

CALIBRAÇÃO DE MICROFONES PADRÃO DE TRABALHO. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO DE SUBSTITUIÇÃO E O MÉTODO DE COMPARAÇÃO

REFERÊNCIA PACK: 43.58.VB

Antunes, Sónia
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal
Tel: (+351) 218443834
Fax: (+351) 218443028
Email: santunes@lnec.pt

ABSTRACT

A comparative analysis between the application of a substitution method and the comparison method in the determination of pressure sensibility of WS2P microphones is presented. On the first method a set of LS1P microphones has been used as reference standard and a pistonphone as transfer standard. On the comparison method as reference standard LS2P microphones was used and a face to face coupler for microphone comparison calibration as transfer standard. The results achieved and the uncertainty budgets for both methods in the determination of pressure sensibility of B&K 4134 microphones are present.

RESUMO

Neste artigo efectua-se uma análise comparativa entre a utilização dos métodos de substituição e de comparação, para a determinação da sensibilidade em pressão de microfones do tipo WS2P. No método de substituição, a determinação do nível de sensibilidade em circuito aberto é realizada tomando como referência a sensibilidade em pressão de três microfones do tipo LS1P e como padrão de transferência um pistãofone. No método da comparação é utilizado como referência a sensibilidade em pressão de microfones do tipo LS2P e um acoplador activo, como padrão de transferência. São apresentados utilizando-se ambos os métodos, os resultados e respectivas incertezas de medição associadas, referentes à determinação da sensibilidade em pressão de um microfone da marca B&K modelo 4134.

INTRODUÇÃO

Os microfones B&K modelo 4134 são os transdutores de medição incorporados nos simuladores de ouvido (designadamente no ouvido artificial) que são utilizados na calibração de audiômetros de sons puros por condução aérea. Para que se possa implementar e

assegurar uma conveniente cadeia de rastreabilidade em audiometria tonal por condução aérea, é necessário assegurar a calibração dos diferentes dispositivos intervenientes, entre os quais se destaca o transdutor de medição. A figura 1 apresenta a instrumentação utilizada num ensaio para a determinação da sensibilidade em circuito aberto de um microfone de condensador de meia polegada, do fabricante Bruel & Kjaer. Como fonte sonora de referência, é utilizado um pistãofone do mesmo fabricante, modelo 4220. De forma a facilitar um alinhamento correcto do sistema, o conjunto constituído pelo pistãofone, microfone e pré-amplificador associado, está assente sobre uma base única de montagem.



Figura 1 – Determinação do nível de sensibilidade de microfones para a frequência de 250 Hz

O pré-amplificador e o gerador de sinais eléctricos sinusoidais, encontram-se ligados ao restante circuito de medição por uma unidade de junção, modelo WB 0850, cuja finalidade é permitir a selecção da origem do sinal de entrada: gerador de sinais eléctricos ou fonte sonora de referência, como também a origem do sinal de saída: sinal de saída proveniente do pré-amplificador; sinal directo do gerador ou sinal do gerador em série com o microfone e pré-amplificador. O circuito de medição é constituído por um amplificador de medição, modelo 2610; um atenuador de precisão modelo, WB 0566; um multímetro diferencial de precisão, modelo 5908 e um frequencímetro da marca Philips modelo PM 6669 .

