

## CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ACÚSTICA E VIBRAÇÕES

**PACS:** 43.58.Vb

Carlos Aroeira<sup>(1)</sup>; Carlos César Rodrigues<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Coordenador CT28/SC4, Sesimbra; Portugal; Tel: (+351) 928058676; e-mail: [carlosaroeira123@gmail.com](mailto:carlosaroeira123@gmail.com)

<sup>(2)</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1; 1959-007 Lisboa; Portugal; Tel:(+351) 218317000; e-mail: [carlos.rodrigues@isel.pt](mailto:carlos.rodrigues@isel.pt)

**Palavras-Chave:** Calibração, verificação, sensores, acústica, vibrações

### ABSTRACT

The acoustics and vibrations physical phenomena have several common characteristics.

However, there are significant differences between the methodologies followed in acoustics and in vibrations, namely in terms of measurement, analysis, monitoring and control.

These differences are evidently embodied by the procedures required in terms of the calibration of the measurement and control systems used in acoustics and the measurement and control systems used in vibrations.

The differences above mentioned mainly results of, (i) the high stability and superior robustness of the sensors used in vibrations, compared to the sensors used in acoustics and (ii) the greater demand in terms of the normative and legislative requirements applicable to acoustics when compared with those applicable to vibrations.

In this paper, the authors present and develop, in a structured way, several considerations about the mentioned differences.

### RESUMO

Os fenómenos físicos inerentes à acústica e às vibrações, têm diversas características comuns.

Contudo, existem diferenças significativas entre as metodologias seguidas em acústica e em vibrações, designadamente em termos de medição, análise, monitorização e controlo.

Estas diferenças surgem consubstanciadas, de modo evidente, nos procedimentos exigidos em termos da calibração dos sistemas de medição e controlo utilizados em acústica e dos sistemas de medição e controlo utilizados em vibrações.

As diferenças acima citadas têm como factores determinantes, (i) a elevada estabilidade e a superior robustez dos sensores utilizados em vibrações, face aos sensores utilizados em acústica e (ii) a maior exigência em termos dos requisitos normativos e legislativos aplicáveis em acústica, face aos aplicáveis em vibrações.

No presente artigo, os autores apresentam e desenvolvem, de modo estruturado, diversas considerações sobre as referidas diferenças.

## **1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA**

Começemos por, de modo sucinto, descrever a evolução ao longo dos tempos, dos sensores utilizados em acústica e em vibrações.

### **1.1. Sensores de Acústica**

O primeiro microfone que permitiu a telefonia vocal adequada foi o microfone de carbono (de contacto solto). Este microfone foi desenvolvido independentemente por David Edward Hughes, em Inglaterra e por Emile Berliner e Thomas Edison, nos EUA. Embora Edison tenha recebido a primeira patente (após uma longa disputa legal) em meados de 1877, Hughes já havia demonstrado a eficácia do seu microfone perante diversas testemunhas alguns anos antes, razão pela qual a maioria dos historiadores atribui a David Hughes [1] a sua invenção.

O microfone de carbono é o protótipo directo dos microfones actuais, tendo sido fundamental no desenvolvimento da telefonia, da transmissão e das indústrias fonográficas.



Figura 1 – Microfone de carbono

Anos mais tarde, George Washington Pierce (1872-1956), foi quem primeiro ligou um microfone de carbono a um galvanómetro, possibilitando, assim, a medição eléctrica de fenómenos sonoros. O microfone de carbono, apesar de extremamente sensível a pequenas mudanças de temperatura e de humidade, tornou obsoletos os instrumentos mecânicos até então existentes [2].

Em 1916, Edward C. Wente (1889-1972), inventou o microfone electrostático ou “de condensador”, ao descobrir que quando uma membrana carregada se encontra a vibrar, a capacidade estabelecida entre esta e uma placa estacionária colocada a uma distância de 220µm, apresenta uma alteração em função da deflexão da membrana [2].

