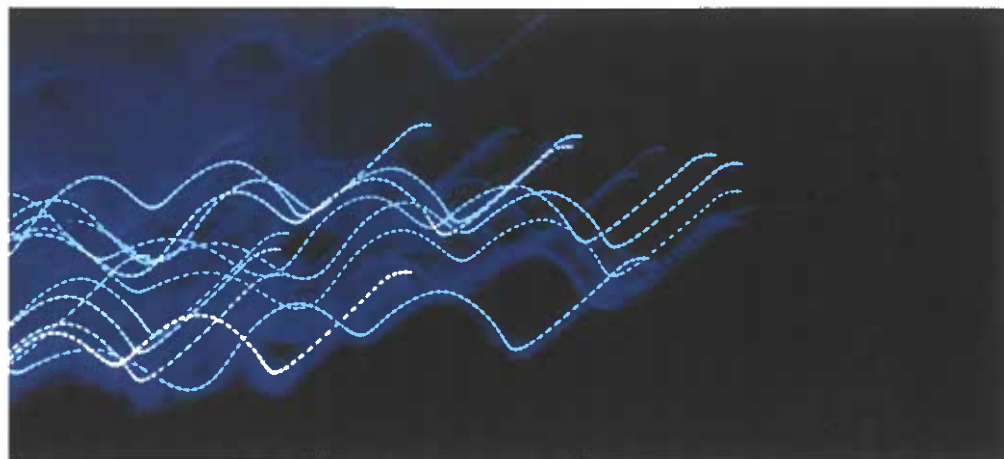
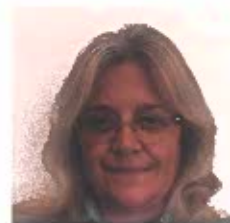




© SANDIP KALAL / UNISPLASH



Sônia Antunes
Investigadora auxiliar do LNEC



Jorge Patrício
Investigador Coordenador do LNEC

METROLOGIA ACÚSTICA E RUÍDO AMBIENTE

METROLOGIA E MEDIÇÕES NO ÂMBITO DA ACÚSTICA AMBIENTAL

Atualmente, no campo da Acústica, a realização de medições requer a presença de três componentes fundamentais:

- Equipamento de medição devidamente calibrado e rastreável a um padrão primário de medição, por meio de uma cadeia contínua e documentada de comparações;
- Método de medição previamente definido, preferencialmente normalizado de acordo com normas internacionais reconhecidas (vd. Figura 1);
- Profissional responsável pela medição devidamente treinado e com experiência comprovada na área.

A conjugação equilibrada destes três elementos é indispensável para garantir a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes laboratórios. Tal convergência garante que os valores medidos apresentem níveis de reprodutibilidade compatíveis com os defini-

dos nos protocolos de medição, respeitando a variabilidade específica ao processo.

No domínio da acústica ambiental, o primeiro documento normativo internacional com o objetivo de harmonizar critérios e indicadores para a avaliação e gestão do ruído ambiente foi a recomendação ISO/R 1996, publicada em 1971. Esta recomendação teve vigência por cerca de uma década, sendo posteriormente substituída, nos anos 1980, por uma nova versão composta por três 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 [1,2], enquanto a segunda parte, referente à determinação dos níveis de pressão sonora do ruído ambiente (ISO 1996-2), foi atualizada em 2007 e 2017 [3,4]. As duas últimas revisões desta norma apresentam avanços consideráveis relativamente a pro-

cedimentos 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 que diz respeito às aplicações práticas em acústica ambiental, é fundamental considerar o equilíbrio entre a qualidade (exatidão dos resultados) e a eficácia (tempo de processamento e validação dos dados). Neste contexto, as aplicações podem ser categorizadas em três níveis, consoante os objetivos e os requisitos técnicos:

1. Aplicações de grande exatidão: São utilizadas em contextos críticos, como litígios judiciais relacionados ao ruído, onde se exige elevada exatidão na amostragem dos níveis sonoros e elevada fiabilidade nos dados de entrada dos modelos de previsão acústica, caso utilizados. Este nível pressupõe medi-

ções e cálculos rigorosos, com um elevado grau de detalhe.

