

Gestão de Laboratório de Calibração de Equipamentos de Análises de Vibrações

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Autor

Alexandre Daniel Batista Martins

Orientador

Dr. José Manuel Torres Farinha

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coorientadores

Eng.º Luís Miguel Vasconcelos Ferreira

Eng.ª Ana Margarida Vivaldo dos Santos Colaço

Instituto de Soldadura e Qualidade

Coimbra, Junho, 2019

AGRADECIMENTOS

É com enorme desejo que quero deixar umas palavras de agradecimentos a todos os que participaram construtivamente em mais uma etapa da minha vida, que foi a realização do estágio curricular e a realização deste relatório.

Começo por agradecer à minha família, de uma forma especial aos meus pais e irmã que estiveram comigo e me apoiaram em todo o meu percurso, permitindo que tudo isto fosse possível.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e aos professores pela formação fornecida no meu percurso académico. Uma especial atenção ao meu orientador, professor José Manuel Torres Farinha que sempre se mostrou disponível para me ajudar e me proporcionou esta oportunidade de estágio de grande contributo para a minha carreira profissional.

Também quero agradecer ao Instituto de Soldadura e Qualidade que me acolheu e me transmitiu uma excelente formação na área da metrologia. Todos os meus colegas de laboratório foram de extrema importância na minha estadia na empresa, demonstrando sempre afeto e vontade de partilhar conhecimento. Quero deixar uma palavra de agradecimento aos meus coorientadores, Engenheiro Luís Miguel Vasconcelos Ferreira e Engenheira Ana Margarida Vivaldo dos Santos Colaço, que foram um grande apoio em todos os meses de estágio, estando sempre disponíveis a ajudar e partilhar conhecimento.

Também agradeço a todos que sempre estiveram comigo, como os meus amigos, dando sempre apoio e motivação na realização desta etapa.

Por fim agradeço aos meus colegas do Mestrado de Engenharia e Gestão Industrial que viveram este percurso comigo.

RESUMO

O presente relatório refere-se ao estágio do autor, desenvolvido no contexto da metrologia, realizado num laboratório acreditado em análise de sensores de vibração, no Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).

Através da atividade do laboratório em apreço é garantida a rastreabilidade dos instrumentos de medição, de acordo com os requisitos e ou normas vigentes, aos mais diversos equipamentos industriais, bem como aos atinentes a estudos e projetos realizados na área do ambiente, saúde, higiene e segurança, construção, manutenção, desenvolvimento de produtos e indústria em geral.

As atividades desenvolvidas no laboratório de vibração do ISQ são as seguintes:

- Calibração de acelerómetros uniaxiais e triaxiais (X, Y, Z);
- Calibradores de aceleração;
- Analisadores de vibração;
- Cadeias de medição (acelerómetros; condicionadores; e unidades de leitura) em aceleração;
- Sistema de medição de vibração associada ao corpo humano (Norma ISO 8041:2017);
- Sismógrafos.

Em termos operacionais, os clientes do ISQ enviam os acelerómetros ou equipamentos de medição de vibração para o laboratório descrevendo o que pretendem que este faça. Podem solicitar a determinação da sensibilidade do acelerómetro numa só frequência, ou ao longo de uma faixa de frequências, determinando assim a variação de sensibilidade ao longo de todas as frequências. Também podem solicitar para calibrar a sua resposta em amplitude, ou seja, para determinar a sensibilidade do acelerómetro numa frequência específica e avaliar apenas a amplitude nessa mesma frequência para verificar a variação à sensibilidade.

No laboratório são realizadas calibrações a qualquer equipamento de medida de vibração, dentro das gamas de frequência e amplitude possíveis gerar. Em relação à calibração dos equipamentos de vibração no corpo humano, esta é feita de acordo com a norma ISO 8041:2017. Estes são os aspetos tratados ao longo do estágio e que são descritos ao longo do presente relatório, que correspondem ao estágio curricular do mestrado em Engenharia e Gestão Industrial do autor.

Palavras Chave: Metrologia; Calibração; Vibração; Acelerómetros; Vibrações.

ABSTRACT

This report refers to an internship of the author, developed in the context of metrology, performed in a laboratory accredited in vibration sensor analysis, at the Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).

Through the laboratory's activity it is guaranteed the traceability of the measuring instruments, according to the requirements or standards in force to the most diverse industrial equipment, as well as those related to studies and projects carried out in the area of environment, health, hygiene and safety, construction, maintenance, product development and industry in general.

The activities developed in the vibration ISQ laboratory are as follows:

- Calibration of uniaxial and triaxial accelerometers (X, Y, Z);
- Acceleration gauges;
- Vibration analyzers;
- Measuring chains (accelerometers, conditioners, and reading units) in acceleration;
- Vibration measurement system associated with the human body (Standard ISO 8041: 2017);
- Seismographs.

In operational terms, ISQ customers send the accelerometers or vibration measuring equipment to the laboratory describing what's there intended function. They may request the measurement of the sensitivity of the accelerometer on a single frequency, or over a frequency range, thereby determining the sensitivity deviation across all frequencies. They may also request to calibrate their amplitude response, i.e., to determine the sensitivity of the accelerometer at a specific frequency and to assess only the amplitude at that same frequency, in order to check the deviation to the sensitivity.

In the laboratory, the calibrations are performed on any vibration measuring equipment within the frequency and amplitude ranges available on the market. Regarding the calibration of vibration equipment in the human body, it is made according to standard ISO 8041: 2017. These are the aspects dealt along the internship and that are described throughout this report, which corresponds to the curricular internship of the master's degree in Engineering and Industrial Management of the author.

Keywords: Metrology, Calibration, Vibration, Accelerometers

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
ABREVIATURAS	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	3
2.1 Instituto de Soldadura e Qualidade – ISQ	3
2.1.1 Departamento de Metrologia.....	3
3 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
3.1 Metrologia.....	5
3.1.1 Conceitos.....	6
3.1.2 Conceitos gerais de Metrologia.....	7
3.1.3 Objetivos	12
3.1.4 Áreas de atuação	12
3.1.5 Rastreabilidade.....	14
3.1.6 Organização Internacional – Tipos de Laboratórios.....	18
3.1.7 Enquadramento do laboratório de vibração do ISQ	20
3.2 Vibração.....	20
3.2.1 Conceitos de Vibração	21
3.2.2 Parâmetros da vibração	24
3.2.2.1.1 Níveis de Vibração.....	25
3.2.3 Frequência natural e Ressonância	28
3.2.4 Graus de liberdade.....	29
3.2.5 Classificação da vibração.....	32

3.3	Sensores de análise de vibração	34
3.3.1	Acelerómetros	35
3.4	Calibração de acelerómetros	43
3.4.1	Montagem do acelerómetro	44
3.4.2	Cabos	48
3.4.3	Condições externas	51
3.4.4	Método de calibração.....	53
4	LABORATÓRIO DE ACÚSTICA E VIBRAÇÃO.....	55
4.1	Caracterização Global do Laboratório	55
4.1.1	O que se faz?.....	58
4.1.2	Tipo de clientes.....	59
4.1.3	Gestão do Laboratório	59
4.2	Cadeia de medição de vibração	60
4.2.1	Definição da gama de frequência e amplitude	69
4.3	Ensaio prático de medição de vibração.....	70
4.4	Medição de vibrações de baixa frequência	74
4.5	Introdução aos softwares de calibração	75
4.6	Diferentes sistemas de medição de vibração.....	80
4.7	Calibração de equipamentos de vibração do corpo humano	83
4.7.1	Norma ISO 8041:2017	84
5	ANÁLISE DE CASO PRÁTICO	89
6	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	ANEXOS	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas fundamentais de atuação da metrologia	13
Figura 2 - Rastreabilidade piramidal	15
Figura 3 - Hierarquia de Padrões de Medição [Fonte: (Alves, 2003)]	16
Figura 4 - Vibração pelo sistema de massa-mola.....	22
Figura 5 - Onda sinusoidal	22
Figura 6 – Harmônicos.....	23
Figura 7 – <i>FFT</i>	24
Figura 8 - Formas de representação da amplitude.....	26
Figura 9 – Diferença de fase entre dois vetores Formas de representação da amplitude [Fonte: (Rao, 2011)]	27
Figura 10 – Ponte Tacoma durante vibração provocada por vento	28
Figura 11 – Sistema com 1 grau de liberdade: a) Sistema massa-mola; b) sistema pêndulo	29
Figura 12 – Sistema com dois graus de liberdade: a) Sistema duas massas, duas molas; b) Sistema duplo pêndulo.....	30
Figura 13 – Sistema n graus de liberdade: a) n -massa $n + 1$ -sistema mola; b) Pêndulo composto; c) Estrutura de modelo de aircraft.....	31
Figura 14 – Viga elástica – Exemplo de sistema contínuo.....	32
Figura 15 – Classificação de vibração.....	32
Figura 16 – a) Vibração determinística; b) Vibração aleatória.	34
Figura 17 – Esquema básico de funcionamento de um transdutor	34
Figura 18 – Esquema de acelerómetro potenciométrico	38
Figura 19 - Esquema de acelerómetro piezoresistivo.....	38
Figura 20 - Esquema de acelerómetro piezoresistivo.....	39
Figura 21 – Mecanismos de transdução quando usados condensadores	39
Figura 22 - Esquema de acelerómetro piezoelétrico	40
Figura 23 – Esquema de acelerómetro térmico: a) Sem aceleração; b) Com aceleração	41
Figura 24 - Esquema de acelerómetro MEMS capacitivo.....	41
Figura 25 – Diferentes técnicas de montagem de acelerómetros e seus efeitos a altas frequências	44
Figura 26 – Montagem por aparafusamento: a) Parafuso removível; b) Parafuso integrado	45
Figura 27 – Preparação da superfície de montagem.....	46

Figura 28 – Adaptador para montagem	46
Figura 29 – Adaptador fixado em superfície de montagem.....	46
Figura 30 – Montagem com adesivo diretamente na superfície	47
Figura 31 – Exemplos de montagem magnética.....	47
Figura 32 – Adaptador de montagem Suporte de mão	48
Figura 33 – Vista de cima de montagem de cabos	49
Figura 34 – Efeito sobre a sensibilidade nas baixas frequências, com má montagem de cabos.....	50
Figura 35 - Efeito sobre a sensibilidade nas baixas frequências, com boa montagem de cabos.....	51
Figura 36 – Condições externas que podem influenciar na medição do acelerômetro	52
Figura 37 – Variação Sensibilidade Vs Temperatura	52
Figura 38 – Sistema de calibração Back-to-back.....	53
Figura 39 – Resposta típica do acelerômetro ao longo de uma faixa de frequência, tanto em amplitude como em fase.....	54
Figura 40 – Bancada de trabalho de calibração e vibrações.....	56
Figura 41 – Acelerômetro padrão de referência Modelo 8305-011 da Bruel&Kjaer [Fonte: (https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2052.ashx)].....	57
Figura 42- Acelerômetro padrão de referência Modelo 8305-011 da Bruel & Kjaer [Fonte: (https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2052.ashx)]	57
Figura 43 - Acelerômetro padrão de referência Modelo 301A11 da PCB.....	58
Figura 44 – Esquema da cadeia de medição 1	60
Figura 45 - Esquema da cadeia de medição 2.....	60
Figura 46 – Áreas de calibração da plataforma [Fonte: (Bruel & Kjaer, 2002)]	62
Figura 47 – Limites de frequência e amplitude para o Shaker 4808.....	64
Figura 48 - Limites de frequência e amplitude para o Shaker 4809	66
Figura 49 - Limites de frequência e amplitude para o Shaker APS ELETRO-SEIS	68
Figura 50 – Montagem dos acelerômetros no Shaker para calibração	71
Figura 51 – Determinação da sensibilidade do acelerômetro a calibrar a uma frequência de 160 Hz e uma amplitude de 10 m/s ² (1 g).....	71
Figura 52 – Resposta em frequência do acelerômetro a calibrar	72
Figura 53 - Comportamento do acelerômetro em resposta de frequência	72
Figura 54 - Resposta em amplitude do acelerômetro a calibrar.....	73

Figura 55 - Comportamento do acelerómetro em resposta de amplitude	73
Figura 56 – Determinação da sensibilidade do acelerómetro a calibrar com o acelerómetro padrão Bruel & Kjaer 8305.....	74
Figura 57 - Montagem dos acelerómetros no Shaker para calibração. Acelerómetro padrão 8305 da Bruel & Kjaer.....	74
Figura 58 – Programa em Excel para leitura de vibração com frequência inferior a 5Hz.....	75
Figura 59 – Criação do modelo do acelerómetro no software.....	76
Figura 60 – Definição do procedimento de calibração.....	77
Figura 61 – Comportamento do acelerómetro ao longo de uma faixa de frequência	77
Figura 62 – Exemplo de uma onda de vibração a 159.2 Hz e 1 g no multímetro do software	79
Figura 63 – Exemplo de uma folha de Excel na calibração de um sistema de medição de vibração	81
Figura 64 - Exemplo de uma folha de Excel para o estudo de resposta em amplitude num sismógrafo	89
Figura 65 - Exemplo de uma folha de Excel para o estudo de resposta em frequência num sismógrafo	90
Figura 66 – Folha de Excel preenchida com erro calculado para determinar o comportamento do sismógrafo em amplitude.....	93
Figura 67 - Folha de Excel preenchida com erro calculado para determinar o comportamento do sismógrafo em frequência.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de vibração	25
Tabela 2 – Aplicações possíveis dos acelerómetros.....	42
Tabela 3 – Especificações do amplificador de sinal (Power Amplifier type 2719)	63
Tabela 4 - Especificações do Shaker (Vibration Exciter Type 4808)	64
Tabela 5 - Especificações do Shaker (Vibration Exciter Type 4809)	65
Tabela 6 – Alguns exemplos de equipamentos de medição de vibração.....	82
Tabela 7 - Resumo das características de desempenho e requisitos de teste	86
Tabela 8 – Montagens do sismógrafo nos vários eixos	91

ABREBIATURAS

APCER – Associação Portuguesa de Certificação

BIPM – Bureau International de Pesos e Medidas

BRE – Boletim de Registo de Entrada

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CCLD – *Constant Current Line Drive*

CERN – *Conseil européen pour la recherche nucléaire*

CGPM – Conferência Geral sobre Pesos e Medidas

CIPM – Comité Internacional para Pesos e Medidas

ESA – *European Space Agency*

FFT – *Fast Fourier Transform*

IPAQ – Instituto Português de Acreditação

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade

LNM – Laboratório Nacionais de Metrologia

MEMS – *Micro Eletro Mechanical Systems*

OVM – Organismos de Verificação Metrológica

RMS – *Root Mean Square*

SPM – Sociedade Portuguesa de Metrologia

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

1 INTRODUÇÃO

Praticamente tudo no dia a dia do ser humano é passível de medição. É através desse pressuposto e de um sistema de unidades bem definido que se consegue manter uma coerência, quer a nível nacional quer internacional.

É possível fazer estudos de manutenção, segurança e higiene no trabalho, fazer compras no supermercado, etc. Então, a necessidade de realizar medições vai desde a mais simples tarefa do quotidiano, até aos mais exigentes estudos da engenharia. É uma prática segundo a qual o ser humano se rege há muitos anos e pela qual se orienta.

O presente relatório descreve ainda o funcionamento de um Laboratório de metrologia, mais concretamente o laboratório de calibração de analisadores de vibração do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).

O relatório está dividido em quatro capítulos principais que apresentam vários conceitos relacionados com o tema, primeiro de uma forma teórica e, depois, de uma forma prática, adquirida ao longo do estágio curricular de seis meses. É ainda feita a apresentação da empresa onde o estágio decorreu, tanto a um nível global como a um mais específico, designadamente do departamento de metrologia.

A segunda parte foca-se no enquadramento teórico, sendo descritos vários conceitos relacionados com a metrologia, vibração, sensores de vibração e calibração de acelerómetros. Na vertente da metrologia é descrito o seu significado e objetivo. São apresentados alguns conceitos importantes para o suporte global do relatório, bem como para o enquadramento da metrologia a nível nacional e mundial. É descrita a rastreabilidade metrológica e feito um enquadramento do laboratório do ISQ nesse contexto. De seguida apresenta-se o conceito de vibração e como este acontece em diversos fenómenos físicos. Em relação aos sensores de vibração, são descritas as suas funcionalidades e o seu funcionamento, bem como a sua importância para as empresas. Por fim, descreve-se o processo de calibração de acelerómetros, apresentando o método utilizado ao longo do estágio.

Na terceira parte do relatório é apresentada a parte mais prática do estágio, começando por apresentar o laboratório de Acústica e vibração do ISQ. Seguidamente referem-se os equipamentos utilizados para a calibração de acelerómetros, de forma a dar a conhecer as cadeias de medição utilizadas pelo laboratório. É descrito como se podem fazer ensaios práticos de medição de vibração, designadamente aos acelerómetros e equipamentos de

medição de vibração dos clientes do ISQ. Estas medições têm uma abordagem diferente a baixas frequências e, como tal, descreve-se como se fazem estas medições que são específicas para certos tipos de equipamentos. Também são apresentadas diversas ferramentas informáticas utilizadas para apoio às medições, mostrando o seu funcionamento e as vantagens da sua utilização. Por fim, apresenta-se uma componente mais específica para medições de vibração no corpo humano, incluindo a norma pela qual o laboratório se rege para a calibração deste tipo de equipamentos.

Na quarta parte, apresenta-se um caso prático de uma calibração de um sismógrafo, ilustrando o seu comportamento numa resposta em amplitude e frequência.

2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

2.1 Instituto de Soldadura e Qualidade – ISQ

De acordo com o *site* do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ)¹, “O ISQ é uma entidade privada e independente com cerca de 50 anos de atividade, que presta serviços de inspeção, ensaio, formação e consultoria técnica.

Apoia os clientes na melhoria do seu desempenho e na redução do risco das suas atividades, visando o aumento da disponibilidade dos seus ativos.

Oferece aos clientes serviços e soluções integradas e inovadoras garantindo a conformidade dos seus ativos e produtos com as normas e regulamentos, em termos de qualidade, segurança, ambiente e responsabilidade social.

A estratégia de crescimento passa por uma presença cada vez mais importante e sustentada no mundo, com escritórios, delegações e empresas associadas em mais de 15 países.

Nas últimas décadas o ISQ, enquanto entidade inspetora, esteve envolvido nos grandes projetos industriais e civis realizados em Portugal.

A nível internacional é de referir o envolvimento em centenas de projetos internacionais de I&D e os trabalhos realizados para entidades, como o CERN e a ESA.

Com uma presença internacional significativa, desenvolve atividade em toda a Europa e em mais de 20 países de outros continentes.”

2.1.1 Departamento de Metrologia

De acordo com o *site* do laboratório de metrologia do ISQ (Labmetro)², este é um laboratório “acreditado pelo IPAC, presta serviços de metrologia (calibrações, ensaios e verificações) às organizações e pessoas, satisfazendo os seus requisitos e exigências legais, através do desenvolvimento de soluções que contribuem para o sucesso dos seus clientes.

¹ <https://www.isq.pt/> (Data de acesso: 18/03/2019)

² <https://www.isq.pt/servicos/metrologia> (Data de acesso: 18/03/2019)

Recorrendo a uma equipa experiente e sempre disponível, que reconhece e responde às necessidades específicas dos clientes, através de uma oferta completa, única e inovadora, é hoje o maior e mais especializado laboratório do País.

Presta serviços nos domínios da saúde, acústica e vibração, dimensional, elétrico e radiofrequência, gás e caudal, massa, volume, ótica e topografia, pressão, temperatura e humidade, centros de inspeção e concessionários de automóveis.

Dispõe também de vários laboratórios móveis e executa trabalhos nas instalações do cliente, facilitando os processos de produção e permitindo assim um serviço rápido com redução significativa dos tempos de imobilização.”

Os clientes entregam os seus equipamentos ao Labmetro para serem alvo de intervenções de metrologia, designadamente calibrações. Os equipamentos são registados numa base de dados, criada pelo ISQ, a qual permite fazer o seu controlo, acompanhamento das suas intervenções, os clientes e os tipos de serviços a serem realizados.

Os equipamentos, depois de rececionados, passam por diferentes fases, sendo depois direcionados para o setor específico do laboratório correspondente ao tipo de serviço a ser prestado.

3 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

3.1 Metrologia

A necessidade de existir uma métrica e uma forma de a conseguir medir sempre foi essencial na vida do ser humano. Seria impossível seguir uma receita culinária que fosse sempre igual se não existissem medidas. Seria impossível existirem horas, ou dias, sem relógios ou calendários. Então, a existência de medidas é de extrema importância, desde as coisas mais simples do dia-a-dia até às mais complexas da ciência e engenharia.

De acordo com o *site* da Sociedade Portuguesa de Metrologia (SPM)³, “no princípio, tal como hoje, medir era contar algo que se tomava por unidade. É razoável admitir que a primeira grandeza que preocupou o Homem terá sido o tempo. E, ao considerar o tempo, na observação dos fenómenos naturais periódicos, falar-se-ia de tantos sóis ou de tantas luas...”.

Com a existência de métricas bem definidas é possível haver uma coerência. Para poderem existir estas métricas, têm de existir instrumentos de medição que comprovem que as medidas são sempre iguais, em qualquer altura e em qualquer parte do mundo.

Assim sendo, o objetivo da Metrologia passa por garantir a efetividade e exatidão das medições realizadas por esses instrumentos de medição.

De acordo com o *site* do Instituto Português da Qualidade (IPQ)⁴, “a metrologia, enquanto ciência da medição, fornece o suporte material fiável ao sistema de medições, essencial nos setores da economia, da saúde, da segurança e do ambiente, constituindo uma infraestrutura tecnológica essencial nas sociedades modernas.”

Com o passar do tempo tornou-se imperativo para todas as sociedades a existência de referências de unidades de medida, de forma a poder manter uma coerência em tudo que se executa no dia a dia; ou seja, com a existência de métricas, passou a ser necessário adquirir padrões que se tornassem referências nessas mesmas métricas.

³ <http://www.spmet.pt/historia.html> (Data de acesso: 18/03/2019)

⁴ <http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/apresentacao/Pages/Metrologia.aspx> (Data de acesso: 18/03/2019)

Por exemplo, na medida peso, hoje em dia pode saber-se exatamente o que é uma grama ou um kilo, porque, anteriormente, foi determinado um método de definição de massa que mantivesse a sua estabilidade e que pudesse ser reproduzido.

Como em praticamente tudo no dia a dia das pessoas e, principalmente, na vertente da Engenharia, tem de existir sempre uma métrica; é essencial haver um bom uso da metrologia de forma a garantir uma uniformidade universal.

A Convenção do Metro, o tratado que criou o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), uma organização intergovernamental sob a autoridade da Conferência Geral sobre Pesos e Medidas (CGPM), com a supervisão do Comité Internacional para Pesos e Medidas (CIPM), foi assinado, em Paris, em 20 de maio de 1875, por representantes de dezassete nações. Além de fundar o BIPM e estabelecer a maneira pela qual as atividades do BIPM devem ser financiadas e administradas, a Convenção do Metro estabeleceu uma estrutura organizacional permanente para os governos membros poderem agir de comum acordo em todas as questões relativas às unidades de medida, (Braz, 2015).

Uma das competências da CGPM é discutir e examinar o trabalho executado pelos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM); por sua vez, o BIPM faz recomendações sobre novas determinações da metrologia fundamental nos restantes domínios da metrologia. Atualmente, o BIPM é composto por 56 Estados Membros, incluindo os países mais industrializados, (Braz, 2015).

3.1.1 Conceitos

Metrologia é a ciência da medição, que tem como principal objetivo garantir que os equipamentos de medição garantem valores de determinadas grandezas que são reprodutíveis e que são semelhantes internacionalmente.

Segundo (Sousa, 2010), a Metrologia é a área responsável por tudo o que está relacionado com aspetos práticos e teóricos da medição, quer se fale de exatidão da ordem dos fentossegundos – cujos instrumentos de medição são calibrados em laboratórios primários com recurso às mais altas tecnologias – ou da ordem das horas, quer seja com a utilização do metro de madeira do retalhista que é submetido a uma operação de verificação metrológica legal por Organismos de Verificação Metrológica (OVM), pelos diferentes agentes da Metrologia Legal.

Em termos práticos a metrologia compreende um conjunto diversificado de aspetos (por *exemplo*, procedimentos, incertezas, erros, padrões, etc.) tendo como finalidade determinar um valor de uma grandeza.” (Flores & Marques, 2018).

3.1.2 Conceitos gerais de Metrologia

Para enquadrar os diversos conjuntos de termos relacionados com a metrologia foi tomado como referência o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)⁵, o qual surge no contexto da metrologia mundial e procura a harmonização internacional das terminologias e definições utilizadas nos campos da metrologia e da instrumentação.

Este documento é considerado como uma referência para os metrologistas, uniformizando as terminologias, estando dividido em cinco partes:

- 1) Grandezas e unidades;
- 2) Medições;
- 3) Dispositivos de medição;
- 4) Propriedades dos dispositivos de medição;
- 5) Padrões de medição.