Assim, ao medir a capacidade entre a placa e a membrana não deflectida e a capacidade entre a placa e a membrana deflectida, e sendo conhecida a respectiva tensão de polarização, facilmente se poderia calibrar o sinal eléctrico obtido à saída do microfone.

### **1.2. Sensores de Vibrações**

Os primeiros detectores de movimento de que existe conhecimento são os detectores de sismos inventados na China, actualmente designados por sismógrafos.

De facto, o primeiro sismógrafo foi o inventado na China por Zhang Heng no ano de 132. Este equipamento consistia em oito esferas de bronze, cada uma sustentada pela boca de um dragão, de modo que quando ocorria um tremor de terra, por menor que fosse, a boca do dragão abria-

se e a respectiva bola caía na boca aberta de um dos oito sapos de metal que se encontravam por baixo, permitindo, assim, determinar a direcção de propagação do sismo.



Figura 2 – Sismógrafo de Zhang Heng

Mais tarde, foi sentida a necessidade de se obter a evolução temporal do sismo, a que se atribuiu a designação de sismograma.

Actualmente, a geração do sismograma pode ser efectuada de modo analógico ou de modo digital. O modo analógico consiste, por exemplo, numa caneta ligada a uma massa, marcando o movimento em um rolo de papel [3].

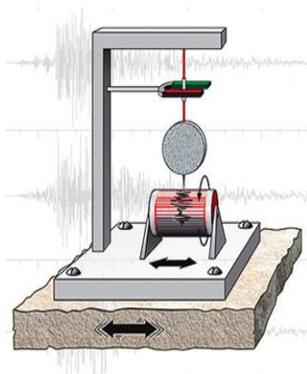


Figura 3 – Geração de um sismograma

O modo digital que é, actualmente, o mais utilizado, tem por base a voltagem gerada pelo sensor do sismógrafo que se altera com o movimento da massa, sendo posteriormente processada em computador de modo a gerar o respectivo sismograma.

O primeiro registo de um sensor de vibrações com saída em sinal eléctrico, era baseado em extensómetros [4].

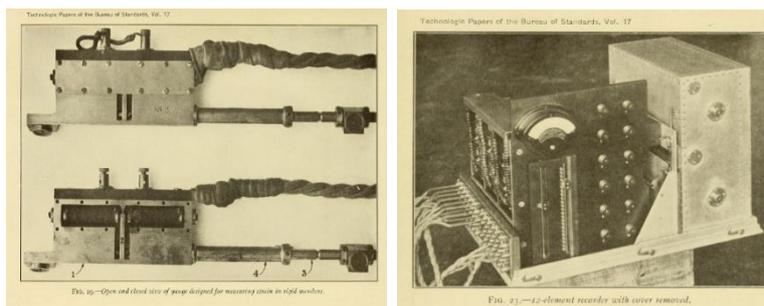


Figura 4 – Sensores (à esquerda); Registador (à direita)

Anos mais tarde (em meados de 1930), com a necessidade emergente da medição de vibrações em máquinas com espectros de frequência superiores a 200Hz, surgiram os sensores de vibrações electrodinâmicos de velocidade [5].

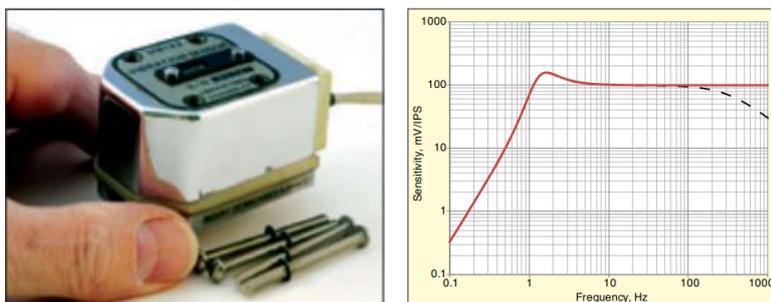


Figura 5 – Sensor de vibrações electrodinâmico de velocidade

Finalmente, surgem em 1940 os acelerómetros piezoeléctricos, dos quais o ilustrado na figura seguinte é um exemplo e que são utilizados até aos dias de hoje. Posteriormente, têm sido fabricados inúmeros tipos de sensores de vibrações com princípios de funcionamento adequados às mais distintas aplicações [6].



