrão não foi alterado. Logo verificou-se a expressão seguinte:

Equação 32:

$$u(x_{iA}) = u(x_i)$$

As grandezas do tipo A que compuseram o cálculo de incertezas na calibração de acelerómetros-padrão foram:

Para o Método da Contagem de Franjas:

- Desvio-padrão experimental da média da tensão de pico;
- Desvio-padrão experimental da frequência ótica.

Para o Método da Diferença de Fase:

- Desvio-padrão experimental da média da tensão de pico;
- Desvio-padrão experimental da média da amplitude de fase.

O desvio experimental, $s(q)$, do ensaio de 5 aquisições corresponde à fórmula matemática seguinte:

Equação 33:

$$s(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^5 (q_j - \bar{q})$$

- q_j = Valor correspondente a 1 aquisição;
- \bar{q} = Média dos valores obtidos das j aquisições.

Para o cálculo do desvio-padrão foi necessário antes efetuar o cálculo da média. A seguinte expressão representa a fórmula matemática utilizada para o cálculo do valor de cada ensaio que resulta da média dos valores obtidos de cada 5 aquisições, realizados para cada combinação de valores de aceleração e frequência.

Equação 34:

$$\bar{q} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 q_j$$

Para obter o valor da incerteza associada a cada grandeza do tipo A usou-se neste sentido a seguinte expressão matemática que traduz a igualdade entre a incerteza associada e o desvio-padrão de um conjunto de aquisições que compõem cada ensaio:

Equação 35:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q})$$

Grandezas do Tipo B:

As grandezas do tipo B consideradas para cálculo de incertezas na calibração de acelerómetros-padrão foram:

Para o Método da Contagem de Franjas:

- Incerteza da tensão de pico do acelerómetro;
- Incerteza da frequência ótica;
- Incerteza do comprimento de onda do laser de He-Ne;
- Incerteza da frequência do controlador de vibração.

Para o Método da Diferença de Fase:

- Incerteza da tensão de pico do acelerómetro;
- Incerteza da medição da amplitude de fase;

- Incerteza do comprimento de onda do laser de He-Ne;
- Incerteza da frequência do controlador de vibração.

A avaliação da incerteza-padrão do tipo B consiste no método de avaliação de incerteza por outros meios que não os da análise estatística de séries de observações, mas sim outros meios científicos. Algumas das incertezas do tipo B foram fornecidas pelo fabricante do equipamento.

As grandezas do tipo B incluem grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são provenientes de origens externas à medição, provenientes de:

- Padrões de medição calibrados;
- Materiais de referência certificados;
- Dados de referência obtidos de manuais.

Foi necessário atribuir uma distribuição de probabilidade para a grandeza x_i , tendo sido utilizadas 2 distribuições de probabilidade diferentes. A distribuição de probabilidade escolhida definiu a forma como a incerteza padrão final $U(x_i)$ foi calculada com base na incerteza-padrão $u(x_i)$.

Distribuição de Probabilidade Retangular:

Nas situações correspondentes às grandezas do tipo B utilizou-se uma distribuição de probabilidade retangular, para a variabilidade possível de x_i .

Neste sentido foi usada a fórmula:

Equação 36:

$$u(x_{iB}) = \frac{u(x_i)}{\sqrt{3}}$$

Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída y:

A grandeza $u(y)$ constitui a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída y , resultando da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada x_i .

Uma vez que nenhuma das grandezas de entrada se encontra relacionadas entre si, o quadrado da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y foi calculado pela expressão:

Equação 37:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

- $u(y)$ = Incerteza padrão da estimativa da grandeza de saída;
- $u_i(y)$ = Incerteza padrão da estimativa da grandeza de entrada i .

Coefficiente de sensibilidade:

A cada valor de incerteza padrão $u(x_i)$ associada a uma dada grandeza de entrada i , foi multiplicado um fator denominado coeficiente de sensibilidade, c_i , de acordo com a fórmula:

Equação 38:

$$u(y) = c_i \times u(x_i)^2$$

O coeficiente de sensibilidade c_i , associado à estimativa da grandeza de entrada, é a derivada parcial da função modelo f em relação às estimativas de x_i . Este parâmetro descreve como a estimativa da grandeza de saída y é influenciada pelas variações de cada uma das grandezas de entrada x_i . Uma vez que $u(x_i)$ é sempre positivo, a contribuição de $u(y)$ será positiva ou negativa de acordo com o sinal do coeficiente de sensibilidade c_i .

O coeficiente de sensibilidade é calculado segundo a seguinte expressão:

Equação 39:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

Para a incerteza da tensão de saída do acelerómetro, bem como para a incerteza associada ao desvio-padrão experimental da tensão de pico, relativamente ao método da Contagem de Franjas, calculou-se a derivada parcial da função f em relação à tensão de pico. A expressão para o cálculo de c_i foi a seguinte:

Equação 40:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial V} = \frac{2}{\pi^2 \times \lambda \times f_e \times f_o}$$

Onde:

- c_i (1/ Hz²m).

Para a incerteza da tensão de saída do acelerómetro, bem como para a incerteza associada ao desvio-padrão experimental da tensão de pico, relativamente ao método da Diferença de Fase, a expressão para o cálculo de c_i foi a seguinte:

Equação 41:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial V} = \frac{2}{\lambda \times \Delta\phi \times \pi \times f_e^2}$$

Em que:

- c_i (V/ Hz²m).

Para a incerteza da frequência ótica, bem como para a incerteza associada ao desvio-padrão experimental da frequência ótica, parâmetro apenas associado ao método da Contagem de Franjas, a expressão para o cálculo de c_i foi a seguinte:

Equação 42:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial f_o} = \frac{-2V}{\pi^2 \times \lambda \times f_o^2 \times f_e}$$

Onde:

- c_i (V/ Hz³m).

Para a incerteza do comprimento do laser de He-Ne, associada tanto ao método da Contagem de Franjas como ao método da Diferença de Fase, a expressão para o cálculo de c_i foi a seguinte:

Equação 43:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial \lambda} = \frac{-2V}{\pi^2 \times \lambda^2 \times f_e \times f_o}$$

Onde:

- c_i (V/ Hz²m²).

Para a incerteza associada à frequência do controlador de excitação, associada aos 2 métodos de calibração alvo do cálculo de incertezas, a expressão para o cálculo de c_i foi a seguinte:

Equação 44:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial f_e} = \frac{-2V}{\pi^2 \times \lambda \times f_e^2 \times f_o}$$

Onde:

- c_i (V/ Hz³m).

Número de graus de liberdade:

O número de graus de liberdade, GDL, assume um determinado valor, consoante a grandeza seja do tipo A ou do tipo B.

Para as incertezas associadas a grandezas do tipo A considera-se:

Equação 45:

$$GDL = (n-1)$$

Em que n representa o número de observações para cada ensaio.

Para as incertezas associadas a grandezas do tipo B considerou-se:

Equação 46:

$$GDL = 50$$

Fator de expansão, k:

Para o cálculo do fator de expansão é utilizada a seguinte equação:

Equação 47:

$$k = v_{eff} = \frac{u_i^4(y)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i^4(y)}{GDL}\right)}$$

Método de Cálculo da Incerteza Expandida:

A incerteza combinada, U_c , calculou-se da seguinte forma:

Equação 48:

$$U_c = \sum_{n=1}^5 (c_i \times u(x_i))^2$$

A incerteza expandida, U , calculou-se da seguinte forma:

Equação 49:

$$U = k \times U_c$$

Onde:

U = Incerteza expandida (mV/m·s⁻²) ou (pC/m·s⁻²).

A incerteza expandida, U (%), sob a forma percentual foi apresentada através da expressão seguinte:

Equação 50:

$$U(\%) = \frac{U}{\bar{V}} \times 100$$

6.3 Tabelas Auxiliares Utilizadas no Balanço de Incertezas

Para explicar como se chegou às tabelas finais correspondentes aos balanços de incerteza, tornou-se necessário ter em consideração parâmetros auxiliares e cálculos que foram realizados. Os mesmos são apresentados neste capítulo através de tabelas que foram construídas para cada quadro de balanço de incertezas na qualidade de tabelas auxiliares.

A tabela que se segue representa a primeira tabela auxiliar para a construção da tabela de balanço de incertezas:

Tabela 6-1 Primeiros Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.

Δto = N° ciclos/fe	1,7E-02
N° franjas	8,6E+02
N° passagens por zero do sinal óptico/Δt = fo	5,3E+04

O tempo da amostra, Δt_0 , é o intervalo de tempo no qual a amostra foi definida, corresponde à seguinte expressão:

Equação 51:

$$\Delta t_0 = \frac{\text{Número de Ciclos}}{f_e} \text{ (s)}$$

Onde:

- f_e = Frequência de excitação(Hz);
- Número de franjas = Padrão de interferência que quanto maior for menor será a incerteza a ele associada (adimensional);
- f_o = Frequência do sinal ótico (Hz).

A frequência do sinal ótico é dada pela seguinte expressão:

Equação 52:

$$f_o = \frac{2 \times a_{\text{método}}}{\pi^2 \times \lambda \times f_e}$$

Onde:

- $a_{\text{método}}$ = Aceleração obtida pelo método da Contagem de Franjas ou pelo método da Diferença de Fase, consoante o caso ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);
- λ = Comprimento de onda da radiação proveniente do laser = $6,328 \times 10^{-7}$ m.

A tabela que se segue representa a segunda tabela auxiliar para a construção da tabela de balanço de incertezas:

Tabela 6-2 Segundos Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.

Clock da Placa = Δt	1,0E-04
Fs	1,0E+06
1/Fs =	1,0E-06
(1/Fs) / Δto=	6,0E-05
N° Ciclos	10

O *Clock* da placa, $\Delta t(s)$, corresponde ao tempo de aquisição utilizado pela placa de aquisição de dados num determinado ensaio, e tem de ser muito maior do que o tempo da amostra para

não cortar o sinal. Este parâmetro faz parte do equipamento e não se altera com a variação dos parâmetros de aquisição.

A frequência de amostragem, F_s (Hz) corresponde à resolução em termos de frequência da amostra de dados proveniente da aquisição em questão. Este valor muda em cada aquisição pois varia em função do tamanho da amostra.

O Número de ciclos é adimensional e consiste no número de ciclos descritos pelo sinal ótico que quanto maior for, menor será a incerteza associada.

A tabela que se segue representa a terceira tabela auxiliar para a construção da tabela de balanço de incertezas:

Tabela 6-3 Terceiros Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.

Espec. Placa aquis. = $\Delta t \cdot f_o$	5,3E+00
Resolução taxa amostragem	3,1

A Especificação da Placa PCI traduz-se pela seguinte expressão:

Equação 53:

$$Espec. Placa = \Delta t \times f_o$$

Onde a espessura da placa é um parâmetro adimensional.

A Resolução da taxa de amostragem (s^{-1}) traduz-se pela seguinte expressão:

Equação 54:

$$R_{amostragem} = \frac{1}{F_s} \times \frac{Número\ de\ Franjas}{\Delta t_o^2}$$

A tabela que se segue representa a quarta tabela auxiliar para a construção da tabela de Balanço de Incertezas:

Tabela 6-4 Quartos Dados para o Cálculo da Incerteza Expandida.

Resolução de 12 bits	0,010	
0,5	51,2	bits em 500mV de amp. Pic
Erro Máximo	0,039	rad

A Resolução de 12 bits é uma característica inerente à placa PCI, pelo que esta tem o valor:

Equação 55:

$$R_{12bits} = \frac{20}{2^{11}}$$

O erro máximo da placa corresponde à expressão seguinte:

Equação 56:

$$Erro = \arctg\left(\frac{R12bits}{0,25}\right)$$

Este parâmetro vai corresponder à incerteza de medição da amplitude de fase, $\Delta\phi$.

A componente referente ao índice de refração, que varia de acordo com as condições atmosféricas, não é apresentada pois a estabilidade da temperatura no laboratório e a variação da pressão atmosférica causam uma variação no índice de refração muito inferior a todas as outras componentes e é por isso desprezável.

6.4 Balanço de Incertezas e Cálculo da Incerteza Expandida

Ao nível da construção das tabelas de balanço de incertezas, o procedimento realizado foi o mesmo para os dois acelerómetros.

Para cada ensaio correspondente a cada combinação de valores de aceleração e frequência bem definidos foram realizados dois balanços de incerteza, que corresponderam a dois quadros de valores calculados de acordo com os procedimentos estatísticos descritos para o cálculo de incertezas. Os dois balanços referem-se respetivamente ao método da Contagem de Franjas e ao Método da Diferença de Fase.

Uma vez que não é possível apresentar neste documento todas as tabelas efetuadas, apresentam-se 2 exemplos dos balanços de incertezas, que combinam a informação para o cálculo da incerteza expandida para os 2 acelerómetros.

Na tabela seguinte apresenta-se o balanço de incertezas realizado para o acelerómetro B&K8305S para uma aceleração de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e uma frequência de 600 Hz utilizando o método da Contagem de Franjas.

Tabela 6-5 Balanço de Incerteza para o Método da CF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$.

Grandeza	Incerteza-Padrão $[u(x_i)]$		Avaliação (Tipo A ou Tipo B) / Distribuição de Probabilidade	Incerteza-Padrão $[u(x_i)]$	Coeficientes de Sensibilidade c_i	[$c_i \cdot u(x_i)$] ²		Nº de graus de liberdade de liberdade [v]
Incerteza da Tensão de Pico do Acelerómetro	8,4E-05	V	B / rectangular	4,9E-05	$2 / (\pi^2 \lambda_{n0} f f_0)$	1,0E-02	2,4E-13	50
Desvio Experimental da Média da Tensão de Pico	3,7E-05	V	A / normal	3,7E-05	$2 / (\pi^2 \lambda_{n0} f f_0)$	1,0E-02	1,4E-13	4
Incerteza da Frequência Ótica	6,1E-00	Hz	B / rectangular	3,5E+00	$-2 / (\pi^2 \lambda_{n0} f_0^2)$	-1,9E-07	4,5E-13	50
Desvio Experimental da Frequência Ótica	9,3E+01	Hz	A / normal	9,3E+01	$-2 / (\pi^2 \lambda_{n0} f_0^2)$	-1,9E-07	3,1E-10	4
Incerteza do λ do laser	1,0E-10	m	B / rectangular	5,8E-11	$-2 / (\pi^2 \lambda_{n0}^2 f_0^2)$	-1,6E-04	8,3E-13	50
Incerteza da Frequência do Controlador de Vibração	1,0E-06	Hz	B / rectangular	5,8E-07	$-2 / (\pi^2 \lambda_{n0}^2 f_0^2)$	-1,7E-05	9,2E-23	50
					Σ		3,1E-10	4,0

A tabela anterior resulta na tabela que se segue onde foram calculados os valores de incerteza expandida para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$, para o método da Contagem de Franjas.

Tabela 6-6 Incerteza Expandida para o Método da CF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$.

Incerteza Combinada, U_c (y)	1,8E-05	
Fator de Expansão, k	2,9	
Incerteza Expandida, U	5,0E-05	V/m*s-2
Incerteza Expandida, U	0,5	%

Na tabela que se segue apresenta-se o balanço de incertezas realizado para o acelerómetro B&K8305S para uma aceleração de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e uma frequência de 600 Hz utilizando o método da Diferença de Fase.

Tabela 6-7 Balanço de Incerteza para o Método da DF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$.

Grandeza	Incerteza-Padrão [u(xi)]		Avaliação (Tipo A ou Tipo B) / Distribuição de Probabilidade	Incerteza-Padrão [u(xi)]	Coeficientes de Sensibilidade c_i	Coeficientes de Sensibilidade $(c_i \cdot u(x_i))^2$		Nº de graus de liberdade [v_i]
Incerteza da tensão de saída do acelerómetro	8,4E-05	V	B / rectangular	4,9E-05	1,0E-02	2*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^2$)	2,4E-13	50
Desvio Experimental da Média da Tensão de Pico	4,2E-05	V	A / normal	4,2E-05	1,0E-02	2*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^2$)	1,8E-13	4
Incerteza da Medição da Amplitude de Fase	3,9E-02	rad	B / rectangular	2,3E-02	-3,6E-05	2*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \pi \cdot f$) ($\sqrt{2}$)	6,6E-13	50
Desvio Experimental da Média da Amplitude de Fase	8,4E-03	rad	A / normal	8,4E-03	-3,6E-05	2*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \pi \cdot f$) ($\sqrt{2}$)	9,1E-14	4
Incerteza do λ laser	1,0E-10	m	B / rectangular	5,8E-11	-1,6E-04	2*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^2 \cdot \pi \cdot f$) ($\sqrt{2}$)	8,3E-13	50
Incerteza da Frequência do Controlador de Vibração	1,0E-06	Hz	B / rectangular	5,8E-07	-3,3E-05	4*($\lambda \cdot \Delta\phi \cdot \pi \cdot f^3$) ($\sqrt{2}$)	3,7E-22	50
					Σ		2,0E-12	1,2E+02

A tabela anterior resulta na tabela que se segue onde foram calculados os valores de incerteza expandida para uma aceleração $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 600 \text{ Hz}$, para o Método da Diferença de Fase.

Tabela 6-8 Incerteza Expandida para o Método da DF, $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ e $f = 600 \text{ Hz}$.

Incerteza Combinada, $U_c(y)$	1,4E-06	
Fator de Expansão, k	2,0	
Incerteza Expandida, U	2,9E-06	V/m*s-2
Incerteza Expandida, U	0,03	%

7 Apresentação e Discussão de Resultados

Neste capítulo apresenta-se a síntese e a análise dos resultados, bem como a sua interpretação. O objetivo desta fase consistiu em expor os dados bem como efetuar comparações pertinentes. Pretendeu-se obter conhecimentos acerca dos métodos em estudo para os dois acelerómetros-padrão, principalmente acerca do método da Diferença de Fase.

Neste sentido, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos para o método da Contagem de Franjas, CF, para o método da Diferença de Fase, DF, para o método do Ajuste de Velocidades, AV, bem como para o método da Razão de Frequências do Contador, RFC.

Conforme pretendido, com vista a cumprir o intervalo de medição de amplitudes de aceleração, nomeadamente entre $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, foram realizadas medições para 3 valores neste intervalo, nomeadamente, $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ao nível da frequência de excitação, o intervalo de medição considerado situou-se entre os 40 Hz e os 3 kHz, variando os intervalos comparativos dentro deste consoante os métodos de calibração.

Numa primeira fase, compararam-se os valores obtidos através dos 4 métodos, previamente apresentados, relativamente à sensibilidade do acelerómetro. Nesta comparação, considerou-se os valores de incerteza determinados e associados ao método da CF e ao método da DF. Foi também considerada a sensibilidade determinada pelo método do AV e pelo método da RFC nestes intervalos, como forma de avaliação dos valores obtidos para estes dois métodos.

Numa segunda fase, através de gráficos de barras, realizou-se a comparação dos valores da amplitude de aceleração em função da frequência de excitação, calculados através dos 4 métodos de calibração.

Numa terceira fase, foi realizada a comparação entre o método da DF e o da CF ao nível da sua incerteza expandida, apresentada sob a forma percentual. Estes foram os principais métodos de estudo que se pretendia comparar, pelo que a incerteza expandida apenas foi calculada para estes dois casos.

Com vista a comparar os métodos entre si, em termos de sensibilidade de medição, o que constitui o fator mais importante e que melhor caracteriza um acelerómetro, nas mesmas condições de calibração, foram tomados como padrão o método da CF e o da DF.

Procurou-se perceber de que forma a sensibilidade calculada pelos restantes métodos se afastava da sensibilidade do método considerado padrão ao longo da frequência, considerando os 3 valores de aceleração referidos. Sendo a CF o método primário de calibração de acelerómetros-padrão por interferometria laser, e o método da DF o que se pretendeu validar nesta dissertação, esta

comparação permitiu tirar conclusões acerca destes dois métodos e compreender o afastamento que o método do AV e da RFC apresentam face ao método da CF e da DF.

Considerando o acelerómetro B&K8605S e o método da DF, procedeu-se à escolha de um intervalo de frequências onde foram usados os mesmos valores de frequência de excitação. Fez-se a comparação inversa, ou seja, verificou-se o comportamento deste acelerómetro para a mesma frequência e para os 3 valores de aceleração. Este procedimento proporcionou um conhecimento alargado acerca do método que se pretendeu validar nesta dissertação.