De acordo com a VIM, definem-se os seguintes conceitos:

- *Grandeza* - Propriedade dum fenómeno dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência;
- *Sistema de Grandezas* - Conjunto de *Grandezas* associado a um conjunto de relações não contraditórias entre estas grandezas;
- *Sistema Internacional de Grandezas* - *Sistema de Grandezas* baseado nas sete *Grandezas de Base*: comprimento; massa; tempo; corrente elétrica; temperatura termodinâmica; quantidade de matéria; e intensidade luminosa;
- *Dimensão duma Grandeza* - Expressão da dependência duma *Grandeza* em relação às *Grandezas de Base* dum *Sistema de Grandezas*, na forma dum produto de

⁵ http://www1.ipq.pt/pt/metrologia/documents/vim_ipq_inmetro_2012.pdf (Acedido em: 2019.03.30)

potências de fatores correspondentes às *Grandezas de Base*, omitindo-se qualquer fator numérico;

- *Unidade de Medida* - *Grandeza* escalar real, definida e adotada por convenção, com a qual qualquer outra grandeza da mesma *natureza* pode ser comparada para expressar, na forma dum número, a razão entre as duas grandezas;
- *Sistema Internacional de Unidades (SI)* - *Sistema de Unidades*, baseado no *Sistema Internacional de Grandezas*, com os nomes e os símbolos das unidades, incluindo uma série de prefixos com os seus nomes e símbolos, em conjunto com regras de utilização, adotado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM).
- *Medição* - Processo de obtenção experimental dum ou mais *valores* que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma *grandeza*;
- *Metrologia* - Ciência da *Medição* e das suas aplicações;
- *Mensuranda/Mensurando* - *Grandeza* que se pretende medir;
- *Método de Medição* - Descrição genérica duma organização lógica de operações utilizadas na realização duma *Medição*;
- *Procedimento de medição* - Descrição detalhada duma *Medição* de acordo com um ou mais *Princípios de Medição* e com um dado *Método de Medição*, baseada num *Modelo de Medição* e incluindo todo o cálculo destinado à obtenção dum *Resultado de Medição*;
- *Procedimento de Medição de Referência* - *Procedimento de Medição* considerado capaz de fornecer *Resultados de Medição* adequados para a avaliação da *justeza de medição* de *valores medidos* obtidos a partir de outros procedimentos de medição para *grandezas* de mesma *natureza*, em *calibração* ou em caracterização de *materiais de referência*;
- *Procedimento de Medição Primário* - *Procedimento de medição de referência* utilizado para obter um *resultado de medição* sem relação com um *padrão* duma *grandeza* da mesma *natureza*;
- *Resultado de Medição* - Conjunto de *valores* atribuídos a uma *mensuranda*, juntamente com toda outra informação pertinente disponível;

- *Valor Medido Duma Grandeza - Valor Duma Grandeza* que representa um *resultado de medição*;
- *Exatidão de Medição* - Grau de concordância entre um *valor medido* e um *valor verdadeiro* duma *mensuranda*;
- *Fidelidade ou Exatidão de Medição* - Grau de concordância entre *indicações* ou *valores medidos*, obtidos por *medições* repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas;
- *Erro de Medição* - Diferença entre o *valor medido* duma *grandeza* e um *valor de referência*;
- *Condição de Repetibilidade de Medição* - Condição de *medição* num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo *procedimento de medição*, os mesmos operadores, o mesmo *sistema de medição*, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo;
- *Repetibilidade de Medição - Fidelidade ou Exatidão de Medição* sob um conjunto de *condições de repetibilidade*;
- *Condição de Reprodutibilidade de Medição* - Condição de *medição* num conjunto de condições, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes *sistemas de medição* e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares;
- *Incerteza de Medição* - Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos *valores* atribuídos a uma *mensuranda*, com base na informação utilizada;
- *Calibração* - Operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os *valores* e as *incertezas de medição* fornecidos por *padrões* e as *indicações* correspondentes com as incertezas associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum *resultado de medição* a partir duma *indicação*;
- *Hierarquia de Calibração* - Sequência de *calibrações* desde uma referência até ao *sistema de medição* final, em que o resultado de cada calibração depende do resultado da calibração precedente;

- *Rastreabilidade Metrológica* - Propriedade dum *resultado de medição* pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de *calibrações*, cada uma contribuindo para a *incerteza de medição*;
- *Cadeia de Rastreabilidade Metrológica* - Sequência de *padrões* e *calibrações* utilizada para relacionar um *resultado de medição* a uma referência;
- *Verificação* - Fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados;
- *Validação* - *Verificação* na qual os requisitos especificados são adequados para um uso pretendido;
- *Comparabilidade Metrológica* – *Comparabilidade de resultados de medição* que, para grandezas de uma dada natureza, são rastreáveis metrologicamente á mesma referência;
- *Instrumento de Medição* - Dispositivo utilizado para realizar *medições*, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares;
- *Sistema de Medição* - Conjunto dum ou mais *instrumentos de medição* e, frequentemente, outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e fontes de alimentação, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos *valores medidos*, dentro de intervalos especificados para *grandezas de naturezas* especificadas;
- *Transdutor de Medição* - Dispositivo utilizado em *medição* que fornece uma *grandeza* de saída, a qual tem uma relação especificada com uma *grandeza* de entrada;
- *Sensor* - Elemento dum *sistema de medição* que é diretamente afetado por um fenómeno, corpo ou substância que contém a *grandeza* a ser medida;
- *Cadeia de Medição* - Série de elementos dum *sistema de medição* que constitui um único caminho para o sinal, do *sensor* até ao elemento de saída;
- *Ajuste dum Sistema de Medição* - Conjunto de operações efetuadas num *sistema de medição*, de modo que ele forneça *indicações* prescritas correspondentes a determinados *valores* duma *grandeza* a ser medida;

- *Valor Nominal* - Valor arredondado ou aproximado duma *grandeza* característica dum *instrumento de medição* ou dum *sistema de medição*, o qual serve de guia para a sua devida utilização;
- *Intervalo de Medição* - Conjunto de *valores* de *grandezas* da mesma *natureza* que pode ser medido por um dado *instrumento de medição* ou *sistema de medição* com *incerteza de medição instrumental* especificada, sob condições determinadas;
- *Sensibilidade dum Sistema de Medição* - Quociente entre a variação duma *indicação* dum *sistema de medição* e a variação correspondente do *valor* da *grandeza* medida;
- *Resolução* - Menor variação da *grandeza* medida que causa uma variação perceptível na *indicação* correspondente;
- *Estabilidade dum Instrumento de Medição* - Propriedade dum *instrumento de medição* segundo a qual este mantém as suas propriedades metrológicas constantes ao longo do tempo;
- *Incerteza de Medição Instrumental* - Componente da *incerteza de medição* proveniente do *instrumento de medição* ou do *sistema de medição* utilizado;
- *Padrão de Medição* - Realização da definição duma dada *grandeza*, com um *valor* determinado e uma *incerteza de medição* associada, utilizada como referência;
- *Padrão de Medição Internacional* - *Padrão de medição* reconhecido pelos signatários dum acordo internacional, tendo como propósito a sua utilização mundial;
- *Padrão de Medição Nacional* - *Padrão de medição* reconhecido por uma entidade nacional para servir dentro dum estado ou economia, como base para atribuir *valores* a outros padrões de medição de *grandezas* da mesma *natureza*;
- *Padrão de Medição Primário* - *Padrão de medição* estabelecido com auxílio dum *procedimento de medição primário* ou criado como um artefacto, escolhido por convenção;
- *Padrão de Medição Secundário* - *Padrão de medição* estabelecido por intermédio duma *calibração* com referência a um *padrão de medição primário* duma *grandeza* da mesma *natureza*;

- *Padrão de Medição de Referência* - *Padrão de medição* estabelecido para a *calibração* de outros padrões de *grandezas* da mesma *natureza* numa dada organização ou num dado local;
- *Padrão de Medição de Trabalho* - *Padrão de medição* que é utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar *instrumentos de medição* ou *sistemas de medição*;
- *Calibrador* - *Padrão de medição* utilizado em *calibrações*;
- *Valor de Referência* - *Valor duma grandeza* utilizado como base para comparação com valores de *grandezas* da mesma *natureza*;
 - O valor de referência pode ser um *valor verdadeiro* duma *mensuranda*, sendo, nesse caso, desconhecido; caso seja um *valor convencional*, ele é conhecido.

3.1.3 Objetivos

Segundo (Cabral, 2015), a tarefa da metrologia e dos metrologistas é alcançar os resultados de medição confiáveis que são necessários para garantir:

- a qualidade e eficiência da produção na indústria;
- a justiça no comércio;
- a defesa do consumidor;
- a saúde e segurança de vida
- a proteção do meio ambiente humano e animal.

3.1.4 Áreas de atuação

Segundo (Cabral, 2015) existem três áreas fundamentais de atuação na metrologia como se pode observar na Figura 1.

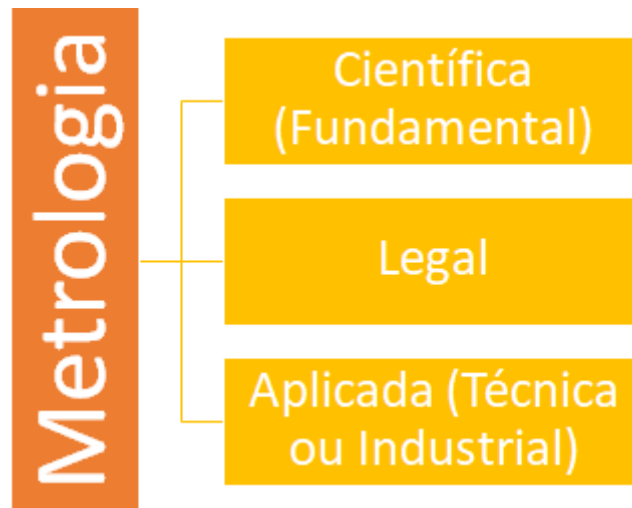


Figura 1 - Áreas fundamentais de atuação da metrologia

Na área de conhecimento em apreço podemos dizer que a metrologia tem os seguintes objetivos:

- Definição e manutenção das unidades de medida;
- Definição e manutenção dos padrões de medição da mais elevada qualidade metrológica.

Ou seja, está relacionada com as unidades de medida e com os padrões de medição internacionais de forma a manter a qualidade metrológica. É uma área que atua na mais alta exatidão e incerteza, sendo independente de outras entidades no que diz respeito à rastreabilidade.

No que concerne à vertente Legal, importa enfatizar o seguinte:

- Aplicações comerciais, fiscais, de proteção do ambiente, da conservação da energia, da saúde, e da segurança regulamentada por cada Estado;
 - Esta área é responsável por atuar no campo da Legislação, existindo um controlo metrológico referente aos mais diversos instrumentos de medição existentes, no que diz respeito às exigências técnicas e jurídicas regulamentares.

No que concerne à vertente Técnica ou industrial, destaca-se o seguinte:

- Essencialmente, relacionada com a atividade produtiva;

- Esta exerce sobre os processos e produtos um certo controlo que exige uma integração dos meios metrológicos ao nível das empresas e dos laboratórios; tem em consideração uma cadeia de padrões hierarquizada, existente em laboratórios ou empresas/organizações, sendo estes rastreáveis também por padrões primários que podem ser nacionais ou internacionais, (Castro, 2015) e (Cabral, 2015).

3.1.5 Rastreabilidade

Para existir coerência métrica internacional, tem de existir uma cadeia de rastreabilidade. Isto é, um conjunto ininterrupto de comparações que asseguram que o resultado duma medição, ou o valor de um padrão, se relaciona com as referências de nível mais elevado, terminando no nível final do padrão primário. Assim, é garantido que os valores do padrão, mesmo sendo o primário, irão estar em concordância com os superiores.

Segundo (Sousa, 2010), na Europa, a rastreabilidade é assegurada ao nível mais elevado, através de laboratórios Europeus acreditados. Nos Estados Unidos da América (EUA), a rastreabilidade é assegurada ao nível mais elevado diretamente pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Importa, aqui, alertar para dois conceitos de rastreabilidade (Sousa, 2010):

- 1) Adotado no contexto da Qualidade;
- 2) Adotado no contexto da Metrologia (rastreabilidade metrológica).

Na área da metrologia, a rastreabilidade é representada a um nível piramidal, como se pode verificar na Figura 2.

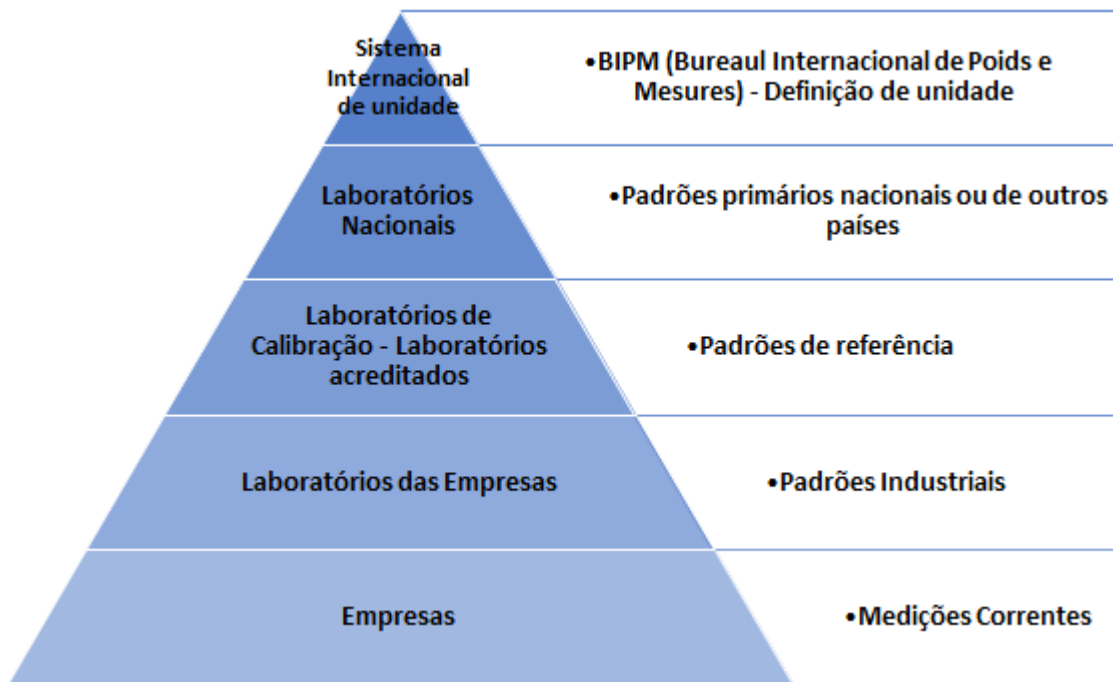


Figura 2 - Rastreabilidade piramidal

3.1.5.1 Calibração

Segundo (Sousa, 2010), um dos serviços de metrologia é a calibração dos instrumentos de medição, que é uma ferramenta básica para assegurar a rastreabilidade de uma medição.

A calibração envolve a determinação das características metrológicas de um instrumento, sendo conseguida através de uma comparação direta com padrões.

A uma calibração corresponde a emissão de um certificado de calibração e a colocação de uma etiqueta. Baseado nesta informação, um utilizador pode decidir se o instrumento é adequado à aplicação em causa.

As três razões principais para se utilizarem instrumentos calibrados são:

- 1) Assegurar que as leituras de um instrumento são consistentes com outras medições;
- 2) Determinar a exatidão das leituras do instrumento;
- 3) Estabelecer a viabilidade do instrumento.

Através da calibração é possível (Flores & Marques, 2018):

- Atribuir os valores das mensuradas às indicações;
- Determinar as correções relativas às indicações;

- Determinar outras propriedades metrológicas, tais como o efeito das grandezas de influência.

A calibração é responsável por realizar uma comparação de um instrumento de medição com um padrão, de forma a determinar o erro de medição. Sabendo este erro de medição, pode-se determinar o valor exato da métrica a ser medida.

3.1.5.2 Padrões

Para se fazerem as calibrações é necessário a existência de padrões para poder ser realizada uma comparação.

Segundo (Flores & Marques, 2018), um padrão de medição pode ser um artefacto, um instrumento de medição, um material de referência ou um sistema de medição, destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade de um ou mais valores de uma grandeza para servir de referência.

Os padrões são a referência para cada métrica, tais como, por exemplo:

- Padrão de massa de 1 kg;
- Resistência padrão de 100 Ω ;
- Amperímetro padrão.

Os padrões estão organizados de forma hierárquica: Padrões Internacionais; Padrões Primários; Padrões Secundários; e Padrões de Trabalho, (Alves, 2003). Esta hierarquia de padrões está representada na Figura 3.

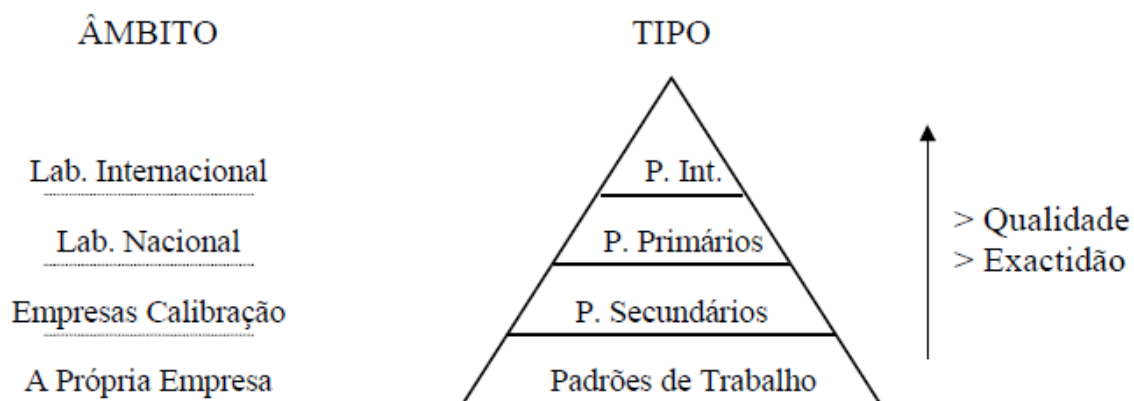


Figura 3 - Hierarquia de Padrões de Medição [Fonte: (Alves, 2003)]

3.1.5.2.1 Padrões Internacionais

Um padrão internacional é a base de reconhecimento de uma grandeza que, posteriormente, serve para fixar valores de padrões na cadeia de rastreabilidade. São, periodicamente, avaliados e testados através de medições absolutas, em termos das unidades fundamentais. Estes padrões são mantidos no *Bureau International de Poids et Mesures* (BIPM) e não estão disponíveis ao utilizador normal para calibração. Esta organização, sediada em Paris, tem a responsabilidade de (Alves, 2003):

- Estabelecer os padrões das grandezas fundamentais e as escalas das principais grandezas físicas, bem como conservar os padrões internacionais;
- Efetuar a comparação de padrões nacionais e internacionais;
- Assegurar a coordenação das técnicas de medição correspondentes;
- Efetuar e coordenar as determinações relativas às constantes físicas que intervêm nas atividades acima referidas (condições de temperatura, humidade, etc.).

3.1.5.2.2 Padrões Primários

Estes padrões são os que possuem as mais elevadas qualidades metrológicas, e cujo valor é aceite sem referência por outros padrões da mesma grandeza. Em Portugal, o responsável por estes padrões é o IPQ, o qual assegura a manutenção dos padrões primários, bem como a acreditação dos Laboratórios de Calibração. São padrões para uso exclusivo nos laboratórios nacionais, tendo como principal função a calibração de padrões secundário. Estes laboratórios emitem certificados de calibração para os padrões secundários, normalmente mantidos pelos laboratórios de calibração acreditados, (Alves, 2003).

3.1.5.2.3 Padrões Secundários

Estes são considerados como padrões de referência que são utilizados por laboratórios acreditados e, normalmente, são mantidos pelas empresas. Estes padrões são enviados, periodicamente, aos laboratórios nacionais para calibração e comparação com os padrões primários” (Alves, 2003).

O ISQ, tendo laboratórios de Metrologia acreditados pelo IPQ, possui padrões secundários.

3.1.5.2.4 Padrões de Trabalho

São padrões industriais que podem ser utilizados em laboratórios de medição de uma empresa. Estes padrões de trabalho são, então, normalmente utilizados em testes e calibrações de outros instrumentos de laboratórios ou instrumentos de aplicações industriais.

Um fabricante de resistências de grande exatidão, por exemplo, pode utilizar uma resistência padrão no departamento de controlo de qualidade, para verificar o equipamento de teste das resistências. Neste caso, o fabricante estará a verificar se a sua empresa industrial processa de acordo com os limites de exatidão preestabelecidos, (Alves, 2003).

3.1.6 Organização Internacional – Tipos de Laboratórios

3.1.6.1 A convenção do metro

De forma a implementar um sistema métrico decimal universal, a 20 de maio de 1875 ocorreu em Paris uma Conferência Diplomática sobre o metro, onde dezassete governos assinaram um tratado designado por "A Convenção do Metro". Os signatários criaram e financiaram um instituto científico e permanente: o “Bureau International des Poids et Mesures” (BIPM).

A "Conférence Général des Poids et Mesures" (CGPM) discute e examina o trabalho executado pelos Laboratórios Nacionais de Metrologia, e o BIPM faz recomendações sobre novas determinações da metrologia fundamental e em todos os outros domínios de atuação do BIPM, (Sousa, 2010).

Esta convenção também garantiu uma estrutura organizacional permanente para os governos membros agirem em comum de acordo com as questões relativas às unidades de medida.

3.1.6.2 Laboratórios Nacionais de Metrologia

O Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) é responsável por desenvolver e manter os padrões nacionais para uma ou mais grandezas.

Em Portugal, o LNM é uma estrutura metrológica centralizada, tendo, portanto, um único Laboratório Nacional de Metrologia.

Há, no entanto, outros países que têm uma estrutura metrológica totalmente descentralizada, havendo muitos laboratórios desses países que têm o estatuto de LNM.

Então, um LNM é o representante internacional do país nas relações com outros laboratórios nacionais de metrologia de outros países. (Sousa, 2010).

3.1.6.3 Laboratório Primários

Para que um laboratório possa ser considerado como primário é necessário (Sousa, 2010):

- Que seja reconhecido internacionalmente pela realização primária de uma unidade de base do SI, ou pela realização de uma unidade derivada do SI a um nível considerado elevado;
- Que realize investigação em domínios bem definidos, e que esta atividade seja reconhecida internacionalmente;
- Que mantenha e desenvolva os padrões primários para a unidade que realiza;
- Que participe em comparações interlaboratoriais ao mais alto nível internacional.

3.1.6.4 Laboratórios Acreditados

São laboratórios reconhecidos por um organismo independente, como uma organização competente, organizada e imparcial para determinadas atividades. No caso dos laboratórios, é o reconhecimento de que cumpre todos os requisitos da norma NP EN ISO/IEC 17025, além de outras especificações e guias técnicos que, no caso português, são definidos pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC).

Os certificados emitidos por laboratórios acreditados pelo IPAC têm assegurado a rastreabilidade, o que não acontece nos laboratórios não acreditados. Nestes últimos, embora possam ter a rastreabilidade ao SI, a sua evidência não é linear, podendo mesmo ter que se recorrer a auditorias de segunda parte para se obter tal evidência, (Sousa, 2010).

3.1.6.5 Organizações Europeias

Segundo (Sousa, 2010), várias são as organizações que na Europa estão direta ou indiretamente relacionadas com a Metrologia, das quais se destacam as seguintes:

- EURAMET (Metrologia);
- COOMET (Metrologia);
- OIML (Metrologia Legal);
- WELMEC (Metrologia);
- EUROLAB (Ensaaios);
- EURACHEM (Ensaaios);
- EA – Cooperação Europeia para a Acreditação;
- ILAC – (Acreditação).

3.1.7 Enquadramento do laboratório de vibração do ISQ

O ISQ possui vários laboratórios de metrologia de diferentes naturezas; o presente relatório apenas se vai centrar no laboratório de análise de vibrações. Este é um laboratório acreditado, possuindo para a realização de calibrações padrões secundários (padrões de referência) e padrões de trabalhos.

3.2 Vibração

A vibração é algo a que o ser humano está sujeito diariamente e que acontece em qualquer lugar. É um fenómeno físico que pode ser estudado e, a partir daí, tirar conclusões sobre vários temas, como: saúde; manutenção de equipamentos; estudos geológicos; etc.

Tal como referido em (Rao, 2011), a maioria das atividades humanas envolve vibrações, que o ser humano consegue ouvir, porque induzem vibrações nos tímpanos e porque as ondas de luz também sofrem vibrações. A respiração está associada á vibração dos pulmões e a caminhada envolve movimentos oscilatórios de pernas e mãos. A fala humana requer o movimento oscilatório das laringes e língua.

Os primeiros estudos no campo da vibração foram feitos para a compreensão dos fenómenos naturais e desenvolvimento de teorias matemáticas para descrever a vibração dos sistemas físicos.

Mais recentemente, estes estudos passaram a ter efeito em aplicações de engenharia da vibração, como o projeto de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controlo.

Em todas estas situações, a estrutura ou os componentes da máquina estão sujeitos a vibrações que podem falhar devido à fadiga do material resultante da variação cíclica do *stress* induzido. Além disso, a vibração provoca desgaste mais rápido das peças da máquina, como rolamentos e engrenagens, e também gera ruído excessivo.

Em muitos sistemas de engenharia, o ser humano age como parte integrante do sistema. A transmissão de vibração para os seres humanos resulta em desconforto e perda de eficiência. A vibração e o ruído causado pelos motores provocam desconforto ao ser humano e, por vezes, danificam a propriedade.

3.2.1 Conceitos de Vibração

Um sistema vibratório, em geral, inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio pelo qual a energia é gradualmente perdida (amortecedor).

A vibração de um sistema envolve a transferência da sua energia potencial para energia cinética e da energia cinética para energia potencial, alternadamente. Se o sistema é amortecido, alguma energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se um estado de vibração constante tiver de ser mantida (Rao, 2011).

Então considera-se uma vibração o fenómeno físico observado num corpo ou numa partícula quando estes executam um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio. Este fenómeno é provocado pela existência de forças dinâmicas inerentes, ou não, ao sistema (Braz, 2015).

É possível definir uma vibração de forma simples, ilustrada na Figura 4, onde um movimento oscilatório, pode ser o sistema de massa-mola. O movimento é provocado pela compressão ou alongamento da mola através do deslocamento da massa, (Costa, 2017).

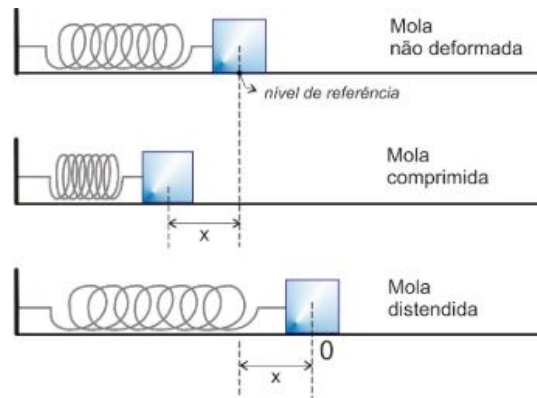


Figura 4 - Vibração pelo sistema de massa-mola
[Fonte: (Alexandre & Costa, 2017)]

Então a massa é deslocada do seu ponto de referência, tendo um deslocamento de x , quer na compressão, como na extensão da mola. Este movimento repetido designa-se por movimento oscilatório e pode ser descrito por uma onda sinusoidal, representada na Figura 5.

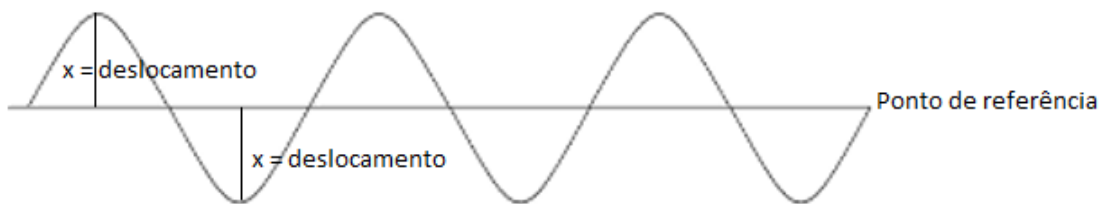


Figura 5 - Onda sinusoidal

Este movimento oscilatório pode ser constituído por vários ciclos de movimento. Considera-se que se realiza um ciclo completo quando o corpo se desloca nos dois sentidos em relação ao ponto de referência e depois volta à posição inicial. O ciclo completo é definido como Período (T), e tem como unidade de medida o segundo (s).

O número de vezes que se realiza um ciclo num segundo é definido por frequência e tem como medida a unidade *Hertz* (Hz), representada pela equação (1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

O movimento pode consistir num único componente, ocorrendo numa única frequência, mas, normalmente, ocorre em vários componentes com diferentes frequências simultâneas, como

o movimento de um pistão num motor de combustão, ou um sistema de roldanas (Figura 6), (Bruel & Kjaer, 1982).

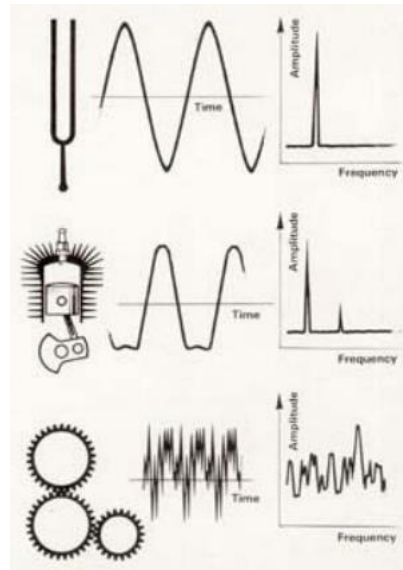


Figura 6 – Harmónicos
[Fonte: (Bruel&Kjaer, 1982)]

Como se pode verificar, num sistema mais aproximado da realidade não existe apenas uma frequência característica, mas sim uma frequência para cada componente. Assim sendo, e como se pode verificar na Figura 7, a forma de onda resultante não será sinusoidal, podendo ser bem mais complexa. Esta representação da onda, no domínio do tempo, torna mais difícil a interpretação do que está a acontecer. Uma forma de facilitar a análise do sinal é através da passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência, onde a amplitude da frequência característica de cada componente aparece bem discriminada, (Pereira, 2009).