Figura 6 – Acelerómetro tipo 4301 da Bruel & Kjaer (1943)

## 2. CALIBRAÇÃO DE SENSORES

### 2.1. Sensores de Acústica

A calibração de microfones “de condensador” começa por ser efectuada (Edward C. Wentz) utilizando um pequeno cilindro e um pistão voltados para a membrana do microfone, sendo o pistão accionado por um motor rotativo com um curso conhecido.

O sistema acima descrito apresentava a limitação importante de apenas ser credivelmente utilizável em baixas frequências, razão pela qual, sensivelmente na mesma época, Harold D. Arnold (1883-1933) e Irving B. Crandall (1890-1927) desenvolveram um termofone que, utilizando duas tiras de folhas de ouro que vibravam quando percorridas por correntes eléctricas, permitia a calibração de microfones “de condensador” em frequências elevadas, desde que neles fosse introduzido um fluxo de hidrogénio.

Até ao início da década de 1920, a grande maioria das medições acústicas eram realizadas em espaço livre, para evitar o eventual mascaramento dos resultados por via das reflexões artificiais que pudessem ocorrer no ambiente onde se realizava a medição.

Apenas em 1941, é descrito por R. K. Cook, o método de calibração de microfones por reciprocidade, como ilustrado de modo esquemático na figura seguinte [7].

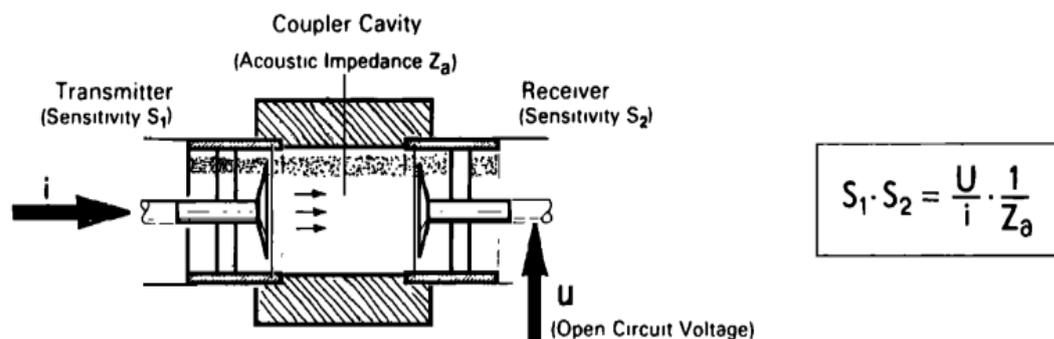


Figura 7 – Calibração de microfones por reciprocidade

Como consequência da calibração absoluta se encontrar assegurada, passou-se à fase seguinte, de importância vital, em que foram desenvolvidos os denominados calibradores de campo que permitiam a calibração da instrumentação utilizada em medições acústicas realizadas no exterior.

Estes calibradores actuam, em geral, como dispositivos de transferência para a instrumentação de campo do obtido no microfone de padrão primário, uma vez que este é extremamente preciso e se encontra calibrado através do método de calibração por reciprocidade.

Finalmente, surge o pistonfone que, permitindo a calibração absoluta, obtém o respectivo reconhecimento pela comunidade acústica internacional, pelo facto de apresentar uma estabilidade extremamente bem comprovada ao longo de vários anos de utilização.

Outros dispositivos controlados electronicamente e da mesma complexidade e fiabilidade que a restante instrumentação, são actualmente utilizados para a verificação em campo de várias respostas da cadeia de medição, de modo a garantir a não ocorrência de qualquer desajuste significativo que possa alterar o rigor das medições efectuadas e, conseqüentemente, da respectiva posterior avaliação [8].