Foi ainda efetuada a comparação entre o comportamento dos 2 acelerómetros entre si, num intervalo de medição de valores de alta frequência e num intervalo de medição de valores de baixa frequência, respetivamente para o método da Diferença de Fase e para o método da Contagem de Franjas. Neste sentido, os 2 acelerómetros foram comparados diretamente em termos da incerteza expandida de medição, sob a forma percentual, para uma aceleração nominal de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Esta comparação teve em vista compreender a diferença de comportamento associada aos dois acelerómetros quando comparados entre si para os dois métodos principais.

Neste sentido foi possível calibrar os dois acelerómetros-padrão, bem como perceber o seu comportamento a baixas e altas frequências, com diferentes amplitudes de aceleração, considerando os 4 métodos de calibração de acelerómetros-padrão por interferometria laser.

Conforme era objeto principal da dissertação, analisou-se a validade do Método da Diferença de Fase em regime de alta frequência $\geq 1 \text{ kHz}$.

7.1 Acelerómetro B&K8305S

O método da DF surgiu no sentido de efetuar a calibração de acelerómetros-padrão para elevados valores de frequência de excitação, pelo que constitui o método padrão que complementa o método da CF, cuja zona de funcionamento se situa para valores até 1 kHz . Neste sentido, procedeu-se ao estudo comparativo destes dois métodos usando como objeto o acelerómetro B&K8305S sujeito a calibração. Procurou-se validar o método da DF a partir do método da CF e perceber o que acontece quando se usa o método da CF acima de 1 kHz . Usou-se ainda os dois restantes métodos, nomeadamente o método do AV e da RFC, com vista a observar os seus valores procurando inseri-los nos intervalos de validade do método da CF e da DF. O Acelerómetro B&K8305S tem uma sensibilidade nominal de $0,1289 \text{ pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$, pelo que se procurou verificar se a sensibilidade calculada se afastava deste valor ao longo da análise de resultados.

7.1.1 Síntese dos Resultados para o Acelerómetro B&K8305S

Apresenta-se a seguir a tabela ilustrativa dos valores obtidos de aceleração, sensibilidade e incerteza expandida, para as três amplitudes de aceleração, nomeadamente de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e

10 m·s⁻². Estes valores foram obtidos através dos quatro métodos de calibração em estudo. Considerou-se valores de frequência desde as baixas às altas frequências, nomeadamente entre 40 Hz e 3000 Hz.

Tabela 7-1 Síntese dos 4 métodos para o B&K8305S.

a=100m*s-2	Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.		
	Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)
80	99,9	1,276E-01	1,1E-03	0,85						100,8	1,2658E-01	99,4	1,2827E-01
100	99,2	1,286E-01	1,2E-03	0,92	99,4	1,2831E-01	7,0E-05	0,05	99,9	1,2765E-01	99,4	1,2827E-01	
200	99,2	1,2867E-01	1,4E-04	0,11	99,1	1,2873E-01	2,8E-05	0,02	100,0	1,2759E-01	99,1	1,2876E-01	
400	98,9	1,2904E-01	3,4E-04	0,26	99,0	1,28934E-01	3,1E-05	0,02	99,3	1,2857E-01	99,0	1,2895E-01	
600	99,1	1,2876E-01	6,5E-04	0,50	99,0	1,28960E-01	3,7E-05	0,03	99,2	1,2873E-01	99,0	1,2898E-01	
900	98,8	1,2912E-01	2,6E-04	0,20	98,8	1,29194E-01	5,8E-05	0,04	98,8	1,2913E-01	98,7	1,2927E-01	
1000	99,2	1,287E-01	1,3E-03	1,00	98,4	1,29713E-01	6,9E-05	0,05	98,6	1,2945E-01	98,7	1,2926E-01	
1200	99,0	1,288E-01	1,3E-03	0,99	98,1	1,29999E-01	1,0E-04	0,08	98,4	1,2961E-01	97,6	1,3067E-01	
1500	98,7	1,291E-01	1,2E-03	0,91	99,3	1,2836E-01	1,5E-04	0,12	99,1	1,2861E-01	99,4	1,2833E-01	
1700	99,6	1,280E-01	1,0E-03	0,81	99,7	1,28006E-01	7,7E-04	0,60	98,8	1,2909E-01	99,5	1,2824E-01	
2000	99,1	1,2881E-01	8,2E-04	0,64	98,9	1,29124E-01	2,7E-04	0,21	98,6	1,2951E-01	99,1	1,2886E-01	
2200	99,5	1,283E-01	1,6E-03	1,25	99,6	1,28227E-01	1,1E-03	0,85	98,7	1,2940E-01	99,8	1,2793E-01	
2500	98,0	1,3021E-01	8,4E-04	0,65	100,3	1,27285E-01	5,6E-04	0,44	98,1	1,3015E-01	99,3	1,2851E-01	
2800	99,7	1,279E-01	1,4E-03	1,10	98,6	1,29368E-01	4,7E-04	0,37	98,5	1,2953E-01	98,6	1,2930E-01	
3000	99,3	1,2853E-01	9,0E-05	0,07	100,3	1,27233E-01	7,7E-04	0,61					

a=50m*s-2	Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.		
	Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)
40	49,8	1,28070E-01	8,8E-05	0,07						49,8	1,2809E-01	49,6	1,2917E-01
200	49,6	1,2865E-01	2,0E-04	0,16	49,6	1,28609E-01	3,1E-05	0,02	49,7	1,2830E-01	49,6	1,2860E-01	
400	49,5	1,288E-01	1,2E-03	0,90	49,5	1,28852E-01	3,8E-05	0,03	49,6	1,2871E-01	49,5	1,2889E-01	
600	49,5	1,2887E-01	6,2E-04	0,48	49,5	1,28950E-01	5,4E-05	0,04	49,5	1,2898E-01	49,5	1,2896E-01	
800	49,7	1,2848E-01	6,5E-04	0,51	49,6	1,28744E-01	1,1E-04	0,08	49,4	1,2930E-01	49,5	1,2881E-01	
1000	49,2	1,296E-01	2,2E-03	1,73	49,2	1,29531E-01	1,4E-04	0,11	49,2	1,2960E-01	49,6	1,2865E-01	
1200	49,6	1,2843E-01	8,8E-04	0,69	49,5	1,28812E-01	2,1E-04	0,17	48,9	1,3036E-01	49,6	1,2863E-01	
1500	49,9	1,2777E-01	7,6E-04	0,59	50,1	1,27251E-01	3,3E-04	0,26			50,0	1,2756E-01	
1700	50,1	1,2720E-01	8,4E-04	0,66	49,6	1,28573E-01	5,0E-04	0,39	48,6	1,3118E-01	49,5	1,2890E-01	
2000	50,0	1,2766E-01	7E-05	0,06	49,3	1,29536E-01	4,9E-04	0,38	49,2	1,2970E-01	49,3	1,2930E-01	
2200	50,0	1,275E-01	1,6E-03	1,28	49,7	1,28395E-01	1,1E-03	0,83					
2500	50,0	1,276E-01	1,0E-03	0,80	49,6	1,28704E-01	1,0E-03	0,78					
2800	50,0	1,274E-01	1,7E-03	1,37	49,3	1,29274E-01	9,5E-04	0,73					

a=10m*s-2	Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.	
	Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	U(pC/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(pC/m*s-2)	a(m*s-2)
40	9,9	1,2876E-01	6,0E-04	0,47	9,9	1,28825E-01	3,9E-05	0,03			9,9	1,2880E-01
100	9,9	1,2824E-01	7,9E-04	0,61	9,9	1,28487E-01	7,4E-05	0,06	9,9	1,2826E-01	9,9	1,2846E-01
160	9,9	1,2875E-01	9,0E-04	0,70	10,0	1,28252E-01	3,5E-05	0,03	10,0	1,2808E-01	10,0	1,2809E-01
400	9,9	1,286E-01	1,1E-03	0,87	9,9	1,28832E-01	1,3E-04	0,10	9,8	1,3044E-01	9,9	1,2886E-01
600	10,0	1,283E-01	1,1E-03	0,87	10,0	1,27915E-01	6,2E-04	0,49	9,8	1,3026E-01		
800	10,0	1,2757E-01	8,5E-04	0,67	10,0	1,27646E-01	9,6E-04	0,75				
1000	10,0	1,2777E-01	7,1E-04	0,55	10,0	1,2774E-01	1,3E-03	1,03				
1200	10,0	1,277E-01	1,0E-03	0,79	9,9	1,28414E-01	1,0E-03	0,81			9,9	1,3E-01
1500						1,287E-01	1,5E-03	1,14				

Aceleração:

Conforme se pode observar através da interpretação da tabela acima representada, os valores de aceleração obtidos pelos 4 métodos não se afastaram significativamente dos valores de amplitude de aceleração impostos à partida pelo controlador de vibração.

Considerando os valores de $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, o maior afastamento em relação ao valor nominal surgiu nos seguintes casos:

- Método da CF: $f = 2500 \text{ Hz}$, $a = 98,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método da DF: $f = 1200 \text{ Hz}$, $a = 98,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método do AV: $f = 2500 \text{ Hz}$, $a = 98,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método da RFC: $f = 1200 \text{ Hz}$, $a = 97,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Sabendo que o limite de funcionamento do método da CF se situa para valores inferiores a 1 kHz, devido à sua limitação associada à resolução da ordem de $\lambda/2$, faz todo o sentido que o valor menos exato de aceleração se tenha verificado para $f = 2500 \text{ Hz}$.

Uma vez que o método da RFC funciona sob os mesmos fundamentos do método da CF e que em $f = 1200 \text{ Hz}$ já se considera a alta frequência, verificou-se o valor de aceleração mais afastado da aceleração nominal nesta frequência, o que está fora da zona de funcionamento deste método.

Verificou-se que com uma amplitude de excitação de $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, em 4 métodos de estudo diferentes os valores de aceleração mais afastados do valor nominal corresponderam às frequências de excitação $f = 1200 \text{ Hz}$ e $f = 2500 \text{ Hz}$.

Considerando os valores de aceleração obtidos para uma amplitude de $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, o maior afastamento em relação ao valor nominal surgiu nos casos seguintes:

- Método da CF: $f = 1000 \text{ Hz}$, $a = 49,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método da DF: $f = 1000 \text{ Hz}$, $a = 49,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método do AV: $f = 1700 \text{ Hz}$, $a = 48,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- Método da RFC: $f = 2000 \text{ Hz}$, $a = 49,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Para $f = 1000 \text{ Hz}$, valor no qual se faz a diferença entre baixa e alta frequência, considerando a amplitude de aceleração $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, verifica-se que os métodos da CF, da DF e do AV apresentam o mesmo valor de aceleração, nomeadamente $a = 49,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. A discrepância é muito pequena face ao valor nominal, nomeadamente com um erro de 1,6 % relativamente ao valor de aceleração nominal.

O método da CF e da DF, indicados respetivamente para baixa e alta frequência, tiveram o valor de aceleração menos exato na frequência $f = 1000 \text{ Hz}$. Isto pode ser justificado pelo fato de esta frequência ser a frequência na qual se indica a transição entre as altas e baixas frequências.

O método da RFC apresentou o maior erro de aceleração, face à aceleração nominal, num valor de alta frequência de $f = 2000$ Hz. O método da RFC funciona nos mesmos princípios do método da CF, e a frequência referida situa-se fora do intervalo de funcionamento do método da CF. Uma vez que este método é mais adequado para valores de frequência até 1 kHz, tal como o método da CF, é lógico que a menor exatidão para o método da RFC surja em valores de alta frequência.

Considerando os valores de aceleração de $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, dada a repetibilidade obtida dos valores, não se considerou pertinente fazer a comparação acima realizada para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, em termos de afastamento da aceleração obtida relativamente ao valor nominal imposto.

Sensibilidade:

Sabendo que o valor da sensibilidade nominal do acelerómetro da Bruel&Kjaer® é de $0,1289 \text{ pC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, verificou-se que nenhum dos valores de sensibilidade se afastou significativamente deste, tendo sido obtidos valores de diferença da ordem de $10^{-3} \text{ pC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, o que demonstra a elevada exatidão dos valores determinados para este acelerómetro em qualquer dos métodos de calibração estudados nesta dissertação, relativamente às 3 amplitudes de aceleração consideradas.

Incerteza:

Os valores máximos de incerteza expandida obtidos para os 4 métodos de calibração foram da ordem de 1 % para todas as amplitudes de aceleração e frequência estudadas, exceto para $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $f = 1000$ Hz em que se obteve uma incerteza de 1,73 % para o método da Contagem de Franjas.

7.1.2 Variação da Sensibilidade do B&K8305S para os 3 valores de Aceleração

Representou-se graficamente na figura seguinte a variação dos valores de sensibilidade obtidos para os 4 métodos numa amplitude de aceleração do sinal de excitação de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Considerou-se os intervalos de frequência entre 80 Hz e 3 kHz. Neste gráfico é possível observar que todos os valores obtidos se situam compreendidos na zona limitada pelos intervalos de validação correspondentes ao método da CF e da DF (respetivamente linhas contínuas azuis e vermelhas), o que permite validar os valores de sensibilidade obtida através destes 4 métodos.

Neste sentido, para um intervalo de frequências entre 80 Hz e 3 kHz, o método da CF em conjunto com o da DF validam o método do AV e da RFC, pois todos os diamantes representativos dos valores de sensibilidade obtidos para os 4 métodos encontram-se dentro dos intervalos de validade referidos

Da mesma forma, fazendo a centralização no objetivo principal da dissertação, que consistiu em validar o método da DF através do método da CF, verifica-se que os diamantes vermelhos no

gráfico, representativos da sensibilidade obtida pelo método da DF, se encontram dentro das curvas limite a azul, que constituem os limites do intervalo de validação do método da CF.

Apenas o ponto onde $f = 2500$ Hz para o método da DF, não se encontra dentro do intervalo de validação do método da CF, o que pode ser explicado uma vez que 2500 Hz se encontra já fora da zona ótima de funcionamento do método da CF.

Neste sentido, até aos 2,2 kHz valida-se o método da DF por comparação com o método da CF, para uma amplitude de aceleração de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, considerando o acelerómetro-padrão B&K8305S.

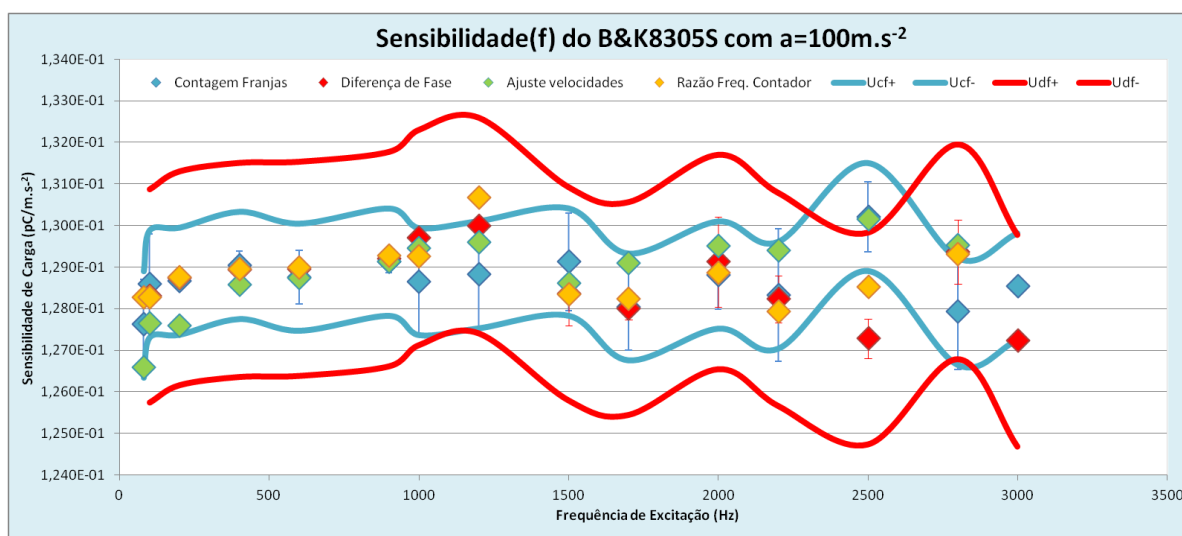


Figura 7-1 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Da mesma forma foi realizado o gráfico ilustrativo da variação dos valores de sensibilidade obtidos para a amplitude de aceleração do sinal de excitação de $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, considerando respetivamente os intervalos de frequência entre 40 Hz e 2,8 kHz.

Verifica-se que todos os diamantes que representam os 4 métodos se encontram dentro dos limites dos intervalos de validação do método da CF em conjunto com o método da DF (linhas contínuas respetivamente azuis e vermelhas).

Verifica-se que a partir de $f = 1700\text{Hz}$ os diamantes vermelhos do método da DF saem do intervalo de validação do método da CF.

Valida-se o método da DF pelo método padrão da CF até uma frequência de 1,7 kHz para uma amplitude de aceleração de $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, considerando o acelerómetro-padrão B&K8305S.

Esta situação é apresentada no gráfico seguinte:

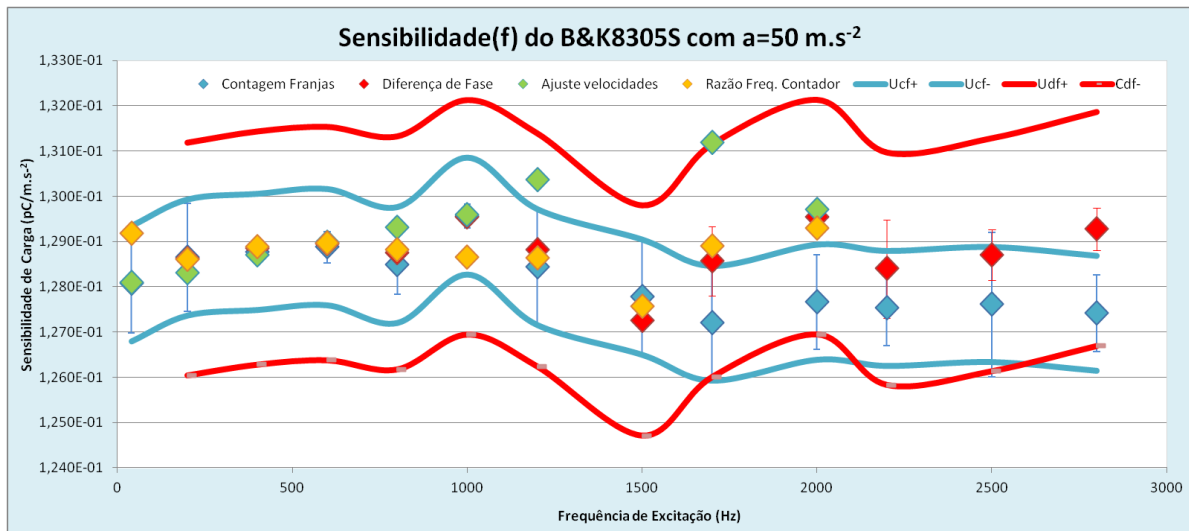


Figura 7-2 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Apresenta-se graficamente de seguida os valores de sensibilidade obtidos para a amplitude de aceleração do sinal de excitação de 10 m.s^{-2} , considerando respetivamente os intervalos de frequência entre 40 Hz e 1,5 kHz.

Verifica-se a validade dos 4 métodos dentro dos limites do intervalo de validação do método da DF. Verifica-se que os diamantes vermelhos correspondentes ao método da DF se encontram dentro do intervalo de validação do método da CF até uma frequência de 1200 Hz.