Isto é possível através da análise de Fourier, a qual permite determinar as frequências existentes em sinais complexos, como os existentes nas vibrações. O sinal de onda complexo, que está representado no domínio de tempo, é submetido a uma análise de Fourier, chamada FFT (Fast Fourier Transform), onde passa a ser representada no domínio da frequência, como é demonstrado na Figura 7.

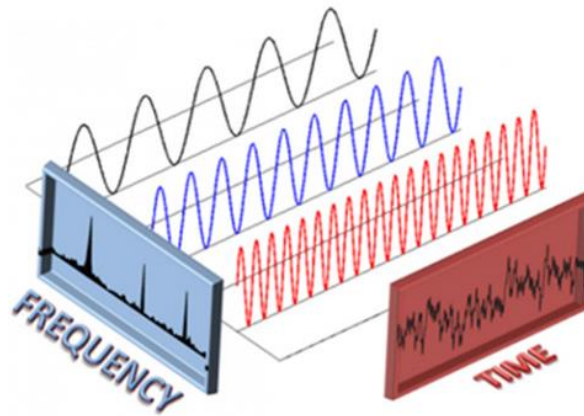


Figura 7 – FFT

[Fonte: <http://www.srl-llc.com/?product=fft-ip-core-function-module>]

Isto é bastante importante para ser possível analisar uma onda específica e, por consequência, a sua frequência e amplitude.

3.2.2 Parâmetros da vibração

Na vibração, existem vários parâmetros que podem ser estudados através da onda, como a frequência (tal como referido na seção anterior), a amplitude e a fase.

3.2.2.1 Amplitude

A vibração consiste no movimento oscilatório em torno de uma posição de repouso. Manifesta-se sempre que ocorra uma força de excitação interna ou externa, sendo a amplitude de vibração a função da intensidade da força de excitação, da massa e rigidez do sistema, e do seu amortecimento, (Pereira, 2009).

A amplitude de onda pode ser representada pelo deslocamento, velocidade e aceleração.

O deslocamento é uma quantidade vetorial que especifica a mudança de posição de um corpo. Geralmente é medido a partir da posição de descanso, (Bruel&Kjaer, 1986).

Quando a massa é afastada da sua posição de descanso e largada, o seu deslocamento, x , ao longo do tempo, t , com a frequência, f , é dado por,

$$x = A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

As vibrações também podem ser descritas em termos da velocidade, que é uma quantidade vetorial que especifica o tempo de mudança de deslocamento, (Bruel&Kjaer, 1986).

A velocidade de um ponto da massa num dado instante t é dada por,

$$\frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (3)$$

A aceleração, por sua vez, é uma quantidade vetorial que especifica a taxa de mudança de velocidade.

A fórmula para a aceleração num determinado instante t é dada por,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2\pi f A \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

Segundo (Bruel & Kjaer, 1982), os parâmetros de vibração são quase universalmente medidos em unidades métricas, de acordo com os requisitos da norma ISO 1000, como especificado na Tabela 1. A constante gravitacional g ainda é amplamente utilizado para avaliar os níveis de aceleração, embora esteja fora do sistema ISO de unidades coerentes. Este fator de quase 10 (9,81) relaciona as duas unidades, de modo que a conversão mental, numa amplitude de 2%, é uma questão simples.

Tabela 1 - Parâmetros de vibração

Unidades de medida	
Deslocamento	$m, mm, \mu m$
Velocidade	$m/s, mm/s (ms^{-1}, mm.s^{-1})$
Aceleração	$m/s^2 (ms^{-2})$ ou g

3.2.2.1.1 Níveis de Vibração

A amplitude é um dos parâmetros de referência do estado de vibração, indicando a sua severidade, e pode ser quantificada de várias maneiras.

Esta amplitude pode ser expressa em valor de pico, pico a pico e valor eficaz (Root Mean Square, RMS), como ilustrado na Figura 8.

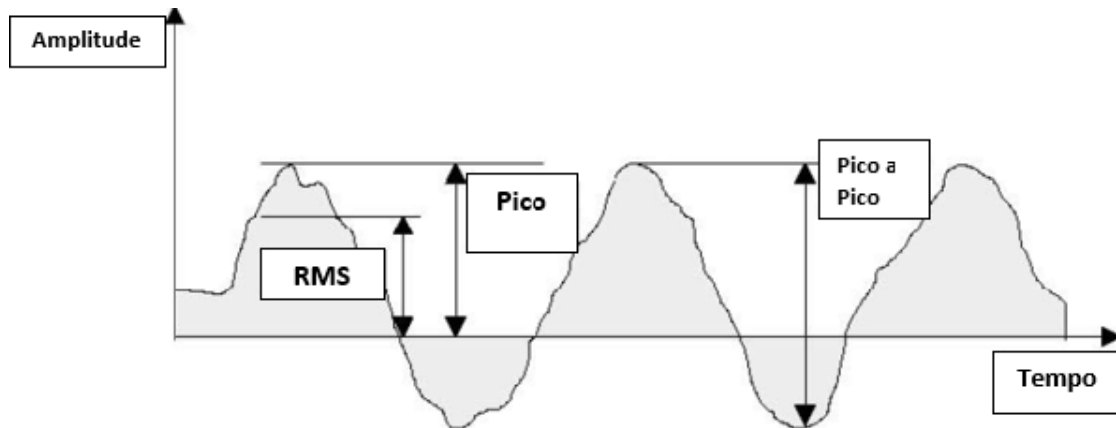


Figura 8 - Formas de representação da amplitude

[Fonte: (Alexandre & Costa, 2017)]

- *Pico* - é particularmente relevante para indicar o nível de choques de curta duração, etc. Mas, como pode ser observado na Figura 8, os valores de pico indicam apenas o nível máximo ocorrido; não é levado em consideração o histórico de tempo da onda, (Bruel & Kjaer, 1982);
 - Corresponde ao valor máximo numa direção (positiva ou negativa) a partir do zero; indica a amplitude máxima da vibração.
- *Pico a pico* – é uma variável relevante na medida em que indica a excursão máxima da onda, uma quantidade útil onde, por exemplo, o deslocamento vibratório de uma peça de uma máquina é crítico para consideração da tensão máxima ou da folga mecânica, (Bruel & Kjaer, 1982);
 - Corresponde à distância entre o pico máximo e o pico mínimo, indicando assim o percurso máximo da onda.
- *RMS* - é a variável que permite medir a amplitude mais relevante, porque leva em consideração o histórico de tempo da onda e fornece um valor de amplitude diretamente relacionado com o conteúdo energético e, portanto, às capacidades destrutivas da vibração, (Bruel & Kjaer, 1982).

3.2.2.2 Fase

Este é outro parâmetro da vibração, e é muito importante quando comparamos dois sinais e indica o modo como o equipamento está a vibrar. Ou seja, é uma ferramenta válida para identificar, confirmar ou distinguir os vários tipos de problemas. (Silva, 2010)

Só pode ser medido quando os dois sinais apresentam a mesma frequência. Então a fase é a diferença no tempo entre dois pontos equivalentes relativos a dois sinais. Isto significa que dois sinais podem coincidir quando são sobrepostos. Quando eles não coincidem significa que existe um desfasamento, e caso este seja metade do período, diz-se que estão em oposição de fase. (Costa, 2017)

A fase, pode também ser caracterizada pelo ângulo de fase. Se tivermos harmónicos com a mesma frequência. Estas duas oscilações sincronizadas não precisam de ter a mesma amplitude e não precisam de atingir os seus valores máximos a meso tempo. Para ilustrar esta situação de fase angular, podemos descrever duas equações de movimentos harmónicos com a mesma frequência, e amplitudes diferentes, sendo a equação (5) e equação (6).

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

A Figura 9 representa graficamente as equações anteriores, onde o vetor P2 conduz o primeiro P1 por um ângulo ϕ , conhecido como ângulo de fase. Isto significa que o máximo do segundo vetor ocorreria ϕ radianos antes do primeiro vetor. Note que ao contrário da amplitude máxima, qualquer outro ponto pode ser utilizado para encontrar o ângulo de fase (Rao, 2011).

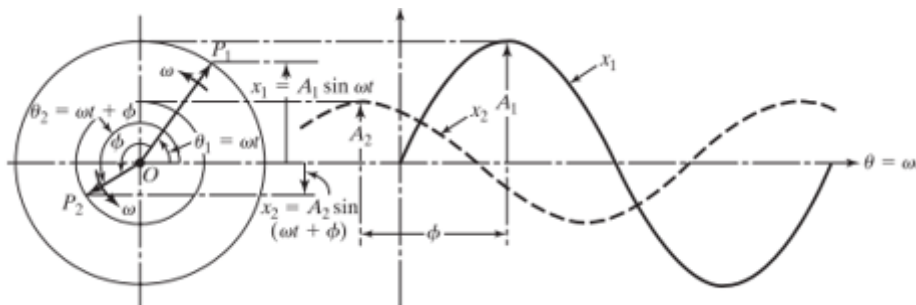


Figura 9 – Diferença de fase entre dois vetores Formas de representação da amplitude [Fonte: (Rao, 2011)]

3.2.3 Frequência natural e Ressonância

A frequência natural é aquela em que um sistema tende a vibrar na ausência de qualquer excitação externa. É calculada tendo em consideração as características de todo o sistema de vibração: massa; rigidez; e amortecimento.

Em relação à ressonância, este é um fenómeno onde um sistema vibratório leva outro a oscilar com maior amplitude em certas frequências, conhecidas como frequências ressonantes. Ocorre quando a frequência da força excitadora coincide com a frequência natural do sistema, elevando, por consequência, a sua amplitude.

Sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência da excitação externa, ocorre um fenómeno conhecido como ressonância, que leva a desvios e falhas excessivas. A literatura está repleta de relatos de falhas do sistema provocadas por ressonância e vibrações excessivas de componentes e sistemas (Figura 10) (Rao, 2011).



Figura 10 – Ponte Tacoma durante vibração provocada por vento

[Fonte: (Rao, 2011)]

3.2.4 Graus de liberdade

De acordo com Rao (2011), o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema em qualquer instante define o número de graus de liberdade do sistema.

Para fazer o estudo de um sistema é necessário escolher parâmetros que descrevam o movimento desse sistema, certificando-nos que empregamos os parâmetros suficientes para caracterizar o movimento de interesse por completo. É então possível saber a configuração de um sistema num dado momento se forem conhecidos os valores das variáveis nesse determinado instante.

Resumindo, o número de graus de liberdade de um sistema refere-se ao número de coordenadas independentes necessárias para descrever a sua configuração a qualquer momento, (Bottega, 2011).

3.2.4.1 Sistemas com um grau de liberdade

Os sistemas seguintes são considerados os mais simples, pois apenas têm uma coordenada independente para descrever a sua configuração. A Figura 11 ilustra um sistema de massa-mola, que é o exemplo mais simples com um único grau de liberdade.

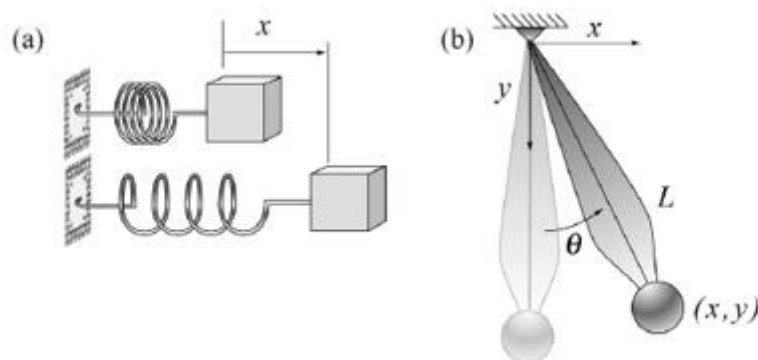


Figura 11 – Sistema com 1 grau de liberdade: a) Sistema massa-mola; b) sistema pêndulo

[Fonte: (Bottega, 2011)]

Para o sistema precedente, pode verificar-se apenas um único número de coordenadas. Para o sistema (a), a distância x indica a posição da massa medida em relação à sua posição quando a mola está em repouso e está esticada. x é conhecido como uma função do tempo t ,

isto é, se $x=x(t)$, então o movimento de todo o sistema é conhecido como uma função do tempo. Similarmente, em (b), o pêndulo é também um sistema com um grau de liberdade, uma vez que o movimento de todo o sistema é conhecido se também for conhecida a coordenada angular θ como uma função do tempo. A posição do pêndulo pode ser descrita pelas duas coordenadas cartesianas, $x(t)$ e $y(t)$, que não são independentes.

Então, as coordenadas (x, y) estão relacionadas ($x^2+y^2=L^2$), o que significa que, conhecendo uma, sabemos a outra. Além disso, quer $x(t)$ como $y(t)$ são conhecidos, quando também é conhecido o $\theta(t)$.

Em ambos os casos apenas é necessária uma coordenada para caracterizar o sistema, possuindo assim um grau de liberdade, (Bottega, 2011).

3.2.4.2 Sistemas de dois graus de liberdade

Dois exemplos que podem demonstrar as características de um sistema com dois graus de liberdade são ilustrados na Figura 12, onde é mostrado um sistema de duas molas e um pêndulo duplo.

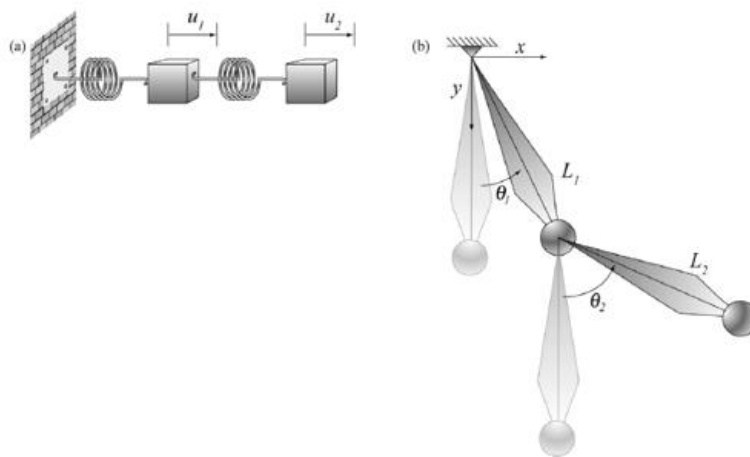


Figura 12 – Sistema com dois graus de liberdade: a) Sistema duas massas, duas molas; b) Sistema duplo pêndulo

[Fonte: (Bottega, 2011)]

No caso (a) de massa-mola é possível conhecer todo o sistema, se a posição da massa m_1 for conhecida, juntamente com a posição da massa m_2 . As posições são conhecidas se as

coordenadas u_1 e u_2 forem conhecidas. Estas coordenadas representam os deslocamentos das respectivas massas a partir das suas posições de equilíbrio.

De igual forma, o movimento do pêndulo é conhecido se os deslocamentos angulares θ_1 e θ_2 , medidos a partir das configurações de equilíbrio vertical das massas, forem funções conhecidas de tempo, (Bottega, 2011).

3.2.4.3 Sistema multi-graus discretos de liberdade geral

É considerado um sistema com graus múltiplos de liberdade, ou seja, n graus de liberdade, onde n pode assumir qualquer valor inteiro tão grande quanto desejado. Alguns exemplos são os sistemas compostos de n massas e $n+1$ molas, ilustrados na Figura 13, sistemas (a), (b) de n pêndulos, e o sistema (c) do modelo de uma estrutura de aeronave, (Bottega, 2011).

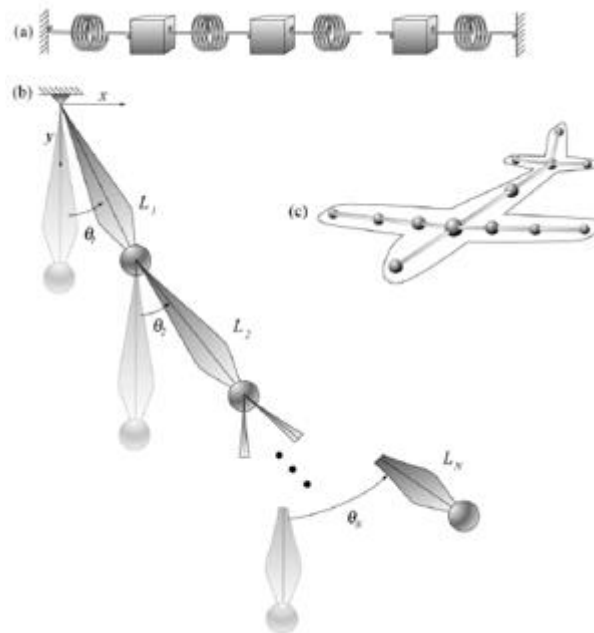


Figura 13 – Sistema n graus de liberdade: a) n -massa $n + 1$ -sistema mola; b) Pêndulo composto; c) Estrutura de modelo de aircraft

[Fonte: (Bottega, 2011)]

3.2.4.4 Sistemas Contínuos

Os sistemas contínuos são aqueles cuja massa é distribuída continuamente, geralmente num domínio finito. Na Figura 14 está representada uma viga elástica, que demonstra o funcionamento de um sistema contínuo.

O movimento transversal da viga é conhecido pela deflexão transversal, $w(x,t)$, de cada partícula localizada nas coordenadas $0 \leq x \leq L$ ao longo do eixo da viga, (Bottega, 2011).

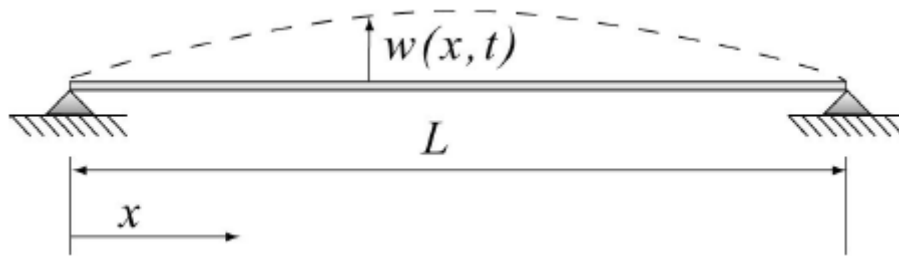


Figura 14 – Viga elástica – Exemplo de sistema contínuo
[Fonte: (Bottega, 2011)]

3.2.5 Classificação da vibração

Segundo (Rao, 2011), a vibração pode ser classificada de várias maneiras de acordo com o ilustrado na Figura 15.

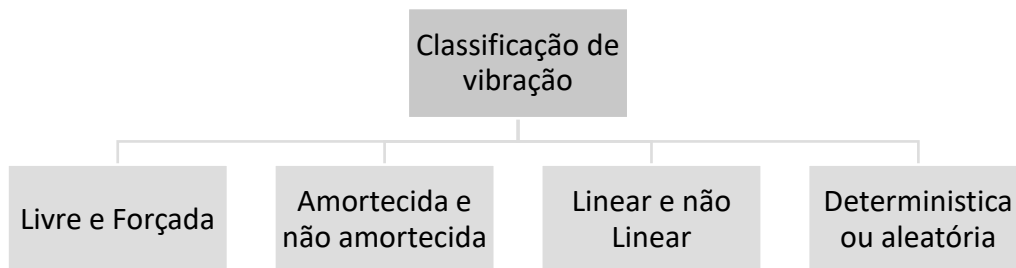


Figura 15 – Classificação de vibração

Vibração Livre e Forçada (Rao, 2011)

- *Vibração Livre* - Sistema que, após uma perturbação inicial deixa de vibrar por conta própria; a vibração resultante é conhecida como vibração livre. Nenhuma força externa age no sistema. A oscilação de um pêndulo simples é um exemplo de vibração livre.
- *Vibração Forçada* - Sistema que é submetido a uma força externa (geralmente, um tipo de força repetitiva), e onde a vibração resultante é conhecida como vibração forçada. As vibrações que ocorrem em máquinas, como motores a Diesel, são exemplos de vibração forçada. Se a frequência da força externa coincidir com uma

das frequências naturais do sistema, pode ocorrer uma condição de ressonância que provoca vibrações perigosamente grandes. Falhas de estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de avião estão associadas à ocorrência de ressonância.

Vibração não amortecida e amortecida (Rao, 2011)

- *Vibração Amortecida* – Ocorre quando alguma energia é perdida ou dissipada na fricção ou outra resistência durante a vibração. A consideração de amortecimento torna-se extremamente importante na análise de sistemas vibratórios próximos da ressonância.
- *Vibração não amortecida* – Acontece quando nenhuma energia é perdida.

Vibração linear e não linear (Rao, 2011)

- *Vibração Linear* – Acontece quando os componentes básicos de um sistema vibratório, onde a mola, a massa e o amortecedor se comportam linearmente.
- *Vibração não linear* – Se qualquer um dos componentes básicos se comportar de maneira não-linear, a vibração será chamada de vibração não-linear.

As equações diferenciais que governam o comportamento de sistemas vibratórios lineares e não-lineares são lineares e não-lineares, respetivamente. Se a vibração é linear, o princípio da superposição mantém-se, sendo o respetivo modelo matemático bem definido. Para a vibração não-linear, o princípio da superposição não é válido e as técnicas de análise são menos conhecidas. Como todos os sistemas vibratórios tendem a comportar-se de maneira não linear com o aumento da amplitude de oscilação, um conhecimento de vibração não linear é desejável ao lidar com sistemas vibratórios práticos.

Vibração determinística e aleatória (Rao, 2011)

- *Vibração Determinística* – É o valor ou magnitude da excitação (força ou movimento) que atua num sistema vibratório conhecido num determinado momento; a vibração resultante é conhecida como vibração determinística.

- *Vibração Aleatória* - Em alguns casos, a excitação é não-determinística ou aleatória. O valor da excitação num determinado momento não pode ser previsto. Nestes casos, uma grande coleção de registos da excitação pode exibir alguma regularidade estatística. É possível estimar médias, como os valores médios e médios quadrados da excitação; exemplos de excitações aleatórias são a velocidade do vento, a rugosidade da estrada e o movimento do solo durante terremotos. Se a excitação é aleatória, a vibração resultante é chamada de aleatória; neste caso, a resposta vibratória do sistema também é aleatória; pode ser descrito apenas em termos de quantidades estatísticas; a Figura 16 ilustra exemplos de excitações determinísticas e aleatórias.

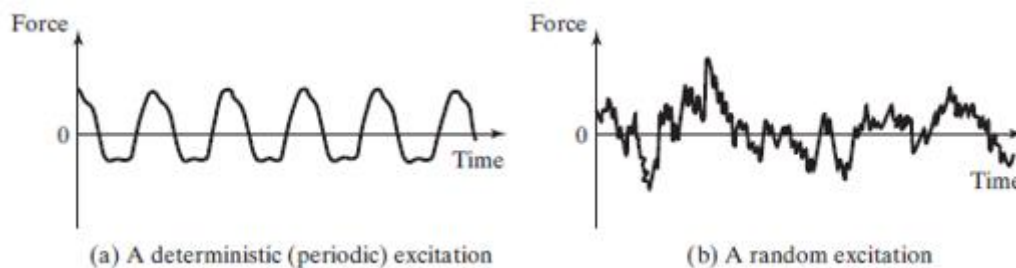


Figura 16 – a) Vibração determinística; b) Vibração aleatória.

[Fonte: (Rao, 2011)]

3.3 Sensores de análise de vibração

Os sensores fazem a ligação direta entre um fenómeno físico e o sistema de aquisição de dados, convertendo sinais de grandezas mecânicas em sinais elétricos. São fenómenos que conseguem converter a informação recebida através do fenómeno mecânico, para transformá-lo de forma a conseguir lê-lo (Figura 17).

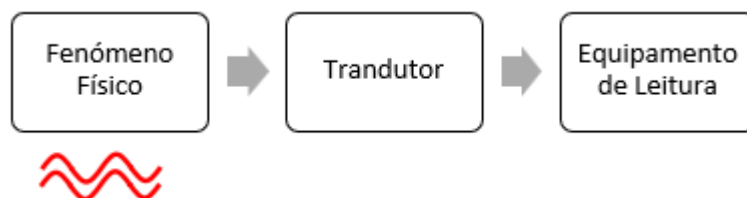


Figura 17 – Esquema básico de funcionamento de um transdutor

Os sensores convertem um fenómeno mecânico num sinal elétrico mensurável. Alguns sensores não respondem naturalmente às mudanças nos fenómenos mecânico sendo necessário recorrer a condicionamento de sinais. Antes da digitalização da saída do sensor, o sinal pode necessitar de outros componentes e circuitos para produzir um sinal que possa aproveitar todos os recursos do *hardware* de medição e reduzir os efeitos de ruído provenientes de interferências externas.(National Instruments,2017)

Atualmente existem transdutores capazes de fazer medições de praticamente todas as grandezas físicas existentes. Por exemplo, para a medição de temperaturas existem os termopares, as termoresistências, os termístores e a junção de semicondutores, que convertem a temperatura do meio com o qual estão em contacto num sinal analógico proporcional; para a medição do caudal, existem, entre outros, os medidores de caudal de turbina, que geram um sinal em onda retangular cuja frequência depende da velocidade do escoamento; para a medição de tensões existem as células de carga; para a medição de pressão existem diversos tipos de transdutores de pressão; etc. (Serrano, Alcobia, Mateus, & Silva, 2004).

As vibrações também são um fenómeno físico e, como tal, podem ser medidas através de sensores e transdutores. Como visto anteriormente existem vários parâmetros que podem definir a vibração, o que faz com que possam também existir diferentes tipos de transdutores para cada característica.

Existem três tipos de sensores mais utilizados: sensores de deslocamento; velocidade; e aceleração. Este relatório irá incidir predominantemente nos sensores de aceleração, designados por acelerómetros, pois são estes os mais requisitados para calibração no laboratório em apreço.

3.3.1 Acelerómetros

Devido à necessidade do conhecimento referente ao comportamento das vibrações e ao que estas podem causar em vários níveis distintos, torna-se importante a existência de um sensor capaz de medir este fenómeno físico. Para adquirir tal conhecimento é necessário haver transdutores capazes de fornecer medições com elevada exatidão. Normalmente, os acelerómetros são os transdutores mais utilizados quando se pretende medir vibrações, devido à versatilidade e confiança que apresentam (Braz, 2015).

Este sensor pode traduzir a vibração em termos de amplitude num valor mensurável de tensão (Volt). Com os valores dados e, através da sensibilidade dos acelerómetros, é possível determinar a amplitude da vibração em aceleração. Também é possível obter os valores de fase e de frequência da vibração, bem como, através da aceleração, é possível definir a amplitude de vibração em termos de velocidade e deslocamento.

As medidas de vibração podem ser obtidas em mais do que um eixo, existindo, para isso, acelerómetros uni, bi e triaxiais. Além de medirem acelerações, os acelerómetros podem ser utilizados na medição de inclinação, rotação, vibração, colisão e gravidade, constituindo-se como dispositivos de elevada utilidade. Devido ao grande número de aplicações, existem, no mercado, diversas configurações de acelerómetros, (Braz, 2015).

3.3.1.1 Características

Os acelerómetros têm várias características que os definem, que variam consoante os diferentes tipos de acelerómetros existentes, permitindo ao utilizador escolher o que lhe é mais benéfico para a sua medição.

As principais especificações de um acelerómetro são: desempenho; ambientais; elétricas; e mecânicas, tal como se descreve no Anexo (A).

