



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

RUÍDO, SOM E PERCEÇÃO SONORA: UMA PERSPETIVA METROLÓGICA DA ACÚSTICA

PACS: 43.50.Rq .

Sónia Monteiro Antunes.
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101
Lisboa
Portugal
Tel: +351 218443834
E-Mail: santunes@lnec.pt

Palabras Clave: Metrologia acústica, ruido ambiente, percepção sonora

ABSTRACT

The challenges involved in performing measurements to characterize environmental noise often are translated into poor reproducibility and uncertainty values of several decibels. The issues posed by real-world measurement are in contrast to the common practice that is used in acoustical metrology. In the latter field, the use of highly accurate laboratory standard instruments supported by very detailed normative specifications, results measuring uncertainties in the order of decibel decimals.

In this communication, a brief historical evolution of these two approaches is presented, explaining the common aspects, the harmonization of measurement concepts and methodologies, the main challenges, and the future perspective.

RESUMEN

Os desafios que se colocam na realização de medições para a caracterização do ruído ambiente, traduzem-se muitas vezes numa fraca reprodutibilidade dos resultados obtidos, e aos quais estão associados valores de incerteza da ordem de vários decibel. As questões colocadas pela medição do mundo real, contrastam muito com a prática comum que é utilizada em metrologia acústica, disciplina, onde o nível de sofisticação, e a utilização de padrões de medição de grande exatidão, suportados em especificações normativas muito detalhadas,

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

permitted to obtain results with values of uncertainty of measurement in the order of tenths of decibel.

In this communication, a brief historical evolution of these two approaches, the respective interconnection, the concepts and methodologies of measurement, as well as the main challenges and the perspectives of future development.

1 - Introdução

As civilizações antigas preocupavam-se com a Acústica essencialmente no contexto da música e da arquitetura, relacionando-se as primeiras medições efetuadas no domínio desta ciência com a medição da velocidade do som no ar. Independentemente da importância do som na comunicação verbal, o fenómeno acústico foi durante muito tempo somente apreciado de forma qualitativa, por meio da categorização dos sons em “som forte” ou “som fraco”. A experimentação no domínio da Acústica é relativamente recente. Para este facto, contribuiu, de modo significativo, a natureza das ondas sonoras. As primeiras medições quantitativas da pressão sonora foram somente realizadas a seguir à invenção do amplificador (em 1907) e do microfone de condensador (em 1917).

Atualmente, para efetuar medições, no domínio da Acústica são necessários três elementos essenciais:

- Equipamento de medição calibrado e rastreado a um padrão primário de medição por meio de uma cadeia ininterrupta de comparações;
- Método pré-estabelecido para a medição, de preferência normalizado internacionalmente;
- Executante treinado e experiente na área.

Estes três elementos são igualmente importantes e a sua coexistência permite que as medições realizadas por laboratórios distintos tenham resultados análogos, aos quais estão associados valores de reprodutibilidade dentro da gama de valores estabelecidos pelo protocolo de medição para a correspondente variabilidade.

No caso da Acústica, os padrões primários são constituídos por microfones de condensador em que o diafragma se encontra rodeado por um anel, de forma a possibilitar sua calibração pela técnica da reciprocidade. Estes microfones são designados por microfones padrão de laboratório, em conformidade com a norma IEC 61094-1. Algumas características dos microfones de condensador, como por exemplo a sua grande estabilidade mecânica e resposta em frequência essencialmente planas, para a zona do audível, favoreceram a sua escolha como equipamento padrão. A sua forma e design simples também é um fator importante a ter em consideração, pois permitem calcular muito facilmente a respetiva interação com os diversos tipos de campo sonoro [1].

A nível de padrões primários, a comparação dos resultados de medição e incertezas associadas é efetuada a partir da realização de intercomparações a nível internacional, promovidas por organizações inter-regionais de metrologia, como por exemplo a EURAMET, no caso europeu, ou o BIPM, que congrega as diferentes organizações inter-regionais a nível mundial.

As normas publicadas pelos organismos internacionais, como a Organização Internacional de Normalização (ISO) e o Comité Eletrotécnico Internacional (IEC), formam um elo entre as

FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

medições objetivas e as especificações a que os instrumentos de medição devem seguir, permitindo o estabelecimento da respetiva cadeia de rastreabilidade.

Relativamente à acústica ambiental, o primeiro documento a ser publicado pela ISO para a harmonização de critérios e indicadores a serem utilizados na avaliação e gestão do ruído ambiente, foi a recomendação ISO/R 1996, em 1971. Esta recomendação vigorou durante uma década, tendo sido substituída, nos anos 80, por uma nova versão composta por 3 partes. Posteriormente, este conjunto de normas, já foi atualizado por duas vezes, sofrendo na primeira atualização uma reestruturação em duas partes. A norma relativa à descrição das grandezas fundamentais e métodos de avaliação (ISO 1996-1), foi atualizada em 2003 e 2016, enquanto que a segunda parte referente à determinação dos níveis de pressão sonora do ruído ambiente (ISO 1996-2), foi atualizada em 2007 e 2017. As duas últimas revisões desta norma apresentam avanços consideráveis relativamente a procedimentos de medição e respetiva avaliação dos resultados, incluindo diretrizes para o cálculo da incerteza associada; consideração da influência de efeitos meteorológicos na propagação sonora e na avaliação dos efeitos do ruído nas populações, designadamente a quantificação da incomodidade induzida pela exposição ao ruído.