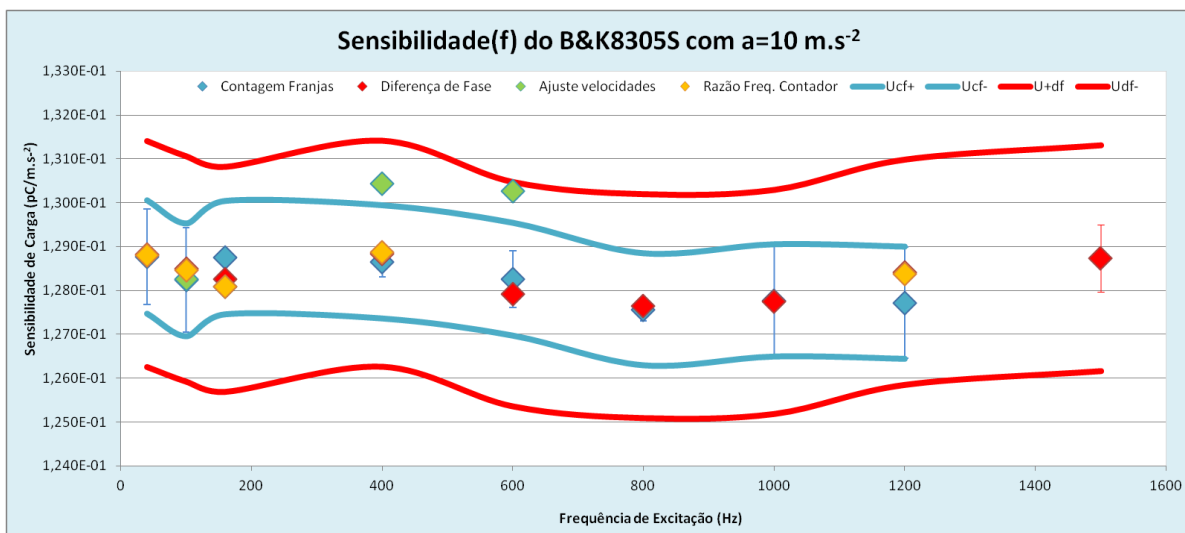


Figura 7-3 Gráfico de Sensibilidade para o B&K8305S com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Após avaliar os 3 gráficos anteriores, verifica-se que quanto menor a amplitude de aceleração, mais difícil é validar os métodos em termos de comparação com o método da CF e mais difícil é alcançar um intervalo de frequências elevadas, ao nível da metodologia utilizada.

7.1.3 Variação dos Valores de Aceleração do B&K8305S

No gráfico que se segue apresenta-se o comportamento do acelerómetro ao nível da sua aceleração, com base nos 4 métodos de calibração, para uma aceleração nominal de 100 m.s^{-2} .

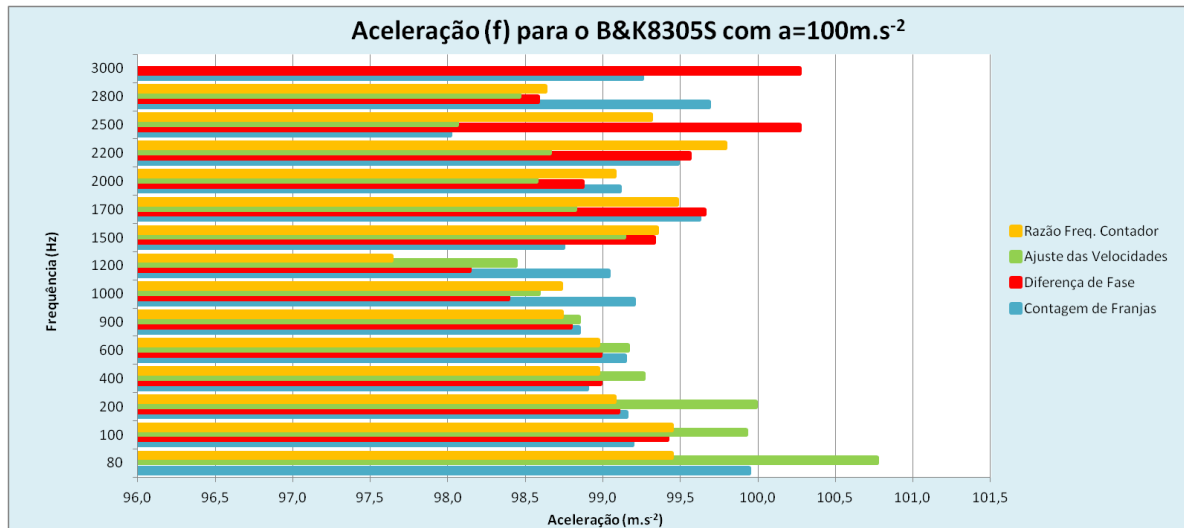


Figura 7-4 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

Ao analisar o gráfico acima apresentado para a aceleração obtida pelos 4 métodos, verifica-se que nas baixas frequências, entre 80 Hz e 600 Hz, o método do AV apresenta os valores mais elevados do intervalo de frequências estudado, analisando apenas este método.

No início das altas frequências, nomeadamente próximo de 1 kHz os métodos tendem de um modo geral a diminuir o seu valor, voltando a aumentar para valores de frequência mais elevados. Isto significa que em geral os métodos funcionam com uma elevada exatidão num dado intervalo de frequência de funcionamento, consoante o método usado, mas nenhum método se verifica adequado a todas as frequências altas e baixas representativas de todas as zonas de funcionamento.

Para uma amplitude de aceleração de 100 m.s^{-2} verifica-se que o método da DF é o que apresenta maior aceleração nas frequências mais elevadas, nomeadamente para os 2500 Hz e os 3 kHz. Esta situação faz todo o sentido uma vez que o método da DF é o mais adequado às altas frequências.

Como é possível verificar nos gráficos anteriores e no gráfico em questão, o método do AV não apresenta um funcionamento ótimo para frequências de valores intermédios de funcionamento.

Na figura que se segue apresenta-se o comportamento em termos de aceleração do acelerómetro B&K8305S, através dos 4 métodos de calibração, quando sujeito a uma amplitude de excitação de 50 m.s^{-2} :

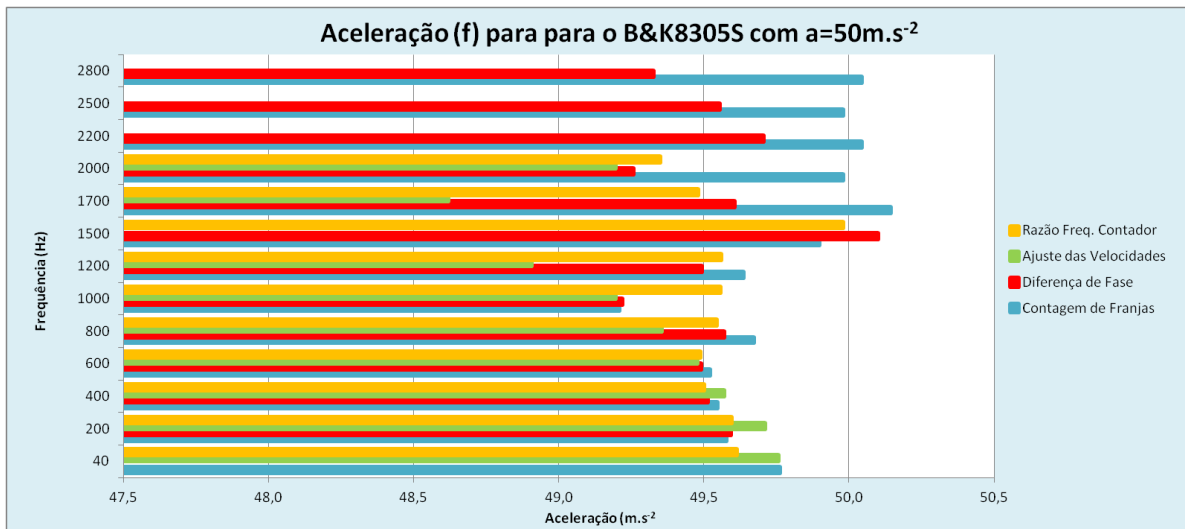


Figura 7-5 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Para uma amplitude de aceleração de 50 m.s^{-2} , verifica-se que o método da CF apresenta valores elevados de aceleração nas frequências acima de 1500 Hz. Verifica-se que os 4 métodos apresentam um comportamento semelhante no intervalo de baixas frequências, nomeadamente entre 40 e 1200 Hz.

O método do AV teve sempre valores abaixo do valor nominal para esta amplitude de aceleração.

Na figura seguinte demonstra-se novamente a variação da amplitude de aceleração do acelerómetro B&K8305S, obtida através dos 4 métodos de calibração, mas nesta situação é-lhe imposta uma amplitude de excitação de 10 m.s^{-2} .

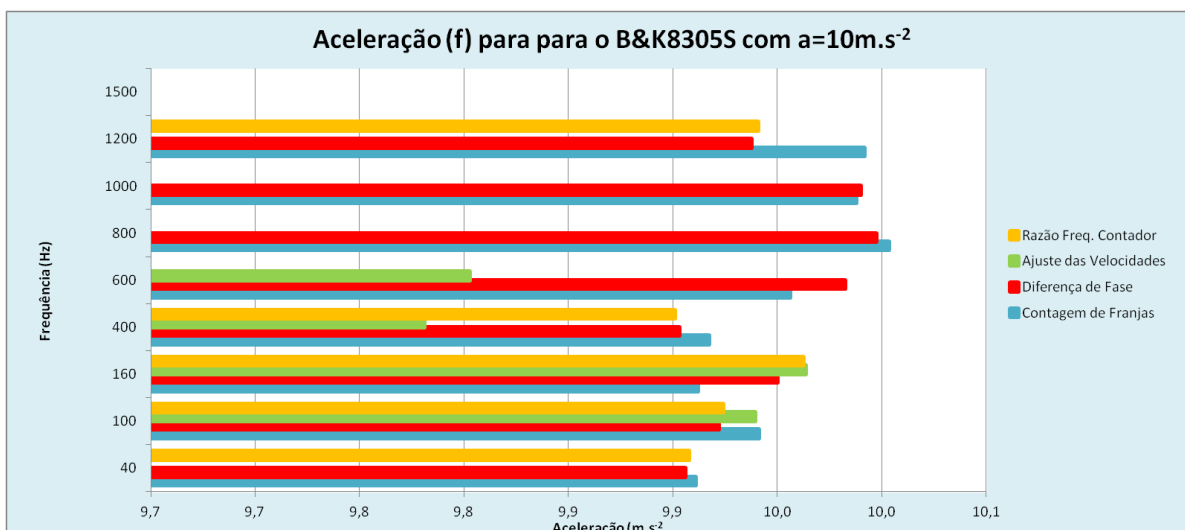


Figura 7-6 Gráfico de Aceleração do B&K8305S com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Verifica-se a concordância entre o Método da Contagem de Franjas e o Método da Diferença de Fase no intervalo de funcionamento entre os 800 Hz e os 1000 Hz para esta amplitude de aceleração.

7.1.4 Comparação dos Valores de Incerteza para o Acelerómetro B&K8305S

Neste subcapítulo apresenta-se os valores de incerteza, sob a forma percentual, obtidos para o método da CF e para o método da DF. Estes valores são comparados através de gráficos de área, cada um respetivamente para as amplitudes de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$ e $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Na tabela seguinte encontram-se os valores de incerteza calculada, o fator de expansão k , bem como a incerteza expandida nas unidades de sensibilidade e sob a forma percentual, calculados para todo o intervalo de amplitudes de aceleração e frequência alvo de estudo.

Tabela 7-2 Síntese das Incertezas para o B&K8305S.

Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
100	80	2,9E-05	2,87	8,4E-05	0,85	1,1E-04	2,87	3,1E-04	1,74
100	100	3,2E-05	2,87	9,2E-05	0,92	2,2E-06	2,52	5,4E-06	0,05
100	200	4,2E-06	2,65	1,1E-05	0,11	1,1E-06	2,03	2,2E-06	0,02
100	400	9,2E-06	2,87	2,6E-05	0,26	1,2E-06	2,03	2,4E-06	0,02
100	600	1,8E-05	2,87	5,0E-05	0,50	1,4E-06	2,02	2,9E-06	0,03
100	900	7,0E-06	2,87	2,0E-05	0,20	2,2E-06	2,03	4,5E-06	0,04
100	1000	3,5E-05	2,87	1,0E-04	1,00	2,6E-06	2,03	5,4E-06	0,05
100	1200	3,4E-05	2,87	9,9E-05	0,99	3,9E-06	2,05	8,0E-06	0,08
100	1500	3,2E-05	2,87	9,2E-05	0,91	5,7E-06	2,05	1,2E-05	0,12
100	1700	2,8E-05	2,87	8,1E-05	0,81	2,1E-05	2,87	5,9E-05	0,60
100	2000	2,2E-05	2,87	6,4E-05	0,64	1,0E-05	2,05	2,1E-05	0,21
100	2200	4,3E-05	2,87	1,2E-04	1,25	3,2E-05	2,65	8,4E-05	0,85
100	2500	2,3E-05	2,87	6,5E-05	0,65	2,0E-05	2,20	4,3E-05	0,44
100	2800	3,8E-05	2,87	1,1E-04	1,10	1,8E-05	2,05	3,7E-05	0,37
100	3000	3,3E-06	2,10	7,0E-06	0,07	2,8E-05	2,17	6,1E-05	0,61
Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
50	40	3,0E-06	2,32	6,9E-06	0,07	1,7E-05	2,87	4,8E-05	0,47
50	200	5,4E-06	2,87	1,6E-05	0,16	1,2E-06	2,03	2,4E-06	0,02
50	400	3,1E-05	2,87	9,0E-05	0,90	1,4E-06	2,03	2,9E-06	0,03
50	600	1,7E-05	2,87	4,8E-05	0,48	2,1E-06	2,03	4,2E-06	0,04
50	800	1,8E-05	2,87	5,0E-05	0,51	3,9E-06	2,11	8,3E-06	0,08
50	1000	6,0E-05	2,87	1,7E-04	1,73	5,4E-06	2,06	1,1E-05	0,11
50	1200	2,4E-05	2,87	6,8E-05	0,69	7,9E-06	2,08	1,7E-05	0,17
50	1500	2,1E-05	2,87	5,9E-05	0,59	1,2E-05	2,09	2,5E-05	0,26
50	1700	2,3E-05	2,87	6,5E-05	0,66	1,8E-05	2,17	3,9E-05	0,39
50	2000	2,8E-06	2,04	5,7E-06	0,06	1,9E-05	2,05	3,8E-05	0,38
50	2200	4,4E-05	2,87	1,3E-04	1,28	3,6E-05	2,32	8,2E-05	0,83
50	2500	2,8E-05	2,87	7,9E-05	0,80	3,7E-05	2,13	7,8E-05	0,78
50	2800	4,7E-05	2,87	1,4E-04	1,37	3,6E-05	2,05	7,3E-05	0,73
Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
10	40	1,6E-05	2,87	4,7E-05	0,47	1,5E-06	2,06	3,0E-06	0,03
10	100	2,1E-05	2,87	6,1E-05	0,61	2,4E-06	2,43	5,7E-06	0,06
10	160	2,4E-05	2,87	7,0E-05	0,70	1,3E-06	2,02	2,7E-06	0,03
10	400	3,0E-05	2,87	8,6E-05	0,87	4,9E-06	2,07	1,0E-05	0,10
10	600	3,0E-05	2,87	8,6E-05	0,87	1,9E-05	2,52	4,8E-05	0,49
10	800	2,3E-05	2,87	6,6E-05	0,67	3,0E-05	2,52	7,4E-05	0,75
10	1000	1,9E-05	2,87	5,5E-05	0,55	4,2E-05	2,43	1,0E-04	1,03
10	1200	3,8E-05	2,05	7,8E-05	0,79	3,9E-05	2,09	8,1E-05	0,81
10	1500					5,5E-05	2,05	1,1E-04	1,14

Verificou-se a obtenção de valores de incerteza expandida da ordem de 1 %, exceto para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$ numa frequência de $f = 1000 \text{ Hz}$, para o método da CF, no qual a incerteza expandida foi de 1,73 %, próxima de 2 %.

No gráfico seguinte apresenta-se a variação da incerteza associada à medição da sensibilidade para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

Observa-se através da análise do gráfico que de um modo geral a incerteza foi maior para o método da CF num intervalo de frequências entre os 100 Hz e os 3 kHz, o que demonstra a exatidão do método da DF em comparação com o método da CF. Uma vez que neste método de usa a recombinação de 2 feixes óticos bem como a amplitude de fase entre os dois sinais [26], este é um

método mais exato face ao método da CF, especialmente a altas frequências, possibilitando a sua validação.

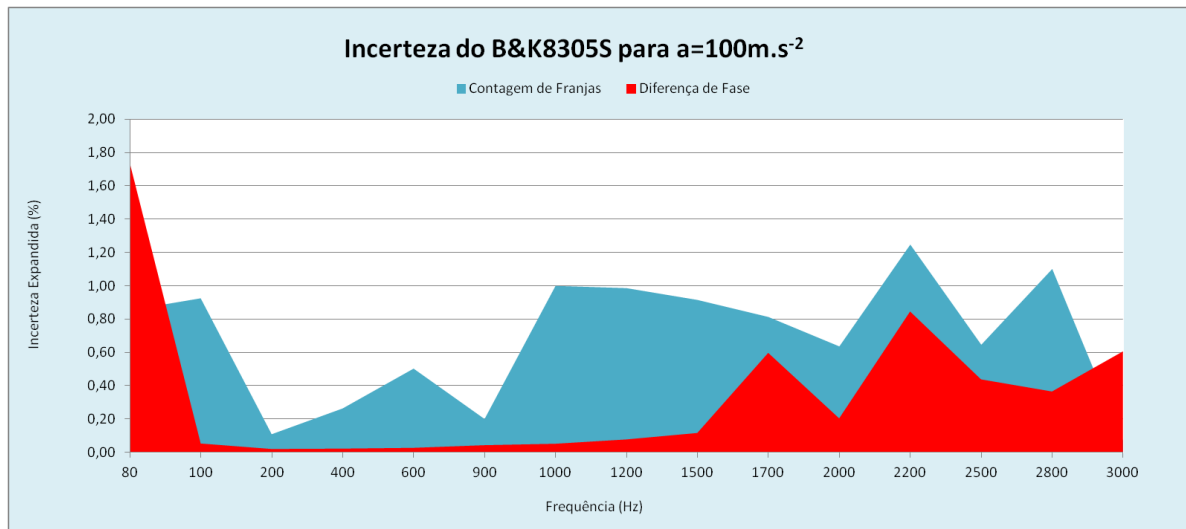


Figura 7-7 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

No gráfico que se segue, nos mesmos módulos do gráfico anterior, verifica-se a maior exatidão do método da DF face ao da CF, considerando a amplitude de aceleração de 50 m.s^{-2} , num intervalo de frequências entre os 200 Hz e os 2 kHz.

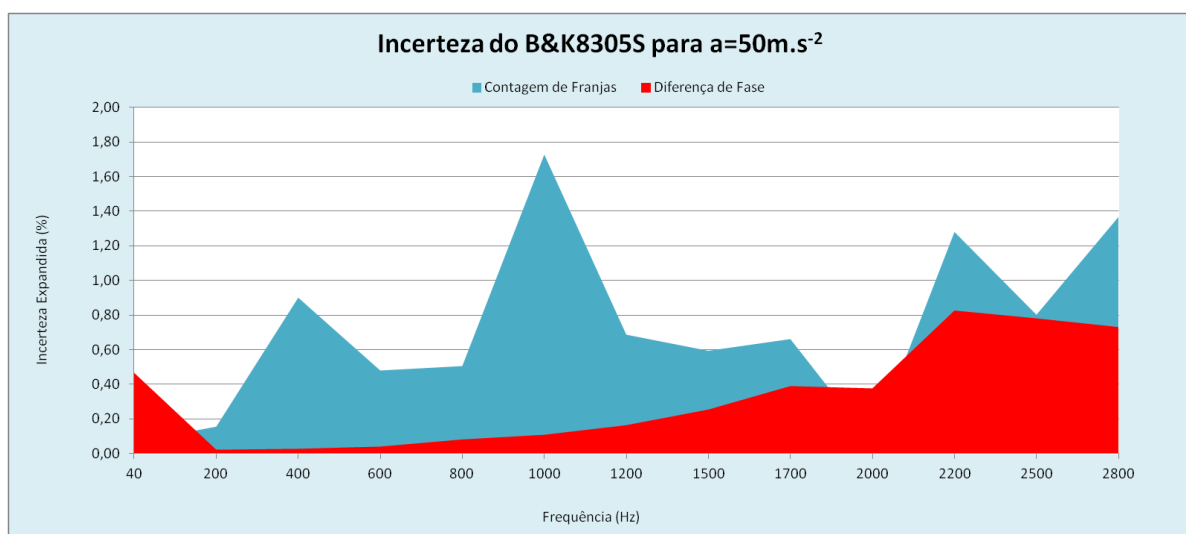


Figura 7-8 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Apresenta-se de seguida o gráfico do mesmo teor dos dois gráficos anteriores mas para uma amplitude de aceleração de 10 m.s^{-2} . Neste caso, para o método da CF obteve-se valores entre 0,4 % e 0,9 %, de incerteza expandida num intervalo de frequências entre 40 e 800 Hz.