Algumas das especificações mais importantes de um acelerómetro são as seguintes (Azevedo, 2013) e (Braz, 2015):

- *Sensibilidade* – É o parâmetro que dá a capacidade de o acelerómetro detetar movimento; quanto maior for a sensibilidade, maior será a capacidade de o acelerómetro detetar vibração. É a relação entre o sinal elétrico de saída e a grandeza física de entrada. A unidade de sensibilidade é mV/ms^{-2} . Existem acelerómetros onde a sensibilidade é dada em pC/ms^{-2} , pois a saída de sinal é dado em pC (*picocoulomb*). Neste caso tem de se usar uma carga para converter os pC em mV . Como $1 g$ é equivalente a $9.81 ms^{-2}$, pode também obter-se a sensibilidade em mV/g ;
- *Amplitude Dinâmica* – É referente à vibração máxima que o acelerómetro consegue medir antes de ocorrer distorção do sinal gerado. Normalmente, é especificada em g , representando o valor máximo e mínimo de amplitude que o acelerómetro consegue medir;

- *Resposta à Frequência* – É a variação máxima da sua sensibilidade ao longo de um intervalo de frequência. Os limites do intervalo de frequência são determinados pela própria constituição do acelerómetro;
- *Linearidade* - A linearidade representa o quanto linear é a saída dos valores do acelerómetro no âmbito da sua amplitude dinâmica. Ou seja, é a capacidade de o acelerómetro manter a sua sensibilidade independentemente da amplitude aplicada. A linearidade é, normalmente, especificada em termos de percentagem. Qual a percentagem de variação de sensibilidade entre uma amplitude e outra;
- *Tamanho e Massa* - São fatores importantes na medição da vibração de sistemas mais leves, pois tamanhos e massas mais elevados podem alterar as características do objeto a ser testado. A massa dos acelerómetros deve ser significativamente menor do que a massa do sistema pelo qual a medição será realizada;
- *Frequência de Ressonância* - É um fenómeno onde um sistema vibratório leva o acelerómetro a oscilar com maior amplitude em certas frequências, conhecidas como frequências ressonantes. Ocorre quando a frequência da força excitadora coincide com a frequência natural do acelerómetro, elevando, por consequência, a sua amplitude (Rao, 2011).

3.3.1.2 Tipos de acelerómetros

Como vimos atrás existem vários tipos de acelerómetros diferentes com diferentes características, havendo também vantagens e desvantagens. Então, para fazer a escolha do acelerómetro mais correto, tem de se saber o que se vai medir. Por exemplo, os acelerómetros de tamanho reduzido são concebidos para medir em altas frequências e usados em estruturas mais delicadas. Outros têm a função de medir a vibração, simultaneamente em três planos perpendiculares (acelerómetros triaxiais), altas temperaturas, níveis muito baixos de vibração e altos níveis de choque. Segundo a sua construção existem no mercado diferentes tipos de acelerómetros (Braz, 2015) e (Azevedo, 2013):

Acelerómetros potenciométricos

- Este acelerómetro é constituído por uma massa que está acoplada a um potenciómetro, fazendo, quando sujeito a uma aceleração, variar a resistência do

mesmo. É um sensor que, embora seja simples, a sua utilização é mais limitada, sendo mais usado para medir acelerações de baixas frequências, (Azevedo, 2013).

- A Figura 18 ilustra um exemplo de construção deste tipo de acelerómetros.

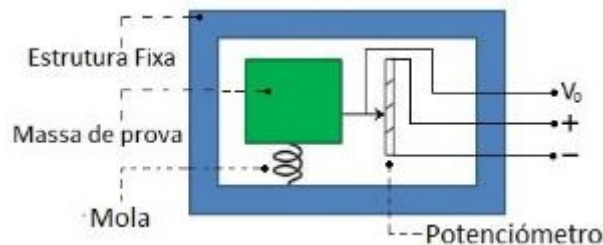


Figura 18 – Esquema de acelerómetro potenciométrico

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

Acelerómetros piezoresistivos

- Neste tipo de acelerómetro existe material piezoresistivo que, quando sofre uma pressão, leva a mudanças da sua resistência. Então, este pode ser composto por uma massa acoplada a uma viga que está encastrada à estrutura do acelerómetro. Esta viga está coberta por uma camada de elementos piezoresistivos que, quando deformada por uma aceleração, o material piezoresistivo conduz à variação da resistência (Figura 19).

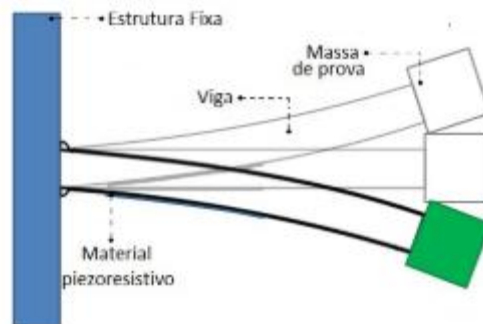


Figura 19 - Esquema de acelerómetro piezoresistivo

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

- Outra forma de representar um acelerómetro piezoresistivo é ilustrado na Figura 20.
- São usados quatro extensómetros iguais que se colocam, de tal maneira, na estrutura do acelerómetro que, quando sujeitos a uma força, dois deles sofrem compressão,

enquanto os outros dois sofrem expansão. Assim, é possível ter uma saída, ΔV_s , proporcional à variação das resistências dos extensómetros, (Azevedo, 2013).

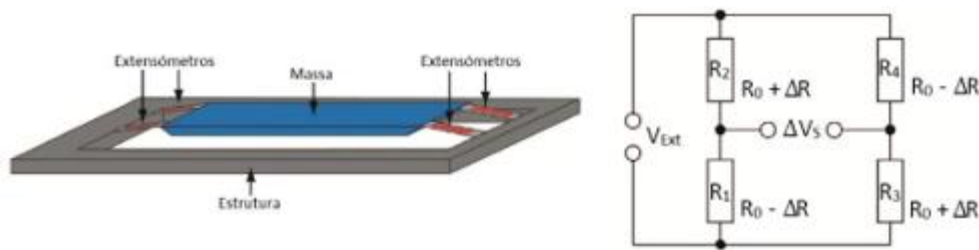


Figura 20 - Esquema de acelerómetro piezoresistivo

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

Acelerómetros capacitivos

- Consiste em ter duas (ou mais) placas do condensador, colocando em cada uma delas cargas elétricas de sinais opostos, o que fará com surja uma diferença de potencial elétrico (Voltagem) entre as placas. Variam a sua capacidade elétrica quando sujeitos a uma aceleração, pois as placas vão variar as distâncias entre elas. Uma das placas está fixa enquanto a outra está ligada a uma massa inercial. Estas variações de espaço são inversamente proporcionais à carga do condensador. Como resposta à aceleração, a capacidade elétrica varia, o que faz variar o sinal de saída do circuito. (Braz, 2015)

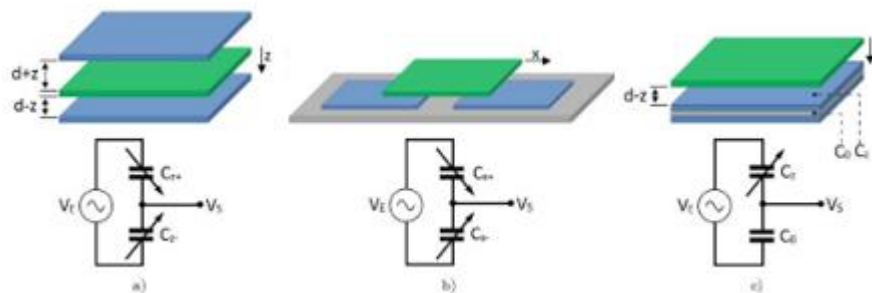


Figura 21 – Mecanismos de transdução quando usados condensadores

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

- A Figura 21 ilustra como os condensadores podem ser expostos de diferentes formas. Têm-se estes três exemplos onde, no primeiro existe uma placa móvel que se move com a aceleração entre duas placas fixas criando dois condensadores. Assim, alterando as distâncias entre as placas faz-se variar o valor da capacidade de cada condensador, o que influencia a saída elétrica.

- No segundo exemplo existe uma placa móvel e duas fixas, sendo que a placa móvel se move na horizontal, fazendo assim variar a capacidade dos condensadores e, respetivamente, a saída elétrica.
- No terceiro exemplo, a deslocação da placa móvel faz variar apenas o valor da capacidade de um dos condensadores, tendo o outro um valor fixo, (Azevedo, 2013).

Acelerómetros piezoelétricos

- Neste tipo de acelerómetro existe uma massa que quando exposta a uma aceleração, esta ativa uma tensão nos cristais (material piezoelétrico). Esta tensão, por sua vez, pode ser lida e, através dela, determinar a amplitude da vibração.
- O material piezoelétrico é usado como elemento ativo do acelerómetro. Tal como ilustra a Figura 22, um dos lados desse material está ligado à estrutura fixa e o outro à massa do acelerómetro. Quando sujeito a uma aceleração, o material piezoelétrico sofre uma deformação, originando uma carga elétrica.

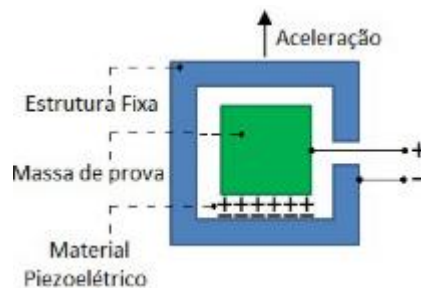


Figura 22 - Esquema de acelerómetro piezoelétrico

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

Acelerómetros Térmico-Convectivos

- Este tipo de acelerómetro não tem muito uso devido ao seu elevado consumo energético e ao processo de fabrico rigoroso e dispendioso.
- Tal como ilustra a Figura 23, este sensor é composto por um elemento aquecedor central e alguns de sensores de temperatura, dependendo do número de eixos que se pretende medir. O objetivo é que o elemento aquecedor crie um padrão simétrico de calor dentro da estrutura em que está inserido, quando esta está em repouso. Ao aplicar-lhe uma aceleração, passa a existir uma diferença de temperatura entre os sensores de temperatura, (Azevedo, 2013).

- Através da diferença de temperaturas é possível obter os valores de aceleração.

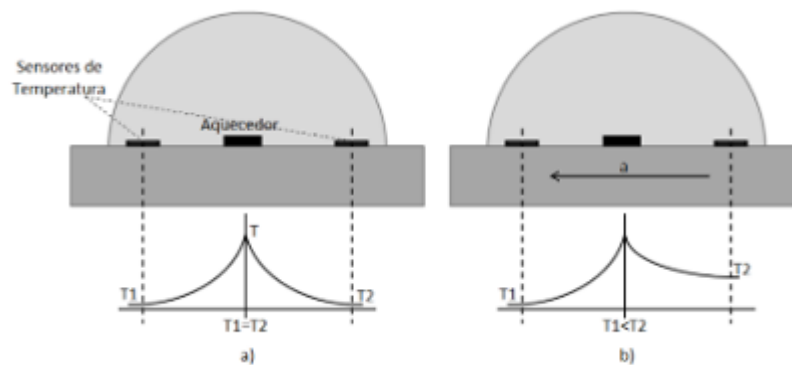


Figura 23 – Esquema de acelerómetro térmico: a) Sem aceleração; b) Com aceleração

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

Acelerómetros MEMS

- O desenvolvimento de acelerómetros em escala micro foi possível com o uso da tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*). Podem variar no mecanismo de transdução, podendo ser capacitivos, piezoelétricos e piezoresistivos. Com esta tecnologia é possível diminuir o tamanho do acelerómetro, assim como torná-lo “inteligente”, pois este tem um sistema de *self-test* que permite testar o seu funcionamento através de um micro atuador embutido, (Azevedo, 2013).
- Este tipo de acelerómetros é usado, por exemplo, nos *smartphones*, o que lhes permite executar diversas funcionalidades, como a rotação do ecrã.
- A Figura 24 ilustra um exemplo de um acelerómetro MEMS capacitivo.

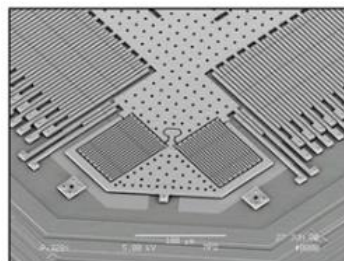


Figura 24 - Esquema de acelerómetro MEMS capacitivo

[Fonte: (Azevedo, 2013)]

3.3.1.3 Aplicações dos acelerómetros

Tal como atrás referido, existe uma panóplia de acelerómetros com diferentes características e funções. A Tabela 2 ilustra algumas aplicações dos acelerómetros, (Azevedo, 2013).

Tabela 2 – Aplicações possíveis dos acelerómetros

Aplicações Automóveis	<ul style="list-style-type: none"> • Airbag • ABS • Suspensão ativa
Aplicações Industriais	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações ferroviárias (Inclinação e suspensão do comboio) • Perfuração de petróleo • Estudos Sísmicos • Testes de estruturas • Manutenção de Condição
Equipamentos Eletrónicos	<ul style="list-style-type: none"> • GPS • Smartphones, Tablets, Portáteis • Consolas de jogos • Estabilização de imagens
Aplicações Médicas	<ul style="list-style-type: none"> • Biomecânica • Polissonografia e actigrafia • Medições de variáveis fisiológicas
Aplicações Militares	<ul style="list-style-type: none"> • Testes de armas • Armas inteligentes • Vigilância militar • Testes de voo

3.4 Calibração de acelerómetros

Com os inúmeros usos que os acelerómetros podem ter e, sendo constituindo estes uma forma de medir as vibrações, precisam ser calibrados, por forma a conhecer a sua exatidão.

Então, tal como os acelerómetros são um dos principais componentes de um sistema de medição no domínio da vibração, a sua calibração torna-se necessária, uma vez que estes, normalmente submetidos a um tratamento bastante violento, o que pode resultar numa mudança significativa nas características e, às vezes, em danos permanentes. Essa mudança manifesta-se de várias maneiras, incluindo: um deslocamento da ressonância do sensor; uma perda temporária de capacidade de medição de baixa frequência, devido a uma queda na resistência de isolamento; ou a uma falha total do circuito microeletrónico embutido, devido a um choque mecânico significativo, (Bruel & Kjaer, 1982), (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002) e (Braz, 2015).

É então recomendado que seja feita uma calibração periódica a cada acelerómetro, baseando-se em vários factos, tais como: extensão do uso; condições ambientais; requisitos de exatidão; informação de tendência, resultantes dos registos de calibração; regulamentos contratuais; frequência de "verificação cruzada" em relação a outros equipamentos; recomendação do fabricante; e qualquer risco associado a leituras incorretas, (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002).

A calibração dos acelerómetros fornece, com um grau de exatidão definido, o elo necessário entre a quantidade física que está a ser medida e o sinal elétrico gerado pelo sensor. Além disso, outras informações úteis sobre limites operacionais, parâmetros físicos, características elétricas ou influências ambientais, também podem ser determinadas, (Bruel & Kjaer, 1982).

A calibração de acelerómetros consiste em determinar a sua sensibilidade real, por forma a conhecer o erro e, assim, poder fazer medições da forma mais correta. Também é possível, não só fazer a calibração do acelerómetro individualmente, bem como calibrar a cadeia de medição completa, que vai desde o sensor, cabo de ligação, e equipamento de medição.

A calibração de acelerómetros pode ser de duas formas (Braz, 2015):

- 1) Calibração primária ou absoluta, onde se determina a sensibilidade do acelerómetro, através de medições absolutas, ou através de técnicas interferométricas. É o método mais utilizado para realizar a calibração de acelerómetros padrão, permitindo a rastreabilidade.

- 2) Calibração secundária ou de comparação, onde a sensibilidade do sensor é obtida através da comparação da sensibilidade de um acelerómetro de referência (padrão).

No caso do presente relatório, será abordado o segundo tipo de calibração.

3.4.1 Montagem do acelerómetro

Para a realização de uma boa calibração, há que ter muito cuidado com a montagem do acelerómetro, sendo este um dos fatores mais críticos na obtenção de resultados exatos.

Para escolher um método de montagem é necessário verificar as vantagens e desvantagens de cada técnica. Características, como a localização, robustez, alcance de amplitude, acessibilidade, temperatura e portabilidade são extremamente críticas. O efeito da técnica de montagem vai afetar principalmente o desempenho em alta frequência do acelerómetro, modificando assim a faixa de frequência, (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002) e (Bruel & Kjaer, 1982).

Na Figura 25 pode-se verificar as seis possíveis técnicas de montagem e os seus efeitos no desempenho. As configurações de montagem e o gráfico correspondente demonstram como a resposta de alta frequência do acelerómetro pode ser comprometida, (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002).

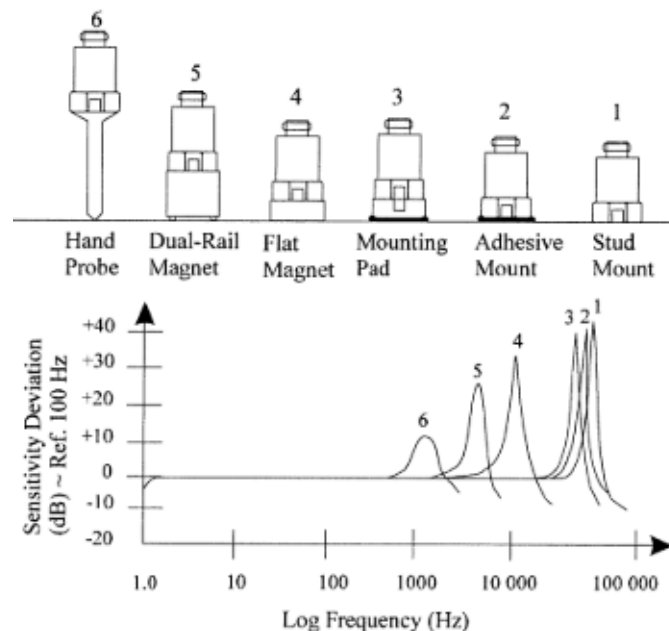


Figura 25 – Diferentes técnicas de montagem de acelerómetros e seus efeitos a altas frequências

[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

No caso do laboratório do ISQ, as montagens mais utilizadas são a de aparafusamento e a de cola, as quais serão descritas de seguida.

Montagem por aparafusamento

- Este é o tipo de montagem que apresenta melhores resultados, pelo que se deve dar preferência. Existe uma boa força de ligação por parte do parafuso, entre o acelerómetro e a superfície onde se quer ligar. Isto faz com que o acelerómetro tenha o mesmo movimento do gerador de vibrações. Existem duas ligações típicas, tal como ilustrado na Figura 26.

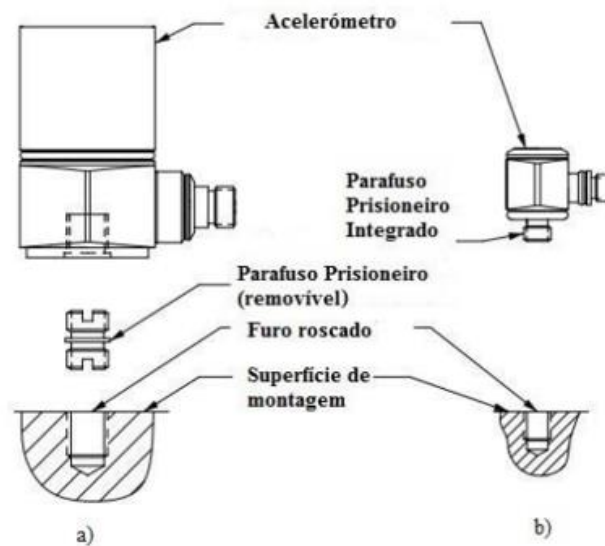


Figura 26 – Montagem por aparafusamento: a) Parafuso removível; b) Parafuso integrado

[Fonte: (Braz, 2015)]

- É importante fazer o aperto mecânico do sistema com uma chave dinamométrica durante esta etapa. O binário insuficiente do sensor pode não acoplar adequadamente o dispositivo; o excesso de binário pode resultar em falha no parafuso.
- Também é importante realizar uma preparação da superfície (Figura 27), de forma a retirar as irregularidades, pois o potencial de desalinhamento pode reduzir significativamente a faixa de frequência.

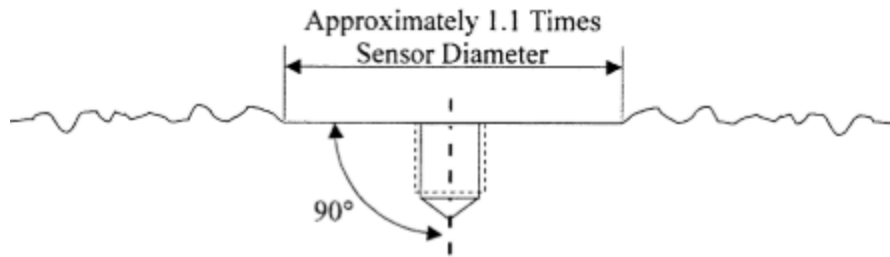


Figura 27 – Preparação da superfície de montagem
[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

Montagem adesiva

- Quando não é possível aplicar o acelerómetro por parafuso (alguns acelerómetros não possuem parafusos nem rosca), a montagem adesiva é considerada a mais prática e fácil. Alguns acelerómetros são projetados de forma a serem ligados a uma superfície através deste método. Também é possível utilizar adaptadores (Figura 28), que facilitem esta montagem com certos acelerómetros (Figura 29).
- A colocação do acelerómetro é feita depois da preparação da superfície onde este se vai colocar, (Braz, 2015).

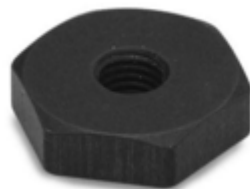


Figura 28 – Adaptador para montagem
[Fonte: (Braz, 2015)]

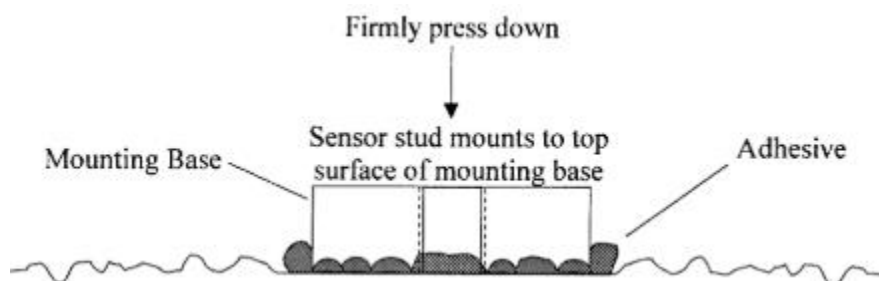


Figura 29 – Adaptador fixado em superfície de montagem
[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

- Adesivos como cola e cera têm um bom desempenho para instalações temporárias (Figura 30).

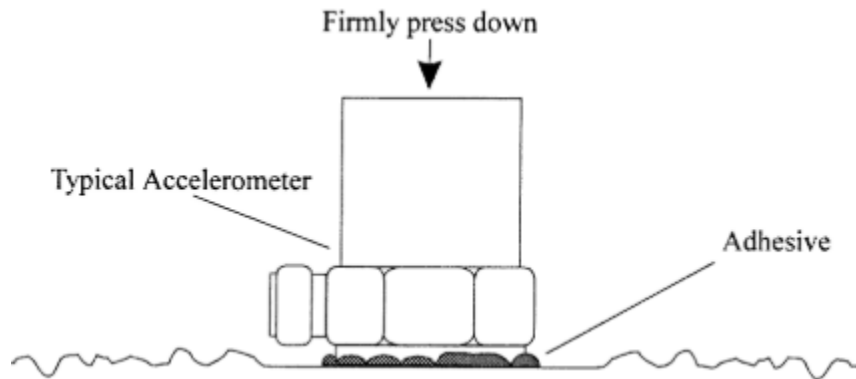


Figura 30 – Montagem com adesivo diretamente na superfície
[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

Montagem magnética

- A montagem magnética fornece um meio conveniente para fazer medições rápidas e portáteis e é comumente usada para monitorização da condição de máquinas, de manutenção preditiva, de verificações pontuais e de análise de tendências. Nem todos os imanes são adequados para todas as aplicações. Os imanes planos funcionam bem em superfícies lisas e planas, enquanto os imanes com trilho duplo são adequados para superfícies curvas, tais como caixas de motor e tubos, (Figura 31). (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002).
- A utilização destes adaptadores deve ser feita com um cuidado especial. Este tipo de montagem não dá grande confiança para frequências acima de 1 kHz, (Braz, 2015).

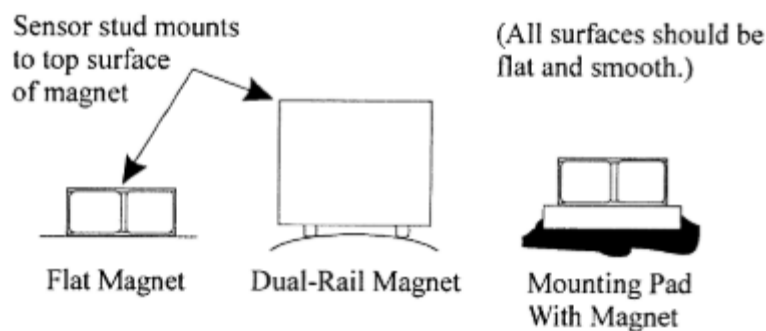


Figura 31 – Exemplos de montagem magnética
[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

Suporte de ponta de mão

- Esse método não é recomendado para a maioria das aplicações. Tanto a exatidão quanto a repetibilidade nas faixas de baixa frequência (<5Hz) e alta frequência (>1kHz) são questionáveis. Geralmente, este é usado somente para monitorizar as condições de máquinas, quando o espaço de instalação é restrito ou, para outras aplicações de tendências portáteis. A técnica, no entanto, pode ser útil para determinar, inicialmente, os locais de maior vibração, para estabelecer um ponto de instalação para um sensor permanente, (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002).
- A representação deste tipo de montagem é ilustrado na Figura 32.

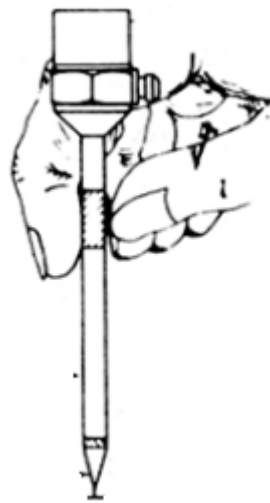


Figura 32 – Adaptador de montagem Suporte de mão

[Fonte: (http://freevibrationanalysis.blogspot.com/2011/08/brief-introduction-to-vibration_5714.html)]

3.4.2 Cabos

Os cabos fazem parte de um sistema de medição e, como tal, também afetam as medições de vibração.

Segundo PCB Piezotronics (2002), a instalação do cabo e a sua condição são essenciais, pois a fiabilidade e a exatidão de qualquer sistema de medição não são melhores do que o do seu elo mais fraco. Uma boa prática de instalação prolongará a vida útil do cabo.

Devem-se seguir os seguintes passos:

- Passo 1 – Verificar se o cabo é o correto;
- Passo 2 - Ligar o cabo ao acelerómetro;

- Passo 3 - Aliviar a tensão na ligação do cabo. Além disso, minimizar o movimento do cabo, prendendo-o com fita, grampos ou braçadeiras, em intervalos regulares. Prevenir danos físicos e minimizar o ruído elétrico, evitando colocar os cabos próximos de fios de alta tensão.
- Passo 4 – Ligar, por fim, a extremidade do cabo restante ao equipamento de leitura. É boa prática dissipar qualquer carga elétrica que possa ter-se acumulado no cabo, encurtando o pino de sinal para o pino de ligação à massa.

Para evitar o movimento dos cabos, de forma a que estes não interfiram com as medições, principalmente as de baixas frequências, deve proceder-se à sua colocação com através de uma cera modeladora, tal como ilustra a Figura 33⁶.