No âmbito das aplicações em Acústica Ambiental há que ter em conta a relação qualidade (ou exatidão dos resultados) e eficácia (em termos de tempo de computação e de validação de dados). Neste contexto podem ser distinguidos três níveis de aplicação: as aplicações que implicam medições e cálculos detalhados, utilizadas sobretudo em situações críticas (por exemplo, em reclamações judiciais sobre o ruído), onde é essencial uma grande exatidão nas técnicas de amostragem dos níveis sonoros, assim como nos dados de entrada do modelo de previsão a utilizar; outro tipo de aplicações diz respeito a avaliação em termos de estudos de impacto ambiental, como por exemplo a construção de novas estradas e a correspondente implementação de medidas de minimização de ruído, sendo necessário o cálculo de dados detalhados, mas também podendo-se fazer uso de valores por defeito. Neste caso, os dados de entrada específicos do projecto, como o fluxo de tráfego e dados geométricos, devem ser o mais detalhados possível, enquanto que, por exemplo, os parâmetros meteorológicos, e impedâncias do solo, dada a sua indisponibilidade podem ser utilizados valores por defeito. Finalmente, e no caso de mapas de ruído de aglomerações, é possível a utilização de dados de entrada mais gerais, por exemplo, relativamente aos dados de tráfego (as distribuições de veículos padrão baseadas no tipo de classificação da estrada), e a utilização de geometria menos detalhada, de modo a obviar cálculos muito morosos. No entanto, é necessário ter em atenção que a exactidão do resultado final depende da exactidão dos dados de entrada, e portanto, das técnicas de amostragem utilizadas, e do “esforço” diretamente associado à obtenção da representatividade dos resultados obtidos.

Neste contexto, o conceito de incerteza de medição aplicada às medições de acústica ambiental, que foi pela primeira vez introduzido na versão de 2007 da norma ISO 1996-2 [3], associa a cada resultado da medição um valor de incerteza. Do ponto de vista da otimização de recursos e custos da medição a incerteza representa o “esforço” efetuado pelo Laboratório de Ensaios. Sendo desejável para as situações de verificação de conformidade com valores limites, ou então nas situações para avaliação da necessidade de implementação de medidas de minimização, que o valor associado à incerteza de medição seja o mais baixo possível.

A realização de ensaios de intercomparação laboratorial, também se esta a tornar uma prática, por exemplo, em Portugal, a Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal (RELACRE), já promoveu desde 2003, três ensaios de comparação na área do ruído ambiente, dois referentes a avaliação de incomodidade, e um relativo à avaliação do nível sonoro de longa duração [4]. Exercícios análogos tem sido promovidos internacionalmente, sendo possível a

procura de disponibilidade de exercícios de comparação laboratorial, a partir da consulta da base de dados da EPTIS (eptis.bam.de/eptis/webSearch/main).

Em algumas situações, principalmente para a determinação de níveis sonoros de longa duração, correspondentes à valores médios anuais, é necessário combinar os resultados de medições, com os resultados provenientes de métodos de previsão reconhecidos [5], como por exemplo, quando se pretende converter os resultados obtidos nas medições de ruído de tráfego rodoviário (ou ferroviário), em valores representativos do fluxo de tráfego anual [6]. Anote-se nesta situação a importância do registo das características do tráfego que ocorreram durante as medições, designadamente o número e categoria de veículos e respetivas velocidades equivalentes contínuas de circulação, no caso de tráfego rodoviário. Para os pontos recetores localizados a distâncias superiores a 100 metros da fonte sonora em avaliação, para além da conversão dos níveis sonoros medidos para valores representativos do fluxo de tráfego anual, é necessário ter em conta a influência das condições atmosféricas [5]. As medições efetuadas devem ser acompanhadas do registo das condições meteorológicas que ocorreram durante a sua realização (velocidade e direção do vento, temperatura, e humidade relativa), assim como o registo do estado de nebulosidade do céu, de modo a permitir a definição das condições de propagação na direção da distância mais curta que une o recetor e a fonte em avaliação, durante a medição.

No que respeita aos modelos de previsão de ruído, implementados em programas informáticos, deve ser considerada a incerteza relativa à própria modelação do ruído [5], essencialmente caracterizada pela incerteza associada aos dados de entrada e parâmetros do modelo, e a incerteza associada ao próprio modelo de cálculo (usualmente traduzido por uma norma). Esta última componente integra as incertezas associadas com a transposição da norma referenciada numa ferramenta de cálculo automática a 3D, e com as técnicas de eficiência de cálculo utilizadas e respectivas simplificações introduzidas. A caracterização das incertezas dos dados de entrada envolve o estudo de cada um dos vários tipos de dados necessários para a elaboração do mapa de ruído. Estas incertezas provêm de diversas fontes, incluindo aspectos que se relacionam com a medição e a avaliação. Por exemplo, incertezas associadas com a posição das fontes, geometria dos obstáculos, variações de altura do solo, qualidade dos dados relativos aos fluxos de tráfego, valores por defeito para as condições meteorológicas. Para a compreensão do modo com cada tipo de incerteza é distribuída, é necessário uma ligação entre especialistas de vários domínios, que contribuem para o estabelecimento destes dados. Usualmente, pode-se admitir que a incerteza associada a cada conjunto de dados de entrada segue uma distribuição normal. A realização de uma análise de sensibilidade, permite estudar variações do modelo de saída, a partir do estudo das variações associadas a cada conjuntos de dados de entrada.