Verificou-se que entre 40 e 400 Hz o valor da incerteza expandida obtido pelo método da DF foi inferior à incerteza obtida pelo método da CF, com uma diferença de valores da ordem dos 0,6 %.

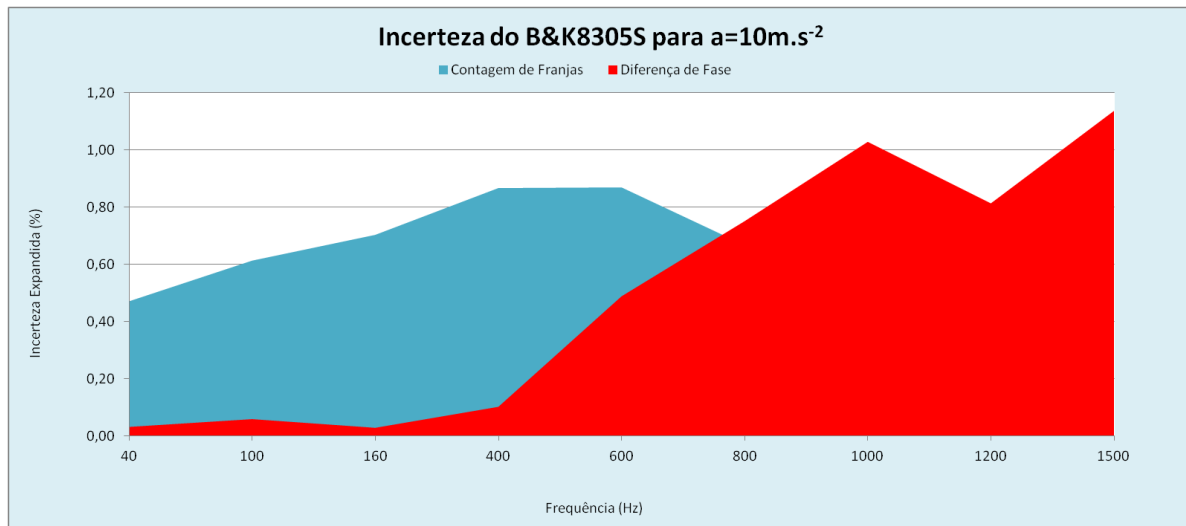


Figura 7-9 Gráfico da Incerteza obtida para o B&K8305S para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.1.5 Comparação dos 3 Métodos com o da Contagem de Franjas, B&K8305S

Seguidamente apresenta-se a tabela de cálculo que compara o método da CF com os restantes 3 métodos. Este procedimento é realizado calculando, para cada valor de aceleração, o erro percentual absoluto entre a sensibilidade para o método da CF e a sensibilidade para os restantes métodos. Esta medição permite verificar a diferença entre os métodos ao nível da sua exatidão mas considerando como termo de comparação o método da CF que é o método primário de calibração de acelerómetros-padrão.

Tabela 7-3 Comparação face ao Método da CF, B&K8305S.

Validação dos métodos face ao da Contagem de Franjas			
a= 100(m*s-2)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
80		0,82	0,50
100	0,23	0,74	0,26
200	0,05	0,83	0,08
400	0,09	0,37	0,07
600	0,16	0,02	0,17
800	0,63	0,45	0,42
900	0,06	0,00	0,11
1000	0,82	0,62	0,47
1200	0,91	0,61	1,43
1500	0,59	0,40	0,61
1700	0,03	0,81	0,15
2000	0,24	0,54	0,03
2200	0,08	0,84	0,31
2500	2,25	0,05	1,30
2800	1,12	1,24	1,07
3000	1,01		1,76
a= 50(m*s-2)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
40	2,72	0,01	0,86
100	0,00	0,03	0,00
200	0,03	0,27	0,03
400	0,06	0,05	0,09
600	0,06	0,09	0,07
800	0,21	0,64	0,26
1000	0,02	0,03	0,70
1200	0,29	1,50	0,16
1500	0,41	2,96	0,16
1700	1,08	3,14	1,34
2000	1,47	1,60	1,28
2200	0,68		1,69
2500	0,86		0,91
2800	1,46		1,76
3000			1,86
a= 10(m*s-2)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
40	0,05		0,03
100	0,19	0,02	0,17
160	0,38	0,52	0,51
400	0,14	1,39	0,17
600	0,26	1,56	
800	0,06		
1000	0,02		
1200	0,55		0,51
1500		1,61	1,61

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico de barras ilustrativo dos resultados da tabela anterior para uma amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

No gráfico que se segue verifica-se que o maior valor de diferença percentual de sensibilidade face ao método da CF surge nas altas frequências para o método da DF, nomeadamente para 2500 Hz, sendo o erro de 2,25 %. Verifica-se ainda que até aos 900 Hz o método da RFC tem uma diferença de sensibilidade muito próxima do método da DF, pois as barras do gráfico para este método apresentam-se muito pequenas, geralmente abaixo de 0,6 %.

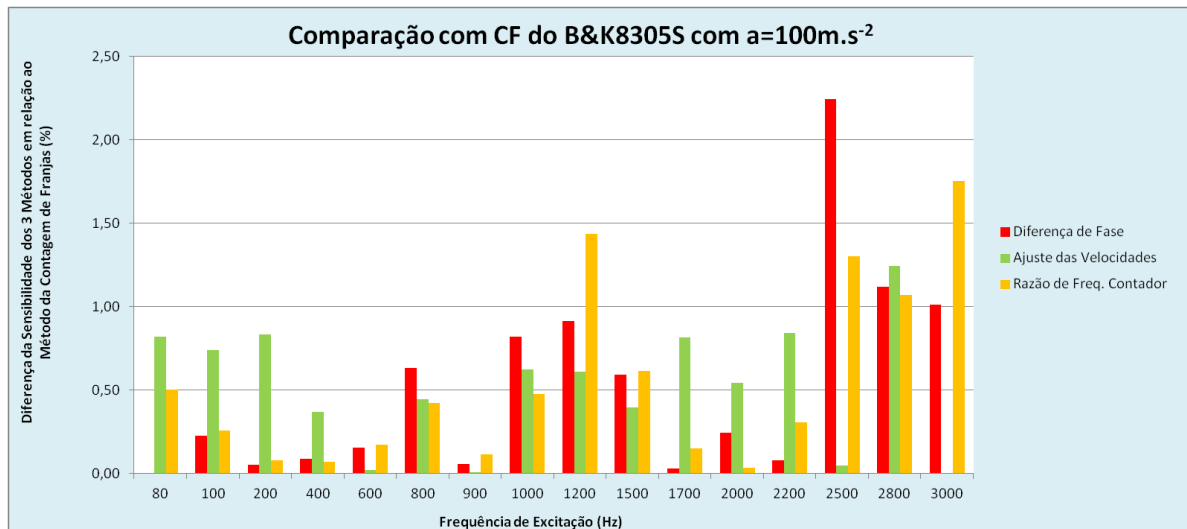


Figura 7-10 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, a = 100 m.s⁻².

No gráfico que se segue apresenta-se a situação semelhante ao gráfico anterior mas com uma amplitude de aceleração de $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Neste caso o método que, de um modo geral, apresenta maior diferença face ao método da CF é o método da AV, nomeadamente para $f = 1,2 \text{ kHz}$ e $f = 1,5 \text{ kHz}$.

Para 40 Hz verifica-se uma grande diferença do método da DF face ao da CF, nomeadamente de 2,72 %. Verifica-se ainda que entre $f = 100 \text{ Hz}$ e $f = 900 \text{ Hz}$ o método da DF apresenta pouca diferença face ao método da CF, o que valida o método da DF neste intervalo.

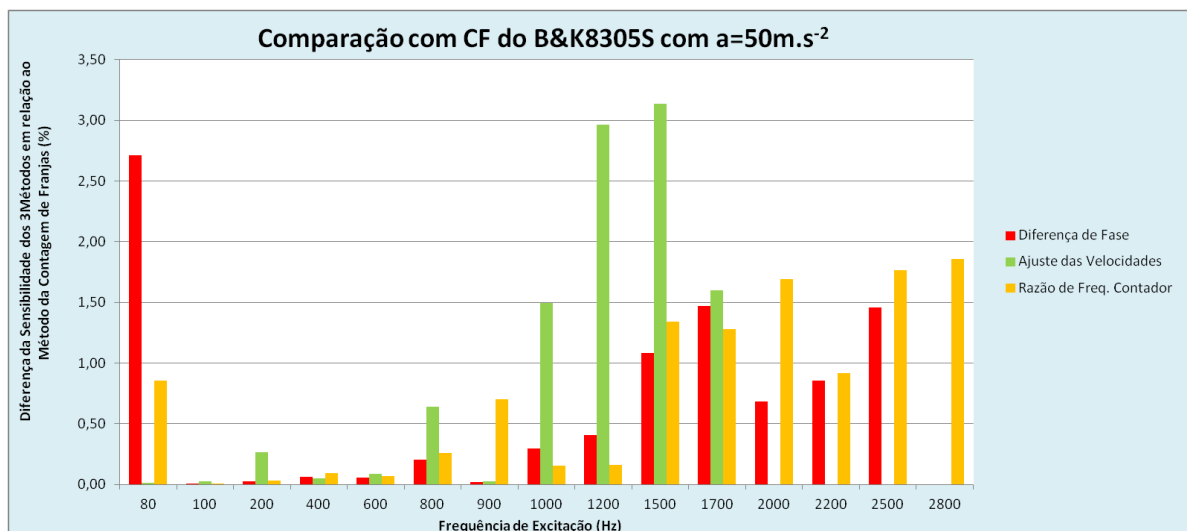


Figura 7-11 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, a = 50 m.s⁻².

Seguidamente apresenta-se a situação semelhante aos 2 gráficos anteriores com uma amplitude de aceleração de $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$. Verifica pouca exatidão do método do AV face ao método da CF nas frequências para 400 Hz e 600 Hz respetivamente 1,39 % e 1,56 %.

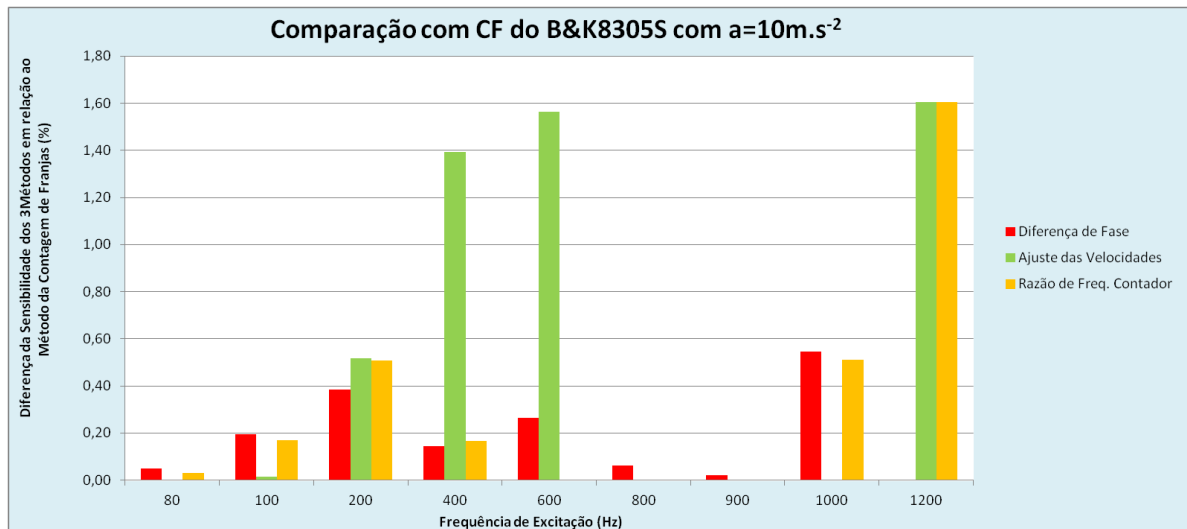


Figura 7-12 Sensibilidade face ao Método da CF, B&K8305S, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.1.6 Comparação dos 3 Métodos com o da Diferença de Fase, B&K8305S

De seguida apresenta-se a situação semelhante ao subcapítulo anterior, mas neste caso o método com que os restantes 3 métodos são comparados, é o método da DF. Dado que, no âmbito desta dissertação este é o método que se pretende validar, é pertinente analisar o erro percentual absoluto apresentado pelos restantes 3 métodos face a este.

Tabela 7-4 Comparação face ao Método da DF, B&K8305S.

Validação dos Métodos face ao da Diferença de Fase			
a= 100(m*s-2)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
80			
100	0,23	0,51	0,03
200	0,05	0,89	0,02
400	0,09	0,28	0,02
600	0,16	0,18	0,01
800	0,63	0,19	0,21
900	0,06	0,05	0,06
1000	0,81	0,20	0,35
1200	0,91	0,30	0,51
1500	0,60	0,20	0,02
1700	0,03	0,84	0,18
2000	0,24	0,30	0,21
2200	0,08	0,92	0,23
2500	2,30	2,25	0,97
2800	1,11	0,12	0,05
3000	1,02		2,79
a= 50(m*s-2)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
40	2,64	2,63	1,81
100	0,00	0,03	0,00
200	0,03	0,24	0,00
400	0,06	0,11	0,03
600	0,06	0,03	0,01
800	0,21	0,43	0,05
1000	0,02	0,05	0,68
1200	0,29	1,20	0,14
1500	0,41	3,38	0,25
1700	1,07	2,03	0,25
2000	1,45	0,13	0,19
2200	0,68		1,00
2500	0,85		1,76
2800	1,44		0,30
3000			2,24
a= 10(m*s-2)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
40	0,05		0,02
100	0,19	0,18	0,02
160	0,39	0,13	0,12
400	0,14	1,25	0,02
600	0,26	1,83	
800	0,06		
1000	0,02		
1200	0,54		0,03
1500			

Apresenta-se o gráfico ilustrativo do erro percentual absoluto, ao nível da sensibilidade, apresentado pelos métodos tomando como referência o método da DF, para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

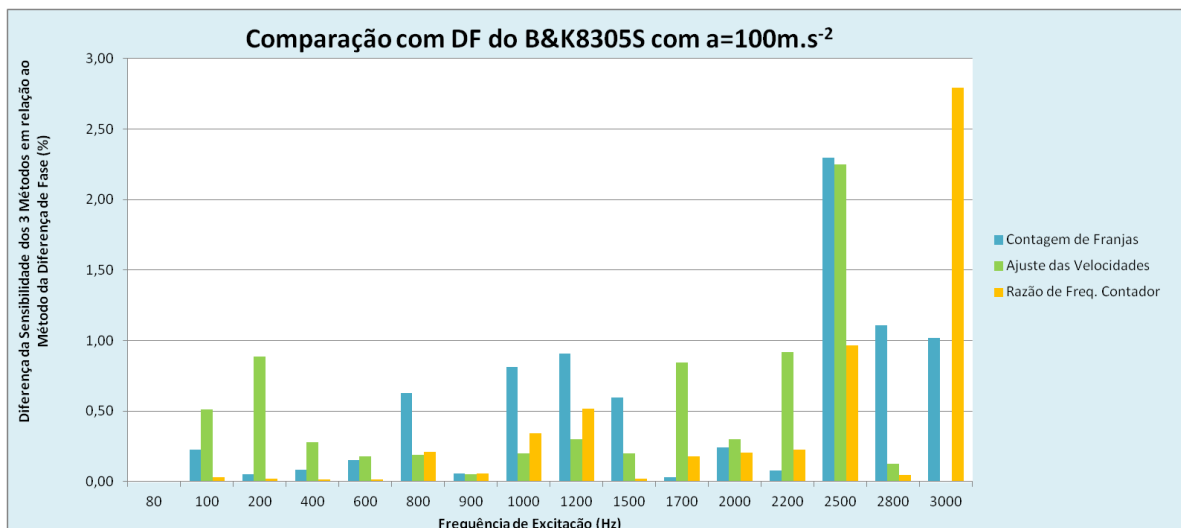


Figura 7-13 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

Através da análise do gráfico anterior verifica-se que para 3 kHz o método da RFC é o que apresenta de um modo geral maior diferença comparativamente com o método da DF, nomeadamente de 2,79 %.

A 2,5 kHz o método da CF, em conjunto com o método da RFC, apresentam uma diferença semelhante face ao método da DF nomeadamente de 2,3 %, o que é normal uma vez que o método da CF pode apresentar menor exatidão quando sujeito a altas frequências de excitação.

Apresenta-se seguidamente a situação semelhante ao gráfico anterior mas para uma amplitude de aceleração de $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Mais uma vez é verificada a grande diferença de exatidão do método do AV face ao método da DF, especialmente para uma frequência de 1500 Hz, na qual o valor foi de 3,38 %.

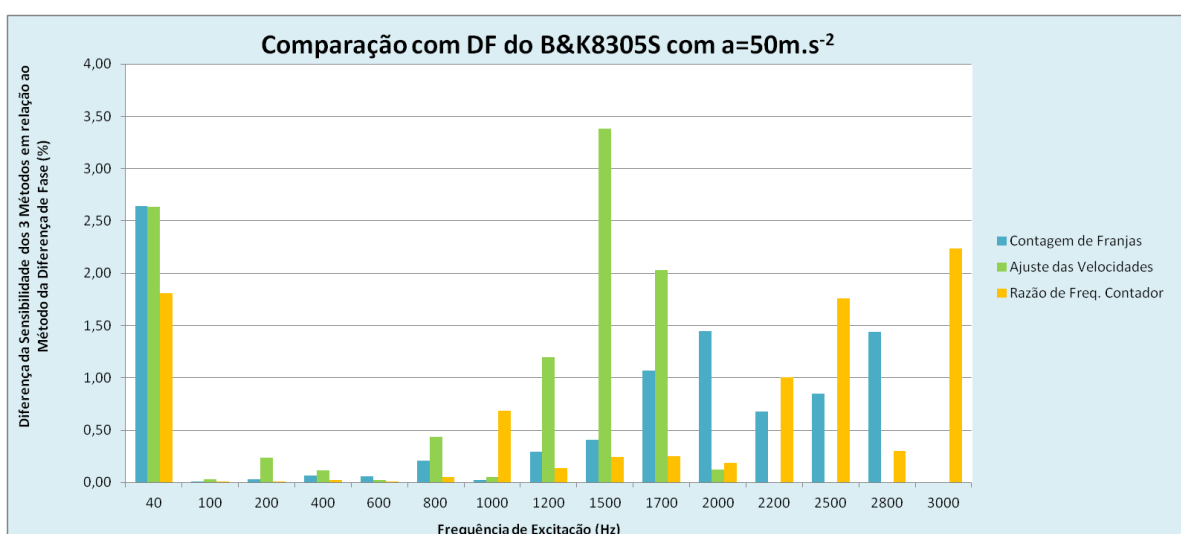


Figura 7-14 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Na figura seguinte mostra-se o gráfico ilustrativo das duas situações anteriores mas para uma amplitude de aceleração de 10 m.s^{-2} . Verifica-se que para $f = 400 \text{ Hz}$ e para $f = 600 \text{ Hz}$ o método do AV apresenta valores muito elevados face ao método da DF. Mais uma vez se demonstra que este método não apresenta elevada exatidão nos intervalos de frequência intermédia, tendo tido um comportamento mais exato nas baixas frequências, face ao método da DF, como se observa pelo gráfico.