O valor da sensibilidade de um microfone capacitivo é obtido pela técnica de aplicação de tensão. Nesta técnica, o diafragma do microfone é em primeiro lugar solicitado por acção da pressão sonora de referência, aplicada por um pistãofone de referência (com uma amplitude de 124 dB para a frequência de 250 Hz). Em consequência desta acção, é gerada nos terminais eléctricos de saída do microfone uma tensão V^0 - a tensão de saída em circuito aberto do microfone - que, quando ligados ao pré-amplificador, produz uma tensão de saída V aos seus terminais. De seguida, a fonte sonora de referência é desligada e substituída por uma tensão de calibração V_1 - a tensão de aplicação - de igual frequência, que é aplicada em série com o microfone. O nível da tensão de aplicação é então ajustado, até que a tensão de saída aos terminais do pré-amplificador seja igual a tensão que é gerada nos mesmos terminais, quando a fonte sonora de referência está em funcionamento. A sensibilidade em circuito do microfone capacitivo, é igual ao valor da tensão de aplicação dividido pela pressão sonora de referência. O nível de sensibilidade em circuito aberto do microfone condensador em ensaio, é determinado a partir da comparação entre os sinais de saída em tensão provenientes do microfone em ensaio e de um microfone utilizado como referência (usualmente um microfone do tipo LS1P), do qual se sabe previamente o valor do nível de sensibilidade em circuito aberto. À diferença entre tensões, expressa em termos de nível, são adicionados determinados termos correctivos, relativos às diferenças entre as características apresentadas pelos dois microfones. O valor do nível de sensibilidade em pressão do microfone de condensador em ensaio (designado por S_{1013}), para as condições ambientais de referência (101,3 kPa, 23°C, 50% de humidade relativa), é calculado a partir da seguinte expressão:

$$S_{1013} = S_{Re f.} + \left(\frac{S_{Re f.(p.amb.)}}{S_{x(p.amb.)}} \right) + \left(\frac{e_x}{e_{Re f.}} \right) + \left(\frac{V_x + V_{Pist}}{V_{Re f.} + V_{Pist'}} \right) - \left(\frac{G_x}{G_{Re f.}} \right) - (D_{att}) \quad [dB] \quad (1)$$

onde: o primeiro termo, representa o nível de sensibilidade em pressão do microfone padrão para as condições de referência; o segundo termo, o quociente entre os factores de correcção para a pressão ambiente do microfone padrão e do microfone a ser calibrado; o terceiro termo, o quociente entre as tensões de saída dos dois microfones; o quarto termo, representa uma correcção relativa ao desvio no volume global definido pela geometria e dimensões do microfone em ensaio e do pistãofone; o quinto termo representa uma correcção para o desvio obtido, no voltímetro diferencial de precisão, da razão entre as tensões de entrada e saída aos terminais do pré-amplificador, entre as medições efectuadas com o microfone a ser ensaiado o microfone utilizado como referência; finalmente o sexto termo da expressão (1) representa o valor obtido no divisor de tensão de precisão correspondente à diferença entre os níveis de sensibilidade em pressão do microfone de referência e do microfone em ensaio.

A partir da utilização do método de aplicação de tensão, é possível obter, para a frequência de funcionamento do pistãofone (250 Hz), o valor do nível de sensibilidade, em circuito aberto dos microfones de condensadores. Para obterem-se valores sobre a reprodutibilidade dos resultados, são utilizados dois microfones padrão, repetindo-se as medições efectuadas. Na determinação do nível de sensibilidade de microfones condensadores, obtiveram-se desvios padrão da ordem de 0,05 dB.

Para a determinação das características de resposta em frequência, relativamente à frequência para a qual foi determinada a sensibilidade em circuito aberto (250 Hz), é utilizado um actuador electrostático, que aplica uma força electrostática com a finalidade de simular a pressão sonora, quando colocado sobre o diafragma do microfone de condensador. O actuador electrostático é constituído por uma grelha metálica perfurada, sendo usualmente colocado a uma distância compreendida entre 0,4 e 0,8 mm do diafragma do microfone.