2. 1 – Aspectos de metrología acústica: rastreabilidade aos microfones padrão primarios

Dado que as medições no domínio da Acústica relativas à propagação de ondas sonoras no ar estão intimamente relacionadas com o auditor humano, e que este somente consegue distinguir diferenças do nível de pressão sonora da ordem de 1 decibel, poder-se-ia, em primeira aproximação, pensar que não seria necessário efetuar medições com uma exatidão superior ao valor apontado.

No entanto, em algumas áreas da Acústica, o equipamento de medição é utilizado com a finalidade de verificar se os níveis de pressão sonora estão acima de determinado valor limite pré-estabelecido. Nestes casos, as medições devem ser realizadas com uma exatidão superior ao decibel, implicando este requisito, valores de incerteza de medição da ordem de 0,05 dB

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

para a calibração dos padrões primários utilizados em Acústica. Uma vez que não é prático manter uma fonte de referência que gere uma pressão sonora de 1 pascal, as medições efetuadas são rastreadas a microfones calibrados em pressão pela técnica da reciprocidade.

A técnica de calibração de microfones por reciprocidade permite criar uma base para a medição da pressão sonora, a partir do estabelecimento de uma relação entre a pressão sonora que incide no diafragma de um microfone e a correspondente tensão de saída estabelecida nos terminais elétricos. O topo da cadeia de rastreabilidade neste processo é assegurada pelos padrões elétricos, e dependente de artefactos (microfones). Na Figura 1 apresenta-se uma fotografia dos microfones padrão de laboratório existentes no LNEC [7], com as configurações mecânicas de 1 e ½ polegadas, e correspondentes a microfones cuja sensibilidade em pressão é aproximadamente independente da frequência. Os microfones padrão de laboratório são usualmente identificados pelas siglas LS1P ou LS2P, correspondendo o número à configuração mecânica do microfone (1 ou ½ polegada) e a última letra à característica eletroacústica do microfone (pressão).

A calibração de microfones pela técnica da reciprocidade encontra-se descrita na norma IEC 61094-2:2009 [9] e consiste, de forma sumária, na medição do produto das sensibilidades à pressão de cada par de um conjunto de três microfones, de forma a permitir o cálculo da sensibilidade absoluta de cada microfone. A sua aplicação, em campo de pressão (ou seja, o campo sonoro que é estabelecido no interior de cavidades cujas dimensões são inferiores a ¼ do comprimento de onda), consiste na colocação de cada par de microfones num acoplador acústico, sendo os diafragmas dos dois microfones dispostos frente a frente.



Figura 1 – Microfones LS1P e LS2P existentes no LNEC [7]

O princípio da reciprocidade aplicado a um transdutor electracústico passivo e linear nas condições indicadas, determina que, ao ser um microfone utilizado como uma “fonte sonora”, a razão entre a velocidade volúmica na cavidade, U , e a corrente de entrada, I , é igual à razão entre a tensão em circuito aberto nos terminais elétricos do microfone, E_A , e a pressão sonora, p , quando este transdutor é utilizado como “recetor”, conforme a expressão:

$$M_A = \frac{U}{I} = \frac{E_A}{p} \quad (1)$$

em que M_A representa a sensibilidade em circuito aberto do microfone. Quando na cavidade estão inseridos dois microfones (designados genericamente por A e B), a expressão da pressão sonora existente no seu interior, tendo em conta a expressão da capacitância escreve-se como :

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

$$p = U \cdot Z_{AB} = \frac{U \cdot \gamma \cdot p_s}{j \cdot \omega \cdot V_{AB}} \quad (2)$$

$$V_{AB} = (V + V_{eA} + V_{eB})$$

onde p_s representa a pressão estática no interior da cavidade; γ a razão entre os calores específicos a pressão e a volume constante, nas condições de medição; V e V_{AB} , representam respetivamente o volume da cavidade sem microfones, e com os microfones A e B nela inseridos, V_{eA} e V_{eB} os volumes equivalentes do diafragma dos microfones A e B.

Considerando que o microfone A está a funcionar como emissor e o B como recetor, o produto das sensibilidades dos dois microfones ($M_A \cdot M_B$) pode ser expresso pela razão entre as impedâncias elétrica (E_B/I_{BA}) e acústica de transferência (Z_{AB}), como :

$$M_A \cdot M_B = \frac{E_B}{I_A} \cdot \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{E_B}{I_A} \cdot \frac{j \cdot \omega}{\gamma \cdot P_e} \cdot V_{AB} \quad (3)$$

O produto de sensibilidades dos restantes pares é obtido com expressões análogas. O valor da sensibilidade de cada microfone é expresso em volt por microbar de pressão sonora, ou, mais usualmente, em decibel referido à sensibilidade de $1V/\mu Pa$. A expressão (3) é válida somente na gama de frequências média, região em que a impedância acústica de transferência é determinada essencialmente pelo volume da cavidade. No domínio das baixas e altas frequências é necessário entrar em conta com fatores corretivos devidos, respetivamente, à influência do efeito de condução de calor que ocorre entre as paredes da cavidade e o meio gasoso que a preenche, e à existência de ondas planas estacionárias no interior da cavidade. A norma IEC 61094-2 [9] descreve de forma pormenorizada o procedimento de cálculo das correções referidas anteriormente. Os valores de incertezas de medição na determinação da sensibilidade, em circuito aberto, de microfones de condensador estão compreendidos entre 0,03 dB e 0,08 dB, para uma gama de frequências entre 31,5 Hz e 16 kHz, como se indica no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores típicos de incerteza de medição para a calibração de microfones pela técnica de reciprocidade, em campo de pressão [1]