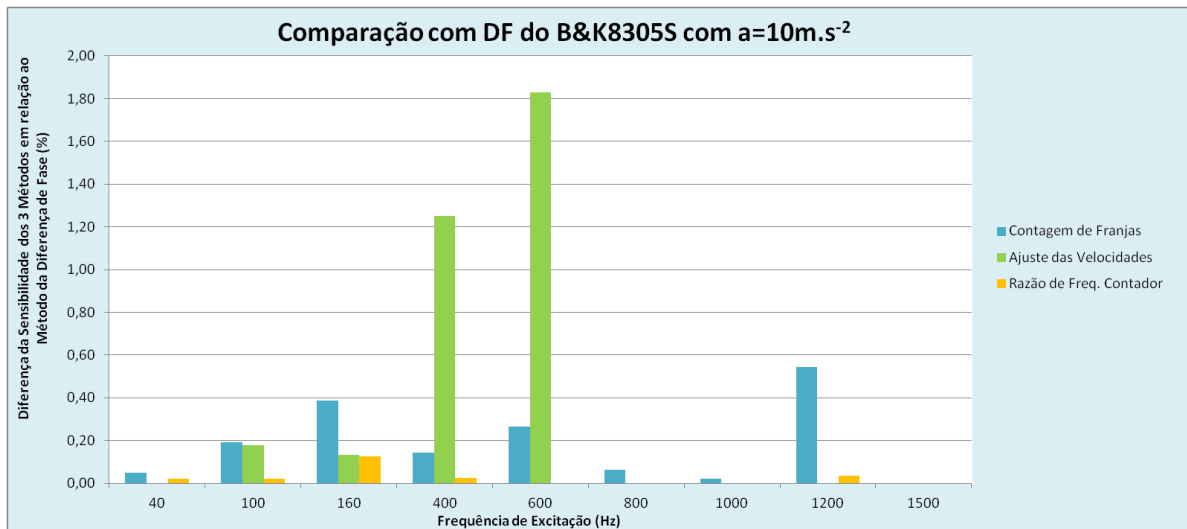


Figura 7-15 Sensibilidade face ao Método da DF, B&K8305S, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.2 Acelerómetro Endevco7254A

De acordo com o que foi descrito calibrou-se mais um acelerómetro, nomeadamente o Endevco7254A. O acelerómetro em questão neste capítulo apresenta uma sensibilidade em tensão de $105,1 \text{ mV/g}$, ou seja, $0,0107 \text{ V/m.s}^{-2}$, bastante inferior à sensibilidade do acelerómetro da *Bruel & Kjaer*®.

O uso de um espelho simplesmente colado ao acelerómetro como meio de obtenção de uma superfície polida como objeto de incidência do laser poderá ser uma desvantagem na qualidade dos resultados obtidos, em comparação com o acelerómetro anterior onde se usou uma *dummy mass*.

Os valores de aceleração, sensibilidade e incerteza obtidos não foram tão exatos como os valores obtidos para o acelerómetro da *Bruel & Kjaer*®, no entanto os resultados foram satisfatórios.

Os procedimentos de aquisição de dados bem como os cálculos, tabelas e gráficos realizados no capítulo anterior para o B&K8305S são semelhantes, pelo que se faz uma análise mais sucinta deste acelerómetro.

7.2.1 Síntese dos Resultados para o Acelerómetro Endevco7254A

Para o acelerómetro Endevco7254A, apresenta-se de seguida a tabela que contém os valores de aceleração, sensibilidade e incerteza adquiridos para as três amplitudes de aceleração, nomeadamente de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Foram usados os mesmos 4 métodos de calibração do caso anterior. Foram considerados valores de frequência de excitação entre 100 Hz e 3000 Hz.

Tabela 7-5 Síntese dos 4 Métodos para o Endevco7254A

a = 100					Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.	
Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)				
100	99,7	1,1414E-01	2,0E-04	0,17					101,5	1,121E-01	99,8	1,140E-01				
200	99,8	1,140E-01	1,6E-03	1,40				1,12	101,3	1,124E-01	100,3	1,134E-01				
400	100,7	1,1308E-01	8,4E-04	0,74	101,2	1,1253E-01	1,4E-04	0,12	101,4	1,123E-01	101,3	1,124E-01				
600	101,0	1,1271E-01	5,1E-04	0,46	101,3	1,1242E-01	3,2E-04	0,28	101,5	1,122E-01	101,2	1,126E-01				
800	101,9	1,11645E-01	5,9E-05	0,05	101,7	1,1188E-01	4,7E-04	0,42	101,5	1,122E-01	101,7	1,119E-01				
900	101,3	1,1232E-01	6,7E-04	0,60	101,9	1,1176E-01	3,2E-04	0,28	101,5	1,122E-01	102,1	1,114E-01				
1000	101,1	1,1262E-01	5,5E-04	0,49	101,9	1,1173E-01	7,5E-04	0,67	101,5	1,121E-01	102,1	1,115E-01				
1200	101,1	1,125E-01	2,3E-03	2,04	102,3	1,1122E-01	5,3E-04	0,47	101,5	1,121E-01	102,1	1,114E-01				
1500	101,2	1,125E-01	3,9E-03	3,51	103,2	1,1029E-01	9,3E-04	0,84	101,8	1,118E-01	103,4	1,100E-01				
1700	100,9	1,129E-01	1,9E-03	1,65	103,0	1,1055E-01	5,9E-04	0,53	101,8	1,119E-01	102,9	1,107E-01				
2000	100,7	1,1318E-01	5,4E-04	0,48	103,9	1,0968E-01	3,4E-04	0,31	101,5	1,123E-01	103,6	1,100E-01				
2200	104,1	1,0940E-01	5,4E-04	0,49	104,8	1,0868E-01	2,9E-04	0,27	102,5	1,111E-01	103,4	1,102E-01				
2500	103,1	1,1046E-01	3,6E-04	0,33	103,7	1,098E-01	1,1E-03	0,98	103,1	1,104E-01	105,7	1,078E-01				
2800	101,9	1,117E-01	1,4E-03	1,24	104,2	1,0925E-01	1,3E-04	0,12			104,9	1,086E-01				
3000	98,4	1,1569E-01	2,3E-04	0,20	100,5	1,1329E-01	4,0E-04	0,35								

a = 50					Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.	
Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)				
100	50,3	1,1326E-01	5,4E-04	0,48	48,0	1,187E-01	0,0E+00		50,3	1,132E-01	50,1	1,137E-01				
200	50,3	1,132E-01	2,6E-03	2,29	50,0	1,139E-01	0,0E+00		50,2	1,135E-01	50,2	1,136E-01				
400	50,9	1,1192E-01	7,1E-04	0,63	50,8	1,1197E-01	4,6E-04	0,41	50,8	1,121E-01	50,8	1,121E-01				
600	50,8	1,1194E-01	7,5E-04	0,67	50,8	1,1210E-01	1,3E-04	0,12	50,8	1,121E-01	50,8	1,121E-01				
800	51,0	1,117E-01	1,1E-03	0,97	51,1	1,1150E-01	7,7E-04	0,69	50,9	1,118E-01	51,0	1,116E-01				
1000	50,7	1,122E-01	1,7E-03	1,49	51,4	1,1084E-01	1,3E-04	0,11	50,9	1,118E-01	51,2	1,113E-01				
1200	50,8	1,120E-01	1,6E-03	1,40	51,0	1,1160E-01	1,5E-04	0,13	50,8	1,120E-01	51,6	1,103E-01				
1700	49,1	1,160E-01	0,0E+00	0,00	49,9	1,1406E-01	9,3E-04	0,81	49,7	1,147E-01	52,3	1,088E-01				
2000	50,5	1,1276E-01	8,5E-04	0,75	53,7	1,0609E-01	3,5E-04	0,33	48,9	1,163E-01						
2200					51,1	1,1144E-01	3,8E-04	0,34								
2500					51,5	1,1050E-01	4,6E-04	0,42								
2800					50,6	1,1238E-01	4,5E-04	0,40								
3000					51,8	1,0990E-01	3,5E-04	0,32								

a = 10					Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase				Método do Ajuste Vel.		Método da Razão Freq.	
Freq.(Hz)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	U(V/m.s²)	U(%)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)	a(m*s-2)	S(V/m*s-2)				
100	10,3	1,1401E-01	6,9E-04	0,60	10,3	1,1437E-01	4,9E-04	0,43	10,1	1,162E-01	10,3	1,144E-01				
200	10,2	1,133E-01	1,8E-03	1,57	10,2	1,1324E-01	4,4E-04	0,39	10,1	1,141E-01	10,3	1,123E-01				
400	10,0	1,1372E-01	7,3E-04	0,64	10,1	1,1338E-01	4,7E-04	0,42	9,6	1,187E-01	10,3	1,109E-01				
600	10,1	1,125E-01	1,2E-03	1,05	10,2	1,1172E-01	5,7E-04	0,51			10,2	1,119E-01				

Verifica-se que na tabela anterior os valores de aceleração não se afastaram significativamente dos respetivos valores nominais, sendo que estão de acordo com o esperado.

Verificou-se que para uma amplitude de excitação de $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ o valor para o qual o método da CF apresentou uma aceleração mais afastada da aceleração nominal foi para uma frequência de 2200 Hz, nomeadamente de $104,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, o que está de acordo com a sua zona de funcionamento. O método da DF apresentou também para $f = 2,2 \text{ kHz}$ uma aceleração mais afastada da nominal de

104,8 m·s⁻². Os métodos do AV e da RFC apresentaram os seus valores mais afastados do valor nominal para 2500 Hz, respetivamente $a = 103,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 105,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

7.2.2 Variação da Sensibilidade do Endevco7254A para os 3 valores de Aceleração

Representou-se na figura que se segue a variação dos valores de sensibilidade, por meio de diamantes no gráfico, obtidos para os 4 métodos em estudo numa amplitude de excitação de 100 m·s⁻². Considerou-se os intervalos de frequência entre 100 Hz e 3 kHz.

Tal como para o acelerómetro anterior, neste gráfico apresenta-se os limites dos intervalos de validação, por meio de linhas contínuas, a vermelho e a azul, respetivamente para o método da DF e para o método da CF.

Verifica-se que os diamantes correspondentes aos valores de sensibilidade obtidos para os 4 métodos se encontram dentro dos intervalos de validação, para uma amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, no intervalo de frequência entre 100 Hz e 3 kHz.

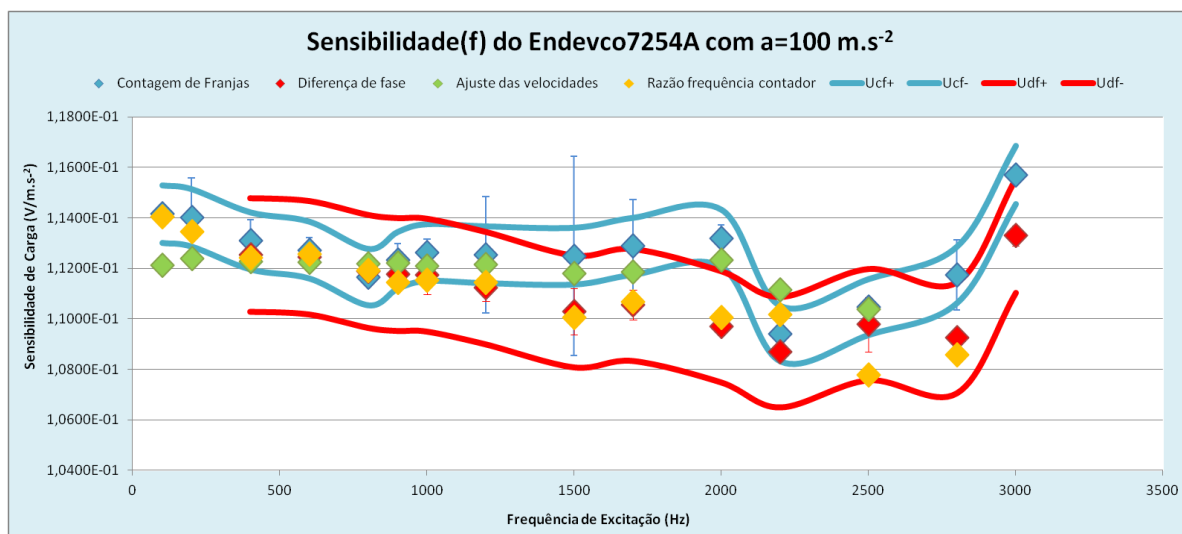


Figura 7-16 Gráfico de Sensibilidade para o Endevco7254A com $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Da mesma forma apresenta-se no gráfico seguinte a representação dos valores de sensibilidade correspondentes aos 4 métodos obtidos para a amplitude de aceleração do sinal de excitação de 50 m·s⁻², considerando respetivamente os intervalos de frequência entre 100 Hz e 3,0 kHz.

Verifica-se que, para uma frequência de 2000 Hz, a sensibilidade obtida usando o método do AV apresenta um valor fora dos respetivos intervalos de validação considerados. Conforme foi já observado para o acelerómetro anterior, o método do AV apresenta uma menor exatidão nos intervalos intermédios de frequência estudados.

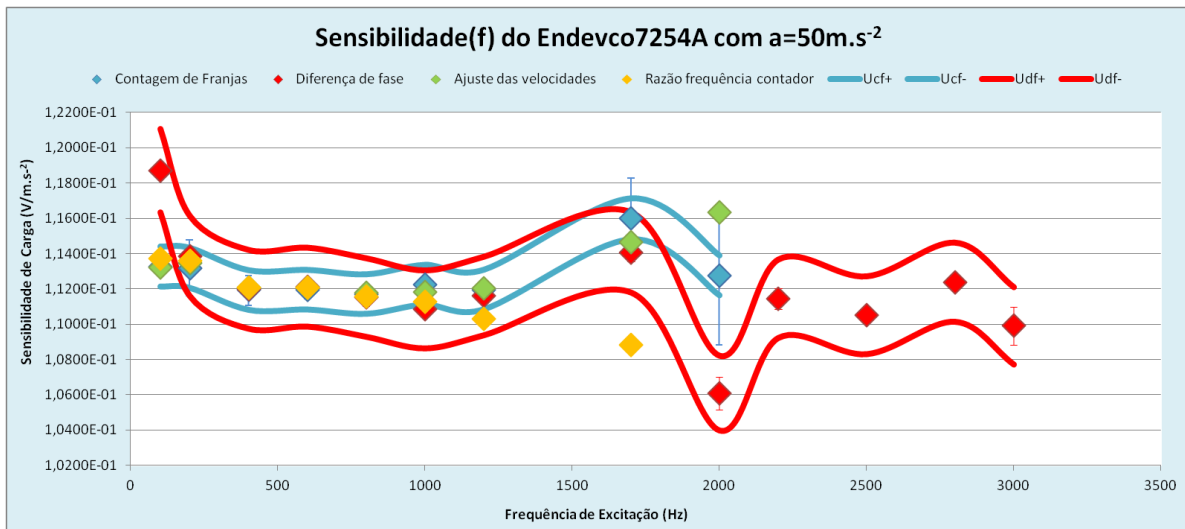


Figura 7-17 Gráfico de Sensibilidade para o Endevo7254A com $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Da mesma forma, no gráfico seguinte, para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, o método do Ajuste de Velocidades apresenta 1 valor fora dos intervalos de validação, nomeadamente numa frequência de 400 Hz.

Para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$ verifica-se que todos os métodos se encontram dentro dos intervalos de validação, à exceção do método do AV.

Verifica-se que os diamantes relativos ao método da DF se encontram dentro do intervalo de validação do método da CF, validando assim o método da DF por comparação com o método da CF para $a=10 \text{ m.s}^{-2}$ para uma gama de frequências entre 100 Hz e 600 Hz.

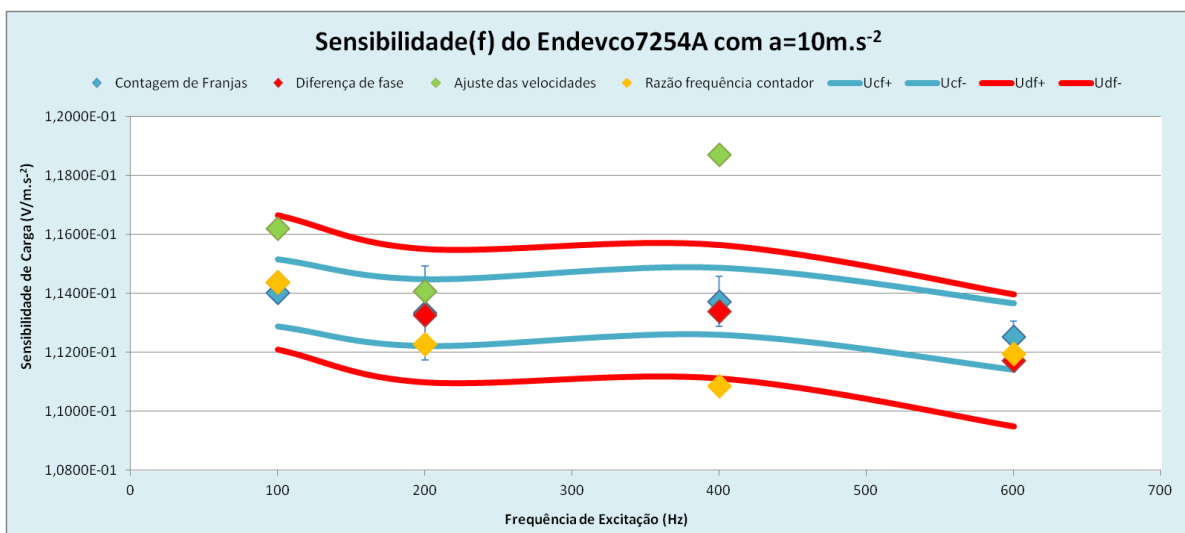


Figura 7-18 Gráfico de Sensibilidade para o Endevo7254A com $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.2.3 Variação dos Valores de Aceleração do Endevco7254A

No gráfico que se segue demonstra-se o comportamento do acelerómetro em termos de aceleração obtida pelos 4 métodos, para uma aceleração nominal de 100 m.s^{-2} .

Observando o gráfico verifica-se que quanto maior foi a amplitude de frequência imposta, maiores os valores de aceleração obtidos pelos métodos, distanciando-se cada vez mais do valor nominal. A obtenção dos maiores valores de aceleração verificou-se desde 1,5k Hz até 2800 kHz.

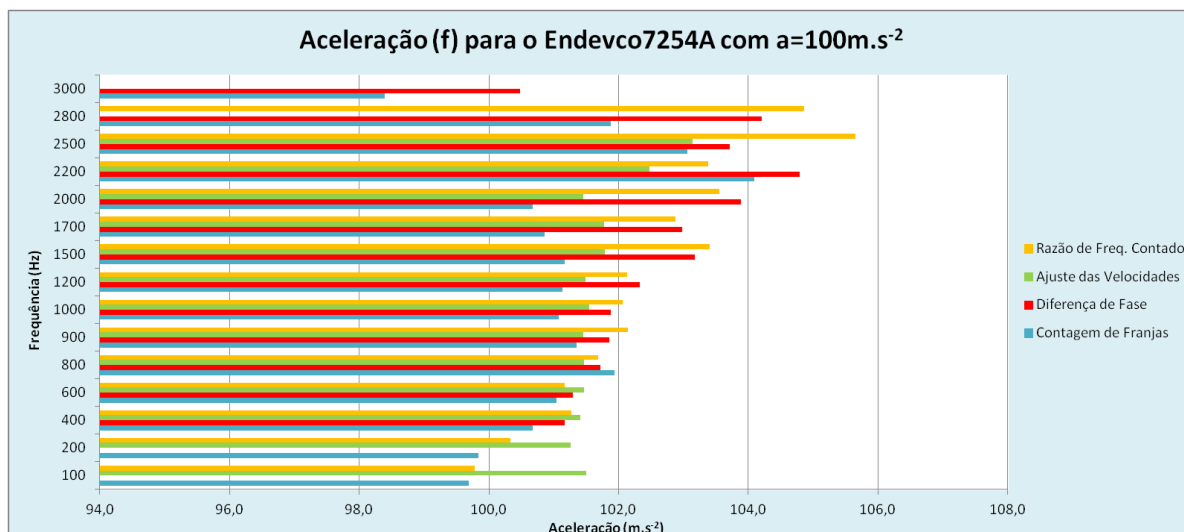


Figura 7-19 Gráfico de Aceleração do Endevco7254A com $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

Da mesma forma que para o gráfico anterior, na figura que se segue apresenta-se a amplitude de aceleração do acelerómetro Endevco7254A, através dos 4 métodos de calibração, quando sujeito a uma amplitude de excitação de 50 m.s^{-2} .