## 2.2. Sensores de Vibrações

Não existem muitas referências históricas sobre a calibração de sensores de vibrações. Os primeiros geradores de vibrações que permitiam avaliar o sinal eléctrico à saída do sensor em análise eram dispositivos mecânicos que, à semelhança do que ocorre actualmente, geram excitações de baixa frequência.

Apenas a partir de 1940, surgem os excitadores de vibrações electrodinâmicos cuja configuração não difere muito de alguns dos modelos disponíveis actualmente [9]. A figura seguinte ilustra um calibrador de vibrações desenvolvido na década de 1960.



Figura 8 – Calibrador de vibrações KE3 da Manfred Weber (1963)

### 3. CONSTITUIÇÃO DOS SENSORES

#### 3.1. Sensores de Acústica

O microfone “de condensador” incorpora uma membrana metálica (diafragma), que constitui uma das armaduras do condensador, sendo a outra armadura do condensador constituída por uma placa metálica posterior colocada na proximidade da membrana.

Deste modo, quando um campo sonoro excita o diafragma, a capacidade do condensador formado pelo diafragma e pela placa metálica varia de acordo com a variação da pressão sonora incidente no microfone, gerando um sinal eléctrico proporcional à pressão sonora incidente.

A carga eléctrica do condensador assim constituído é obtida através de uma tensão de polarização externa aplicada entre o diafragma e a placa metálica ou, alternativamente, através das propriedades intrínsecas do material constituinte, como é o caso dos microfones pré-polarizados.

Note-se que, quando se utilizam microfones polarizados externamente, estes requerem a utilização de uma fonte de tensão de 200V, enquanto a utilização de microfones pré-polarizados requer que a respectiva alimentação seja efectuada por pré-amplificadores IEPE, que necessitam de uma fonte de corrente constante [10].



Figura 9 – Esquema de um microfone “de condensador”

Os microfones “de condensador” têm, tipicamente, diâmetro de 1, 1/2, 1/4 e 1/8 de polegada, sendo que à medida que as dimensões do diafragma aumentam, a rigidez do microfone diminui, melhorando a detecção de menores variações da pressão sonora incidente.

Por outro lado, as dimensões do diafragma do microfone “de condensador” limitam a detecção de sinais sonoro cujo espectro de frequência inclua comprimentos de onda da ordem, ou superiores, às dimensões do diafragma.

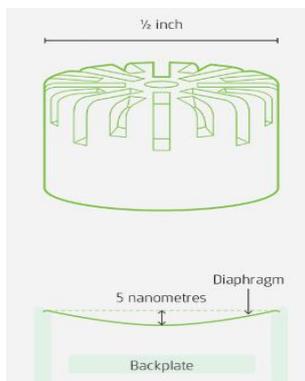


Figura 10 – Deslocamento do diafragma para um microfone “de condensador” de 1/2 de polegada (tipicamente, apenas cerca de 5nm, para uma excitação de 1Pa) [11]

Tendo em consideração que a distância entre o diafragma do condensador e a respectiva placa metálica posterior é, normalmente, da ordem dos 20µm, qualquer partícula que apresente maiores dimensões do que esta e que se encontre presente na cavidade microfónica, determinará instabilidades, designadamente quando ocorrerem mudanças de temperatura [11].

### 3.2. Sensores de Vibrações

Existem diversos tipos de sensores de vibrações, sendo o acelerómetro piezoeléctrico o mais frequentemente utilizado. Neste tipo de acelerómetros a carga eléctrica por eles gerada é proporcional à aceleração a que se encontram sujeitos.

A figura seguinte ilustra, de modo esquemático, a constituição de um acelerómetro piezoeléctrico, bem como a respectiva resposta típica no domínio da frequência.