2. Estudos de impacto ambiental: Apresentam exigências moderadas de exatidão, sendo aplicáveis, por exemplo, à construção de novas infraestruturas de transportes, como a construção de novas vias de comunicação e a implementação de medidas de mitigação de ruído (neste caso pavimentos com características de emissão de baixo ruído e/ou barreiras acústicas). Embora nos modelos de previsão se possam utilizar dados de entrada por defeito, é essencial o recurso a dados de entrada específicos do projeto, como o fluxo de tráfego e dados geométricos, que devem ser o mais detalhados possível. Contudo, por exemplo, para os parâmetros meteorológicos, e impedâncias do solo, é aceitável a utilização valores por defeito, uma vez que esta informação sobre médias anuais não está prontamente disponível.
3. Elaboração de mapas de ruído: Permite uma abordagem mais generalista, com dados de entrada simplificados, tais como distribuições padrão de tráfego em função da classificação das vias rodoviárias e representações geométricas menos detalhadas, com o intuito de reduzir a complexidade e o tempo de cálculo. Contudo, é imperativo destacar que a exatidão dos resultados finais está intrinsecamente dependente da qualidade dos dados de entrada e das técnicas de amostragem adotadas, o que reforça a importância de um esforço adequado para garantir a representatividade e robustez dos resultados obtidos.

No âmbito da acústica ambiental, a introdução formal do conceito de incerteza de medição foi efetuada na versão de 2007 da norma ISO 1996-2 [3]. Esta norma estabelece que a cada resultado de medição deve ser associado um valor de incerteza, refletindo a confiança nos resultados obtidos. Do ponto de vista da otimização de recursos e custos associados à medição, a incerteza pode ser interpretada como uma medida do "esforço técnico" realizado pelo laboratório de ensaio, refletindo os recursos humanos, instrumentais e metodológicos mobilizados para alcançar um valor o mais reduzido possível. Em contextos como a verificação da conformidade com limites le-

gis ou a avaliação da necessidade de implementação de medidas de mitigação de ruído, é desejável que a incerteza de medição seja minimizada, de forma a permitir decisões mais robustas e fundamentadas.

A realização de ensaios de comparação interlaboratorial constitui uma prática crescente no sentido de garantir a rastreabilidade, comparabilidade e fiabilidade dos resultados de medição. Em Portugal, a Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal (RELACRE) tem promovido, desde 2003, múltiplos exercícios de comparação interlaboratorial na área do ruído ambiente, abrangendo tanto a avaliação da incomodidade sonora como a determinação de níveis sonoros de longa duração [5]. Em termos internacionais, iniciativas similares têm sido desenvolvidas, sendo possível identificar oportunidades de participação através da base de dados da EPTIS (European Proficiency Testing Information System), disponível em <https://eptis.bam.de>

INTEGRAÇÃO DE MEDIÇÕES COM MODELOS DE PREVISÃO

Para a estimativa de níveis sonoros de longa duração, especialmente quando se pretende obter valores médios anuais, é comum a integração dos resultados de medição com previsões, utilizando metodologias normalizadas implementadas em programa informático [4].

FIGURA 1 Medições de ruído de tráfego ferroviário.



Um exemplo típico ocorre quando se pretende converter os resultados obtidos nas medições de ruído de tráfego rodoviário ou ferroviário (vd. Figura 2), em valores representativos do fluxo de tráfego anual [6]. Nesta situação, torna-se essencial o registo pormenorizado das características do tráfego durante o período de medição, incluindo o número de veículos por classe e as velocidades médias contínuas equivalentes, no caso do tráfego rodoviário. Quando os recetores se encontram a distâncias superiores a 100 metros da fonte sonora, deve-se ainda considerar a influência das condições atmosféricas na propagação do som. Assim, recomenda-se o registo das variáveis meteorológicas durante as medições – tais como velocidade e direção do vento, temperatura do ar, humidade relativa e estado de nebulosidade – a fim de caracterizar adequadamente as condições de propagação sonora predominantes entre a fonte e o recetor.