Ao analisar o gráfico observa-se que os métodos evidenciam valores com aceleração semelhante até $f = 1,7 \text{ kHz}$.

Relativamente ao método da DF verifica-se o aumento dos valores de aceleração obtidos para altas frequências, a partir de 2000 Hz, em comparação com as baixas frequências nas quais os seus valores foram menores

No intervalo de frequências entre 100 Hz e 1,7 kHz, o método da CF e o método da DF tiveram valores semelhantes pelo que neste intervalo é possível validar o método da DF pelo método da CF para uma amplitude de aceleração de 50 m.s^{-2} .

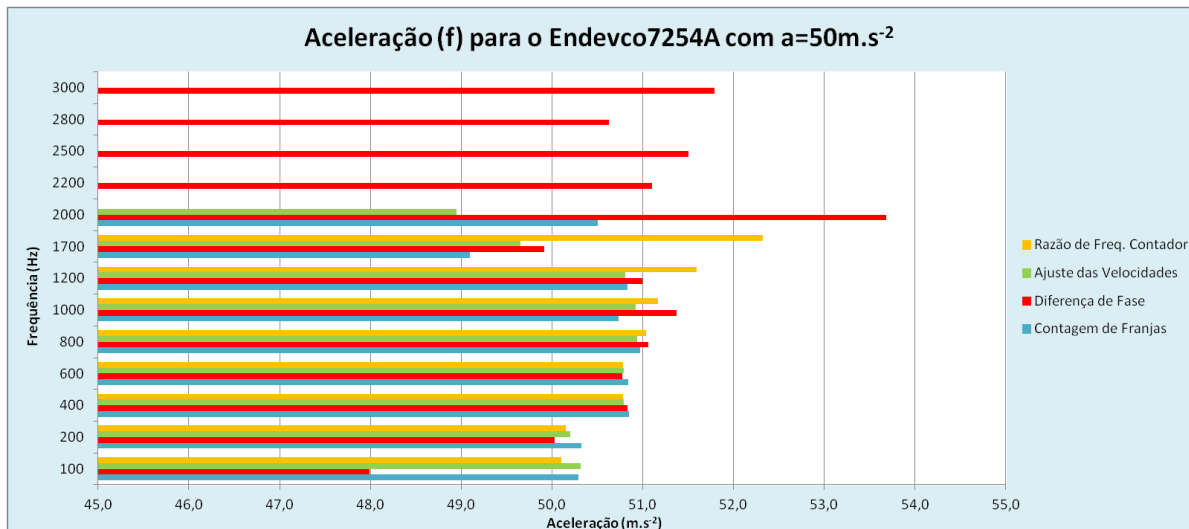


Figura 7-20 Gráfico de Accleração do Endeveco7254A com $a = 50m.s^{-2}$.

Na figura que se segue apresenta-se o gráfico semelhante aos dois gráficos anteriores mas para uma amplitude de accleração de $10 m.s^{-2}$.

Analisando este gráfico verifica-se que foram obtidos valores muito semelhantes para o método da CF e para o método da DF num intervalo de frequências entre 100 Hz e 600 Hz, pelo que se valida o método da DF pelo método da CF neste intervalo, considerando a amplitude de excitação de $10 m.s^{-2}$.

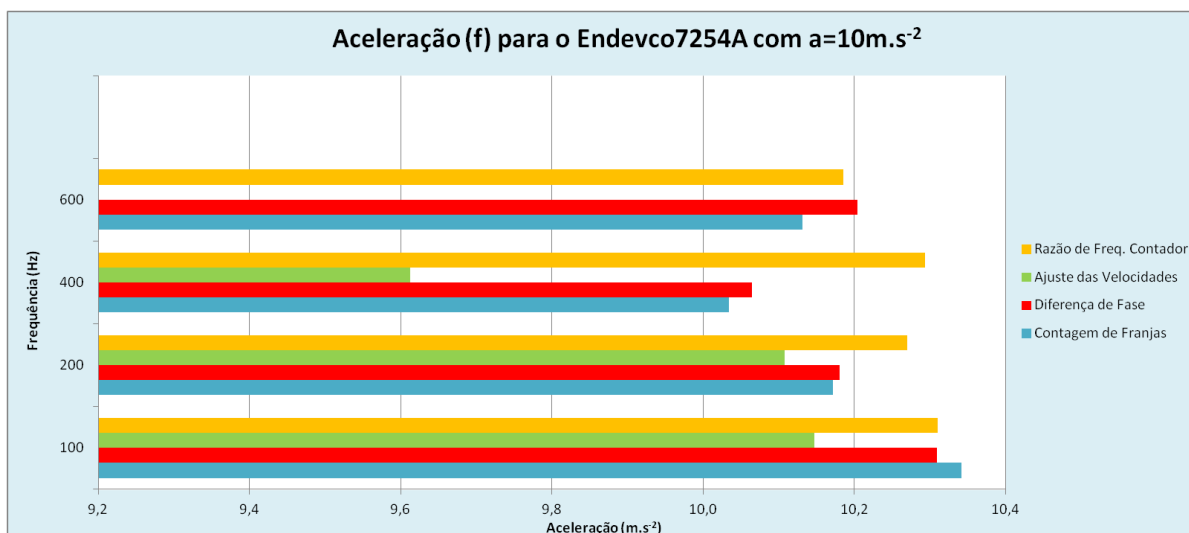


Figura 7-21 Gráfico de Accleração do Endeveco7254A com $a = 10 m.s^{-2}$.

7.2.4 Comparação dos Valores de Incerteza para o Acelerómetro Endevco7254A

Segue-se a apresentação dos valores de incerteza, sob a forma percentual, obtidos para o método da CF e para o método da DF. Estes valores são comparados em gráficos de área, cada um respetivamente para as amplitudes de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$, $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$ e $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Verificou-se a obtenção de valores de incerteza expandida da ordem de 1 %, exceto para:

- $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$: $f = 1500 \text{ Hz}$, com 3,51 % de incerteza para o método da CF;
- $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$: $f = 1200 \text{ Hz}$, com 2,04 % de incerteza para o método da CF;
- $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$: $f = 1700 \text{ Hz}$, com 1,65 % de incerteza para o método da CF;
- $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$: $f = 200 \text{ Hz}$, com 2,29 % de incerteza para o método da CF.

Para o método da DF os valores de incerteza expandida foram da ordem de 1 % para as 3 acelerações de excitação.

No entanto o maior valor de incerteza expandida calculada foi de 3,51 %, para o método da Contagem de Franjas, numa amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$ para uma frequência de excitação de 1500 Hz, o que se considera aceitável dado que o método de Contagem de Franjas tem uma zona de funcionamento até 1000 Hz.

Neste sentido, na tabela seguinte apresentam-se os valores de incerteza calculada, o fator de expansão k , bem como a incerteza expandida nas unidades de sensibilidade e sob a forma percentual calculados para todo o intervalo de amplitudes de aceleração e frequência alvo de estudo:

Tabela 7-6 Síntese das Incertezas calculadas para o Endevo7254A

Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ⁻²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
100	100	6,4E-06	2,87	1,8E-05	0,17	5,1E-03	2,87		
100	200	4,5E-05	3,31	1,5E-04	1,40	5,1E-05	2,87	1,5E-04	1,12
100	400	2,7E-05	2,87	7,8E-05	0,74	4,5E-07	2,87	1,3E-06	0,12
100	600	1,7E-05	2,87	4,8E-05	0,46	9,0E-08	3,31	3,0E-07	0,28
100	800	2,4E-06	2,25	5,5E-06	0,05	2,1E-08	2,07	4,4E-08	0,42
100	900	1,9E-05	3,31	6,3E-05	0,60	1,4E-08	2,04	2,9E-08	0,28
100	1000	1,8E-05	2,87	5,1E-05	0,49	2,6E-08	2,65	7,0E-08	0,67
100	1200	7,5E-05	2,87	2,1E-04	2,04	1,9E-08	2,65	4,9E-08	0,47
100	1500	1,3E-04	2,87	3,7E-04	3,51	3,0E-08	2,87	8,6E-08	0,84
100	1700	6,1E-05	2,87	1,7E-04	1,65	1,9E-08	2,87	5,5E-08	0,53
100	2000	1,8E-05	2,87	5,1E-05	0,48	1,1E-08	2,87	3,1E-08	0,31
100	2200	1,8E-05	2,87	5,0E-05	0,49	9,4E-08	2,87	2,7E-07	0,27
100	2500	1,2E-05	2,87	3,3E-05	0,33	3,5E-07	2,87	1,0E-06	0,98
100	2800	4,5E-05	2,87	1,3E-04	1,24	4,3E-07	2,87	1,2E-06	0,12
100	3000	1,0E-05	2,05	2,1E-05	0,20	1,3E-07	2,87	3,7E-07	0,35
Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ⁻²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
50	100	1,8E-05	2,87	5,1E-05	0,48	1,1E-04	2,87	3,3E-04	
50	200	8,4E-05	2,87	2,4E-04	2,29	9,6E-05	2,87	2,7E-04	
50	400	2,3E-05	2,87	6,6E-05	0,63	1,5E-07	2,87	4,3E-07	0,41
50	600	2,4E-05	2,87	7,0E-05	0,67	4,4E-08	2,87	1,3E-07	0,12
50	800	3,5E-05	2,87	1,0E-04	0,97	2,5E-07	2,87	7,1E-07	0,69
50	1000	5,4E-05	2,87	1,6E-04	1,49	4,1E-07	2,87	1,2E-06	0,11
50	1200	5,1E-05	2,87	1,5E-04	1,40	4,8E-08	2,87	1,4E-07	0,13
50	1700	1,7E-04	2,87	5,0E-04		3,0E-07	2,87	8,7E-07	0,81
50	2000	2,8E-05	2,87	7,9E-05	0,75	1,1E-08	2,87	3,3E-08	0,33
						1,2E-07	2,87	3,5E-07	0,34
						1,5E-07	2,87	4,3E-07	0,42
						1,5E-07	2,87	4,2E-07	0,40
						1,1E-07	2,87	3,2E-07	0,32
Síntese das Incertezas		Método da Contagem de Franjas				Método da Diferença de Fase			
a(m.s ⁻²)	Freq (Hz)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)	Uc	k	U(V/m.s ²)	U(%)
10	100	2,5E-05	2,52	6,4E-05	0,60	1,9E-07	2,37	4,6E-07	0,43
10	160	5,8E-05	2,87	1,7E-04	1,57	1,5E-07	2,65	4,1E-07	0,39
10	400	2,4E-05	2,87	6,8E-05	0,64	1,5E-08	2,87	4,4E-08	0,42
10	600	3,8E-05	2,87	1,1E-04	1,05	1,9E-09	2,87	5,4E-09	0,51
10	800	7,5E-06	2,87	2,1E-05	0,16	6,0E-09	2,87	1,7E-08	0,14

No gráfico que se segue apresenta-se a comparação da incerteza expandida obtida através do método da CF e do método da DF para uma amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$. De um modo geral verifica-se que a incerteza expandida foi maior para o método da CF do que para o método da DF. Num intervalo de frequências entre os 1 kHz e 2 kHz verifica-se um valor máximo de incerteza de 3,51 % para $f = 1500 \text{ Hz}$, o que poderá ser explicado pelo fato de este valor de frequência de excitação já se encontrar fora da zona ótima de funcionamento do método da Contagem de Franjas, e possivelmente também devido ao número limitado de medições efetuadas.

Demonstra-se a capacidade superior ao nível da exatidão do método da DF uma vez que este demonstrou ter uma incerteza menor do que o método da CF mesmo nas baixas frequências.

Neste sentido, não só se valida o método da DF por meio do método da CF nas baixas e altas frequências uma vez que a incerteza do método da DF é menor, mas ainda se verifica que mesmo a baixas frequências o método da DF evidenciou um excelente desempenho.

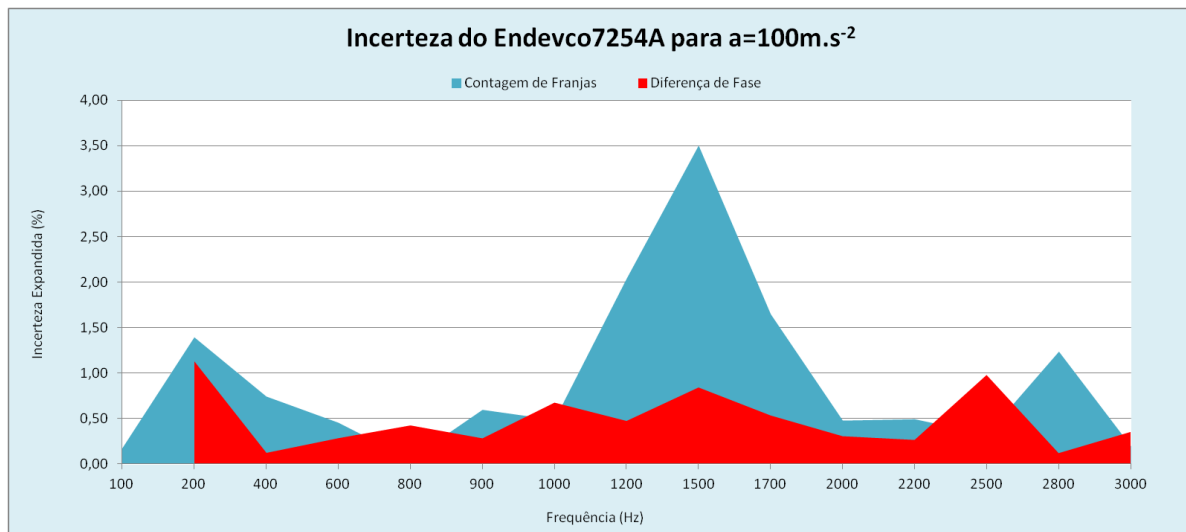


Figura 7-22 Gráfico da Incerteza obtida para o Endevco7254A para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

No gráfico que se segue, para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$, verifica-se um comportamento diferente do anterior face às incertezas para o método da CF e para o método da DF.

Verifica-se maior exatidão do método da CF face ao método da DF, para uma amplitude de aceleração de 50 m.s^{-2} , num intervalo de frequências entre os 400 Hz e os 1,2 kHz.

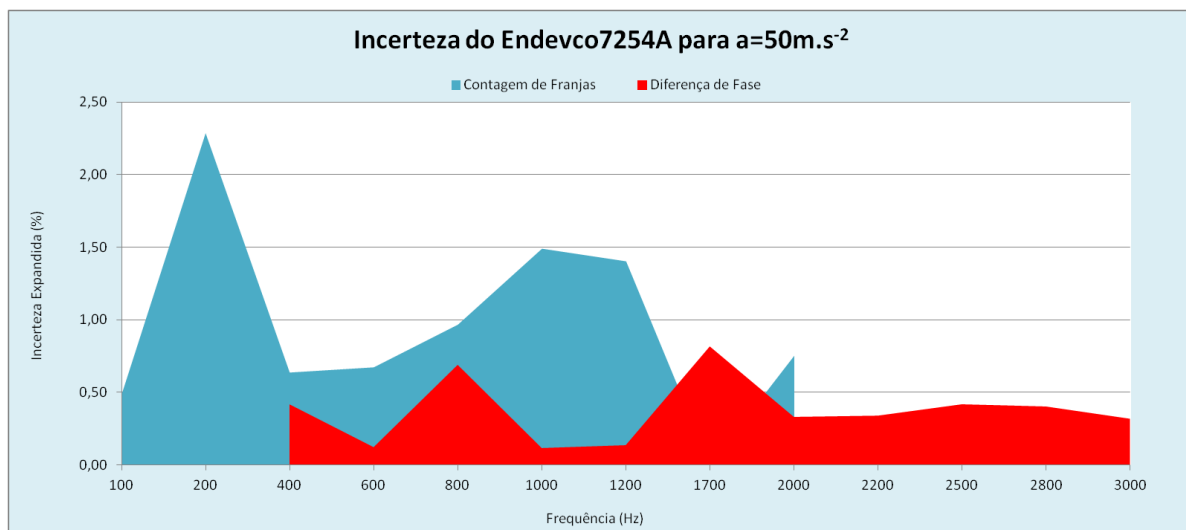


Figura 7-23 Gráfico da Incerteza obtida para o Endevco7254A para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico do mesmo teor dos dois gráficos anteriores mas para uma amplitude de aceleração de 10 m.s^{-2} . Verifica-se que, para uma amplitude de aceleração de $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, num intervalo de frequências entre os 100 Hz e os 600 Hz o método da DF apresenta uma incerteza muito inferior ao método da CF. Esta situação permite validar o método da DF em função do

método da CF para uma gama de frequências entre os 100 Hz e os 600 Hz, numa amplitude de aceleração de $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

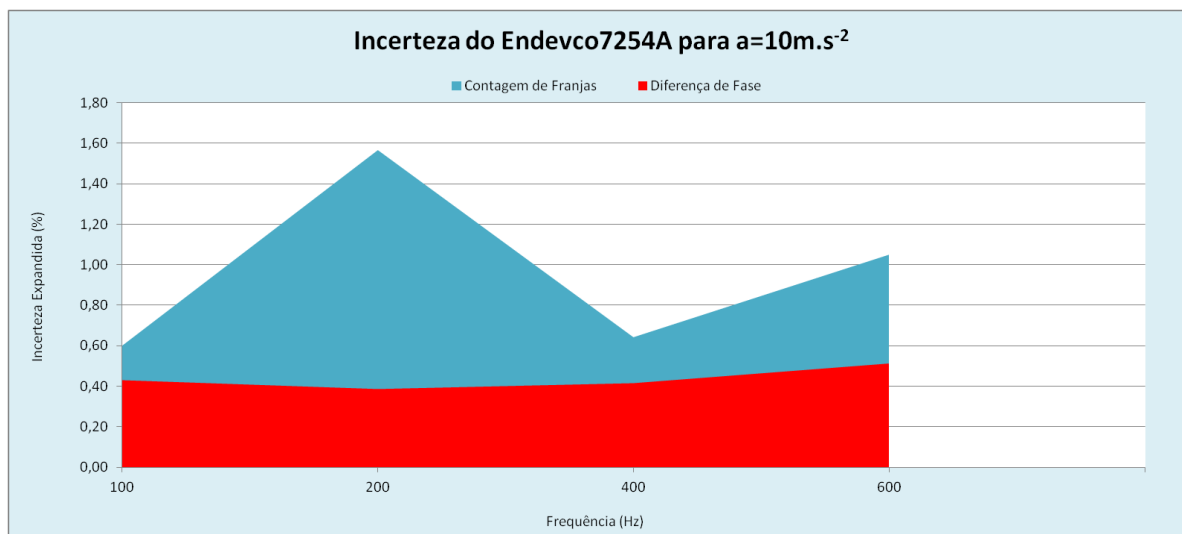


Figura 7-24 Gráfico da Incerteza obtida para o Endeveco7254A para $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.2.5 Comparação dos 3 Métodos com o da Contagem de Franjas, Endeveco7254A

Tal como foi realizado para o B&K8305S, para este acelerómetro apresenta-se a tabela que mostra a comparação do método da CF com os restantes 3 métodos. Da mesma forma que para o acelerómetro anterior, este procedimento é realizado calculando, para cada valor de aceleração, o erro percentual absoluto entre a sensibilidade para o método da CF e a sensibilidade para os restantes métodos. Esta medição permite verificar a diferença entre os métodos ao nível da sua exatidão mas considerando como termo de comparação o método da CF que é o método primário de calibração de acelerómetros-padrão.