Incerteza dB (k=2)	20 Hz	63 Hz	4 kHz	10 kHz	20 kHz
LS1	0,06	0,03	0,03	0,08	--
LS2	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08

A técnica de calibração de microfones pela técnica de reciprocidade também pode ser realizada em camaras anecoicas (campo livre), encontrando-se o respetivo procedimento de medição descrito na norma IEC 61094-3, para uma gama de frequências compreendida entre os 800 Hz e 25 k Hz (microfones LS1), ou 2k Hz e 50 kHz (microfones LS2). Embora a teoria por detrás da determinação da função de transferência para a impedância acústica, em campo livre, seja mais simples, que a correspondente para campo de pressão, a sua implementação prática é tecnicamente mais difícil. Atendendo aos elevados custos de implementação e experiência técnica necessária, para a calibração de microfones por reciprocidade em campo livre, a IEC publicou a norma TS 61094-7 [13] onde estão descritos fatores corretivos para a diferença entre a resposta em campo livre e campo de pressão, em função da frequência, para os microfones padrão LS1 e LS2 microfones. Na tabela 2 apresentam-se valores típicos

associados à calibração de microfones pela técnica de reciprocidade, em campo livre, obtidos por laboratórios nacionais de metrologia.

Quadro 2 – Valores típicos de incerteza de medição para a calibração de microfones pela técnica de reciprocidade, em campo livre [1]

Incerteza dB (k=2)	1 kHz	2 kHz	4 kHz	10 kHz	20 kHz
LS1	0,10	0,08	0,07	0,08	0,10
LS2	--	0,10	0,08	0,07	0,09

A Tabela 3 indica os valores típicos associados à calibração de microfones pela técnica de reciprocidade, em campo livre, obtidos a partir da técnica de reciprocidade, em campo de pressão, e aos quais se adicionou o correspondente fator corretivo indicado na norma IEC 61094-7.

Quadro 3 – Valores típicos de incerteza de medição para a calibração de microfones pela técnica de reciprocidade, em campo livre [1]

Incerteza dB (k=2)	1 kHz	2 kHz	4 kHz	10 kHz	20 kHz
LS1	0,09	0,12	0,14	0,18	0,2

A partir da utilização desta técnica de calibração a unidade de pressão sonora, o pascal, é realizada indiretamente, sendo rastreada a grandezas no domínio da eletricidade e mecânica, e parâmetros físicos como por exemplo, tensão DC; frequência; comprimento; temperatura; pressão estática e densidade do ar. A disseminação da unidade “pascal” é realizada por meio de microfones padrão de trabalho, calibrados por métodos designados de secundários (com incertezas de medição superiores), como por exemplo, o método de aplicação de tensão e o método de comparação. Igualmente a disseminação da unidade “pascal” pode ser efetuada por de calibradores sonoros ou pistãofones a partir da calibração destes dispositivos, por método absoluto, recorrendo a microfones calibrados pelo método da reciprocidade, ou então a partir da calibração destas fontes sonoras por comparação com outras tomadas como referência (método da substituição).

No que respeita à aplicação do método de reciprocidade para a calibração de microfones em campo difuso, esta técnica ainda se encontra em desenvolvimento, existindo alguns laboratórios nacionais a desenvolver estudos nesse sentido [18].

2. 2 – Aspectos de metrología acústica: metodos de calibração de equipamentos de medição

2.2.1 – Calibração de microfones

No que respeita a métodos secundários para a calibração de microfones de medição, correspondentes à determinação da sensibilidade do microfone em função da frequência, por comparação com os valores da sensibilidade de um padrão primário, existem essencialmente duas técnicas: o método da comparação onde é utilizado como referência a sensibilidade em pressão de microfones do tipo LS2P, em função da frequência, e um acoplador ativo, como padrão de transferência; e um método combinado, em que é determinado o nível de sensibilidade em circuito aberto, tomando como referência a sensibilidade em pressão de três microfones do tipo LS1P, para uma única frequência (usualmente 250 Hz) e como padrão de transferência um pistãofone, sendo obtida uma resposta em frequência relativa, com recurso a um atuador electroestático

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Neste último método, o diafragma do microfone é em primeiro lugar solicitado por ação 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 ação, é gerada nos terminais elétricos 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 Figura 2 apresenta a instrumentação utilizada num ensaio para a determinação da sensibilidade em circuito aberto de um microfone de condensador, do fabricante Bruel & Kjaer [7]. Como fonte sonora de referência, é utilizado um pistãofone do mesmo fabricante, modelo 4220.