A pressão electrostática estabelecida pelo actuador para a frequência do sinal eléctrico aplicado, quando são aplicadas simultaneamente uma tensão contínua e uma tensão alternada sinusoidal entre o actuador e o diafragma do microfone, tem a expressão:

$$P = \frac{\epsilon}{4 \cdot d^2} \cdot (2 \cdot E_0^2 + e^2 + 4 \cdot E_0 \cdot e \cdot \sin(w \cdot t) - e^2 \cdot \cos(2 \cdot w \cdot t)) \quad (2)$$

em que as componentes estáticas e dinâmicas são respectivamente, iguais a :

$$P_{\text{estática}} = \frac{\epsilon}{2 \cdot d^2} \cdot (E_0^2 + e_{\text{eff}}^2) \quad (3)$$

$$P_{\text{dinâmica}} = \frac{\epsilon}{2 \cdot d^2} \cdot (2 \cdot \sqrt{2} \cdot E_0 \cdot e_{\text{eff}} \cdot \sin(w \cdot t) + e_{\text{eff}}^2 \cdot \cos(w \cdot t))$$

E_0 , representa a tensão DC aplicada; e , a tensão DC aplicada; e_{eff} , o valor eficaz da tensão DC; w , a frequência angular e t o tempo. No entanto, como a grelha metálica do actuador electrostático é perfurada, somente a uma fracção da área do diafragma do microfone corresponde à área do actuador. Assim, e segundo informação do fabricante [6], a pressão sonora simulada é reduzida para:

$$P_{\text{dinâmica}} = \frac{\epsilon \cdot E_0 \cdot e_{\text{eff}}}{d^2} \cdot R_{\text{area}} \quad (4)$$

em que R_{area} representa a razão entre as áreas do actuador electrostático e do diafragma do microfone.

Segundo a expressão anterior, e para os valores utilizados tipicamente, verifica-se que, para uma tensão de 800 V DC e uma tensão sinusoidal de valor eficaz igual a 30 V, uma distância de 0,4 mm entre o actuador e o diafragma do microfone condensador, e uma razão entre áreas de 0,75 (valor típico indicado pelo fabricante Bruel & Kajer), o nível de pressão sonora equivalente tem um valor igual a 94 dB. Na implementação automatizada da caracterização da resposta em frequência é utilizada a instrumentação apresentada na figura 2. A fonte de alimentação para actuadores electrostáticos modelo, WB 0736, fornece as tensões

necessárias para a geração da força electrostática no diafragma do microfone, enquanto que, o gerador de sinais, modelo 1049, controla o varrimento em frequência da tensão sinusoidal e do registo gráfico do sinal obtido no gravador X-Y modelo 2307.



Figura 2 – *Instrumentação utilizada na determinação da característica de resposta em frequência de microfones de condensador*

A implementação experimental do método de comparação para a determinação da sensibilidade à pressão de microfones recorre à utilização de um acoplador activo para a comparação de microfones de meia-polegada do fabricante Bruel & Kajer, modelo WA 0817, alimentado pelo gerador de sinais sinusoidais modelo 1049; de dois pré-amplificadores com características iguais (neste caso utilizaram-se pré-amplificadores do mesmo modelo), de um multiplexador para pré-amplificadores de microfones modelo 2811, e de um multímetro para leitura dos sinais em tensão relativos a cada microfone. A figura 3 apresenta uma fotografia do equipamento anteriormente referido.



Figura 3 – *Calibração de um microfone de condensador pelo método da comparação*

O acoplador WA 0817 integra uma fonte sonora que fornece essencialmente a mesma pressão sonora aos dois microfones que se encontram inseridos nos extremos opostos deste acoplador, com os respectivos diafragmas dispostos numa configuração frente a frente, e relativamente próximos um do outro. Um destes microfones é o microfone em ensaio e o outro é um microfone cujo valor de sensibilidade é conhecida previamente, pela técnica de reciprocidade, designadamente um microfone B&K 4180. A diferença de leituras obtidas entre os canais é igual à diferença entre as sensibilidades em circuito aberto dos dois microfones, quando as seguintes condições são válidas:

- Os volumes equivalentes dos dois microfones são iguais, de modo que qualquer diferença nos volumes frontais dos microfones não produz uma variação significativa no sinal à saída do pré-amplificador.
- As capacidades de ambos os microfones devem ser aproximadamente iguais, de forma a que a impedância (finita) de entrada do pré-amplificador não produza pequenas variações da sensibilidade do conjunto constituído pelo pré-amplificador e microfone.