Tabela 7-7 Comparação face ao Método da CF, Endevco7254A

Validação dos Métodos face ao da Contagem de Franjas			
a=100(m.s ⁻²)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
100		1,78	0,09
200		1,41	0,49
400	0,48	0,73	0,59
600	0,26	0,42	0,13
800	0,21	0,47	0,24
900	0,50	0,11	0,78
1000	0,79	0,46	0,97
1200	1,17	0,35	0,97
1500	1,94	0,62	2,16
1700	2,05	0,89	1,96
2000	3,09	0,77	2,78
2200	0,66	1,58	0,69
2500	0,63	0,08	2,45
2800	2,22		2,84
3000	2,08		
a=50(m.s ⁻²)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
100	4,80	0,03	0,38
200	0,59	0,25	0,35
400	0,04	0,13	0,13
600	0,14	0,10	0,12
800	0,17	0,08	0,12
1000	1,24	0,38	0,85
1200	0,32	0,06	1,47
1500			
1700	1,65	1,13	
2000		3,18	
2200			
2500	4,13		
2800	3,25		
a=10(m.s ⁻²)	Diferença de Fase	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Sdf - Scf (%)	Sav - Scf (%)	Srfc - Scf (%)
100	0,32	1,92	0,31
160	0,08	0,64	0,95
400	0,30	4,39	2,52
600	0,72	7,32	0,53

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico de barras ilustrativo dos resultados da tabela anterior para uma amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$.

No gráfico que se segue verifica-se que o maior erro percentual absoluto face ao método da CF surge para o método da DF a 2000 Hz sendo de 3,09 %. Até cerca de 900 Hz a diferença entre o método da CF e o método da DF não é significativa, o que demonstra que o método da DF funciona também a baixas frequências.

Verifica-se que o método da RFC apresenta diferenças face ao método da CF muito semelhantes ao método da DF ao longo da variação da frequência.

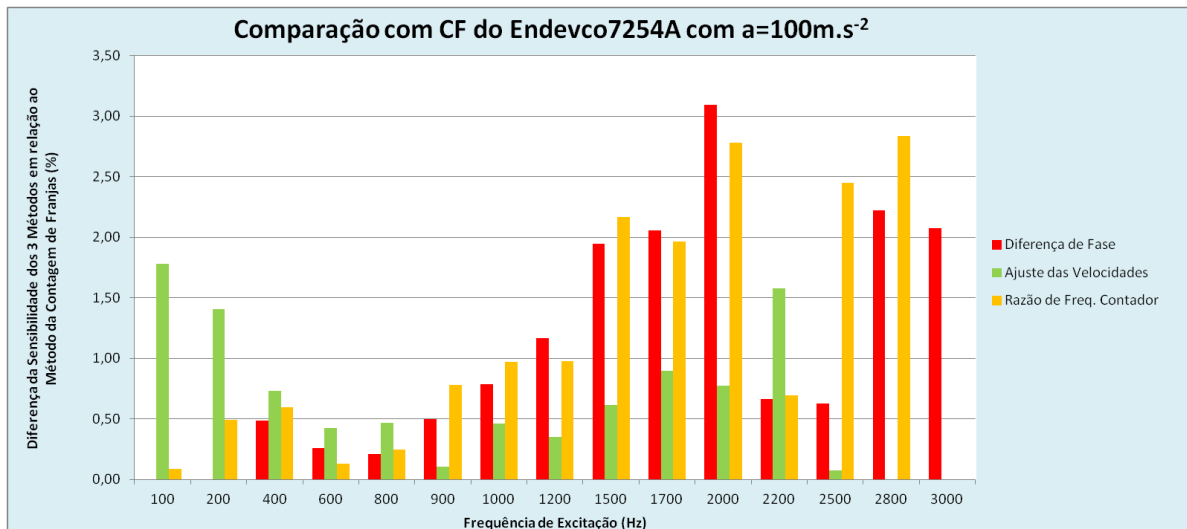


Figura 7-25 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, a = 100 m.s⁻².

Seguidamente apresenta-se a situação semelhante ao gráfico a anterior para uma amplitude de aceleração de $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$. Verifica-se que o método da DF apresenta uma grande diferença de exatidão face ao método da CF nas altas frequências e numa frequência de 100 Hz, obtendo-se valores de diferença da ordem de 4 %.

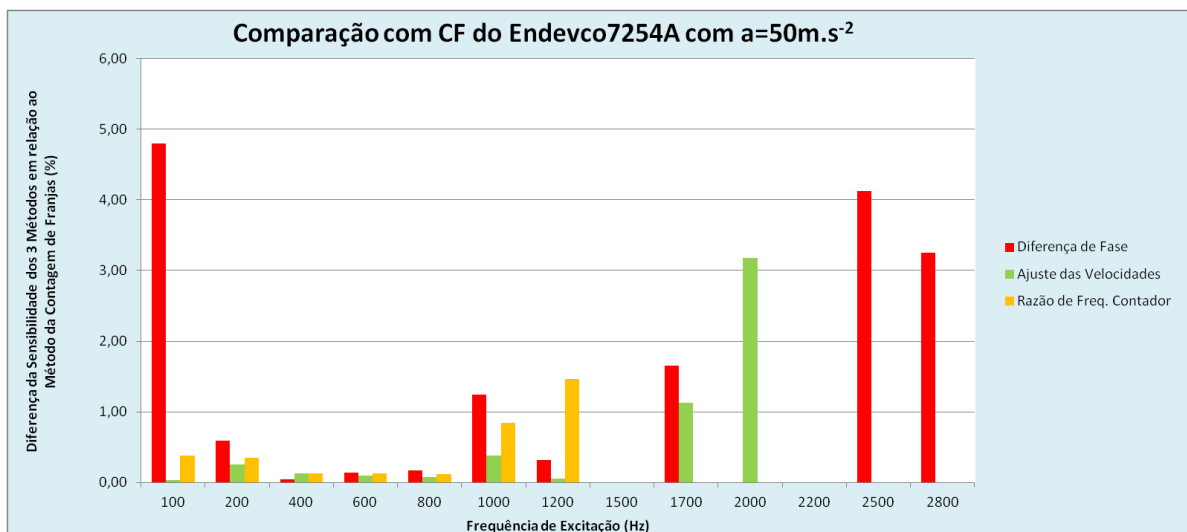


Figura 7-26 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, a = 50 m.s⁻².

No gráfico que se segue apresenta-se a situação semelhante aos dois gráficos anteriores mas com uma amplitude de aceleração de $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

Verifica-se pouca exatidão do método do AV na frequência de 600 Hz, onde se obteve uma diferença face ao método da CF da ordem de 7 %.

O método da DF apresentou valores muito semelhantes ao método da CF num intervalo de frequências entre 100 Hz e 600 Hz pois as barras a vermelho são muito pequenas abaixo de 1 %.

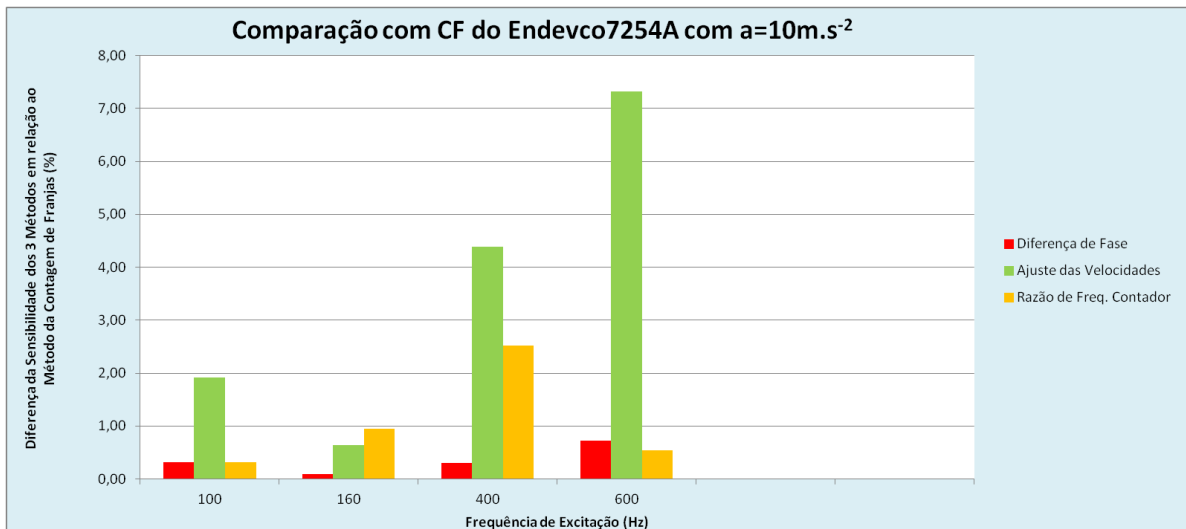


Figura 7-27 Sensibilidade face ao Método da CF, Endevco7254A, $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$.

7.2.6 Comparação dos 3 Métodos com a Diferença de Fase, Endevco7254A

De seguida apresenta-se a comparação do método da DF com os restantes 3 métodos. Dado que, no âmbito desta dissertação este é o método que se pretende validar, analisa-se o erro percentual absoluto apresentado pelos restantes 3 métodos face a este método, não só para o acelerómetro B&K8305S, mas também para o Endevco 7254A.

Tabela 7-8 Comparação face ao Método da DF, Endevco7254A.

Validação dos Métodos face ao da Diferença de Fase/			
a=100(m.s ²)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
400	0,48	0,25	0,11
600	0,26	0,16	0,13
800	0,21	0,25	0,03
900	0,50	0,39	0,28
1000	0,79	0,33	0,18
1200	1,18	0,83	0,20
1500	1,98	1,35	0,22
1700	2,10	1,18	0,09
2000	3,19	2,39	0,33
2200	0,67	2,25	1,36
2500	0,63	0,55	1,84
2800	2,27		0,63
3000	2,12		
a=50(m.s ²)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
100			
200	0,59	0,34	0,25
400	0,04	0,08	0,09
600	0,14	0,04	0,01
800	0,17	0,25	0,06
1000	1,26	0,87	0,40
1200	0,32	0,38	1,15
1500			2,97
1700	1,68	0,53	
2000			
2200			
2500			
2800	3,36		
a=10(m.s ²)	Contagem de Franjas	Ajuste das Vel.	Razão Freq. Contador
Freq (Hz)	Scf - Sdf (%)	Sav - Sdf (%)	Srfc - Sdf (%)
100	0,32	1,59	0,01
160	0,08	0,72	0,87
400	0,30		2,23
600	0,72		0,19
800		3,80	

Tal como foi realizado para o acelerómetro da Bruel &Kjaer®, de seguida apresenta-se o gráfico que mostra o erro percentual absoluto apresentado pelos métodos tomando como referência o método da DF.

Para $a = 100 \text{ m.s}^{-2}$ o método da Contagem de Franjas apresenta diferenças significativas face ao método da DF, nomeadamente a partir de 1500 Hz, apresentado o valor mais elevado do intervalo a 2,0 kHz da ordem de 2 %.

Para $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$ o método da CF apresenta maiores diferenças face ao método da DF para altas frequências, nomeadamente a 1700 Hz de 1,68 % e para 2800 Hz de 3,36 %, uma vez que já não se encontra na sua zona ótima de funcionamento.

Considerando $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$ o método do AV apresenta a sua maior diferença face ao método da DF a 800 Hz de 3,8 %.

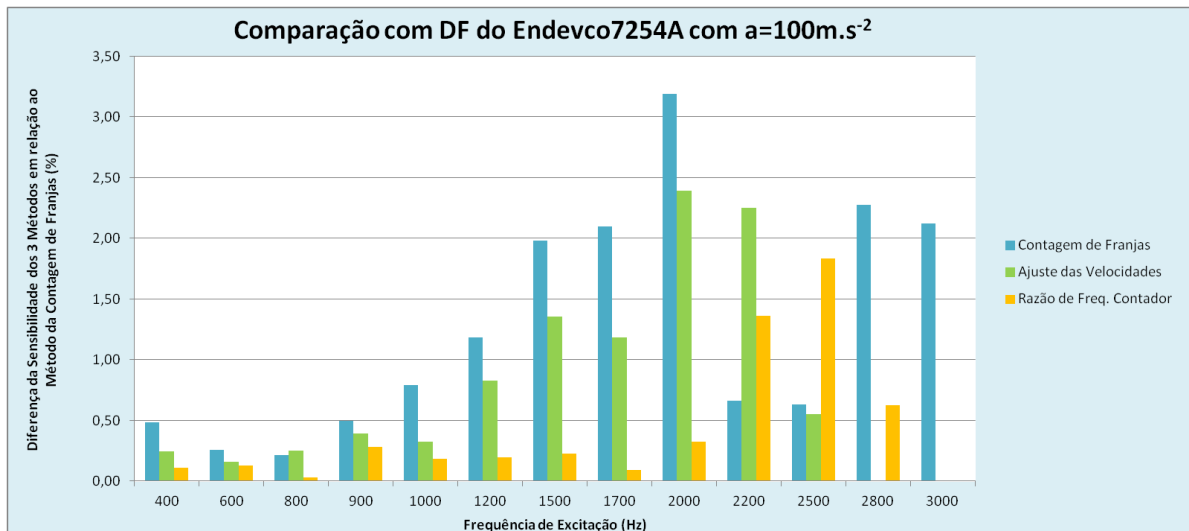


Figura 7-28 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, a = 100 m.s⁻².

Apresenta-se seguidamente a situação semelhante ao gráfico anterior mas para uma amplitude de aceleração de $a = 50 \text{ m.s}^{-2}$.

Verifica-se novamente as situações apresentadas no gráfico anterior quando se compara o método da CF e o método do AV com o método da DF.

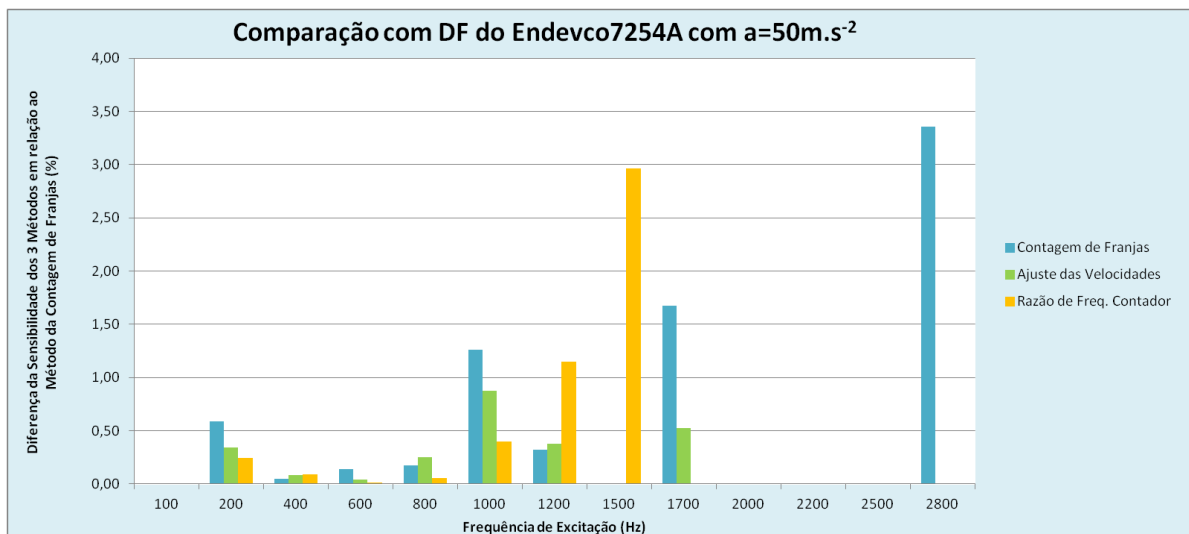


Figura 7-29 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, a = 50 m.s⁻².

Na figura seguinte mostra-se o gráfico ilustrativo semelhante aos dois gráficos anteriores, mas para uma amplitude de aceleração de 10 m.s^{-2} .

Mais uma vez se demonstra que o método da CF e o método da DF não apresentam diferenças significativas em termos de exatidão nas baixas frequências.

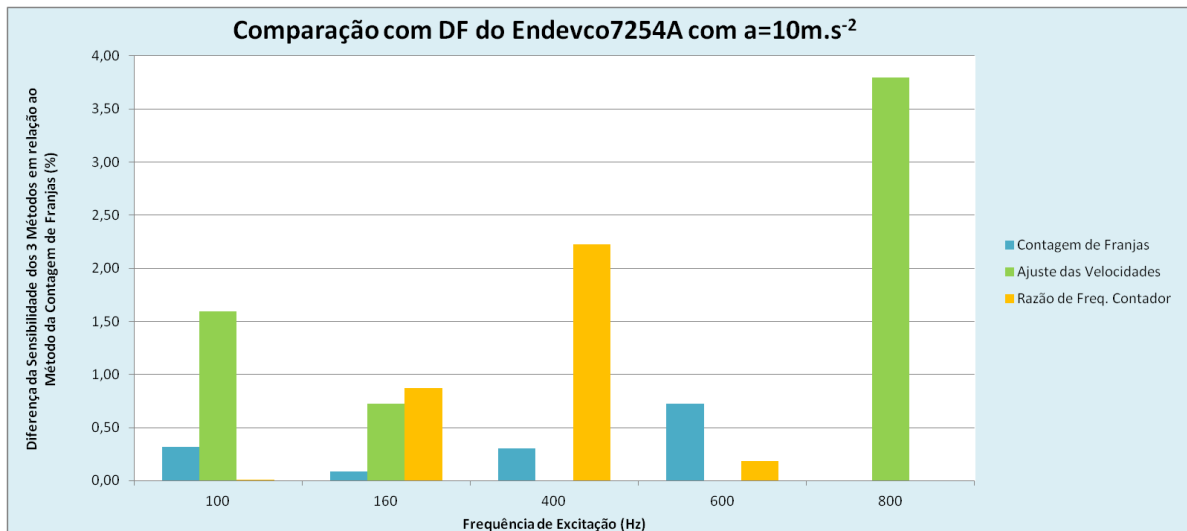


Figura 7-30 Sensibilidade face ao Método DF, Endevco7254A, $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

7.3 Comparação das 3 acelerações para o Método da Diferença de Fase

Na tabela seguinte apresenta-se um intervalo de frequências que foi coincidente para as 3 acelerações testadas, nomeadamente entre $f = 400 \text{ Hz}$ e $f = 1500 \text{ Hz}$, para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

O objetivo desta fase foi comparar o comportamento do método da DF para as 3 acelerações consideradas, com vista a perceber as diferenças entre elas.

Tabela 7-9 Comparação das 3 acelerações para o método da Diferença de Fase.

$a=100\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$		$a=50\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$		$a=10\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	
Freq.(Hz)	S(pC/m*s-2)	Freq.(Hz)	S(pC/m*s-2)	Freq.(Hz)	S(pC/m*s-2)
400	1,2893E-01	400	1,2885E-01	400	1,2883E-01
600	1,2896E-01	600	1,2895E-01	600	1,2792E-01
1000	1,2971E-01	1000	1,2953E-01	1000	1,2774E-01
1200	1,3000E-01	1200	1,2881E-01	1200	1,2841E-01
1500	1,2836E-01	1500	1,2725E-01	1500	1,2873E-01

Observando o gráfico que se segue verifica-se que os valores mais exatos ao nível da sensibilidade foram obtidos sempre para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, o que está de acordo com os gráficos do capítulo anterior, em que se verificou maior dificuldade em obter resultados tão exatos como os resultados obtidos para $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, quando se testaram as acelerações mais baixas.