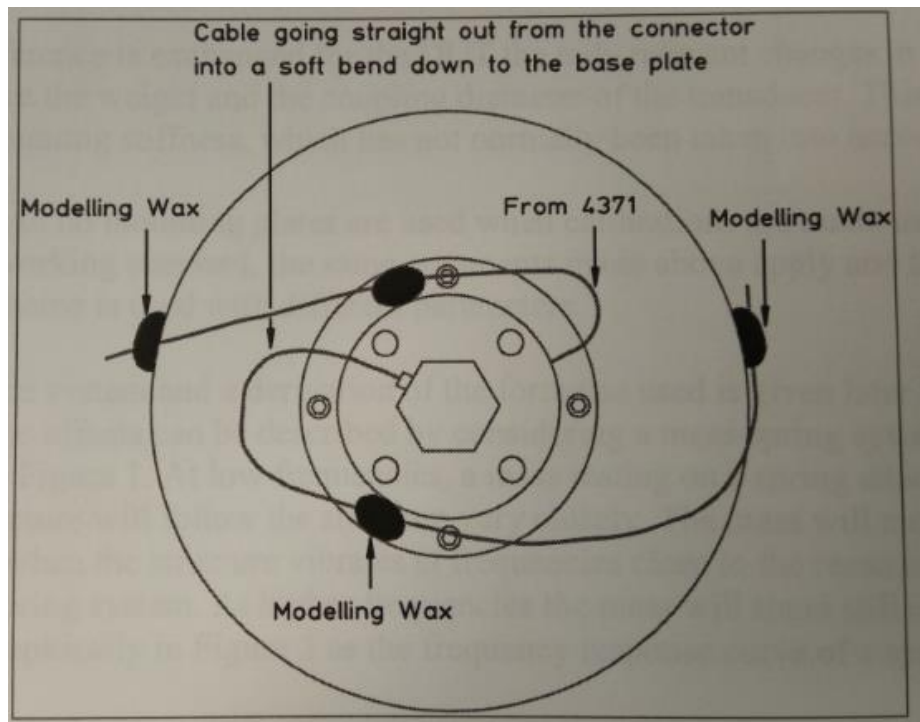


Figura 33 – Vista de cima de montagem de cabos⁷

Como se pode verificar na Figura 34, existe uma grande variação na sensibilidade do acelerómetro nas baixas frequências, devido à má fixação dos cabos. Na Figura 35 pode

⁶ Manual de instrução Bruel & Kjaer. (s.d.). Instruction Manual for Vibration Transducer Calibration System. Denmark: Bruel & Kjaer.

⁷ Fonte manual de instrução – Bruel & Kjaer. (s.d.). Instruction Manual for Vibration Transducer Calibration System. Denmark: Bruel & Kjaer.

verificar-se que a sensibilidade se mantém mais constante em toda a faixa de frequência, incluindo nas baixas frequências, devido à boa fixação dos cabos.

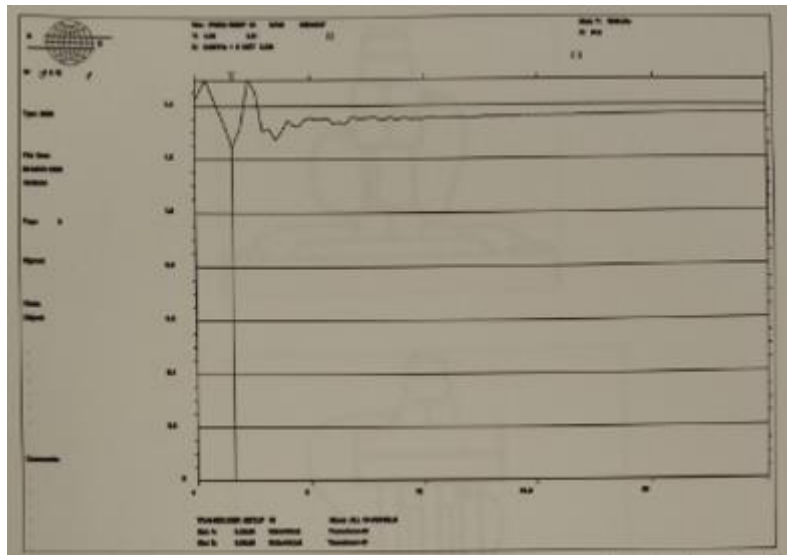


Figura 34 – Efeito sobre a sensibilidade nas baixas frequências, com má montagem de cabos⁸

⁸ Fonte manual de instrução – Bruel & Kjaer. (s.d.). Instruction Manual for Vibration Transducer Calibration System. Denmark: Bruel & Kjaer.

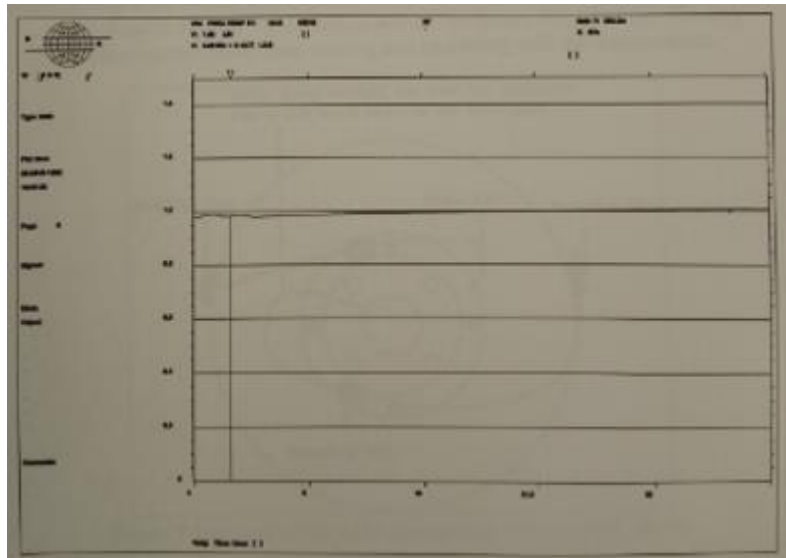


Figura 35 - Efeito sobre a sensibilidade nas baixas frequências, com boa montagem de cabos⁹

3.4.3 Condições externas

Segundo Bruel&Kjaer (1982), existem vários fatores externos que podem afetar os resultados da medição de um acelerómetro, tal como se pode verificar na Figura 36.

⁹ Fonte manual de instrução Bruel & Kjaer. (s.d.). Instruction Manual for Vibration Transducer Calibration System. Denmark: Bruel & Kjaer.

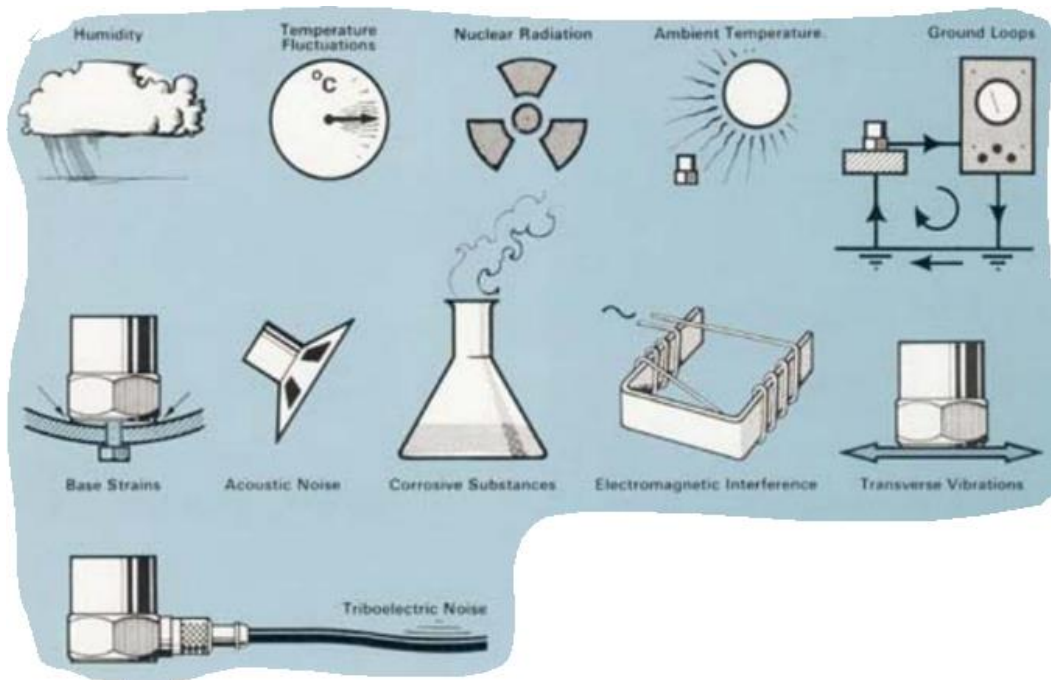


Figura 36 – Condições externas que podem influenciar na medição do acelerómetro

[Fonte: (Bruel & Kjaer, 1982)]

Nos acelerómetros piezoelétricos, o facto que mais influencia as medições é a temperatura, devido à natureza do material piezoelétrico, pois, o seu comportamento varia com a temperatura. Os fabricantes deste tipo de acelerómetros costumam especificar a relação entre a sensibilidade e a temperatura (Figura 37), de forma a fazer as correções devidas.

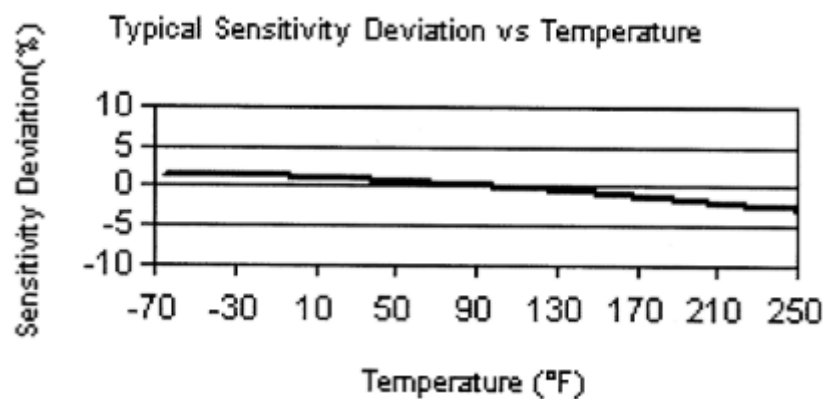


Figura 37 – Variação Sensibilidade Vs Temperatura

[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

Não só a temperatura, mas também outros fatores, como a existência de vibrações transversais, as montagens, entre outros (Figura 36), irão afetar as medições.

O Laboratório de vibração do ISQ é controlado, de forma a diminuir todos estes fatores externos.

3.4.4 Método de calibração

Tal como atrás referido, o método de calibração usado no Laboratório de vibração do ISQ é feito através de comparação – Método *Back-to-back*.

3.4.4.1 Método *Back-to-back*

O método *back-to-back* é utilizado para determinar a sensibilidade do acelerómetro a calibrar ao longo de uma determinada faixa de frequências e/ou amplitude.

Este método baseia-se numa simples comparação com um acelerómetro previamente calibrado, chamado de padrão de referência.

Os padrões de referência utilizados são rastreáveis por um laboratório de padrões reconhecido, e são projetados para terem estabilidade. Montando um acelerómetro de teste no padrão de referência e, em seguida, ligando essa combinação a uma fonte de vibração adequada, é possível por a vibrar os dois dispositivos e comparar os dados (Figura 38).

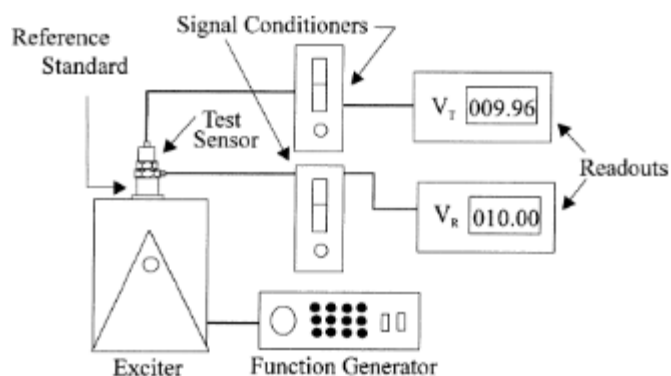


Figura 38 – Sistema de calibração Back-to-back
[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

A sensibilidade do acelerómetro a calibrar é calculada com base na comparação entre a amplitude do sinal de saída do acelerómetro-padrão com a mesma amplitude medida no acelerómetro a calibrar, isto ao longo de diferentes frequências.

Como a vibração aplicada em cada transdutor é a mesma, o rácio das suas sensibilidades é igual ao rácio dos valores lidos. Obtendo os valores lidos, e conhecendo a sensibilidade do acelerómetro padrão, é possível determinar a sensibilidade do acelerómetro a calibrar. O modelo matemático (Equação 7) utilizado é o seguinte, (Bruel & Kjaer), (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002):

$$S_t = S_r \left(\frac{V_t}{V_r} \right) \quad (7)$$

Onde:

S_r - é a sensibilidade do acelerómetro de referência

S_t - é a sensibilidade do acelerómetro a calibrar

V_r - é o sinal de saída devolvido pelo transdutor de referência

V_t - é o sinal de saída devolvido pelo transdutor a calibrar

Ao variar a frequência da vibração, o sensor pode ser calibrado em toda a sua faixa de frequência de operação. A resposta típica de um acelerómetro não filtrado é ilustrado na Figura 39, (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002).

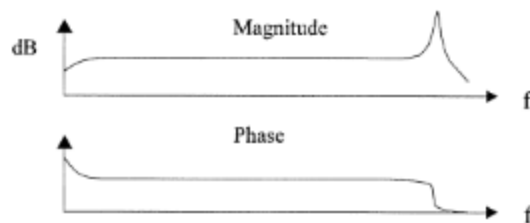


Figura 39 – Resposta típica do acelerómetro ao longo de uma faixa de frequência, tanto em amplitude como em fase

[Fonte: (PCB Piezotronics Vibration Division, 2002)]

4 LABORATÓRIO DE ACÚSTICA E VIBRAÇÃO

4.1 Caracterização Global do Laboratório

De acordo com o *site* do laboratório de metrologia do ISQ (Labmetro)¹⁰ “o controlo e diminuição da vibração em máquinas traduzir-se-á seguramente numa maior longevidade dos sistemas e evitará a transferência dessa vibração ao ser humano.

O Laboratório de Acústica e Vibração assegura a rastreabilidade ao instrumento de medição, de acordo com os requisitos ou normas vigentes, aos mais diversos equipamentos associados a medições, estudos e projetos realizados na área do ambiente, saúde, higiene e segurança, construção, manutenção, desenvolvimento de produto e indústria em geral.

O Laboratório é acreditado pelo IPAC para o exercício de calibrações e qualificado pelo IPQ nas operações de Verificação Metrológica Legal.”

Todo o departamento de metrologia está organizado segundo um sistema de gestão, onde existem diferentes funções descritas. Existem equipas com funções de gestão, funções técnicas e funções de suporte. Todos trabalham de acordo com matrizes de funções e competências.

A desempenhar funções no laboratório de Acústica e Vibração, existe o Responsável Técnico, o Coordenador de Laboratório (substituto do Responsável Técnico) e os Técnicos.

O laboratório é certificado e acreditado, seguindo todas as metodologias e normas exigidas. Possui certificações, no âmbito do sistema de gestão da qualidade, segurança e saúde no trabalho, segundo as normas ISO 9001:2015 e OSHAS 18001:2007, sendo certificado pela APCER¹¹. É um laboratório acreditado pelo IPAC, cumprindo todos os critérios de acreditação para Laboratórios de Calibração estabelecidos na norma NP EN ISO/IEC 17025:2005, onde estão especificados os requisitos gerais para laboratórios de ensaio e calibração. Esta acreditação reconhece também a competência técnica para o âmbito descrito no Anexo Técnico, assim como o funcionamento de um sistema de gestão. O Anexo Técnico,

¹⁰ <https://metrologia.isq.pt/LaboratorioAcusticaVibracao.aspx> (Data de acesso: 10/04/2019)

¹¹ <https://metrologia.isq.pt/Certificacoes.aspx> (Data de acesso: 10/04/2019)

pelo qual o laboratório está acreditado, é o M0059, que pode ser consultado no site do Labmetro¹².

O Labmetro é reconhecido pelo IPQ na vertente acústica, como organismo de verificação metrológica, na área dos sonómetros¹³.

No que concerne ao laboratório de análise de vibrações (Figura 40), este possui competências para realizar as calibrações descritas no Anexo Técnico M0059.

Para a realização das calibrações, possui três padrões, sendo dois deles de trabalho e um de referência:



Figura 40 – Bancada de trabalho de calibração e vibrações

- *Acelerómetro do padrão de referência*

O acelerómetro de referência, seguindo a rastreabilidade metrológica, é calibrado de três em três anos por um Laboratório Primário, que utiliza um padrão primário. É utilizado como referência para os acelerómetros de trabalho do laboratório. É um acelerómetro Piezoelétrico, da marca *Bruel & Kjaer*, modelo 8305_001 (Figura 41), com as características referidas no Anexo (A).

¹² <https://metrologia.isq.pt/AcreditacoesLabmetro.aspx> (Data de acesso: 10/04/2019)

¹³ <https://metrologia.isq.pt/QualificacoesIPQ.aspx> (Data de acesso: 10/04/2019)



Figura 41 – Acelerómetro padrão de referência Modelo 8305-011 da Bruel&Kjaer
[Fonte: (<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2052.ashx>)]

- *Acelerómetro de trabalho*

Este acelerómetro é usado para fazer as calibrações de acelerómetros e para a resposta em frequência. Para garantir a rastreabilidade metrológica, este acelerómetro é calibrado de dois em dois anos. É um acelerómetro Piezoelétrico, da marca *Bruel & Kjaer*, modelo 8305 (Figura 42), com as características referidas no Anexo (A).



Figura 42- Acelerómetro padrão de referência Modelo 8305-011 da Bruel & Kjaer
[Fonte: (<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2052.ashx>)]

- *Acelerómetro de trabalho.*

Este acelerómetro é usado para fazer as calibrações do Laboratório, mais concretamente para a calibração de sistemas de medição de vibração, onde também, normalmente, se testa uma resposta em amplitude. Como é um acelerómetro com uma sensibilidade maior, é possível usá-lo para amplitudes mais pequenas. É um acelerómetro Piezoelétrico, da marca *PCB*, modelo 301A11 (Figura 43), com as características referidas em Anexo (B).



Figura 43 - Acelerómetro padrão de referência Modelo 301A11 da PCB

[Fonte: (<http://www.pcb.com/Products/model/301A11>)]

4.1.1 O que se faz?

De acordo com o *site* do laboratório de metrologia do ISQ (Labmetro)¹⁴, os serviços que podem ser realizados neste laboratório são:

- *Acústica*
 - Audiómetros (IEC 60645-1);
 - Microfones;
 - Dosímetros de ruído (IEC 61252);
 - Calibradores acústicos (IEC 60942);
 - Sonómetros / sonómetros integradores;
 - IEC 60651, IEC 60804, IEC 61672;
 - Filtros de oitava e 1/3 de oitava (IEC 61260);
 - Analisadores em tempo real;
 - Controlo metrológico de sonómetros (Portaria n.º 977/99, de 9 de Setembro);
- *Vibração*
 - Acelerómetros e acelerómetros triaxiais (X, Y, Z);
 - Calibradores de aceleração;
 - Analisadores de vibração;
 - Cadeias de medição (acelerómetro, condicionador e unidade de leitura) em aceleração;
 - Sistema de medição de vibração associada ao corpo humano (ISO 8041);

¹⁴ <https://metrologia.isq.pt/LaboratorioAcusticaVibracao.aspx> (Data de acesso: 10/04/2019)

- Sismógrafos.

4.1.2 Tipo de clientes

Existem vários tipos de clientes que realizam medições de vibração necessitando realizar uma calibração periódica aos seus equipamentos. Há clientes de empresas de higiene e segurança no trabalho, de testes vibratórios, de serviços de manutenção, de estudo geológicos, de construção, e empresas que usam acelerómetros para controlo interno de manutenção e diversos outros estudos.

Esta diversificação de clientes resulta num grande número de variados acelerómetros e sistemas de medição que necessitam ser calibrados. Sem uma boa gestão do laboratório seria impossível levar a efeito todo este trabalho, de forma rápida e eficiente que garanta a qualidade e a satisfação do cliente.

4.1.3 Gestão do Laboratório

A gestão de laboratório corresponde à gestão de clientes e equipamentos, assim como à garantia da certificação e acreditação. Para ajudar a realizar uma gestão eficaz foi realizado pelo ISQ uma base de dados num *software* de apoio.

Cada equipamento do laboratório tem um número de identificação interno associado. Assim, na base de dados criada está registado cada equipamento, permitindo um melhor controlo sobre o processo de calibração metrológica, de forma a cumprir com as normas exigidas para a certificação e acreditação do laboratório. Uma boa gestão dos equipamentos internos garante uma contínua e eficaz realização de serviços de calibração, sem provocar tempos de paragem, diminuindo assim os atrasos para com os clientes.

Aos clientes, depois de pedirem um orçamento de calibração do seu equipamento e de o entregarem na receção, é criado um *Boletim de Registo* referente à receção do *Equipamento* (BRE). Este BRE é criado diretamente na base de dados, onde se colocam os dados do cliente, do equipamento, dos serviços a realizar e a informação referente à entrega. Assim, através do BRE, é possível, ao laboratório, fazer a gestão dos clientes, bem como a realização da calibração dos equipamentos por data de entrega. Cada equipamento demora, em média, três dias úteis a ficar disponível para devolução ao cliente.

São utilizados diversos KPIs para determinar o desempenho de cada laboratório.

4.2 Cadeia de medição de vibração

Para fazer uma calibração de vibração, é necessário que exista uma cadeia de medição de vibração, com o objetivo de simular o fenómeno físico de vibração que, por sua vez, será transformado pelo transdutor, de forma a ter um valor mensurável.

Esta cadeia de medição é, basicamente, constituída por três partes: a primeira, responsável por gerar um sinal de vibração; a segunda, constituída pelo transdutor; e, por fim, a terceira composta por um equipamento de leitura.

No laboratório de vibração do ISQ existem duas cadeias de medição de vibração distintas (Figura 44 e 45), que serão descritas de seguida.

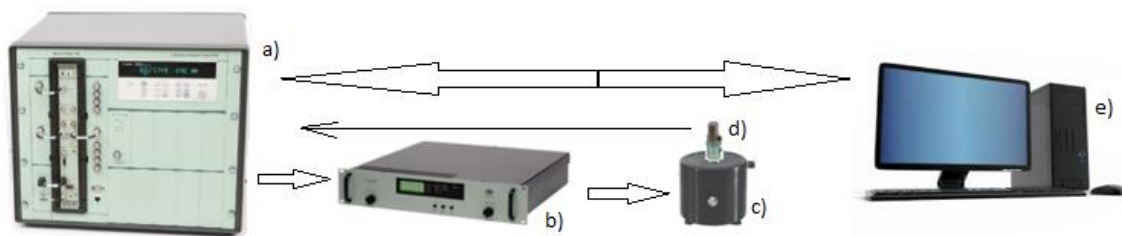


Figura 44 – Esquema da cadeia de medição 1



Figura 45 - Esquema da cadeia de medição 2

Cadeia de medição 1:

- a) *Plataforma de calibração da Bruel & Kjaer (Calibration Platform Type 3630)*^{15,16}

Esta é uma plataforma criada pela *Bruel & Kjaer* especificamente para calibrações de transdutores de vibração e de som. Através de um *software* específico, que será descrito mais à frente, é feita uma série de calibrações, de forma automática, seguindo as especificações de certas normas, proporcionando, assim, aos laboratórios, uma certa automatização.

Possui um gerador de voltagem (*PULSE Generator Voltage*) que gera um sinal CA (Corrente Alternada – AC, Alternating Current) com uma determinada amplitude e frequência. As amplitudes de sinal e frequências desejados são selecionados, através da configuração do gerador *PULSE*, sendo depois medidos através de um multímetro.

Durante uma calibração de acelerómetros, esta plataforma mede a função de resposta em frequência entre o acelerómetro a ser calibrado e o acelerómetro padrão de trabalho, obtendo assim uma função de resposta em frequência equalizada, que é a calibração do acelerómetro a ser calibrado em relação ao acelerómetro de referência padrão.

Resumindo, esta plataforma é baseada num conceito de hardware / software altamente modular que, de mãos dadas com o analisador múltiplo *PULSE*, oferece uma infinidade de diferentes aplicações de calibração (Figura 46).

Um computador é, então, usado para um constante intercâmbio de dados com a plataforma. É responsável por transmitir os dados dos parâmetros de vibração e, também, pela leitura do multímetro.

¹⁵ Manual de instrução do equipamento Bruel & Kjaer. (2002), *Calibration Platform Type 3630*, Denmark, Bruel & Kjaer.

¹⁶ Manual de instrução do equipamento Bruel & Kjaer. (s.d.), *Instruction Manual for Vibration Transducer Calibration System*. Denmark: Bruel & Kjaer.

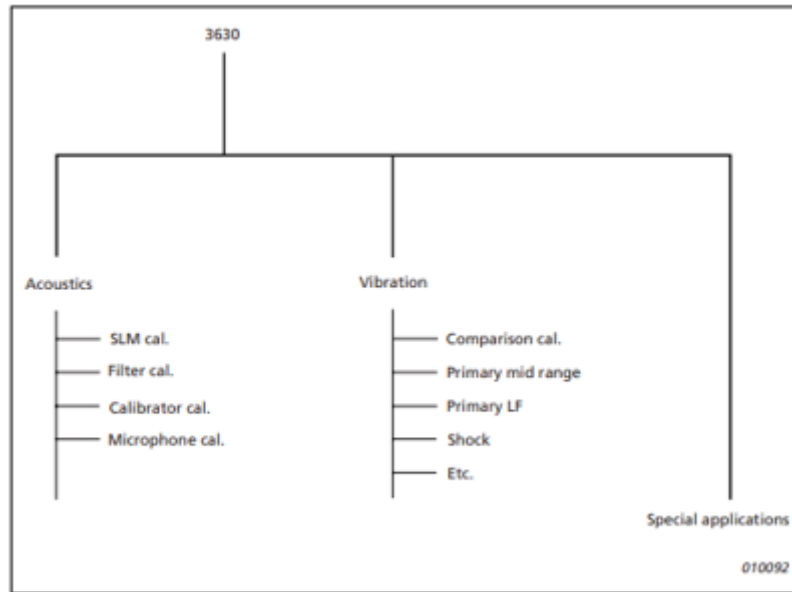


Figura 46 – Áreas de calibração da plataforma [Fonte: (Briel & Kjaer, 2002)]

A plataforma gera um sinal elétrico CA que vai, de seguida, ligar ao amplificador de sinal.

- *b) - Amplificador de sinal (Power Amplifier type 2719)^{17, 18}*

O sinal CA gerado pelo PULSE da plataforma de calibração entra no amplificador de sinal, que, por sua vez, vai amplificar o sinal, de forma a fornecer ao *shaker* potência suficiente para excitar os transdutores com as amplitudes de vibração necessárias para a calibração.

O laboratório possui dois amplificadores, um usado para os *shakers* verticais, que será descrito de seguida, e outro usado para o *shaker* horizontal que será descrito mais à frente.

Com este equipamento é possível, através de ganho variável, aumentar ou diminuir a amplitude do sinal. Também é possível definir um limite de corrente RMS (Root Mean Square) de forma a não exceder o limite definido.