Ambas as condições são cumpridas no caso do microfone de meia polegada modelo 4134, uma vez que o volume equivalente deste microfone e respectiva capacidade (com um valores nominais respectivamente de 10 mm^3 e $18,5 \text{ pF}$) são praticamente idênticos ao volume

e capacidade correspondente ao microfone de referência utilizado (com um valor nominal de 10 mm^3 e $17,5 \text{ pF}$).

No método da comparação, e no caso dos dois microfones não pertencerem ao mesmo modelo, é necessário corrigir a influência de factores ambientais (designadamente da temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica) nos valores relativos ao nível de sensibilidade em circuito aberto de cada microfone. No entanto, para os microfones em causa, os coeficientes que traduzem tais influências são idênticos (coef. temperatura: $-0,002 \text{ dB/}^\circ\text{C}$; coef. humidade relativa: $0,00067 \text{ dB/100\%RH}$; e coef. pressão estática: $-0,007 \text{ dB/kPa}$), pelo que não se efectuaram as respectivas correcções.

INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

No método de aplicação de tensão os valores de incerteza, discriminados em função da frequência, são obtidos pela combinação dos valores de incerteza de medição relativos ao método de aplicação da tensão para a frequência de 250 Hz (a que corresponde um valor de $0,11 \text{ dB}$), com os valores de incerteza associados à obtenção do registo gráfico da resposta do microfone com o actuador electrostático, que resultam essencialmente da repetibilidade e exactidão com que este registo é efectuado. Assim, são obtidos valores de incerteza de medição, para um intervalo de confiança de 95% compreendidos entre $0,3 \text{ dB}$ e $0,4 \text{ dB}$.

No que respeita ao método de comparação os valores para a incerteza de medição obtidos são apresentados no quadro 1. No cálculo destes valores teve-se em conta a repetibilidade e as incertezas de medição resultantes da determinação da sensibilidade do microfone padrão em função da frequência.

Quadro 1 – Valores para a incerteza de medição em função da frequência, na determinação da sensibilidade de microfones para o método de comparação

Incerteza expandida	31,5 Hz	2	0.10
	63 Hz	2	0.09
	125 Hz	2	0.09
	250 Hz	2	0.08
	500 Hz	2	0.08
	1000 Hz	2	0.08
	2000 Hz	2	0.08
	4000 Hz	2	0.08
	8000 Hz	2	0.08
	12500 Hz	2	0.09
	16000 Hz	2	0.15

RESULTADOS OBTIDOS

Na figura 4 é apresentada uma análise comparativa entre os resultados obtidos na determinação do nível de sensibilidade à pressão do microfone de condensador de meia polegada, para ambos os métodos analisados neste artigo. As barras em torno de cada valor representam o valor relativo à incerteza de medição associada (a barra vermelha é correspondente ao método de aplicação de tensão, enquanto que a azul é relativa ao método de comparação). Pela análise dessa figura é fácil constatar a concordância entre os resultados obtidos pelos dois métodos, verificando-se, para toda a gama de frequências, que o valor de incerteza de medição do método de comparação é ligeiramente inferior. Resultando este facto essencialmente da exactidão com que o registo gráfico é obtido (escala em que a menor divisão corresponde a 1 dB).