Nos modelos de previsão de ruído implementados em software especializado, deve-se também considerar a incerteza associada à própria modelação [7]. Esta pode ser dividida em duas componentes principais:

1. Incerteza nos dados de entrada e parâmetros do modelo: Inclui variáveis como a localização das fontes, geometria dos obstáculos, perfil topográfico, caracterização dos fluxos de tráfego, condições meteorológicas, entre outros. Muitas destas variáveis apresentam incertezas inerentes relacionadas com processos de medição, estimativa ou atribuição de valores padrão.
2. Incerteza intrínseca inerente ao modelo de cálculo: Relaciona-se com a transposição da norma técnica para um algoritmo computacional tridimensional, bem como com as simplificações introduzidas para otimização computacional. Essa incerteza reflete-se na fidelidade com que o modelo implementado representa a realidade física e normativa.

A caracterização das incertezas nos dados de entrada envolve o estudo individual dos vários tipos de dados necessários para a elaboração de um mapa de ruído. Estas incertezas podem ter origem em diversas fontes, incluindo aspetos que se relacionam com a sua medição e a correspondente avaliação. Por exemplo, incertezas associadas com a posição das fon-

tes, 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 como cada tipo de incerteza é distribuída, é necessária uma cooperação 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 conjunto de dados de entrada.

ASPETOS DE METROLOGIA ACÚSTICA: RASTREABILIDADE AOS MICROFONES PADRÕES PRIMÁRIOS

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.

Contudo, 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 para a calibração dos padrões primários utilizados em Acústica. Dada a impraticabilidade de manter uma fonte estável que produza uma pressão sonora de referência absoluta (por exemplo, 1 Pascal), a rastreabilidade metrológica dos níveis de pressão sonora é assegurada através da calibração de microfones por técnica de reciprocidade. O recurso a esta técnica de calibração 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 assegurado pelos padrões elétricos, e dependente de artefactos (microfones).

Na Figura 3 apresenta-se uma fotografia dos microfones padrão de laboratório existentes no LNEC [8], com as configurações mecânicas de 1 e 1/2 polegadas, e correspondentes a microfones cuja sensibilidade em pressão é aproximadamente independente da frequência. Os microfones padrões de laboratório são usualmente identificados pelas siglas LS1P ou LS2P, correspondendo o número à configuração mecânica do microfone (1 ou 1/2 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 [9,10,11] 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 micro-

fone. A sua aplicação, em campo de pressão (ou seja, o campo sonoro que é estabelecido no interior de cavidades cujas dimensões são inferiores a 1/4 do comprimento de onda), consiste numa configuração experimental que envolve a montagem de um par de microfones num acoplador acústico, com os diafragmas dispostos frente a frente.

A cadeia de rastreabilidade para a calibração de fontes sonoras (pistão-fones ou calibradores acústicos) 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. Por outro lado, e no que respeita à calibração de sistemas de medição de níveis sonoros a série de normas IEC 61672 [12,13,14], define os requisitos técnicos e metodológicos a serem seguidos para garantir a conformidade metrológica destes equipamentos.

- A Parte 1 (IEC 61672-1) especifica os requisitos de desempenho que os instrumentos de medição devem cumprir, incluindo critérios de resposta em frequência, linearidade, dinâmica e resposta temporal.
- A Parte 2 (IEC 61672-2) descreve os ensaios necessários à aprovação de modelo, os quais incluem testes acústicos (como a determinação das características direcionais e valores de correção em campo livre) e avaliações do desempenho elétrico e imunidade eletromagnética.

FIGURA 2 Registo de medição de ruído ambiente.