Algumas especificações importantes para calibração são ilustradas na Rabela 3.

¹⁷ Documento técnico do equipamento Briel & Kjaer (2001), *Technical Documentatio - Power Amplifier Type 2719*. Denmark, Briel & Kjaer.

¹⁸ Manual de instrução do equipamento Briel & Kjaer. (s.d.), *Instruction for Vibration Transducer Calibration System Type 3629*. Naerum, Denmark, Briel & Kjaer.

Tabela 3 – Especificações do amplificador de sinal (Power Amplifier type 2719)

Capacidade de saída de Voltagem	12 V RMS, DC para 15 kHz
Capacidade de saída de Corrente	7.5A RMS em ou abaixo 5 Hz 15A RMS, 40 Hz até 10 kHz 12A RMS a 15 kHz
Faixa de frequência	Capacidade Total. 40Hz até 10 kHz Capacidade reduzida: DC até 100 kHz
Resposta frequência	Entrada AC: 15 Hz até 15 kHz

- *c) Shaker*

O *shaker* é o responsável por criar a vibração que vai excitar os transdutores. Este vai receber o sinal amplificado pelo amplificador de sinal.

O acelerómetro padrão é montado diretamente na mesa de vibração e atua como a superfície de montagem do acelerómetro a ser calibrado. Assim, é possível determinar a sensibilidade do acelerómetro a ser calibrado pelo método de calibração *back-to-back*.

O laboratório tem três *shakers* distintos, que são usados para a calibração de acelerómetros, consoante os requisitos necessários. Dois são verticais e um é horizontal.

Os verticais podem ser usados com esta cadeia de medição; o outro *shaker* só é utilizado na segunda cadeia de medição, pelo que será descrito mais à frente.

- *Primeiro Shaker vertical (Vibration Exciter Type 4808)¹⁹:*

Projetado para uma operação longa e fiável, este shaker é uma máquina compacta de alta qualidade, com um campo magnético permanente. Tem uma classificação de força de 112 N, permitindo que cargas relativamente pesadas sejam excitadas a níveis elevados. A amplitude de vibração é acionada pelo amplificador de sinal até uma corrente de entrada

¹⁹ Documento técnico do equipamento Bruel & Kjaer (2006). *Technical Documentation - PM Vibration Exciter Type 4808*. Denmark: Bruel & Kjaer.

máxima de 15 A RMS sem refrigeração assistida. Este modelo é usado para calibrar transdutores na faixa de frequência de 5 Hz a 10 kHz.

Os elementos móveis são suportados por um sistema de orientação retilíneo robusto, fornecendo uma forma de onda de aceleração limpa com baixo movimento cruzado e características de baixa distorção.

Algumas especificações importantes para calibração são ilustradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do Shaker (Vibration Exciter Type 4808)

Faixa de frequências (Mesa Vazia)	5 Hz até 10 kHz
Máximo de aceleração (Mesa vazia)	700 m/s ² (71 g)
Máxima entrada de corrente	15 A RMS

Para ajudar os limites de desempenho do *shaker*, tanto em termos de frequência como de amplitude, recorrer-se ao gráfico/tabela ilustrado na Figura 47.

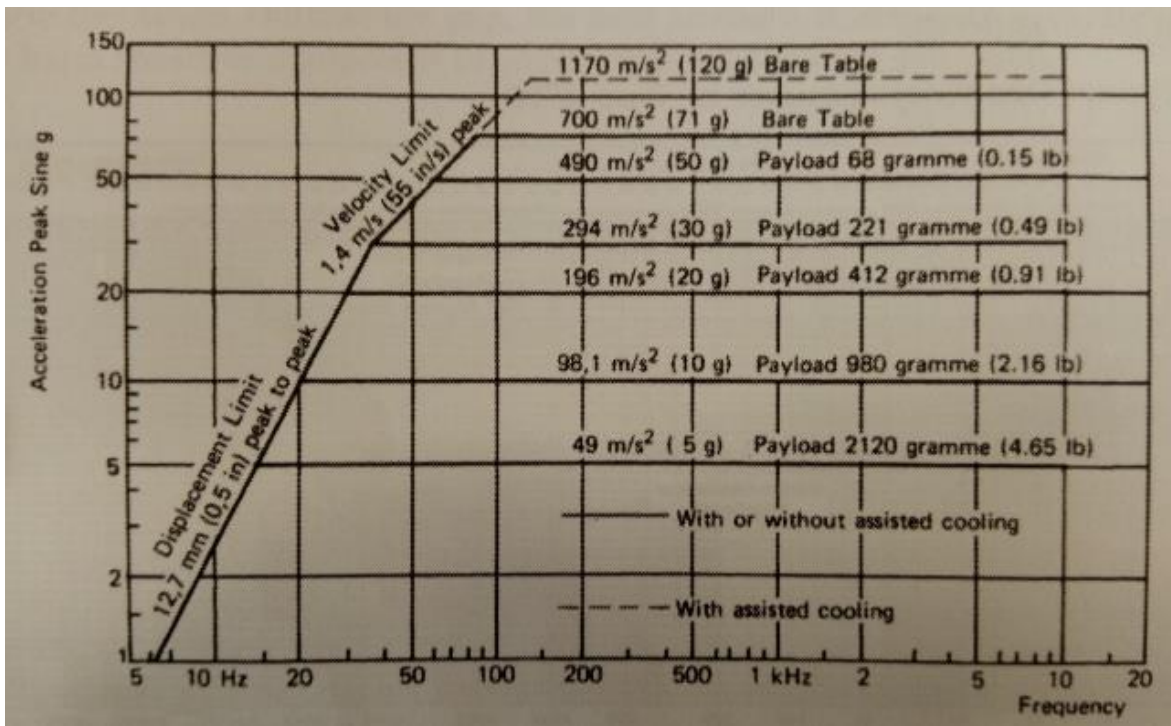


Figura 47 – Limites de frequência e amplitude para o Shaker 4808

- *Segundo Shaker vertical (Vibration Exciter Type 4809)*²⁰:

Este *shaker* é de íman permanente, com uma classificação de força de 45 N, o que permite que um acelerómetro de referência padrão mais um acelerómetro a calibrar sejam excitados em níveis *g* suficientes para calibrar transdutores na faixa de frequências entre 10 Hz e 12.8 kHz.²¹

É um pequeno instrumento versátil com um desempenho impressionante. É construído com materiais de alta qualidade e fiabilidade de construção a longo prazo. Um rigoroso controlo de qualidade resulta num alto desempenho em termos de consistência; pode receber um sinal de qualquer amplificador de potência, com uma corrente de entrada até um máximo de 5 A e uma tensão nominal adequada.

Algumas especificações importantes para calibração são ilustradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações do Shaker (Vibration Exciter Type 4809)

Faixa de frequências (Mesa Vazia)	10 Hz até 20 kHz
Máximo de aceleração (Mesa vazia)	736 m/s ² (75 g)
Máxima entrada de corrente	5 A RMS

Para apoiar na perceção dos limites de desempenho do *shaker*, tanto em termos de frequência como de amplitude, recorre-se à tabela/gráfico ilustrado na Figura 48.

²⁰ Documento técnico do equipamento Bruel & Kjaer (1988). *Technical Documentation - PM Vibration Exciter Type 4809*. Denmark: Bruel & Kjaer.

²¹ Manual de instrução do equipamento Bruel & Kjaer. (s.d.). *Instruction for Vibration Transducer Calibration System Type 3629*. Naerum, Denmark, Bruel & Kjaer.

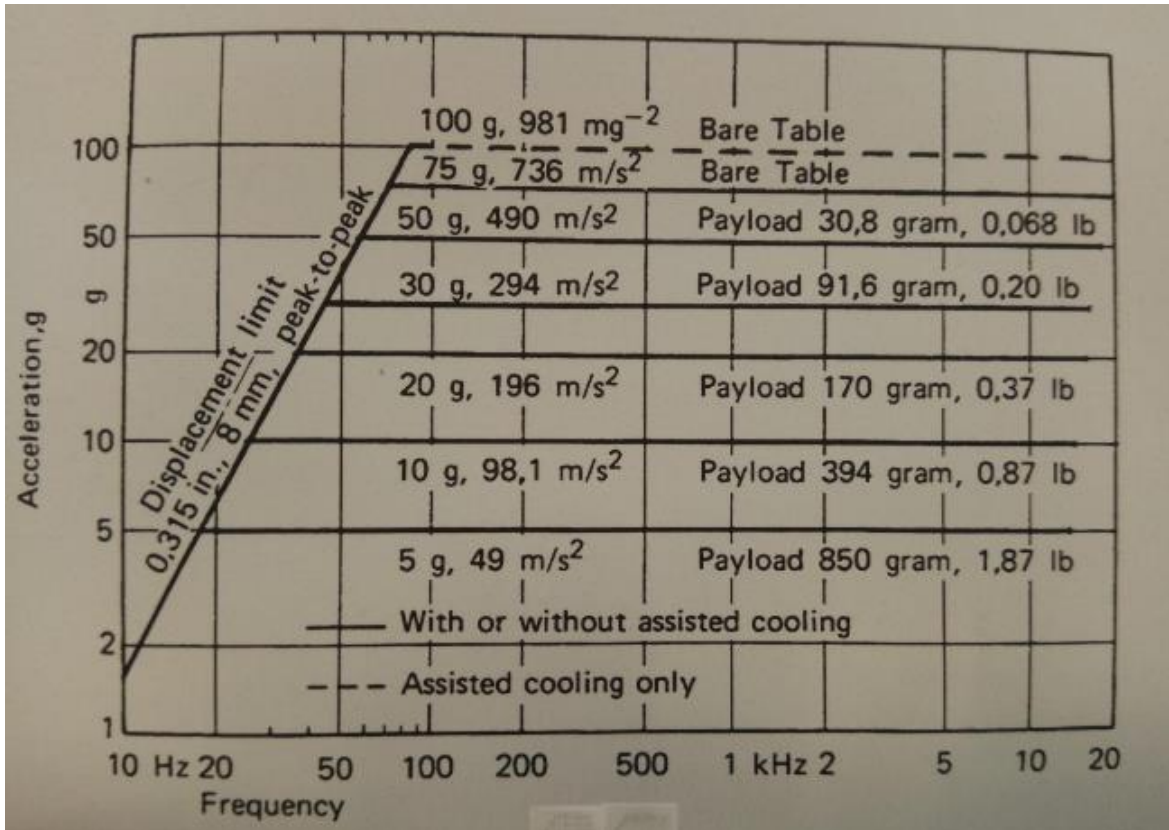


Figura 48 - Limites de frequência e amplitude para o Shaker 4809

- *d) Acelerómetro padrão/Acelerómetro a ser calibrado*

Estes dois acelerómetros estão montados no *shaker*, e irão ser excitados a uma certa amplitude e frequência. Estes, por sua vez, vão traduzir este fenómeno físico (vibração) num valor mensurável (Volt), o qual é lido pelo equipamento de medição que, nesta cadeia, está na plataforma de calibração, tal como atrás referido. Estes valores podem ser lidos num computador que esteja ligado à plataforma.

- *e) Computador pessoal*

O computador é usado através de um *software* da Bruel & Kjaer que vai fazer um intercâmbio constante de dados com a plataforma. O ISQ tem dois *softwares* que interagem com a plataforma, um de forma automática e outro de forma manual, como será descrito mais à frente.

A segunda cadeia de medição é constituída por:

- *f) Gerador de sinal (Stanford Research System Ultra Low Distortion Function Generator Model DS360) (Stanford Research Systems, 2008)*

Este equipamento é o responsável por gerar um sinal sinusoidal de CA, que irá ter uma determinada frequência e amplitude. Este sinal é programado no próprio equipamento de forma bastante amigável.

É um gerador flexível, capaz de produzir formas de onda contínuas e modificadas de ruído e distorção excepcionalmente baixos e grande exatidão e resolução em alta frequência.

Depois de gerar o sinal necessário para a calibração do acelerómetro, este tem de ser inserido num amplificador de sinal.

- *b) Amplificador de sinal*

Este equipamento é o mesmo, desempenhando as funções explicadas em cima.

- *c) Shaker*

Com esta cadeia de medição é possível utilizar qualquer um dos *shakers*, mas, atendendo a que os verticais já foram tratados, agora só vão ser referidos os horizontais.

- *Shaker Horizontal (APS 129 ELECTRO-SEIS)*

Este *shaker* é utilizado para fazer calibrações na horizontal de sistemas de vibração que não sejam possíveis montar nos *shakers* verticais, e também para fazer calibrações em baixas frequências (0.5 a 100 Hz).

É projetado, especificamente, para ser usado na calibração e avaliação de acelerómetros e outros transdutores de movimento. Fornece excelentes propriedades para calibrações de baixa frequência. É constituído por um acionador de rolamento de ar que permite altas cargas até 23 kg, como, por exemplo, para realização de calibração de geofones e sensores sísmicos pesados.

Para ajudar a definir os limites de desempenho do *shaker*, tanto em termos de frequência como de amplitude, pode recorrer-se à tabela/gráfico da Figura 49.

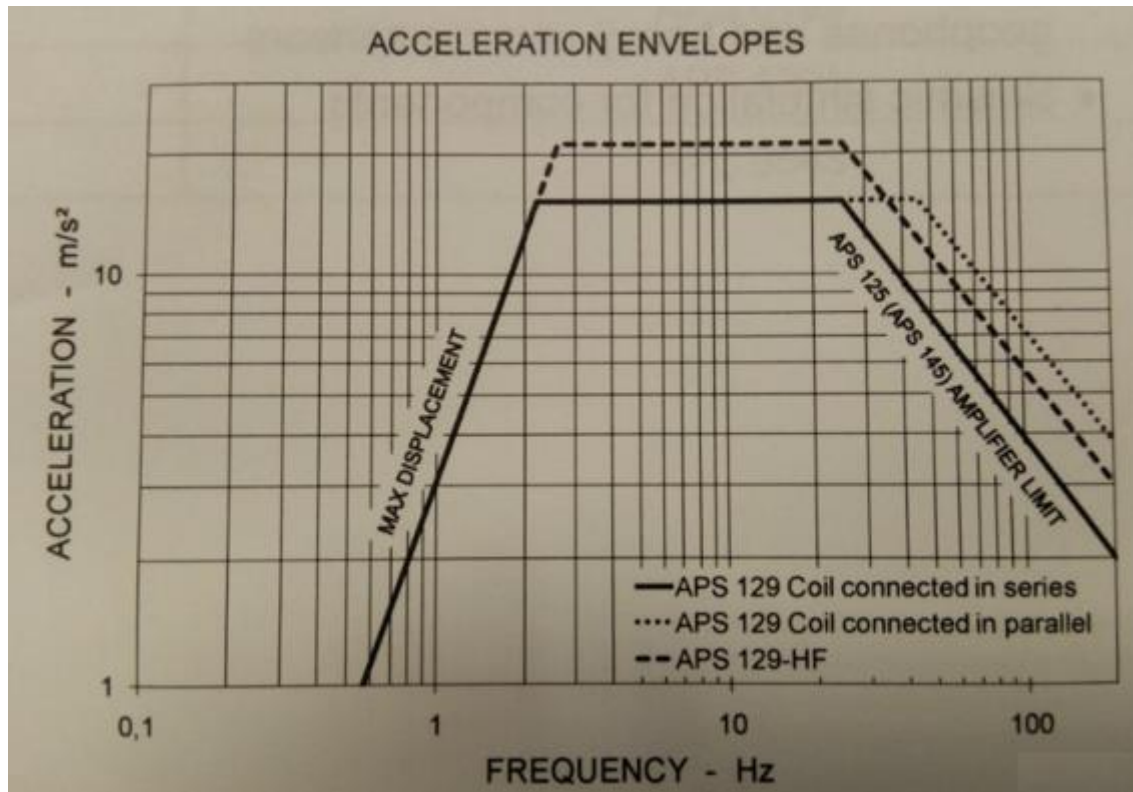


Figura 49 - Limites de frequência e amplitude para o Shaker APS ELETRO-SEIS

- d) *Acelerómetro padrão/Acelerómetro a ser calibrado*

Nesta cadeia, os acelerómetros irão transmitir o sinal para um condicionador de sinal, caso seja necessário para os acelerómetros, ou, então, diretamente para a unidade de leitura (multímetro).

- g) *Condicionador de sinal (Dytran 4114B1 Current Source)*

Este equipamento é utilizado para transdutores com saída de tensão de baixa impedância. Isso pode ser chamado de transdutores CCLD (*Constant Current Line Drive*), conhecidos sob muitos nomes de marcas diferentes²². É uma forma de garantir o fornecimento constante de corrente.

²² Manual de instrução do equipamento Bruel & Kjaer. (s.d.). *Instruction for Vibration Transducer Calibration System Type 3629*. Naerum, Denmark, Bruel & Kjaer.

Aqui, o sinal é condicionado, sendo depois possível ler os valores do acelerómetro de forma eficaz e exata no multímetro. Assim sendo, segue o sinal do condicionador para o multímetro que, neste caso, é a unidade de leitura dos transdutores.

Caso os acelerómetros tenham um pré-amplificador, uma alimentação externa de corrente, estes podem ser ligados diretamente ao multímetro, sem ser preciso condicionar o sinal.

Na plataforma de calibração acima descrita, também existe a opção para a saída do sinal dos acelerómetros, caso sejam CCLD ou de saída direta.

- *h) Multímetro (3458A Multimeter)*

Este equipamento recebe o sinal transformado dos transdutores, em volt, sendo possível ler a vibração que está a acontecer no momento e assim realizar as calibrações necessárias. Com este multímetro é possível ler os valores dos dois acelerómetros em simultâneo.

É um equipamento de alto desempenho e exatidão. A sua utilização num laboratório de calibração é de extrema importância, devido a possuir uma ótima linearidade, baixo ruído interno e excelente estabilidade a curto prazo²³.

Assim, com este tipo de equipamentos de alto desempenho, as calibrações tornam-se mais exatas, com menos erros associados.

4.2.1 Definição da gama de frequência e amplitude

Tendo estes dois sistemas de medição, cada um com as suas características específicas, pode definir-se, para o laboratório, uma gama de amplitude e frequência, no âmbito da qual podem ser calibrados os acelerómetros.

Tal como numa linha de montagem de um produto, o seu tempo de produção é definido pela máquina mais lenta; aqui também é possível determinar o máximo de amplitude e de frequência que se pode realizar numa calibração pelo equipamento “gargalo”. Para se realizar uma calibração é necessário gerar um sinal com uma amplitude e uma frequência e, tal como visto atrás, existem alguns equipamentos envolvidos na geração de vibração.

²³ https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/hp_3458a.pdf (Data de acesso: 10/04/2019)

Sabendo isto, e verificando as características de cada equipamento, verifica-se que o “gargalo” é o *shaker*.

Assim sendo, o máximo de valor, tanto de amplitude como de frequência é definido pelos gráficos ilustrados nas Figuras 47, 48 e 49.

4.3 Ensaios práticos de medição de vibração

Os clientes do ISQ enviam os acelerómetros ou equipamentos de medição para o laboratório descrevendo o que pretendem fazer. Podem pedir para determinar a sensibilidade do acelerómetro numa só frequência, ou ao longo de uma faixa de frequências, determinando assim a variação de sensibilidade ao longo de todas as frequências. Também podem pedir para calibrar em resposta em amplitude, ou seja, determinar a sensibilidade do acelerómetro numa frequência específica e variar só a amplitude nessa mesma frequência, para verificar a variação da sensibilidade.

Normalmente, a sensibilidade de referência do acelerómetro é à frequência de 160 *Hz* e a uma amplitude de 10 m/s^2 (1 *g*). Então, a variação de sensibilidade, tanto ao longo de uma faixa de frequência como numa variação de amplitude é feito em relação à sensibilidade de referência.

De seguida ilustra-se como se realizam as calibrações de forma manual, usando, para isso, a segunda cadeia de medição.

Foi utilizado para este exemplo o acelerómetro padrão PCB 301A11 (Figura 50).

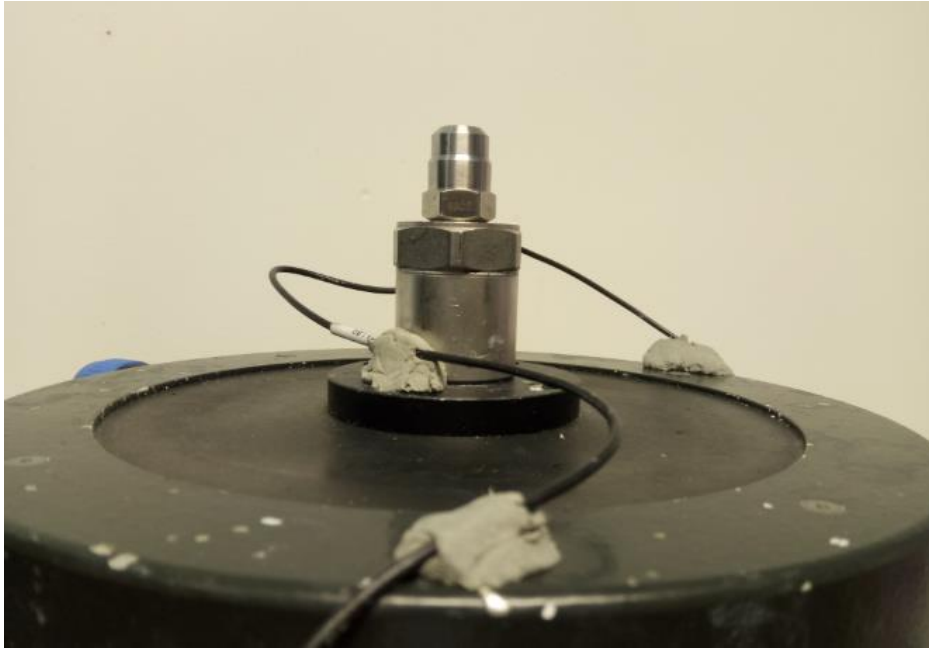


Figura 50 – Montagem dos acelerómetros no Shaker para calibração

- *Determinação de sensibilidade de um acelerómetro à frequência de 160 Hz e uma amplitude de 10 m/s^2 (1 g):*

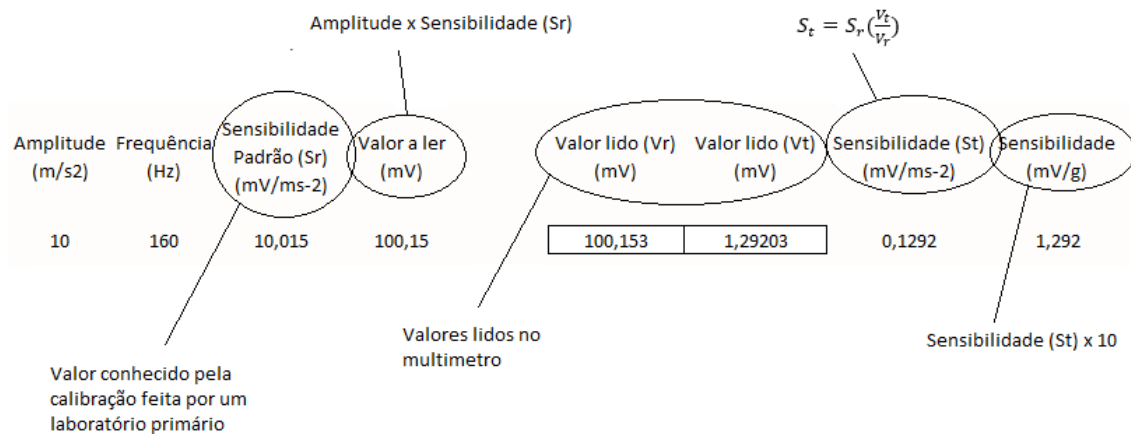


Figura 51 – Determinação da sensibilidade do acelerómetro a calibrar a uma frequência de 160 Hz e uma amplitude de 10 m/s^2 (1 g)

Como se pode observar na Figura 51, através do método de calibração *back-to-back*, determina-se a sensibilidade do acelerómetro; constata-se que a sensibilidade é de $0.1292 \text{ mV/ms}^{-2}$.

- *Determinação de resposta em frequência a 10 m/s² (20 Hz a 1000 Hz):*

Amplitude (m/s ²)	Frequência (Hz)	Sensibilidade Padrão (Sr) (mV/ms-2)	Valor a ler (mV)	Sensibilidade de referência		Sensibilidade (St) (mV/ms-2)	Sensibilidade (mV/g)	Desvio (%)
				Valor lido (Vr) (mV)	Valor lido (Vt) (mV)			
10	160	10,015	100,15	100,153	1,292	0,1292	1,292	
10	20	9,974	99,74	99,749	1,293	0,1293	1,293	0,06
10	100	10,008	100,08	100,082	1,291	0,1291	1,291	-0,08
10	500	10,026	100,26	100,273	1,293	0,1293	1,293	0,05
10	1000	10,035	100,35	100,351	1,293	0,1293	1,293	0,11

Figura 52 – Resposta em frequência do acelerómetro a calibrar

Como se pode observar na Figura 52, foi determinada a sensibilidade do acelerómetro para as quatro frequências referidas e, depois, determinado a sua variação em relação à sensibilidade de referência. Então, o comportamento do acelerómetro nesta gama de frequências pode ser representado tal como se ilustra na Figura 53.

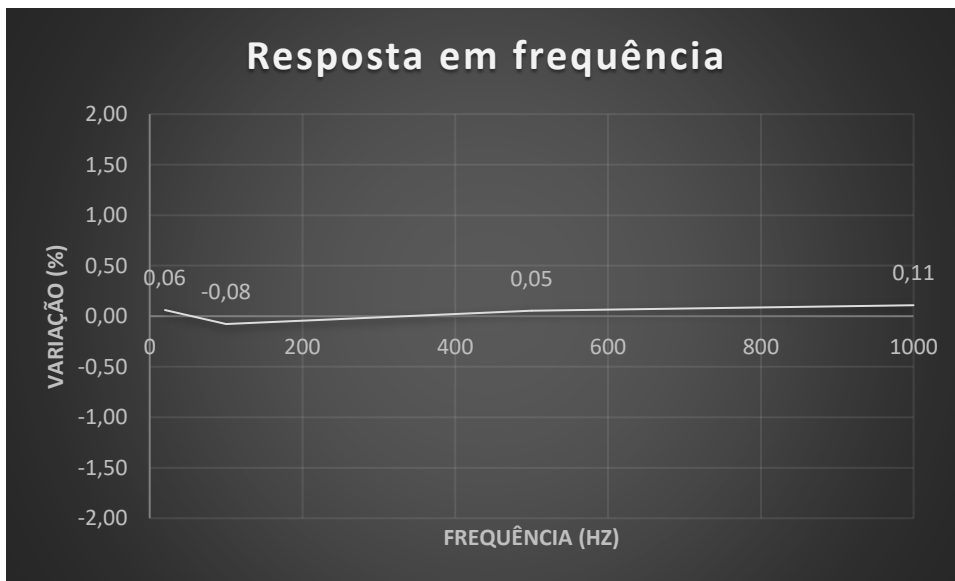


Figura 53 - Comportamento do acelerómetro em resposta de frequência

- *Determinação de resposta em amplitude a 160 Hz (2 m/s² a 100 m/s²):*

Amplitude (m/s ²)	Frequência (Hz)	Sensibilidade Padrão (Sr) (mV/ms-2)	Valor a ler (mV)	Valor lido (Vr) (mV)	Valor lido (Vt) (mV)	Sensibilidade (St) (mV/ms-2)	Sensibilidade (mV/g)	Desvio (%)
10	160	10,015	100,15	100,153	1,292	0,1292	1,292	
2	160	10,015	20,03	20,032	0,256	0,1282	1,282	-0,76
5	160	10,015	50,075	50,078	0,646	0,1292	1,292	-0,02
50	160	10,015	500,75	500,757	6,457	0,1291	1,291	-0,05
100	160	10,015	1001,5	1000,91	12,904	0,1291	1,291	-0,07

Figura 54 - Resposta em amplitude do acelerómetro a calibrar

Como se observa na Figura 54, foi determinada a sensibilidade do acelerómetro para as quatro amplitudes referidas e, depois, determinado a sua variação em relação à sensibilidade de referência. Então, o comportamento do acelerómetro, nesta gama de frequências, pode ser representado tal como se ilustra na Figura 55.