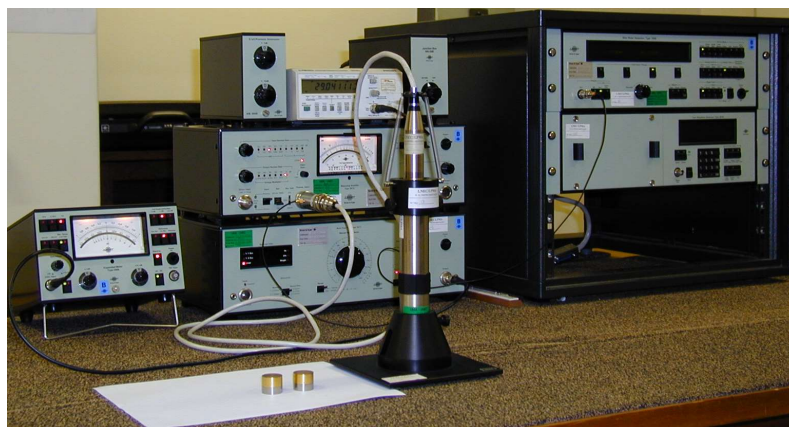


Figura 2 – Determinação do nível de sensibilidade de microfones para a frequência de 250 Hz

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 atuador electrostático, que aplica uma força eletrostática com a finalidade de simular a pressão sonora, quando colocado sobre o diafragma do microfone de condensador. A norma IEC 61094-6 indica as especificações que este dispositivo deve cumprir. O atuador 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 (ver Figura 3).

No que respeita ao método de determinação por comparação do nível de sensibilidade em circuito aberto de microfones de medição, é um método que permite a calibração de um microfone relativamente a um padrão de referência cujo valor de sensibilidade é previamente conhecido a partir da técnica da reciprocidade. Para o efeito é utilizado o acoplador WA 0817 que integra uma fonte sonora, e emite essencialmente a mesma pressão sonora aos dois microfones que se encontram inseridos nos extremos opostos deste acoplador, com os respetivos diafragmas dispostos numa configuração frente a frente, e relativamente próximos um do outro [7]. A diferença de leituras obtidas entre os canais é igual à diferença entre as sensibilidades em circuito aberto dos dois microfones, desde que os volumes e capacidades de

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

ambos os microfones sejam praticamente idênticos, caso contrário terão de ser aplicadas correções (Figura 4). Estes dois métodos para a calibração de microfones de medição, em campo de pressão encontra-se descritos na norma IEC 61094-5.



Figura 3 –Instrumentação utilizada na determinação da característica de resposta em frequência de microfones de condensador

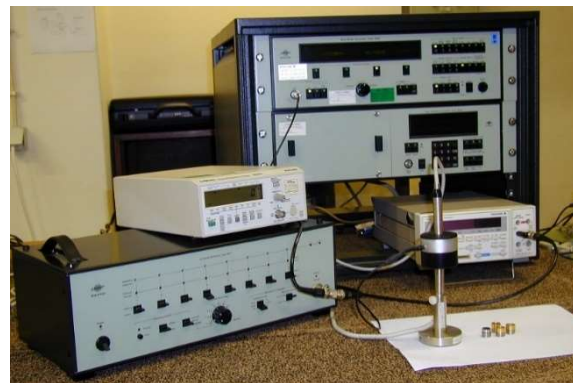


Figura 4 – Calibração de um microfone de condensador pelo método da comparação

2.2.2 – Calibração de pistãofones e calibração acústicos

A cadeia de rastreabilidade para a calibração de fontes sonoras utilizadas na calibração ou verificação de equipamentos de medição de níveis sonoros (sonómetros ou analisadores a tempo real), e respetiva incerteza associada, assenta na calibração de microfones pela técnica da reciprocidade. A norma da IEC 60942 descreve as especificações que este equipamento deve cumprir, assim como o método de calibração a utilizar e incerteza associada. O nível de pressão sonora emitido por um pistãofone, pode ser determinado a partir da medição da tensão de saída em circuito aberto de um microfone de sensibilidade conhecida (usualmente pela técnica da reciprocidade. Na Figura 5 apresenta a instrumentação utilizada no LNEC para a

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

determinação do nível de pressão sonora estabelecido por uma pistãofone com recurso técnica aplicação de tensão [7].



Figura 5 – Método de aplicação de tensão para a calibração de pistãofones

2.2.3 – Calibração de sistemas de medição de níveis sonoros

As especificações para a calibração de sistemas de medição de níveis sonoros estão descritas na serie de normas IEC 61672 [14,15 e 16]. A primeira parte desta série faz referência as especificações que este equipamento, sonómetros e medidores de níveis sonoros a tempo real, devem cumprir, enquanto que a segunda parte refere-se aos ensaios que devem ser realizados numa aprovação de modelo, cobrindo um conjunto de testes acústicos, como a determinação de características direcionais, valores de correção em campo livre, e de testes de desempenho eléctrico e eletromagnético. Por último, a terceira parte desta série de normas, integra um conjunto mais limitado de testes, a serem realizados num ensaio de verificação periódica.

2. 3 – Aspectos de metrología acústica: aspetos conclusivos

O resultado de uma medição corresponde a uma aproximação ou estimativa do valor atribuído à grandeza submetida a medição (mensuranda). A sua expressão só está completa quando é acompanhada de uma indicação da incerteza de medição associada. A incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensuranda.

A relação entre os resultados obtidos com um equipamento de medição e o correspondente padrão é estabelecida a partir da calibração do equipamento. Num determinado domínio, a cadeia de rastreabilidade permite relacionar hierarquicamente os diferentes padrões que a integram, com o padrão primário da grandeza em causa. Esta relação de hierarquia é estabelecida a partir do valor da incerteza de medição associada a cada padrão, correspondendo aos padrões de nível mais elevado, uma menor incerteza de medição.