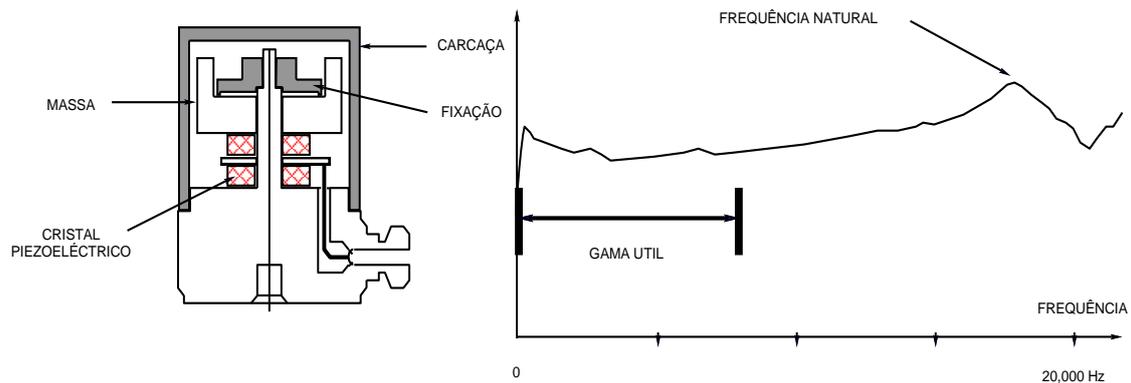


Figura 11 – Acelerómetro piezoeléctrico e respectiva resposta em frequência

Os acelerómetros piezoeléctricos apresentam inúmeras vantagens de utilização, permitindo, nomeadamente, a medição de uma vasta gama de níveis de vibração, bem como de uma extensa gama de frequências (que pode estender-se desde os centésimos de Hertz, até a algumas dezenas de kHz), para além de apresentarem uma notável robustez, não sendo, por exemplo, sensíveis a vibrações laterais.

A grande preocupação dos utilizadores de sistemas de medição de vibrações é, sem dúvida, a montagem dos respectivos sensores, pois o modo como estes se encontram ligados à estrutura em análise, influencia determinantemente os resultados obtidos.

De um modo geral, pode afirmar-se que quanto mais rígida for a ligação do sensor à estrutura, mais rigorosos serão os resultados das medições a efectuar.

Por esta razão, a montagem ideal do acelerómetro (em particular nas altas frequências) será através de um perne roscado que o fixe à estrutura em análise.

Ilustra-se na figura seguinte, a resposta típica de diferentes tipos de montagem de acelerómetros.

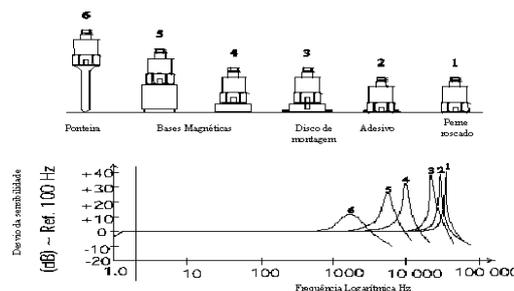


Figura 12 – Resposta em frequência de diversos tipos de montagem de acelerómetros

#### **4. RECOMENDAÇÕES DOS FABRICANTES**

Também em termos das recomendações dos fabricantes de equipamentos para utilização em acústica e em vibrações existem diferenças significativas, pois enquanto os fabricantes de sonómetros e microfones indicam a necessidade de se proceder regularmente à verificação de toda a cadeia de medição, através da utilização de, por exemplo, um calibrador de campo, os fabricantes de vibrómetros e acelerómetros raramente mencionam a necessidade da respectiva verificação e/ou calibração.

#### **5. REQUISITOS LEGAIS E REGULAMENTARES EM PORTUGAL**

##### **5.1. Ensaios de Acústica**

Em termos de metrologia legal existem, em Portugal, diversos ensaios de acústica, designadamente, no domínio do ruído ambiental, do ruído ocupacional, da acústica em edifícios e do ruído de veículos, que requerem a homologação do equipamento de medição, vulgo sonómetro, para o qual é igualmente exigido uma verificação inicial, bem como verificações anuais e verificações em campo antes e após a realização de cada medição.