Figura 55 - Comportamento do acelerómetro em resposta de amplitude

Foi utilizado, para o presente exemplo, o acelerómetro de trabalho PCB - 301A11, mas, caso fosse utilizado o outro acelerómetro de trabalho Bruel & Kjaer – 8305 (Figura 57), o valor de referência e o comportamento do acelerómetro a calibrar seria o mesmo. Para demonstrar isso, foi feita a determinação da sensibilidade do acelerómetro a calibrar à frequência de 160 Hz, com uma amplitude de 10 m/s²(1 g) (Figura 56).

Amplitude (m/s ²)	Frequência (Hz)	Sensibilidade Padrão (mV/ms ⁻²)	Valor a ler (mV)	Valor lido (mV)	Valor lido (mV)	Sensibilidade (mV/ms ⁻²)	Sensibilidade (mV/g)	Desvio (%)
10	160	0,12403	1,24	1,24	1,293	0,1293	1,293	

Figura 56 – Determinação da sensibilidade do acelerómetro a calibrar com o acelerómetro padrão Bruel & Kjaer 8305

Como se verifica, a sensibilidade é a mesma, usando qualquer um dos acelerómetros padrão para calibração.

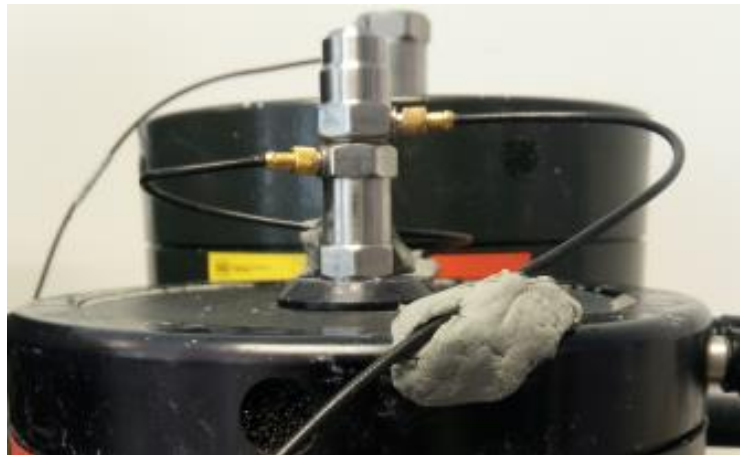


Figura 57 - Montagem dos acelerómetros no Shaker para calibração. Acelerómetro padrão 8305 da Bruel & Kjaer

4.4 Medição de vibrações de baixa frequência

Para medições com frequência acima de 5 Hz, é utilizado o *shaker* vertical 4808. Para medições inferiores a 5 Hz é utilizado o *shaker* horizontal APS ELECTRO-SEIS.

Para este tipo de calibrações é utilizada a 2ª cadeia de medição, mas, como os valores que resultam no multímetro variam muito, foi criado pelo ISQ um programa em *Excel* que consegue, através do uso do multímetro, consegue descrever uma onda sinusoidal e, assim, obter mais facilmente os valores de amplitude nestas frequências mais baixas. O computador está ligado ao multímetro através do programa, sendo os valores recolhidos e trabalhados no *Excel*.

O que acontece é que o multímetro, em vez de ler corrente CA, lê em CC (Corrente Contínua – DC, Direct Current) e, através de macros do *Excel* são retirados 200 valores em cada dois períodos de onda. Os valores DC vão variando e, através dos 200 valores retirados do multímetro é possível recriar uma onda sinusoidal, como é ilustrado na Figura 58. Isto pode

ser chamado de digitalização da onda sinusoidal, onde, depois, é possível fazer um estudo da mesma através dos níveis de vibração (RMS, pico-a-pico e pico) e unidades de amplitude (ms^{-2} , mm/s , g , mV).

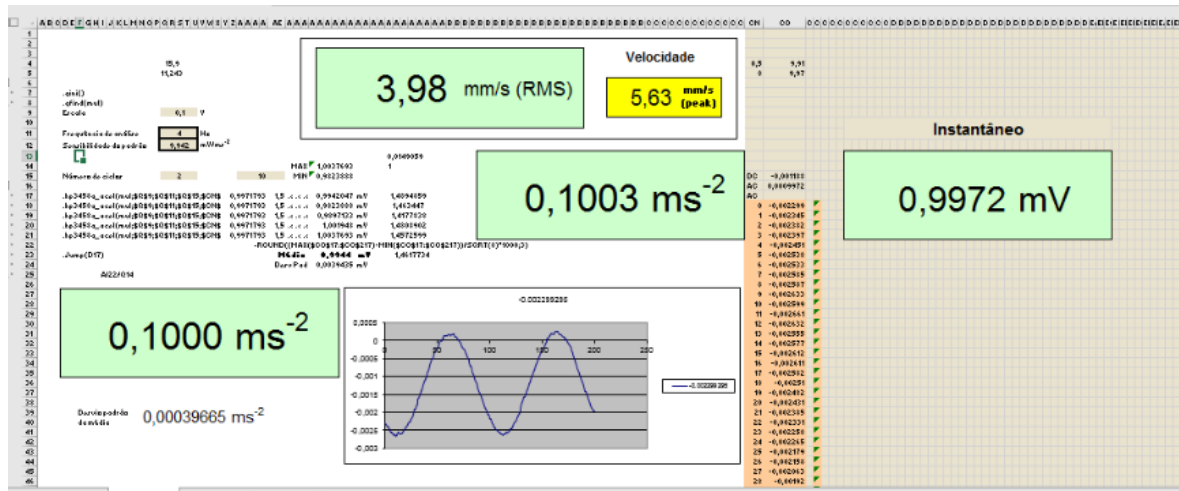


Figura 58 – Programa em Excel para leitura de vibração com frequência inferior a 5Hz

Através deste programa é possível ler valores de frequência mais baixos e de forma mais exata, pois a forma de onda torna-se totalmente sinusoidal. O multímetro consegue fazer leituras eficazes em CA a partir de 3 Hz de frequência; portanto, este método só é utilizado para frequências inferiores a 5Hz.

4.5 Introdução aos softwares de calibração

Como atrás descrito, o Labmetro possui dois *softwares* de apoio à calibração de acelerómetros.

Ambos os *softwares* foram criados pela Bruel & Kjaer e interagem com a plataforma de calibração acima descrita.

O primeiro *software* é o que faz intercâmbio de dados com a plataforma, de forma a gerar sinais para fazer vibrar o *shaker*, como também para ler os sinais que saem dos acelerómetros, calculando automaticamente a sensibilidade, a resposta em frequência e a resposta e amplitude para os valores definidos pelo utilizador.

O segundo *software*, por sua vez, permite uma forma mais visual de se poder ler os valores dos acelerómetros do multímetro, no computador. Neste caso, a montagem da cadeia de

medição é igual à da segunda cadeia, mas usando a plataforma de calibração para substituir o multímetro anteriormente referido. Assim sendo, a geração de sinal e, depois a leitura dos valores dos acelerómetros, é feita manualmente, bem como o estudo da sensibilidade, resposta em amplitude e frequência, que é feito em *Excel*.

- Software 1 – BK3629

1º Passo – Começa-se por criar o modelo do acelerómetro na pasta da sua marca (pastas de marcas criadas previamente) (Figura 59).

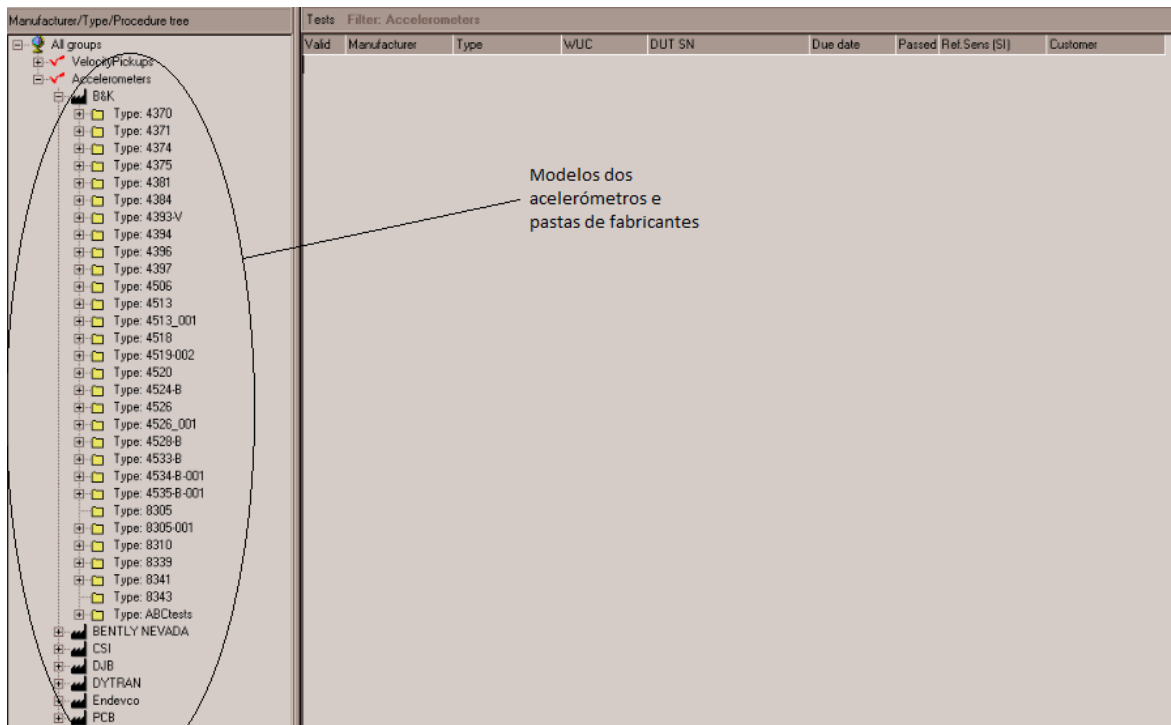


Figura 59 – Criação do modelo do acelerómetro no software

2º Passo – Através dos dados fornecidos pelo fabricante preenche-se o procedimento de calibração com os dados do acelerómetro a calibrar. Também se descreve se o acelerómetro é de saída CCLD ou saída Direta; define-se o teste que se pretende fazer, tanto em amplitude como em frequência. É ainda possível escolher o tipo de vibração, aleatória ou sinusoidal (Figura 60).

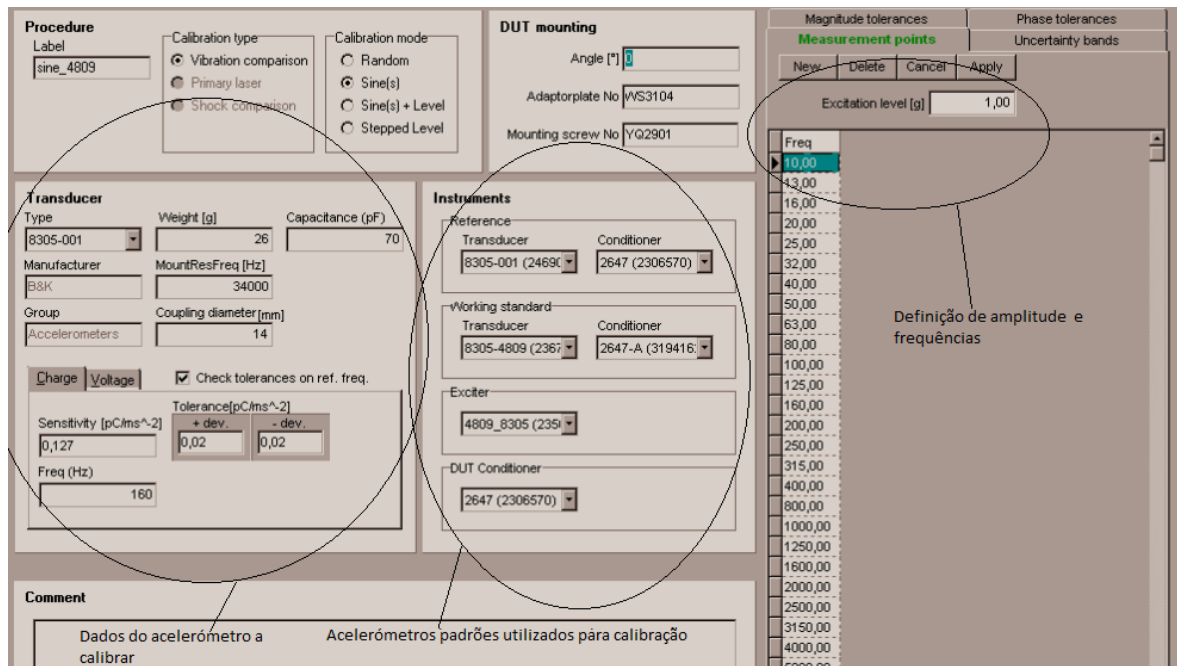


Figura 60 – Definição do procedimento de calibração

3º Passo – Com a primeira cadeia de medição montada, apenas se torna necessário por o programa a correr e, no fim, obtêm-se os resultados da calibração (Figura 61).

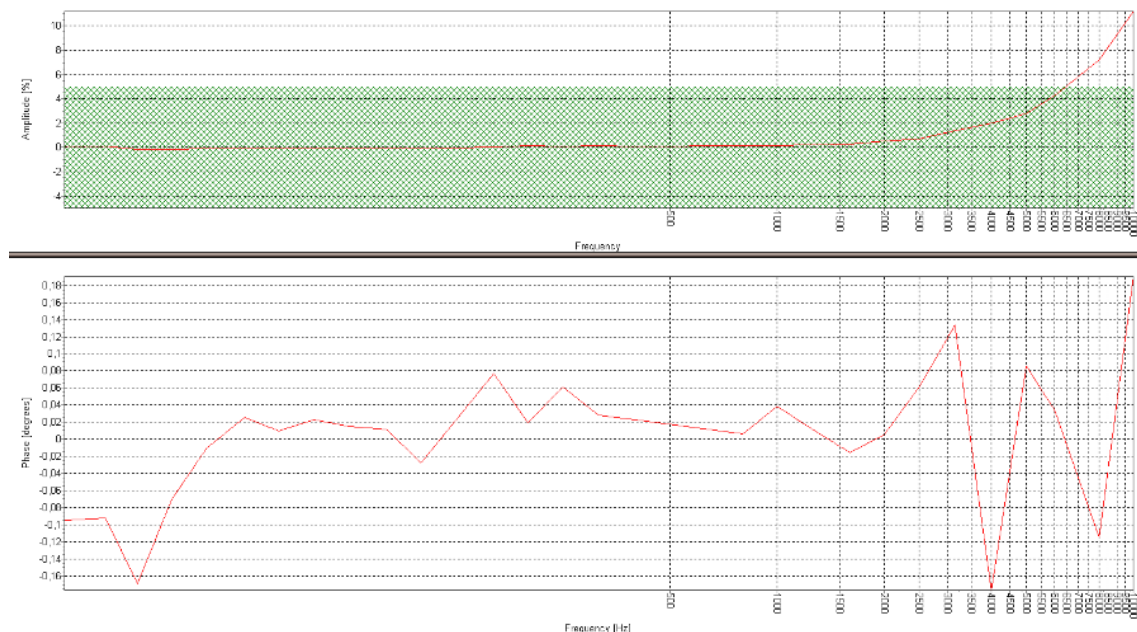


Figura 61 – Comportamento do acelerómetro ao longo de uma faixa de frequência

4º Passo – Por fim é retirado o certificado da calibração para entregar ao cliente.

A calibração feita é *back-to-back*, isto é, por comparação, o que significa que o *software* tem de conhecer os dados dos acelerómetros padrão. Através da calibração feita pelo laboratório primário ao acelerómetro padrão de referência, fica-se a conhecer a sua sensibilidade, numa determinada faixa de frequência e amplitude. Estes valores são transcritos para o *software* e, depois, com esse acelerómetro de referência calibram-se os dois acelerómetros padrão de trabalho em ambos os *shakers* verticais. Com isto, o *software* fica com os valores de todos os acelerómetros padrão do laboratório, podendo assim fazer a calibração automática dos acelerómetros dos clientes, por comparação.

- *Software 2* – PULSE LabShop Version 9.0

Neste caso é utilizada a segunda cadeia de medição, mas utilizando a plataforma + *software* como multímetro. Também não se usa o condicionador de sinal, uma vez que a plataforma já o possui. O *software* permite a opção de escolher se a saída do acelerómetro é CCLD ou Direta. Neste caso, através de FFT (Fast Fourier Transform) é apresentado um gráfico de amplitude e frequência, onde, através do espectro da onda, podem ler-se os valores dos acelerómetros (Figura 62).

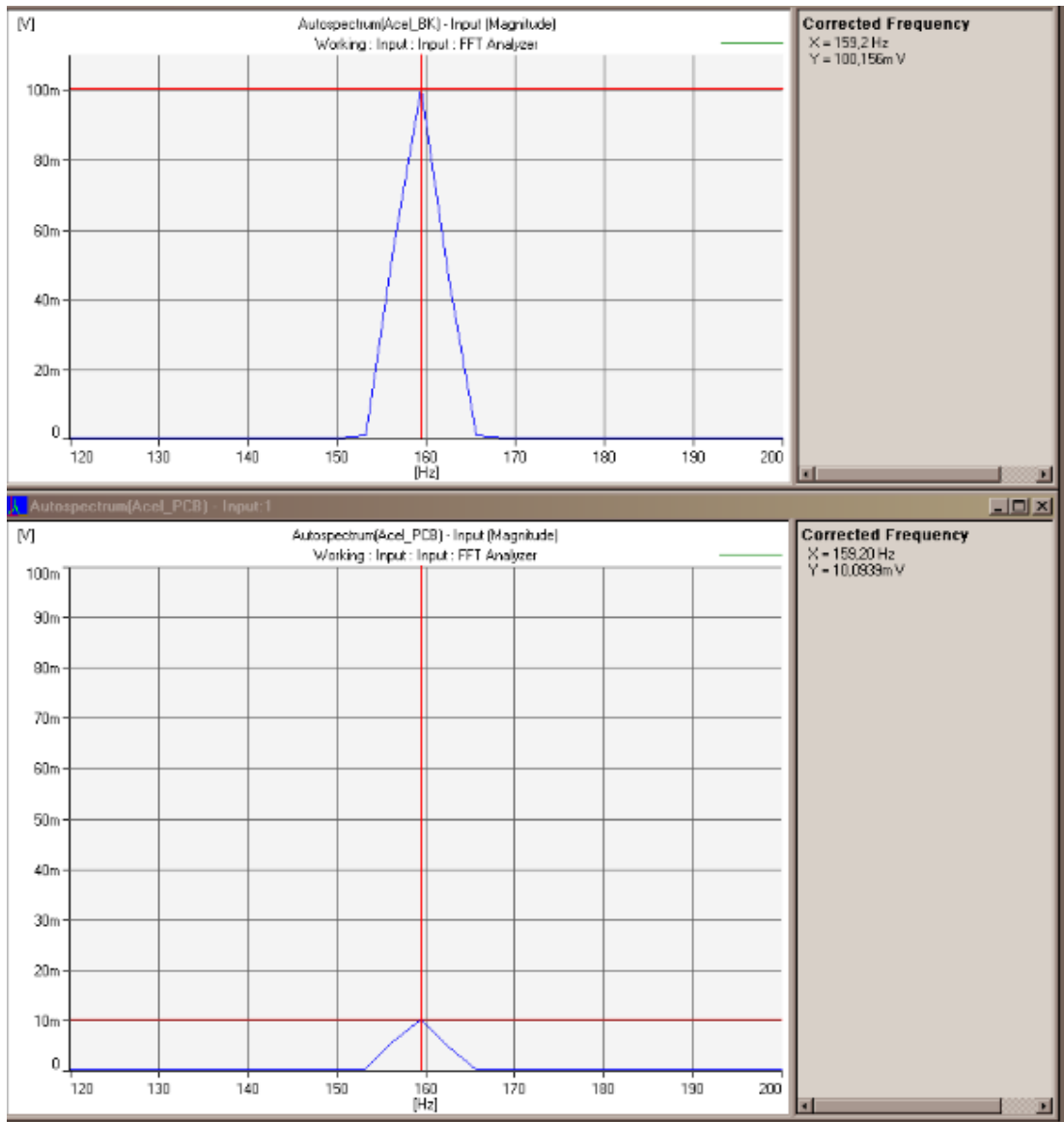


Figura 62 – Exemplo de uma onda de vibração a 159.2 Hz e 1 g no multímetro do software

Neste exemplo vê-se o está a ocorrer a uma vibração de 160 Hz, onde o acelerómetro padrão está a ler 100.156 mV e o do cliente 10.0939 mV. Sabendo que o acelerómetro, aos 160 Hz, tem uma sensibilidade de 10.015 mV/ms⁻², verifica-se que se está com uma amplitude de vibração de 10 ms⁻² (1 g) (Exemplo 1); pode ainda determinar-se a sensibilidade do acelerómetro do cliente (Exemplo 2).

$$Amplitude(ms^{-2}) = \frac{100.156(mV)}{10.015\left(\frac{mV}{ms^{-2}}\right)} = 10 ms^{-2} \quad [Exemplo 1]$$

$$Sensibilidade \left(\frac{mV}{ms^{-2}} \right) = \frac{10.0939(mv)}{\left[\frac{100.156(mV)}{10.015 \left(\frac{mV}{ms^{-2}} \right)} \right]} = 1.0093 mV/ms^{-2} \quad [\text{Exemplo 2}]$$

Então, a sensibilidade do acelerómetro do cliente, a 160 Hz e amplitude de 10 ms^{-2} , é de 1.0093 mV/ms^{-2} . Depois vai-se fazendo o estudo da sensibilidade em resposta de frequência e amplitude, tal como atrás descrito.

Torna-se mais prático usar este *software* do que o multímetro, uma vez que este é mais visual. Tem outras vantagens, como verificar se existem outras ondas, com amplitudes e frequências diferentes a ocorrem. No *software* pode escolher-se ler o valor da onda da frequência desejada, o que no multímetro não acontece. Este apenas dá um valor, que é o de maior amplitude, independentemente da frequência.

4.6 Diferentes sistemas de medição de vibração

Como atrás descrito, o ISQ tem uma grande variedade de clientes, que medem a vibração com diferentes objetivos de estudo. Como tal, à medida que os objetivos de estudo variam, também os equipamentos de medição vão variar.

No laboratório são realizadas calibrações a qualquer equipamento de medição de vibração, dentro das gamas de frequência e amplitude possíveis.

Para a realização de calibração de todo o sistema de medição de vibração, como a leitura é realizada no equipamento, é necessário fazer um estudo prévio sobre este. Cada equipamento tem a sua forma de funcionar e, como tal é necessário estudar o equipamento por forma a conseguir configurá-lo para a realização da calibração.

Nos sistemas onde é possível atualizar a sensibilidade do acelerómetro, primeiro começa-se por determinar a sensibilidade deste, para depois a colocar no equipamento. De seguida, realiza-se uma calibração de resposta em amplitude e frequência, com as leituras realizadas no equipamento do cliente.

Resumindo, através do padrão controla-se a frequência e amplitude de vibração; depois, lê-se o valor que dá no equipamento do cliente, que é dado pelo seu próprio acelerómetro. Seguidamente, determina-se o erro que acontece em cada frequência e amplitude, através do valor esperado.

Os equipamentos podem dar valores em diferentes tipos de unidades (mV ; g ; ms^{-2} ; mm/s), dependendo do que melhor se aplica para o estudo da vibração. No laboratório configura-se o equipamento para ler os valores na unidade em que o cliente trabalha.

Para exemplificar melhor, a Figura 63 ilustra um exemplo de aplicação; neste caso, o equipamento estava a realizar a medição em g .

Amplitude real. Determinado pelo valor lido do acelerómetro padrão

Valor de referência / 9.81

Erro determinado em relação à informação o fabricante

Acelerómetro - Sensibilidade de vibração

Aceleração	Sens. Acel. padrão	Frequência	Lecturas (mV)		Sensibilidade	Sensibilidade	Sensibilidade	Erro
			Padrão	Cliente				
10,00 m/s^2	10,015 mV/ms	159,2 Hz	100,17	97,217	9,720 mV/ms^2	95,32 mV/g	9,72 $mV/mm/s$	2,8 %

Sensibilidade 95,320

Cadeia de medição - Resposta em amplitude

Frequência	Valor aplicado	Factor acelerómetro	Valor no multimetro	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento	Erro
159,2 Hz	2,00 m/s^2	10,015	20,05 mV	2,002 m/s^2	0,204 g	0,206 g	0,002 g
159,2 Hz	5,00 m/s^2	10,015	50,25 mV	5,018 m/s^2	0,512 g	0,515 g	0,003 g
159,2 Hz	7,00 m/s^2	10,015	70,16 mV	7,006 m/s^2	0,714 g	0,720 g	0,006 g
159,2 Hz	9,00 m/s^2	10,015	90,13 mV	9,000 m/s^2	0,918 g	0,925 g	0,007 g
159,2 Hz	20,0 m/s^2	10,015	200,32 mV	20,00 m/s^2	2,04 g	2,05 g	0,01 g
159,2 Hz	50,0 m/s^2	10,015	500,64 mV	49,99 m/s^2	5,10 g	5,13 g	0,03 g
159,2 Hz	70,0 m/s^2	10,015	700,89 mV	69,98 m/s^2	7,14 g	7,19 g	0,05 g
159,2 Hz	90,0 m/s^2	10,015	900,29 mV	89,89 m/s^2	9,17 g	9,23 g	0,06 g

Valor lido no equipamento o cliente

Valor lido - Valor esperado

Cadeia de medição - Resposta em frequência

Frequência	Valor aplicado	Factor acelerómetro	Valor no multimetro	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento	Erro
20 Hz	9,00 m/s^2	9,974	89,79 mV	9,002 m/s^2	0,918 g	0,944 g	0,026 g
40 Hz	9,00 m/s^2	9,989	89,95 mV	9,005 m/s^2	0,918 g	0,937 g	0,019 g
80 Hz	9,00 m/s^2	10,004	90,09 mV	9,005 m/s^2	0,918 g	0,922 g	0,004 g
160 Hz	9,00 m/s^2	10,015	90,13 mV	8,999 m/s^2	0,918 g	0,918 g	0,000 g
200 Hz	9,00 m/s^2	10,017	90,15 mV	8,999 m/s^2	0,918 g	0,919 g	0,001 g
500 Hz	9,00 m/s^2	10,026	90,24 mV	9,000 m/s^2	0,918 g	0,913 g	-0,005 g
1000 Hz	9,00 m/s^2	10,035	90,32 mV	9,000 m/s^2	0,918 g	0,902 g	-0,016 g

Figura 63 – Exemplo de uma folha de Excel na calibração de um sistema de medição de vibração

A Tabela 6 apresenta alguns exemplos de equipamentos que já foram calibrados no laboratório do ISQ.