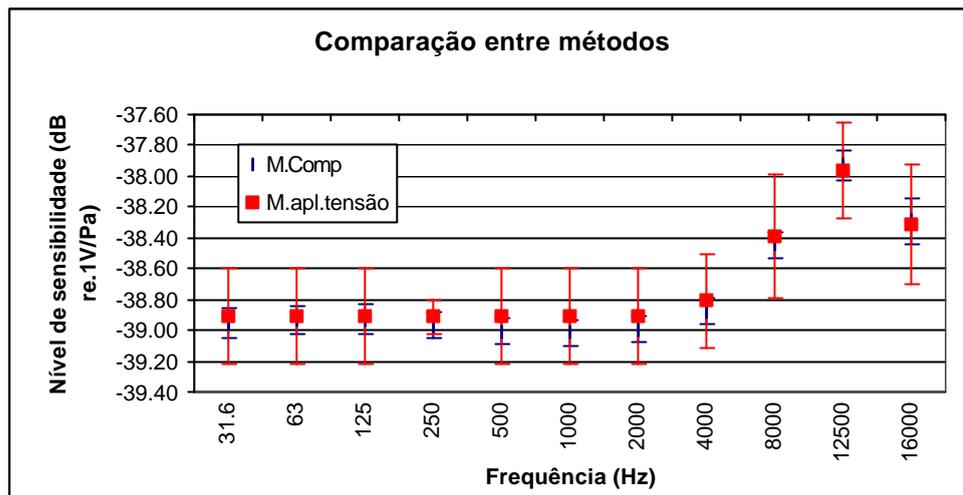


Figura 4 – Resultados obtidos pelo método de aplicação de tensão e pelo método de comparação, para o microfone de 1/2 polegada, modelo 4134, e valor da incerteza de medição associado a cada método

CONCLUSÕES

O padrão de pressão sonora é definido internacionalmente em termos da sensibilidade de microfones de condensador padrão de uma e meia polegada, calibrados pela técnica da reciprocidade. No entanto, esta técnica de calibração é muito complexa fazendo uso de um conjunto vasto de equipamentos. Desta forma, para a determinação da resposta em frequência de microfones, tem sido generalizado o uso de actuadores electrostáticos, que constituem um meio mais fácil e com custos menores. Mas a determinação da resposta em frequência de um microfone de condensador por meio de um actuador electrostático, é uma resposta relativa, não permitindo a calibração absoluta de microfones. De facto, não é possível medir com exactidão suficiente a separação efectiva entre o actuador e o diafragma do microfone. Assim, a sensibilidade do microfone é normalmente determinada a uma única frequência, pelo método de aplicação de tensão, sendo posteriormente utilizado o actuador electrostático para a determinação da resposta em frequência relativa. Para além deste facto, a resposta em frequência obtida por meio do actuador desvia-se, para frequências próximas da frequência de ressonância do microfone, da verdadeira resposta em pressão (e de interesse para aplicações em audiometria). Assim, o “método da comparação” analisado neste artigo, surge como uma alternativa viável, apresentando a vantagem adicional de o manuseamento do equipamento utilizado ser mais prático. Para além destes factores, este método secundário permite igualmente assegurar uma rastreabilidade directa aos microfones de condensador do tipo LS2P e com menores valores de incerteza de medição que o método de aplicação de tensão. Infelizmente, o “método de comparação” só é aplicável, por enquanto, a microfones de meia-polegada. Finalmente, refira-se que muito recentemente foi publicada pela IEC uma norma relativa à utilização do método de comparação [4]. Num futuro próximo, pensa-se no LMA do LNEC melhorar o procedimento de medição relativo ao método de comparação, utilizando-se para tal os resultados relativos a comparação entre o microfone a ensaiar e um conjunto de três microfones padrão do tipo LS2P.

REFERÊNCIAS

- [1] – Wong, G.K, Embleton, T. – *AIP Handbook of Condenser Microphones* - American Institute of Physics, New York, 1995, ISBN 1-56396-284-5
- [2] – Bureau International des Poids et Mesures et al – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* - International Organization for Standardization, First Edition, Switzerland, 1995, ISBN 92-67-10188-9.
- [3] – International Electrotechnical Commission, 1992. *Electroacoustics- Measurement microphones. Part 5: Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison* IEC 61094-5: 2001
- [4] – Bruel & Kjaer – *Microphone Handbook* - Bruel & Kjaer, Naerun, 1996