As operações de calibração dos equipamentos utilizados em acústica ambiental, assentam numa cadeia de rastreabilidade, cujo topo da hierarquia corresponde a calibração de



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

microfones padrão primários, pela técnica de reciprocidade, em campo livre. Usualmente estas calibrações são somente realizadas por alguns Laboratórios Nacionais de Metrologia, devido aos recursos e experiência necessários para a sua realização. Contudo, e de modo a garantir a qualidade dos resultados obtidos, os laboratórios nacionais de metrologia participam periodicamente em exercícios de comparações internacionais, promovidos pelas organizações regionais de metrologia a que pertencem (por exemplo, a EURAMET, no caso europeu)

A necessidade de rastreabilidade pode ter origem em fatores diversos; no caso de fabricantes de equipamento existem benefícios na comprovação da existência de uma adequada cadeia de rastreabilidade para os equipamentos (ou materiais) que fabricam, pois permitirá aos clientes destes produtos ter uma ideia antecipada do nível de desempenho de instrumentos e materiais, e conseqüentemente favorecer a sua venda. A necessidade de rastreabilidade pode também ter origem num outro tipo de fatores, de natureza completamente distinta da descrita anteriormente, como por exemplo, a obrigatoriedade de cumprimento de orientações a nível legislativo, caso que se aplica em grande parte das medições no âmbito da Acústica Ambiental.

3 – Principais desafios

Estima-se que 80% dos cidadãos europeus vivem em zonas urbanas, devendo, para a obtenção nestas zonas de uma elevada qualidade de vida, o ambiente ser considerado como um elemento essencial neste processo [24]. De entre os vários descritores ambientais, o ruído é uma das principais causas da degradação da qualidade do ambiente urbano, devido, em parte, ao facto de a sua presença poder ser imediatamente apercebida pelo ser humano e também poder facilmente ser conotada de incomodativa, ao contrário do que sucede, por exemplo, com alguns poluentes atmosféricos. O ambiente complexo e a grande extensão das cidades e respetivas áreas suburbanas apresentam um grande desafio para o mapeamento e monitorização de ruído, com uma grande diversidade e complexidade de fontes, fenómenos de propagação sonora através de uma vasta e complexa rede geométrica [20]. Com efeito, um modelo para a propagação sonora em zonas urbanas necessita de ter em conta múltiplas reflexões, muitas das quais de natureza não especular (reflexões difusas) nas irregularidades das superfícies das fachadas dos edifícios, difracções, para além existirem numerosos obstáculos à propagação sonora. Adicionalmente, deve fornecer resultados fiáveis na banda de frequências de interesse, nomeadamente, entre 50 Hz e 10 kHz. Muitas vezes, em zonas urbanas coexistem simultaneamente a modelação de ruído (mapas de ruído) e estações de monitorização permanente de níveis sonoros, sendo os resultados do mapeamento atualizados sistematicamente com dados provenientes de estações de monitorização de níveis sonoros e das condições meteorológicas.

Por outro lado, as tecnologias mais modernas tornaram possível a implementação de redes de sensores sem fios de baixo custo (sistemas de sensores microelectromecânicos, também designados por microfones MEMS), associadas a computadores como Raspberry Pi ou o Arduino, por exemplo, e que podem ser uma alternativa viável aos sistemas de monitorização permanentes de ruído, ou até mesmo, serem complementares aos primeiros [26]. A informação recolhida por estas redes associadas a sistemas de informação geográfica, pode servir para a gestão dos recursos e da resposta ambiental de um sistema, informação ao público sobre a existência de determinados acontecimentos (como por exemplo congestionamentos de tráfego), apoio ao planeamento e uso do solo, por parte dos decisores políticos, aumento da sensibilização das populações relativamente ao ruído, ou até mesmo constituírem-se como

FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

uma rede que permita o mapeamento dinâmico do ruído de tráfego rodoviário ou ferroviário. Neste domínio é essencial garantir a qualidade e a integridade dos dados recolhidos, assim como o estabelecimento de procedimentos de calibração autónoma de um conjunto alargado de sensores [26] e o estabelecimento de uma cadeia de rastreabilidade a padrões primários adequados. Neste contexto tem sido desenvolvidos estudos para a aplicação da técnica de calibração de reciprocidade a microfones MEMS, na gama de frequências compreendidas entre 100-10 kHz [27].

Ainda no domínio da metrologia acústica, refira-se que estão a ser desenvolvidos estudos para aplicação de métodos óticos na calibração de microfones, em campo livre [25]. A técnica referida possibilita o cálculo da pressão sonora a partir de medições da velocidade das partículas da impedância acústica, possuindo a vantagem de a realização da unidade de pressão sonora Pascal, deixar de estar dependente de uma configuração mecânica específica de microfones.

No que respeita à percepção do ruído pelo ser humano, tradicionalmente a influência do ruído na qualidade de vida do ser humano foi estudada centrando-se nos efeitos negativos que este descritor ambiental provoca, designadamente a incomodidade e a perturbação do sono [21]. O indicador de ruído utilizado na gestão do ruído ambiente, o L_{den} (nível sonoro dia-entardecer-noite), baseado num descritor energético, o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, embora pela sua simplicidade, seja conveniente na descrição do ruído ambiente, este descritor não consegue explicar a complexidade do fenómeno que conduz à percepção sonora pelo ser humano [22]. Por exemplo, sabe-se que os índices energéticos não são adequados para a avaliação ao ruído de tráfego rodoviário, em termos de sensações experimentadas, pois estas últimas também dependem de outros factores como as emergências dos eventos, o respectivo número de ocorrências e as suas características tonais. As escalas de ruído que se suportam em conceitos como o nível sonoro contínuo equivalente integram os espectros de ruído de todas as fontes presentes, independentemente das suas características, apresentando como resultado o nível global.