Tabela 6 – Alguns exemplos de equipamentos de medição de vibração

Imagem	Nome
	<p>Sismógrafo</p>
	<p>TIR Sine Vibration Controller Type SVC01</p>
	<p>CSI 2130 Machinery Health Analyzer</p>
	<p>Instantel Minimate Blaster</p> <p>Sismógrafo</p>

	<p>Integration Vibration Meter Type 2513 Bruel & Kjaer</p>
	<p>Sound & Vibration Data Logger SVAN 948</p> <p>Equipamento de medição de vibração humana</p>

4.7 Calibração de equipamentos de vibração do corpo humano

A vibração pode ser um incómodo, uma fonte de prazer ou a causa de uma dor. Se um movimento oscilatório pode provocar aborrecimento, desconforto, interferência em atividades, prejudicar a saúde ou criar enjojo, isso vai depender de muitos fatores intrínsecos ao movimento, as características da pessoa, e outros aspetos do ambiente (Griffin, 1990).

O corpo humano sofre o efeito das vibrações mecânicas a que está exposto no dia a dia, como no carro, a caminhar, ou em alguns casos nas atividades profissionais.

Esta exposição às vibrações pode causar algum desconforto ao ser humano, como, por exemplo, aos operadores de máquinas, ou motoristas agrícolas ou de veículos pesados. É feito, então, um estudo do efeito da exposição do corpo humano às vibrações.

Existem dois tipos de vibrações no corpo humano que, sendo mecanicamente diferentes, são estudados em separado:

- *Vibrações no corpo inteiro* – as vibrações são transmitidas ao corpo em toda a sua globalidade, geralmente nas superfícies de suporte, como pés, costas, etc.
- *Vibrações no conjunto mão-braço* – as vibrações são transmitidas às mãos e braços. Este tipo de vibração tende a ocorrer, predominantemente, nas pessoas que trabalham em atividades, como operadores de ferramentas manuais²⁴.

O movimento harmónico simples ocorre quando há uma oscilação sinusoidal numa única frequência; já os movimentos mais comuns encontrados no dia a dia, contêm vibração em mais do que uma frequência. Frequentemente, as exposições humanas à vibração envolvem algum movimento que ocorre em toda a gama de frequências (Griffin, 1990).

Uma vez que o corpo humano é um sistema amortecido, quando este sofre uma excitação à sua frequência natural, este irá vibrar numa faixa de frequência e não numa só. Existem partes do corpo humano mais sensíveis do que outras, sendo necessário existir uma ponderação de frequência, onde se atribui maior peso a certas frequências de vibração, dependendo da sensibilidade da zona onde está a ocorrer a vibração.

Segundo²⁴, as vibrações que mais afetam o corpo humano, como um todo, estão na gama de 1 Hz a 80 Hz, enquanto que as de maior interesse para o sistema mão-braço, são as da gama entre 5 Hz e 1500 Hz.

No laboratório de metrologia de vibração do ISQ é feita a calibração de equipamentos de medição de vibração do corpo humano através dos requisitos e especificações da norma ISO 8041:2017.

4.7.1 Norma ISO 8041:2017

Nesta seção é feita uma abordagem resumida da Norma ISO 8041:2017, a qual tem por objetivo especificar o desempenho e limites de tolerância para equipamentos de medição de vibração no corpo humano, assim como os requisitos para validação de padrões, processo de calibração e confirmação *in situ*.

²⁴ Manual de curso de vibrações no corpo humano, Aroeira, C. (2004). *VIBRAÇÕES NO CORPO HUMANO*. (G. A. Igeniero, Ed.)

Os primeiros quatro capítulos da norma falam das referências normativas, termos e definições, bem como referências às condições ambientais para realizar as medições de vibração.

Do capítulo quinto ao décimo são descritas as características e especificações de desempenho.

O capítulo 11 faz uma introdução aos testes e calibração. Do Capítulo 12 ao 15 são definidas as características e especificações de cada teste a realizar para avaliar o nível de desempenho. A norma termina com diversos anexos normativos e informativos.

Os equipamentos de vibração especificados neste documento destinam-se à medição de vibração para uma ou mais aplicações, como as seguintes:

- Vibração transmitida manualmente (vide ISO 5349-1);
- Vibração corpo inteiro (vide ISO 2631-1, ISO 2631-2 e ISSO 2631-4);
- Vibração corpo inteiro baixa frequência, com uma frequência com um alcance entre 0.1Hz para 0.5Hz (vide ISO 2631-1).

Existem três níveis de desempenho referidos nesta norma:

1) *Avaliação de padrões e validação de instrumentos pontuais*

○ *Avaliação de padrões*

É um teste (direcionado aos fabricantes) completo aos equipamentos em relação às especificações definidas na norma. É usado para teste de tipo de produto ou aprovação de modelo de uma série de produção de instrumentos de medição de vibração. Tem por objetivo demonstrar que um projeto de um instrumento pode corresponder às especificações definidas neste documento.

○ *Validação de instrumentos pontuais*

É um conjunto limitado de testes de um sistema de medida de vibração (destinado a utilizadores de laboratórios ou utilizadores de pesquisas) em relação às especificações de desempenho requeridas neste documento. É um conjunto limitado de testes para demonstrar que um sistema individual de medição de vibrações está em conformidade com as especificações relevantes definidas neste documento.

2) *Processo de calibração*

É um conjunto intermédio de testes (direcionada a fabricantes e utilizadores) designados para garantir que um instrumento permaneça dentro das especificações de desempenho exigidas. Estes testes devem ser realizados periodicamente (por exemplo, antes ou no momento da compra e, pelo menos, a cada dois anos) para verificar se o desempenho permanece dentro das especificações definidas na norma, ou, caso exista alguma modificação (por exemplo, uso de outro transdutor) ou reparação que possa afetar o desempenho do instrumento.

3) *Confirmações in situ*

É um nível mínimo de testes (direcionada aos utilizadores) impostos para indicar que um instrumento funcionará dentro das especificações de desempenho exigidas. É uma forma de indicar que um instrumento de medição de vibração provavelmente funcionará dentro da especificação de desempenho exigida.

Cada um destes testes é utilizado para avaliar as características e especificações de desempenho, assim como dos requisitos.

A tabela 7 apresenta um resumo da (ISO 8041, 2017), dando a conhecer as características e requisitos que são necessários para cada nível de desempenho, assim como os testes que são necessários realizar (tanto a nível mecânico, como elétrico).

Tabela 7 - Resumo das características de desempenho e requisitos de teste

Características e Especificações	Tipo de Teste		Níveis de desempenho			
	Elétrico	Mecânico	Avaliação de padrões	Validação de instrumentos pontuais	Verificação periódica	Confirmações <i>in situ</i>
Características gerais			x	x	x	x
<i>Display</i> do sinal de magnitude			x	x		
Saída elétrica	x		x			

Sensibilidade de vibração		x	x	x	x	x
Exatidão da indicação na frequência de referência sob condições de referência	x		x	x		
Ponderação de frequência e respostas de frequências	x	x	x	x	x	
Linearidade da amplitude	x	x	x	x	x	
Ruído do instrumento		x	x	x		
Resposta de explosão de sinal	x		x			
Indicação de sobrecarga	x		x	x		
Indicação abaixo da faixa	x	x	x			
Média de tempo	x		x			
Correndo aceleração R.M.S.	x		x			
<i>Reset</i>			x			
Cronometrando instalações			x	x		
<i>Electrical cross-talk</i>	x		x	x		
<i>Outputs eixos combinados</i>	x		x			

Caraterísticas dos transdutores de vibração		x	x			
Fonte de energia			x			
Montagem			x			
Critérios ambientais e eletromagnéticos			x			
Provisão para uso com dispositivos auxiliares	x		x			
Marcação de instrumentos			x	x	x	
Documentação de instrumentos			x	x	x	

Na norma, cada uma das características e especificações são explicadas, inicialmente de forma individual, e de seguida, é explicado como se procede para a realização dos testes e calibração a serem realizados para cada um dos três níveis de desempenho acima descritos.

5 ANÁLISE DE CASO PRÁTICO

Nesta seção é descrita uma análise prática de uma calibração de um sismógrafo realizada no Laboratório do ISQ.

O equipamento em questão é da marca Vibra-Tech e o modelo MultiSeis V. Neste modelo o acelerômetro encontra-se dentro do equipamento, não sendo utilizados cabos. É colocado o próprio equipamento em cima dos *Shakers* que, depois de vibrarem, são lidos os valores no próprio equipamento. Como o acelerômetro é triaxial, os testes são feitos em todos os eixos, usando para isso, tanto o shaker vertical como o horizontal.

Como os valores são lidos no equipamento do cliente, não se pode fazer uma calibração automática, usando, assim, a segunda cadeia de medição para a calibração, fazendo-o de forma manual. O acelerômetro de trabalho utilizado para a calibração é o PCB 301A11.

1º Passo – Abrir em Excel uma folha de cálculo de forma a obter o comportamento do sismógrafo, tanto na resposta em amplitude, como em frequência (Figuras 64 e 65).

Resposta em amplitude (16Hz)

Canal	Valor no multimetro	Frequência	Sensibilidade acelerômetro Padrão (mV/m/s ²)	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento (Peak)	Erro
Transversal [1]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
Longitudinal [3]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
Vertical [2]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s

Figura 64 - Exemplo de uma folha de Excel para o estudo de resposta em amplitude num sismógrafo

Resposta em frequência

Canal	Valor no multimetro	Frequência	Factor do acelerómetro Padrão (mV/m/s ²)	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento	Erro
Transversal [1]	1,76 mV	1 Hz	9,892	0,178 m/s ²	40,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	3,53 mV	2 Hz	9,92	0,356 m/s ²	40,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,96 mV	5 Hz	9,949	1,002 m/s ²	45,1 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,960	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,002 m/s ²	22,6 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	10,00 mV	16 Hz	9,971	1,003 m/s ²	14,1 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	10,01 mV	32 Hz	9,983	1,003 m/s ²	7,05 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,02 mV	64 Hz	10,00	1,002 m/s ²	3,52 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,00	1,001 m/s ²	2,82 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
Longitudinal [3]	1,76 mV	1 Hz	9,892	0,178 m/s ²	40,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	3,53 mV	2 Hz	9,92	0,356 m/s ²	40,0 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,97 mV	5 Hz	9,949	1,002 m/s ²	45,1 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,96	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,003 m/s ²	22,6 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	10,00 mV	16 Hz	9,971	1,003 m/s ²	14,1 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	10,01 mV	32 Hz	9,983	1,002 m/s ²	7,05 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,02 mV	64 Hz	9,999	1,002 m/s ²	3,53 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,004	1,002 m/s ²	2,82 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
Vertical [2]	9,98 mV	5 Hz	9,949	1,003 m/s ²	45,2 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,960	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,003 m/s ²	22,6 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	9,98 mV	16 Hz	9,971	1,001 m/s ²	14,1 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,0 mm/s
	10,00 mV	32 Hz	9,983	1,002 m/s ²	7,05 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,03 mV	64 Hz	9,999	1,003 m/s ²	3,53 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,004	1,002 m/s ²	2,82 mm/s-pk	<input type="text"/>	0,00 mm/s



Figura 65 - Exemplo de uma folha de Excel para o estudo de resposta em frequência num sismógrafo

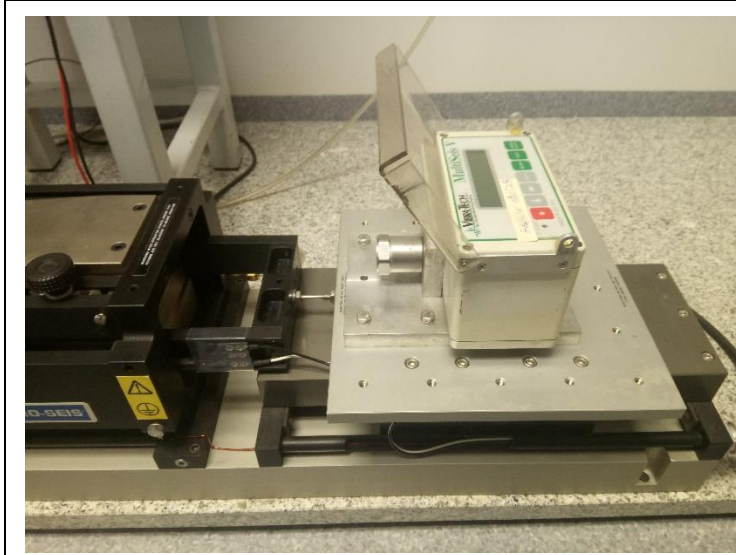
No caso deste equipamento, a medida da amplitude é lida em mm/s ; então, são feitos cálculos para o valor, na mesma unidade, através da amplitude de referência em m/s^2 . No primeiro caso, onde se faz o estudo em amplitude, fixa-se um valor de frequência a $16 Hz$ e varia-se em amplitude, desde os $0.071 m/s^2$ até $3.554 m/s^2$. No estudo do comportamento em frequência, fixa-se o valor da amplitude a, aproximadamente, $1 m/s^2$ e varia-se a frequência, desde o $1 Hz$ até $80 Hz$. No caso dos sismógrafos, estes são, normalmente, os valores estudados, pois é nestas gamas de frequência e amplitude em que eles fazem as suas medições.

As frequências de 1 e $2 Hz$ só são medidas na posição longitudinal e transversal, pois nessas é utilizado o shaker vertical que consegue vibrar nessas amplitudes. Já no shaker vertical, o mínimo de frequência que se consegue medir é de $5 Hz$.

2º Passo – Fazer a montagem do sismógrafo em cima do shaker na posição da qual se quer fazer o estudo (Tabela 8).

Tabela 8 – Montagens do sismógrafo nos vários eixos

 A photograph showing a vertical shaker system. A black cylindrical shaker is mounted on a base. On top of the shaker, a white seismograph unit is mounted vertically. The seismograph has a clear protective cover and a green label with text and a left-pointing arrow. The setup is in a laboratory environment.	<p>Montagem Vertical</p>
 A photograph showing a longitudinal shaker setup. A black shaker unit with a label that reads 'APB ELECTRO-SEES' is mounted on a grey base. A white seismograph unit is mounted horizontally on top of the shaker. The setup is on a light-colored floor.	<p>Montagem Longitudinal</p>



Montagem Transversal

Depois de montado o sismógrafo e o acelerómetro padrão é feito o estudo em resposta em frequência e amplitude.

3º Passo – Estudo do comportamento do sismógrafo.

O acelerómetro padrão dá a informação de qual a frequência e amplitude em que está a ocorrer a vibração no shaker. Quando se define a amplitude e frequência desejada, depois é só ler o valor que é dado no sismógrafo. Através do valor lido neste e do valor esperado (valor teórico), é possível determinar o erro e, assim, o comportamento do equipamento, tanto em amplitude, como em frequência (Figuras 66 e 67).

Resposta em amplitude (16Hz)

Canal	Valor no multimetro	Frequência	Sensibilidade acelerômetro Padrão (mV/m/s ²)	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento (Peak)	Erro
Transversal [1]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	1,02 mm/s-pk	0,02 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	2,03 mm/s-pk	0,03 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	5,02 mm/s-pk	0,02 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	9,9 mm/s-pk	-0,10 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	19,8 mm/s-pk	-0,20 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	50,8 mm/s-pk	0,80 mm/s
Longitudinal [3]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	1,08 mm/s-pk	0,08 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	2,10 mm/s-pk	0,10 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	5,21 mm/s-pk	0,21 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	10,0 mm/s-pk	0,00 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	20,3 mm/s-pk	0,30 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	51,8 mm/s-pk	1,80 mm/s
Vertical [2]	0,709 mV	16 Hz	9,971	0,071 m/s ²	1,00 mm/s-pk	1,08 mm/s-pk	0,08 mm/s
	1,418 mV	16 Hz	9,971	0,142 m/s ²	2,00 mm/s-pk	2,16 mm/s-pk	0,16 mm/s
	3,544 mV	16 Hz	9,971	0,355 m/s ²	5,00 mm/s-pk	5,40 mm/s-pk	0,40 mm/s
	7,088 mV	16 Hz	9,971	0,711 m/s ²	10,0 mm/s-pk	10,9 mm/s-pk	0,90 mm/s
	14,18 mV	16 Hz	9,971	1,422 m/s ²	20,0 mm/s-pk	21,3 mm/s-pk	1,30 mm/s
	35,44 mV	16 Hz	9,971	3,554 m/s ²	50,0 mm/s-pk	54,9 mm/s-pk	4,90 mm/s

Figura 66 – Folha de Excel preenchida com erro calculado para determinar o comportamento do sismógrafo em amplitude

Resposta em frequência

Canal	Valor no multimetro	Frequência	Factor do acelerómetro Padrão (mV/m/s ²)	Valor de referência	Valor esperado	Valor do equipamento	Erro
Transversal [1]	1,76 mV	1 Hz	9,892	0,178 m/s ²	40,0 mm/s-pk	0	0,0 mm/s
	3,53 mV	2 Hz	9,92	0,356 m/s ²	40,0 mm/s-pk	37,6	-2,4 mm/s
	9,96 mV	5 Hz	9,949	1,002 m/s ²	45,1 mm/s-pk	44,7	-0,4 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,960	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	29,5	1,3 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,002 m/s ²	22,6 mm/s-pk	23,4	0,8 mm/s
	10,00 mV	16 Hz	9,971	1,003 m/s ²	14,1 mm/s-pk	14,2	0,1 mm/s
	10,01 mV	32 Hz	9,983	1,003 m/s ²	7,05 mm/s-pk	6,73	-0,3 mm/s
	10,02 mV	64 Hz	10,00	1,002 m/s ²	3,52 mm/s-pk	3,37	-0,2 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,00	1,001 m/s ²	2,82 mm/s-pk	2,79	0,0 mm/s
Longitudinal [3]	1,76 mV	1 Hz	9,892	0,178 m/s ²	40,0 mm/s-pk	0	0,0 mm/s
	3,53 mV	2 Hz	9,92	0,356 m/s ²	40,0 mm/s-pk	37,6	-2,4 mm/s
	9,97 mV	5 Hz	9,949	1,002 m/s ²	45,1 mm/s-pk	43,7	-1,4 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,96	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	29,5	1,3 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,003 m/s ²	22,6 mm/s-pk	23,1	0,5 mm/s
	10,00 mV	16 Hz	9,971	1,003 m/s ²	14,1 mm/s-pk	14,5	0,4 mm/s
	10,01 mV	32 Hz	9,983	1,002 m/s ²	7,05 mm/s-pk	7,11	0,1 mm/s
	10,02 mV	64 Hz	9,999	1,002 m/s ²	3,53 mm/s-pk	3,56	0,0 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,004	1,002 m/s ²	2,82 mm/s-pk	2,86	0,0 mm/s
Vertical [2]	9,98 mV	5 Hz	9,949	1,003 m/s ²	45,2 mm/s-pk	48,8	3,6 mm/s
	9,98 mV	8 Hz	9,960	1,002 m/s ²	28,2 mm/s-pk	30,5	2,3 mm/s
	9,99 mV	10 Hz	9,965	1,003 m/s ²	22,6 mm/s-pk	24,6	2,0 mm/s
	9,98 mV	16 Hz	9,971	1,001 m/s ²	14,1 mm/s-pk	15,2	1,1 mm/s
	10,00 mV	32 Hz	9,983	1,002 m/s ²	7,05 mm/s-pk	7,11	0,1 mm/s
	10,03 mV	64 Hz	9,999	1,003 m/s ²	3,53 mm/s-pk	3,56	0,0 mm/s
	10,02 mV	80 Hz	10,004	1,002 m/s ²	2,82 mm/s-pk	2,86	0,0 mm/s

Figura 67 - Folha de Excel preenchida com erro calculado para determinar o comportamento do sismógrafo em frequência

4º Passo – Por fim é feito um certificado de calibração para enviar ao cliente.

Após a calibração aos equipamentos são realizados os respetivos cálculos de incertezas culminando num certificado de calibração que depois é utilizado pelo cliente para efetuar as suas medições.

6 CONCLUSÕES

No presente relatório foi abordada a “Gestão de um Laboratório de calibração de analisadores de vibração”, sendo referidos temas, tais como a metrologia, a vibração, analisadores de vibração e a calibração de acelerómetros. Também foi apresentada uma vertente prática do que foi realizado ao longo do estágio, descrevendo o laboratório, os seus equipamentos e a forma de realizar as calibrações.

Com este estágio e relatório foi possível perceber a importância da metrologia no quotidiano e nos atos de engenharia, bem como a importância da análise de vibrações em várias áreas de estudo, como a manutenção de condição, higiene e segurança no trabalho, estudos geológicos, etc. Pode inferir-se que sem a metrologia e a calibração de sensores, as medições realizadas não seriam confiáveis, podendo levar a resultados indesejados e prejudiciais em vários níveis.

O estágio cumpriu todos os objetivos inicialmente propostos, designadamente o conhecimento holístico do funcionamento de um laboratório de calibração de sensores de vibração.

Este estágio e relatório foram particularmente importantes para a valorização do autor, designadamente na compreensão e aprofundamento do tema, além de ter permitido desenvolver competências técnicas, de investigação, organização e comunicação de informação.

Adicionalmente, o estágio permitiu ao autor abrir novos horizontes no que concerne à importância da metrologia nos mais diversos setores de atividade e, por consequência, no potencial de investigação que esta vertente de conhecimento representa e, por consequência, das oportunidades de futuro que abre ao autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, M. F. (2003). *ABC Da Metrologia Industrial*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Azevedo, M. D. da C. (2013). *Caracterização de um acelerómetro polimérico piezoresistivo*. Universidade do Minho. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1063/1.872368>
- Bottega, W. J. (2011). *Engineering Vibrations*. Group, Taylor & Francis.
- Braz, J. F. F. (2015). *Conceção e Validação de uma Mesa de Vibração para a Calibração de Acelerómetros*. Universidade Nova de Lisboa.
- Bruel & Kjaer. (1982). *Measuring of vibration*.
- Cabral, P., Sousa, C., Filipe, E., Couto, P., & Girão, P. (2015). *A Metrologia como ferramenta transversal da Engenharia*. Lisboa.
- Castro, A. I. A. (2015). *Implementação de um Laboratório de Implementação de um Laboratório de Metrologia Elétrica*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Costa, D. A. G. (2017). *Técnicas Avançadas de Análise de Vibração no âmbito do Controlo de Condição Técnicas Avançadas de Análise de Vibração no âmbito do Controlo de Condição*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Flores, P., & Marques, F. (2018). *Sobre a Metrologia*.
- National Instruments. (2017). *Guia de engenharia para medições de alta exatidão com sensores*.
- PCB Piezotronics Vibration Division. (2002). *Model M352C68 ICP ® Accelerometer Installation and Operating Manual*. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000004311.04226.29>
- Pereira, R. M. R. (2009). *Análise De Dados De Vibração: Contributo para a definição do estado de condição*. Universidade Nova de Lisboa.
- Serrano, L. M. V, Alcobia, C. J. O. P. J., Mateus, M. L. O. S., & Silva, M. C. G. (2004). *Sistemas de Aquisição , Processamento e Armazenamento de Dados*. *Sociedade Portuguesa de Metrologia (SPMet)*, 1–15.
- Silva, T. M. de O. (2010). *Avaliação da transmissão de vibração num edifício existente*. Instituto Superior Técnico.

Sousa, C. (2010). *Metrologia Notas Históricas*.

Stanford Research Systems. (2008). *DS360 Ultra Low Distortion Function Generator - Operating Manual Programming Reference* . 1290-D Reamwood Avenue. <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/DS360m.pdf>, acessado em 13-05-2019

ANEXOS


ANEXO A – Folha de dados de acelerómetros padrão do laboratório de vibração do ISQ (Bruel & Kjaer Modelos 8305 e 8305-001)

Specifications – Accelerometer Types 8305 and 8305-001

Type No.			8305	8305-001
General				
Sensitivity ($\pm 10\%$)	after Sept. 1, 2016	$\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$ ($\mu\text{C}/\text{g}$)	0.110 (1.08)	
	before Sept. 1, 2016	$\mu\text{C}/\text{ms}^{-2}$ ($\mu\text{C}/\text{g}$)	0.125 (1.23)	
Frequency Range* †	Amplitude	$\pm 10\%$	0.2 to 10000	
		$\pm 2\%$	0.2 to 5000	
	Phase‡	$\pm 1^\circ$	0.2 to 10000	
Mounted Resonance Frequency †		kHz	≥ 40	
Transverse Sensitivity		%	≤ 2	
Electrical				
Insulation Resistance		T Ω	≥ 1	
Capacitance (typical)		pF	70	
Signal Ground			Case grounded	
Environmental				
Operating Temperature Range		$^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{F}$)	-74 to +200 (-101 to +392)	
Base Strain Sensitivity (at 250 $\mu\epsilon$)	Top	$\text{ms}^{-2}/\mu\epsilon$ ($\text{g}/\mu\epsilon$)	0.01 (0.001)	–
	Base		0.003 (0.0003)	0.01 (0.001)
Acoustic Sensitivity (154 dB SPL, 2 to 100 Hz)		ms^{-2} (mg)	0.008 (0.8)	
Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF)		$\text{ms}^{-2}/^\circ\text{C}$ ($\text{g}/^\circ\text{F}$)	0.5 (0.03)	
Magnetic Sensitivity (50 Hz, -0.03 T)		ms^{-2}/T ($\mu\text{g}/\text{kG}$)	1 (10)	
Max. Operating Sinusoidal Vibration (peak)		g	1000	
Max. Non-destructive Shock (peak, half sine, 1 ms minimum duration)		ms^{-2}	10000	
		g	1000	
Mechanical				
Connector			Miniature coaxial, 10–32 UNF-2A	
Piezoelectric Sensing Element			PZ 100	
Construction			Inverted compression	Compression
Housing Material			Stainless steel, ANSI 316L	
Sealing			Hermetic	
Weight (excluding cable)		g (oz)	40 (1.4)	26 (0.92)
Mounting				
Mounting Torque		Nm	0.5 to 3.5 (recommended: 2.0)	

ANEXO B – Folha de dados de acelerómetro padrão do laboratório de vibração do ISQ (PCB Modelo 301A-11)

	ENGLISH	SI	
Performance			
Sensitivity (± 2.0 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)	
Measurement Range	± 50 g pk	± 490 m/s ² pk	
Frequency Range (± 5 %)	0.5 to 10,000 Hz	0.5 to 10,000 Hz	
Frequency Range (± 10 %)	0.3 to 14,000 Hz	0.3 to 14,000 Hz	
Frequency Range (± 3 dB)	0.2 to 20,000 Hz	0.2 to 20,000 Hz	
Resonant Frequency	≥ 35 kHz	≥ 35 kHz	
Broadband Resolution	0.004 g rms	0.039 m/s ² rms	[1]
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	[2]
Transverse Sensitivity	≤ 3 %	≤ 3 %	
Environmental			
Overload Limit	± 5000 g pk	± 49,050 m/s ² pk	
Temperature Range	-65 to 250 °F	-54 to 121 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Electrical			
Excitation Voltage	23 to 30 VDC	23 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm	
Output Bias Voltage	11 to 17 VDC	11 to 17 VDC	
Discharge Time Constant	2.0 to 5.0 sec	2.0 to 5.0 sec	
Settling Time (within 10% of bias)	<12.0 sec	<12.0 sec	
Spectral Noise (10 Hz)	65 µg/√Hz	638 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise (100 Hz)	20 µg/√Hz	196 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Spectral Noise (1 kHz)	15 µg/√Hz	147 (µm/s ²)/√Hz	[1]
Physical			
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Size (Hex x Height)	1 3/16 in x 1 1/2 in	30.2 mm x 38.1 mm	
Weight	6.2 oz	176 gm	[1]
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting Thread (Shaker Mount)	1/4-28 Female	1/4-28 Female	
Mounting Thread (Unit Under Test Mount)	10-32 Female	10-32 Female	



[3]

Typical Sensitivity Deviation vs Temperature