Comparando as amplitudes de aceleração de $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ e $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, verificou-se que até uma frequência de $f = 1,2 \text{ kHz}$ a aceleração $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ apresentou maior exatidão do que a aceleração $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, mas para $f = 1,5 \text{ kHz}$ a exatidão foi maior para $a = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ do que para $a = 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

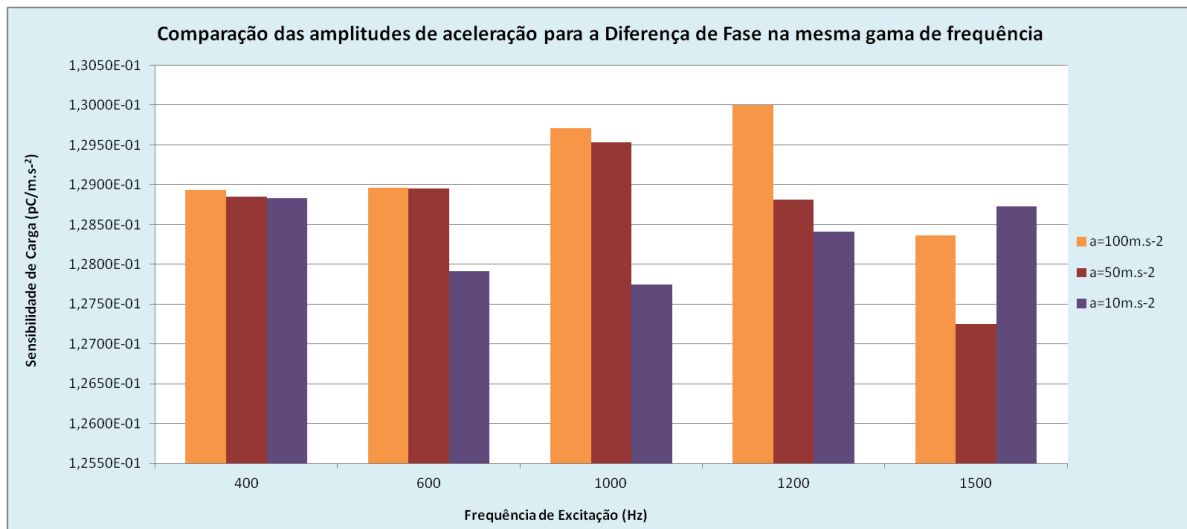


Figura 7-31 Gráfico das 3 acelerações para o Método da Diferença de Fase.

7.4 Comparação dos 2 Acelerómetros

Nesta fase efetuou-se a comparação entre os dois acelerómetros-padrão num mesmo intervalo de frequências, para a amplitude de aceleração $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Fez-se a comparação para o método da Diferença de Fase, o qual se pretende validar, e para o método da Contagem de Franjas, considerado o método padrão neste estudo.

Comparação para o método da Diferença de Fase:

Na tabela seguinte apresenta-se os valores de incerteza expandida obtidos para o método da DF num intervalo de frequências comum aos 2 acelerómetros:

Tabela 7-10 Comparação dos dois Acelerómetros para o Método da DF.

B&K8305S_DF		Endevco7254A_DF	
Freq.(Hz)	U(%)	Freq.(Hz)	U(%)
200	0,02	200	1,12
400	0,02	400	0,12
600	0,03	600	0,28
900	0,04	900	0,28
1000	0,05	1000	0,67
1200	0,08	1200	0,47
1500	0,12	1500	0,84
1700	0,60	1700	0,53
2000	0,21	2000	0,31
2200	0,85	2200	0,27
2500	0,44	2500	0,98
2800	0,37	2800	0,12
3000	0,61	3000	0,35

De acordo com a tabela anterior, no gráfico que se segue apresenta-se a comparação da incerteza expandida que foi obtida para os dois acelerómetros no intervalo de frequências entre 200 Hz e 3 kHz para o método da Diferença de Fase. Verifica-se que, de um modo geral o Endevco7254A apresentou maior incerteza, o que poderá ser explicado dado que para o B&K8305S foi usada uma *dummy mass* de elevado polimento, enquanto para o Endevco7254A foi usado um espelho comum. Esta diferença apresentada relativamente ao tipo de superfície onde o laser incidiu contribui para a diferença de valores de incerteza de medição obtidos.

O B&K8305S apresentou valores de incerteza expandida inferiores a 0,2 %, até 1,5 kHz, tendo-se obtido como valor máximo 0,85 % para uma frequência de 2,2 kHz, o que permite validar o método da Diferença de Fase tanto para as altas como para as baixas frequências.

O Endevco7254A apresentou uma incerteza expandida variável ao longo do intervalo de frequência, tendo-se obtido como valor máximo de 1,2 %, o que se considera muito bom.

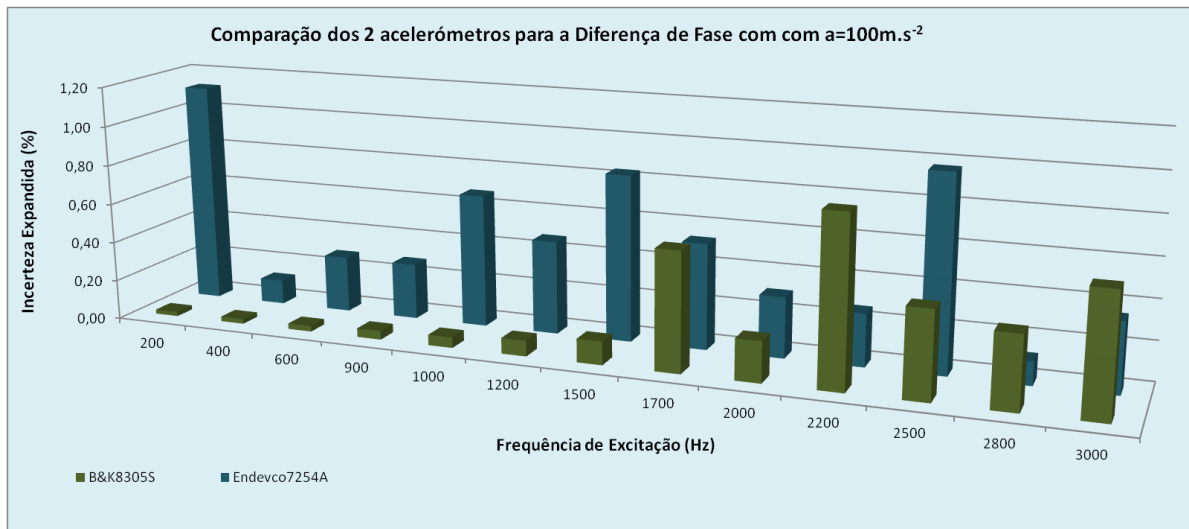


Figura 7-32 Comparação dos 2 Acelerómetros para o Método da Diferença de Fase.

Comparação para o Método da Contagem de Franjas:

Na tabela seguinte encontram-se os valores de incerteza expandida obtidos para o método da CF no intervalo de frequências de comparação comum aos 2 acelerómetros, nomeadamente desde $f = 100$ Hz a 3 kHz, novamente para uma amplitude de aceleração de $a = 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Tabela 7-11 Comparação dos dois acelerómetros para o Método da CF.

B&K8305S_CF		Endevco7254A_CF	
Freq.(Hz)	U(%)	Freq.(Hz)	U(%)
100	0,92	100	0,17
200	0,11	200	1,40
400	0,26	400	0,74
600	0,50	600	0,46
900	0,20	900	0,60
1000	1,00	1000	0,49
1200	0,99	1200	2,04
1500	0,91	1500	3,51
1700	0,81	1700	1,65
2000	0,64	2000	0,48
2200	1,25	2200	0,49
2500	0,65	2500	0,33
2800	1,10	2800	1,24
3000	0,07	3000	0,20

De acordo com a tabela anterior, no gráfico que se segue apresenta-se a comparação da incerteza expandida obtida para os dois acelerómetros no intervalo de frequências entre 100 Hz e 3 kHz. Verifica-se que, de um modo geral o acelerómetro Endevco7254A apresentou maior incerteza face ao B&K8305S.

O B&K8305S apresentou uma incerteza expandida máxima de 1,25 % para uma frequência de $f = 2,2$ kHz. Este valor de incerteza resulta do facto de a 2200 kHz o Método da Contagem de Franjas já não se encontrar na sua zona de funcionamento. (Verifica-se que para o método da Diferença de Fase a incerteza máxima que o B&K8305S apresentou foi também para $f = 2,2$ kHz).

O Endevco7254A apresentou um valor máximo de incerteza expandida de 3,51 % para a frequência $f = 1,5$ kHz. Neste sentido verifica-se que ambos os acelerómetros tiveram valores de exactidão considerados aceites, tendo sido o valor de incerteza expandida máxima da ordem de 3 %.

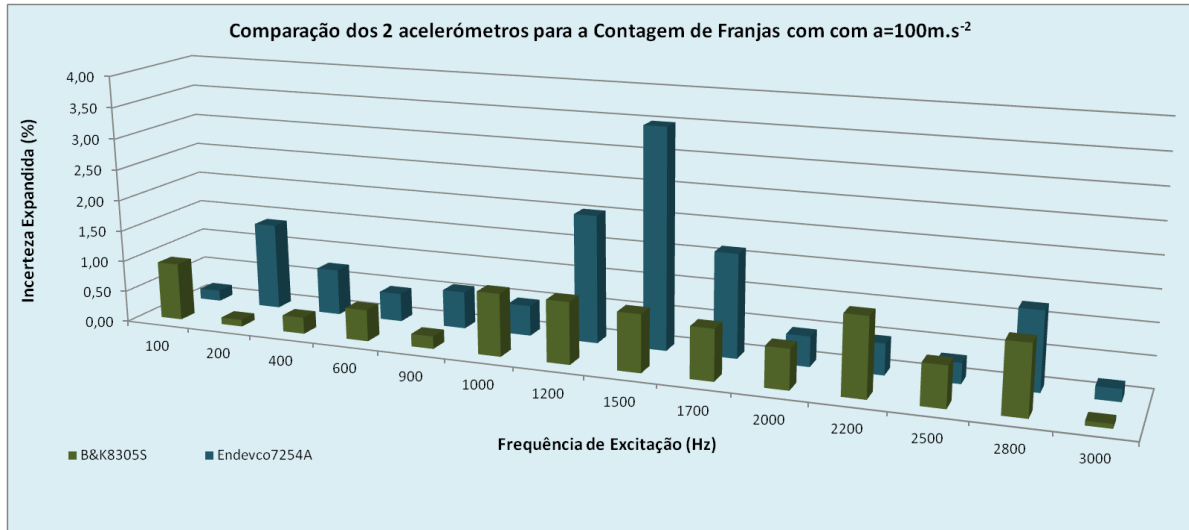


Figura 7-33 Comparação dos 2 Acelerómetros para o Método da Contagem de Franjas.

8 Conclusões

Tendo em consideração os resultados presentes no capítulo de Apresentação e Discussão de Resultados, conclui-se que foi possível validar o método da Diferença de Fase para os dois acelerómetros no intervalo de frequências de medição entre 40 Hz e 3 kHz.

Verificou-se que cada acelerómetro apresentou valores de incerteza diferentes devido às suas características, bem como em função do método de calibração utilizado, dado que cada método possui uma zona ótima de funcionamento. Os valores máximos de incerteza expandida foram da ordem de 1 % para o primeiro acelerómetro apresentado e da ordem de 3 % para o segundo acelerómetro apresentado, o que se considerou ótimo.

Validou-se o método da Diferença de Fase através do método da Contagem de Franjas, validação também suportada e confirmada pelos resultados obtidos através dos métodos do Ajuste de Velocidades e da Razão de Frequências do Contador, bem como pelas respectivas incertezas expandidas de medição calculadas

Foi otimizado o sistema experimental, para a medição e caracterização de acelerómetros-padrão em regime de alta frequência. Foi efetuada a análise e a validação dos resultados, considerando o cálculo de todas as incertezas associadas às medições realizadas para o método da Contagem de Franjas e para o método da Diferença de Fase.

Foi ainda efetuada a calibração de outros equipamentos utilizados no sistema experimental, nomeadamente os pré-amplificadores de carga e o controlador de vibração, cujos resultados e a respetiva incerteza permitiram validar a sua adequabilidade à utilização pretendida. Os pré-amplificadores apresentaram um erro de medição percentual abaixo de 0,5 %, o que está de acordo com as suas características técnicas.

Com relação à dissertação no âmbito do estágio no IPQ, conclui-se que foram obtidos novos conhecimentos ao nível da Metrologia científica, dos métodos de calibração, cálculo de incertezas, bem como da ciência Ótica, pelo que o IPQ contribuiu muito para desenvolver as minhas capacidades.

Esta dissertação permitiu-me comparecer em diversas conferências sobre vibrações e qualidade ao nível metrológico bem como escrever um artigo acerca do trabalho em questão para uma Conferência e ainda adquirir competências laboratoriais e de trabalho numa empresa como forma de experiência profissional. Foi ainda possível participar nas Jornadas Tecnológicas da FCT.

Ao nível de sugestões para trabalhos futuros considero que seria interessante realizar a calibração dos mesmos acelerómetros para frequências entre 3 kHz e 10 kHz e estudar o comportamento do Método da Diferença de Fase nestas frequências.

Bibliografia:

- [1] Baker, R. **Introduction to Vibration**. LDS Ling Dynamic Systems, 1995.
- [2] BIPM. **CCAUV: Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration**. Obtido em: <<http://www.bipm.org/en/committees/cc/ccauv/>> Acesso em: 01 de Setembro de 2013.
- [3] BIPM. **CIPM: International Committee for Weights and Measures**. Obtido em: <<http://www.bipm.org/en/committees/cipm>> Acesso em: 01 de Setembro de 2013.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAP and OIML, **Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)**, Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100, 2008.
- [5] BIPM. **General Conference on Weights and Measures**. Obtido em: <www.bipm.org/en/convention/cgpm> Acesso em: 02 de Setembro de 2013.
- [6] BIPM. **The BIPM headquarters**. Obtido em: <<http://www.bipm.org/en/bipm>> Acesso em: 01 de Setembro de 2013.
- [7] Bruel & Kjaer. **Certificate of Calibration - Absolute Calibration by Laser-Interferometer**. Dinamarca, 2000.
- [8] Bruel & Kjaer. **Instruction Manual Vibration Exciter System**. Dinamarca, 1974.
- [9] Bruel & Kjaer. **Piezoelectric Accelerometers and Vibration Pre-amplifiers Theory and Application**, 1986.
- [10] Bruel and Kjaer. **Product Data Mechanical Filter for Accelerometers**. BP 0297-I 4, Dinamarca, 2008.
- [11] Bruel & Kjaer. **Product Data Power Amplifier – Type 2718**. BP 1928-13, Dinamarca, Maio, 2011.
- [12] Bruel & Kjaer. **Product Data Piezoelectric DeltaShear Accelerometers Uni-Gain**. BP0196-22, Fevereiro, 2008.
- [13] Bruel & Kjaer. **Product Data Cables, Connectors and Adaptors Batteries and Motor Scales**. BP 0185-15, Dinamarca, 2000.
- [14] Bruel & Kjaer. **Technical Documentation Charge Amplifier 2635**. BP0099-15, Dinamarca, 1998.
- [15] Cabral, A., Godinho, I., Rebordão, J., Nunes, J., & Oliveira, V. **Metrologia por Interferometria ótica: Acelerometria e espaço**. INETI, Lisboa, 2005.
- [16] Cabral, A., Godinho, M. I., Oliveira, V., Rebordão, J. M., & Nunes, M. C. **Metrologia Primária de Vibração por Laser: Avaliação dos Efeitos de Balanceio na Exatidão das Medidas de Aceleração**. Metrologia e Inovação, Funchal, Madeira 2007. (p.8).
- [17] Cabral, A., Godinho, M. I., Oliveira, V., Rebordão, J. M., & Nunes, M. C. **Primary Laser Vibration Metrology: Evaluation of the Rocking Motion Impact in the Accuracy of Acceleration Measurements**. INETI, Lisboa, Portugal, 2008. (p.12).
- [18] Cabral, A., Godinho, M. I., Oliveira, V., Rebordão, J. M., & Nunes, M. C. **Interferometria Ótica com Detecção Heterodina – Calibração de Acelerómetros-padrão em Regime de Alta Frequência**. SPMET, INETI, Lisboa, 2005. (p.7).

- [19] Cabral, A, Rebordão, J. M., Oliveira, V., Godinho, M. I., & Nunes, M. C. **Heterodyne Interferometry for Calibration of Standard Accelerometers in High Frequency Regime**. INETI, Lisboa, 2006. (p.7).
- [20] CEN. **About us**. Obtido em: <<http://www.cen.eu/cen/AboutUs/Pages/default.aspx>> Acesso em: 02 de Setembro de 2013.
- [21] Dosch, Jeffrey J., e Lally, David, **A Heterodyne Laser Interferometer for Primary Calibration of Accelerometers**, AR#79, Conference & Exposition on Structural Dynamics, IMAC-XXI, 2003.
- [22] EURAMET. **Objectives of EURAMET**. Obtido em: <<http://www.euramet.org/index.php?id=objectives>> Acesso em: 28 de Agosto de 2013.
- [23] Endevco. **Instruction Manual for Endevco Piezoelectric Accelerometers**. U.S.A,1979.
- [24] EURAMET. **METROLOGY IN SHORT**. Publications, Alemanha, 3^a Edição, Julho, 2008. (p.86). Obtido em: <http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/Metrology_in_short_3rd_ed.pdf> Acesso em: 25 de Agosto de 2013.
- [25] EURAMET. **Welcome to the European Metrology Research Programme (EMRP)**. Obtido em: <<http://www.euramet.org/index.php?id=emrp>> Acesso em: 28 de Agosto de 2013.
- [26] Godinho, M. I., Nunes, M. C., Cabral, A., Rebordão, J. M. & Oliveira, V. **Absolute Calibration of Standard Accelerometers with Optical Interferometry**. INETI, Lisboa, 2006. (p.8).
- [27] Godinho, M., Cabral, A., Nunes, M., Rebordão, J. & Oliveira, V. **Calibração Primária de Acelerómetros por Interferometria Óptica – Extensão da Gama de Medição em Frequência de Aceleração**. INETI, Lisboa (p. 6).
- [28] Godinho, I., Rebordão, J., Nunes, M., Ribeiro, L. **Calibração de Acelerómetros por Interferometria Laser-Interferómetro de Michelson**. INETI, Lisboa.
- [29] Godinho, M. I., Cabral, A., Nunes, M. C., Rebordão, J. M. & Oliveira, V. **Interferometria Óptica: Calibração Primária de Acelerómetros-Padrão**. INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P., LME – Laboratório de Medidas Eléctricas, Lisboa, 2006.
- [30] Hetch, E. **Óptica**. (J. M. Rebordão, Tradução.) Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1991 (p.720).
- [31] IPQ. **Calibração Primária de Acelerómetros-Padrão por Interferometria Laser com Detecção Homodina**. Caparica, 2009.
- [32] IPQ. **Estrutura Orgânica**. Obtido em: <<http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/apresentacao/estrutorg/Pages/estrutorg.aspx>> Acesso em: 31 de Agosto de 2013.
- [33] IPQ. **Guia para a Expressão de Incertezas**. Caparica, Portugal, 2005. (p.24).
- [34] IPQ. **INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE**. Obtido em: <<http://www1.ipq.pt/PT/IPQ/Pages/IPQ.aspx>> Acesso em: 31 de Agosto de 2013.
- [35] IPQ. **LABORATÓRIO DE ACELERAÇÃO E VIBRAÇÕES**. Obtido em: <<http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/saceleracaovibracoes/Pages/AcelVib.aspx>> Acesso em: 31 de Agosto de 2013.
- [36] IPQ. **Manual da Qualidade da Unidade de Metrologia Científica e Aplicada**. Caparica, 2011.

- [37] IPQ. **Procedimento Técnico de Calibração Primária de Acelerómetros-Padrão por Interferometria Laser com Detecção Homodina.**, Caparica, 2009.
- [38] IPQ. **Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)**. 1ª Edição Luso-Brasileira, Caparica, 2012.
- [39] ISO. **About ISO**. Obtido em: <<http://www.iso.org/iso/home/about.htm>> Acesso em: 02 de Setembro de 2013.
- [40] ISO. **Guide for Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration**. International Standard ISO 2631, 2ª Edição, Janeiro, 1978. (p. 16).
- [41] ISO. **Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry**. ISO 16063-11. 1999. (p.27).
- [42] National Instruments. **Types of Accelerometers**. Obtido em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/284>> Acesso em: 3 de Setembro de 2013.
- [43] Nunes, M. C. Godinho, M. I., Rebordão, J. M., & Ribeiro, L. **Accelerometer Calibration by Interferometry Laser Interferometry using ‘Cots’ Components and Offline Data Processing**. IMAC-XIX: Conference on Structural Dynamics, Florida, Fevereiro, 2001.
- [44] Oliveira, V., Godinho, I., Ribeiro, L., & Filipe, E. **Calibração Primária de Acelerómetros-Padrão por Interferometria Laser: Medição de Amplitudes Submicrométricas**. CONFOMET, 2010.
- [45] PCB Piezotronics. **Accelerometer Design and Operation Characteristics**. Obtido em: <<http://www.imi-sensors.com>> Acesso em 2008.