Por iniciativa da União Europeia foram desenvolvidos estudos [29] no sentido de estabelecer relações entre a exposição ao ruído e incomodidade, para os diferentes modos de transportes. No entanto, ao confrontar as relações assim obtidas, com inquéritos sócio-acústicos, constata-se um nível de correlação muito baixo entre as duas variáveis. Este facto permite salientar a importância da influência de factores não - acústicos para a compreensão dos julgamentos e atitudes de cada indivíduo face ao ruído.

Nesta classe de factores não-acústicos há que ter em conta os efeitos directamente relacionados com a fonte, como por exemplo o odor, impacto visual da fonte (associado a mudanças de vista, perturbação da paisagem ou sombreamento), e efeitos indirectos, como por exemplo o aumento de tráfego, e os efeitos relacionados com a atenuação sonora, tais como a presença de barreiras sonora (que pode ou não ter um impacto positivo) e a existência de isolamento sonoro na fachada dos edifícios). Outro fator importante é o contexto em que decorre a exposição sonora, este factor engloba todas as circunstâncias e condições significativas para a reacção de incomodidade, que incluem: a actividade desenvolvida pelo indivíduo durante a ocorrência do estímulo; o período durante o qual este ocorre; o local onde os indivíduos se encontram durante a ocorrência do estímulo [20]. Ainda no factor contexto, é também considerada a expectativa que os indivíduos possuem relativamente que à qualidade acústica de uma determinada área (por exemplo, os residentes que esperavam viver numa zona rural sossegada, podem se sentir mais incomodados que os trabalhadores agrícolas dessa zona). Relativamente as características de grupos específicos de pessoas que podem causar desvios relativamente a média, para um determinado contexto, ou seja, as

FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

características pessoais, há que ter em conta os factores apercebidos, como por exemplo o sentimento subjectivo do medo (no caso dos meios de transporte, por exemplo o medo de um acidente aéreo nas redondezas está associado com a incomodidade ao ruído). Outros factores englobados nas características pessoais são a sensibilidade ao ruído, a dependência da fonte sonora (por exemplo, pessoas que são dependentes economicamente de actividades de transporte que provocam o ruído aparentam ser ligeiramente menos incomodadas pelo ruído provocado por esta fonte), a educação, a atitude que o indivíduo tem relativamente à fonte de ruído, o número de pessoas que coabitam numa residência, e, situações pessoais tais como o grau de stress, a satisfação com o estilo de vida, a capacidade de actuação perante a existência do ruído (actividade de coping).

Analogamente, os mapas de ruído valorizam os níveis sonoros existentes na fachada mais exposta, não tendo em conta a exposição sonora dos residentes fora das suas habitações, nas proximidades da sua zona residencial [23]. Este tipo de abordagem não tem em conta a apreciação qualitativa dos habitantes e visitantes da zona em análise e, em particular, a interacção entre as “dimensões” acústicas e os aspectos sociais, visuais e psicológicos. A aplicação deste tipo de abordagem aos planos de redução de ruído, revela-se essencial, uma vez que a redução dos níveis sonoros pode não conduzir necessariamente a uma melhoria da qualidade de vida dos habitantes, para além do facto de ser de execução prática fácil, nem apresentar uma relação custo-eficácia satisfatória.

Desta forma, cada vez mais se torna necessário o estabelecimento de metodologias e técnicas de análise que permitam a compreensão do ambiente sonoro de espaços urbanos, não só no que respeita à distribuição espacial dos níveis sonoros, mas também no contexto da descrição da paisagem sonora, para a avaliação da qualidade sonora de espaços exteriores. Refira-se também o contributo significativo que o campo da psicoacústica tem dado para a avaliação de ambientes sonoros complexos, a partir da introdução de parâmetros de avaliação suplementares (caracterização da sensação auditiva, tonalidade, aspereza, rugosidade e mascaramento, entre outros) e do desenvolvimento da análise binaural de registos sonoros.

Até ao momento, todas estas técnicas e parâmetros têm sido exclusivamente utilizados para a avaliação da qualidade sonora de produtos industriais e de consumo, ou então para a avaliação do conforto acústico no interior de espaços fechados, como, por exemplo, veículos automóveis e aviões. As aplicações no âmbito da caracterização do ruído ambiente são escassas.

A introdução de aspetos metrologicos nesta area, no sentido de assegurar a qualidade das medições, está ainda na sua fase embrionária, embora tenha um grande potencial para inovação. Neste caso a inovação ultrapassa o campo tradicional de aplicação da metrologia no domínio da psicofísica, lidando não só com os aspetos da audição, mas também incluindo processos mentais e de comportamentais. Uma das primeiras tentativas para assegurar a aplicação de conceitos e terminologia metrológica neste domínio específico da “medição das pessoas”, em termos de o homem como instrumento de medição, ocorreu no projeto MINET [27]. Neste projeto foi realizada a primeira tentativa de harmonização sobre conceitos de medição, rastreabilidade e incerteza de medição, aplicada a este domínio específico do homem como instrumento de medição,

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

4 – Aspetos conclusivos

Nesta comunicação tentou se mostrar a interligação e a importância que a metrologia assume nas medições de acústica ambiental, designadamente na avaliação e gestão do ruído ambiente. Para além de garantir o estabelecimento de toda a cadeia de rastreabilidade para as medições, a ciência da medição e os conceitos e metodologias usualmente utilizados, começam a ser prática diária nas medições de ruído ambiental. Com a atualização dos documentos normativos na área da acústica ambiental, conceitos como incerteza de medição passam a ser utilizados na modelação e medição.