##### **5.2. Ensaios de Vibrações**

Em termos de metrologia legal existem, em Portugal, apenas dois ensaios de vibrações, designadamente, no domínio das vibrações ocupacionais e das vibrações impulsivas em estruturas, aos quais é exigido a verificação anual do respectivo equipamento de medição. No que respeita à exposição dos trabalhadores às vibrações é igualmente exigida a realização de verificações em campo antes e após a realização de cada medição.

##### **5.3. Metrologia Legal**

Em Portugal, e no âmbito da metrologia legal, são realizados muito mais ensaios de acústica do que ensaios de vibrações, apesar dos requisitos legais inerentes aos primeiros serem francamente mais abrangentes e onerosos.

Contudo, fora do âmbito da metrologia legal, verifica-se exactamente o contrário, isto é, são efectuados muito mais ensaios de vibrações do que ensaios de acústica.

Desde logo, existem dezenas/centenas de técnicos que realizam, muitos vezes diariamente, medições de vibrações no âmbito do controlo de condição do funcionamento da maquinaria, designadamente em termos dos respectivos programas de manutenção preditiva.

Ainda fora do âmbito da metrologia legal, também o recurso a sistemas de monitorização permanente de vibrações em máquinas é claramente superior ao que se verifica com os sistemas de monitorização permanente de fenómenos acústicos.

De modo geral, pode afirmar-se que a realização de medições de vibrações determina uma preocupação maior com a tendência observada nos resultados obtidos, em detrimento da preocupação existente em medições acústicas com a calibração/verificação de toda a cadeia de medição.

#### **6. CONCLUSÃO**

Em conclusão, pode então referir-se que, devido a diversos factores objectivos como os referidos ao longo do presente artigo, os procedimentos de verificação/calibração dos sistemas de medição e controlo utilizados em acústica são muito mais frequentes e rigorosos, quando comparados com os procedimentos de verificação/calibração dos sistemas de medição e controlo utilizados em vibrações.

Por outro lado e de acordo com a vasta experiência dos autores do presente artigo no domínio da acústica e das vibrações, consubstanciada nos inúmeros ensaios efectuados e nos diversos projectos elaborados, a percepção dos utilizadores de instrumentação de acústica é a de que a mesma apresenta, nomeadamente ao nível dos microfones, uma sensibilidade extremamente elevada em relação às condições ambientais, bem como uma fragilidade não desprezável, o que justifica uma verificação periódica mais rigorosa em laboratório, bem como uma verificação rápida mas sistemática em campo.

Pelo contrário, os utilizadores de instrumentação de vibrações, têm a percepção de que a instrumentação associada, incluído os respectivos sensores, exhibe grande robustez, não necessitando de verificações frequentes. Em campo, a grande preocupação com a utilização de sensores de vibrações deve ser a respectiva montagem nos locais de medição pretendidos, já que se a mesma se mostrar inadequada, a precisão da medição resultará degradada e, conseqüentemente, as conclusões obtidas podem ser erróneas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Robjohns, Hugh. *A brief history of microphones*, Microphone Data Book, 2001.
- [2] <http://proaudioencyclopedia.com/the-history-of-audio-and-sound-measurement/>
- [3] <https://www.wikiwand.com/en/Seismometer>
- [4] McCollum, B.; Peters, O. S.. *A new electric telemeter*, Technologic Papers of the Bureau of Standards, Vol. 17, 1924, págs. 767 e 773.
- [5] Judd, John; Lang, George. *MB Electronics - A Nearly Forgotten Important Piece of Our History*, Sound & Vibration, 2014, pág. 14.
- [6] <https://www.bksv.com/pt/about/history>
- [7] Cook, R. K.. *Absolute pressure calibration of microphones*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 12, 1941.
- [8] Rasmussen, Gunnar. *Acoustical instruments and measurement: Microphones*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 68(1), 1980.
- [9] Manfred Weber Metra Meß- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.
- [10] <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/13/measuring-sound-with-microphones.html>.
- [11] <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/sound/measurement-microphones>