Para além disso, é importante ter em conta, que novas técnicas e novos tradutores de medição, permitindo obter uma maior exatidão, só poderão ter uma aplicação prática, quando a respetiva cadeia de rastreabilidade esteja assegurada.

Finalmente, espera-se que os conceitos de metrologia, num futuro próximo, também possam a ter a sua utilização nas aplicações de acústica, onde o ser humano é utilizado como instrumento de medição. Efetivamente grande parte das aplicações em acústica ambiental estão relacionadas com incomodidade induzida pelo ruído, ou então com a percepção humana dos sons, numa perspetiva de melhoria da qualidade e conforto, saúde ou bem estar.

Referências bibliográficas

1. Frederiksen, E. 2013 Acoustic metrology – an overview of calibration methods and their uncertainties. Int. J. Metrol. Qual. Eng. 4, 97–107 (2013).
2. International Organization for Standardization, ISO 1996-2: Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels, ISO, 2003.
3. International Organization for Standardization, ISO 1996-2: Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels, ISO, 2007.
4. Fradique, J; Inglês, F. – Acústica e Vibrações- 15 anos de ensaios de Comparação Interlaboratorial. EuroRegio 2016, 13-15 de junho, 2016, Portugal.
5. International Organization for Standardization, ISO 1996-2: Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels, ISO, 2017.
6. Antunes, Sónia; Lopes, L.; Domingues, O. – Metodologias para a monitorização de ruído. Combinação de medições e modelação de ruído na melhoria da eficiência na amostragem de ruído. VIII Congresso Ibero-Americano de Acústica 2012, 1 -3 outubro 2012, Évora.
7. Antunes, Sónia Monteiro – Metodologias para a calibração de equipamento no domínio da audiometria. Coleção teses de mestrado LNEC, nº 21, Lisboa, LNEC, 2004, ISBN 972-49-1997-8.
8. IEC 61094-1, Measurement microphones, Part 1: Specifications for laboratory standard microphones.
9. IEC 61094-2, Measurement microphones, Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique.
10. IEC 61094-3, Measurement microphones, Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

11. IEC 61094-5, Measurement microphones, Part 5: Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison.
12. IEC 61094-6, Measurement microphones, Part 6: Electrostatic actuators for determination of frequency response.
13. IEC 61094-7, Measurement microphones, Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones.
14. IEC 61672-1, Electroacoustics - Sound Level Meters, Part 1: Specifications.
15. IEC 61672-2, Electroacoustics - Sound Level Meters, Part 2: Pattern Evaluation Test.
16. IEC 61672-3, Electroacoustics - Sound Level Meters, Part 3: Periodic Test.
17. IEC 60942, Electroacoustics - Sound Calibrators.
18. Milhomem, T.; Soares, Z. - Calibração Primária em Metrologia Acústica. VII Congresso Brasileiro de Metrologia, 24 a 27 de novembro de 2013, Brasil.
19. Antunes, Sónia M.; Rosão, Vítor; Falção, Ana – Representatividade das medições em Acústica Ambiental. Acústica 2008, 20- 22 de outubro, Coimbra, Portugal.
20. Antunes, Sónia Monteiro – Avaliação do Ambiente sonoro em zonas urbanas. Integração de aspectos qualitativos. Tese de doutoramento. Universidade de Aveiro, outubro de 2011 (disponível em <http://hdl.handle.net/10773/7039>).
21. Berglund, B.; Lindvall, T.- Community noise. World Health Organization, 1995.
22. Semidor, 2005 Semidor, C. - Characterization of urban soundscape using psychoacoustic criteria. In Proceedings of Inter-noise 2005, Rio de Janeiro, 2005.
23. Klæboe, 2005 Klæboe, R.; Kolbenstvedt, M.; Fyhri, A.; Solberg, S. - The Impact of an Adverse Neighbourhood Soundscape on Road Traffic Noise Annoyance, Acta Acoustica, vol . 91, nº 6, 2005.
24. CCE, 2004 - Comissão das Comunidades Europeias - Para uma estratégia temática sobre ambiente urbano, COM (2004) 60, Bruxelas, 2004.
25. Cho, W.H.; Koukoulas, T., 2018 - Implementation of a sound measurement system based on an optical method for the primary free-field microphone calibration and the realization of the acoustic pascal. NOVEM 2018: Noise and Vibration Emerging Methods, Espanha, 7-9 maio, Espanha.
26. Sotirakopoulos, K; Barham, R., Piper, B.- Designing and evaluating the performance of a wireless sensor network for environmental noise monitoring applications, EuroRegio 2016, Junho 13-15, Portugal.
27. Wagner, R. e Fick, S. - Pressure reciprocity calibration of a MEMS microphone. J Acoust Soc Am.2017 Sep;142(3):EL251.
28. MINET 2010 - Measurements with Persons: Theory, Methods and Implementation Areas, B. Berglund, G. B. Rossi, J. Townsend, L. R. Pendrill (Eds.), Psychology Press/Taylor and Francis (in press), 2010.
29. Miedema, H. – Exposure-response relationships for environmental noise. In proceedings of Internoise 2007, Istanbul, 2007.