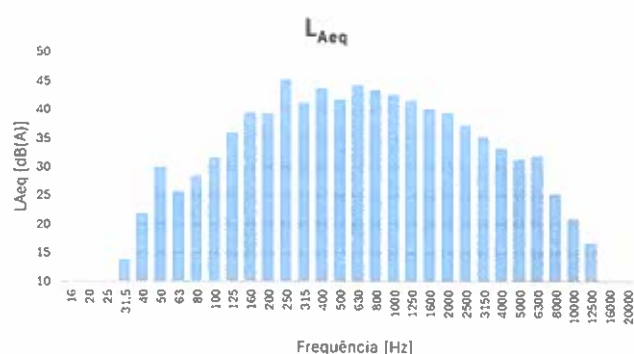


FIGURA 3 Microfones LS1P e LS2P existentes no LNEC [8].





A GARANTIA DA RASTREABILIDADE METROLÓGICA, DESDE OS PADRÕES PRIMÁRIOS ATÉ AOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE NÍVEIS SONOROS, É FUNDAMENTAL PARA ASSEGURAR A EXATIDÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS.

A Parte 3 (IEC 61672-3) aborda os ensaios de verificação periódica, consistindo num conjunto mais restrito de testes que devem ser realizados para assegurar o desempenho contínuo do equipamento ao longo do tempo.

A aplicação rigorosa destes procedimentos é essencial para garantir a exatidão e a rastreabilidade das medições acústicas, particularmente em contextos regulamentares e científicos.

DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O avanço das tecnologias digitais e da microeletrônica tem permitido o desenvolvimento de redes de sensores acústicos de baixo custo, baseadas em microfones MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), integrados em plataformas computacionais de baixo consumo, como Raspberry Pi ou Arduino.

Estas redes constituem uma alternativa promissora aos sistemas tradicionais de monitorização permanente do ruído, podendo ser utilizadas como sistemas complementares, ou até mesmo serem utilizados em alternativa para terminadas aplicações [15]. Quando integradas a sistemas de Informação Geográfica (SIG), estas soluções permitem:

- A monitorização dinâmica de ruído de tráfego rodoviário e ferroviário;

- A disponibilidade de informações em tempo real ao público sobre eventos acústicos relevantes (ex: congestionamentos, acidentes);
- O apoio ao ordenamento do território e à tomada de decisão política;
- O aumento da consciencialização pública sobre a poluição sonora.

Contudo, para que esses sistemas sejam operacionalmente válidos, é indispensável garantir a qualidade metrológica e a integridade dos dados recolhidos, o que implica:

- A definição de procedimentos de calibração automatizados e robustos para redes extensas de sensores;
- A rastreabilidade a padrões primários adequados;
- O desenvolvimento de métodos de calibração específicos para microfones MEMS, inclusive por meio da adaptação da técnica de reciprocidade na faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz.

Estudos recentes têm explorado a viabilidade desta abordagem, visando integrar os MEMS em cadeias metrológicas certificadas e compatíveis com os requisitos das normas internacionais [16].

ASPECTOS CONCLUSIVOS

A presente análise evidenciou a relevância da metrologia no domínio da acústica ambiental, especialmente no que respeita à avaliação e gestão do ruído ambiente. A garantia da rastreabilidade metrológica, desde os padrões primários até aos sistemas de medição de níveis sonoros, é fundamental para assegurar a exatidão das medições realizadas.

Com a evolução dos documentos normativos internacionais, conceitos como incerteza de medição têm sido incorporados nas metodologias de modelação e medição acústica, consolidando-se como parte integrante da prática técnica na área.

Além disso, o desenvolvimento de novos transdutores acústicos e metodologias de medição, com potencial para ampliar a exatidão e a acessibilidade das medições, dependerá sempre da existência de uma cadeia de rastreabilidade robusta e da sua integração nas estruturas normativas existentes. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. International Organization for Standardization, ISO 1996-1: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures, ISO, 2003.
2. International Organization for Standardization, ISO 1996-2: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Basic quantities and assessment procedures, ISO, 2016.
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. International Organization for Standardization, ISO 1996-2: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels, ISO, 2017.
5. Fradique, J.; Inglês, F. – Acústica e Vibrações- 15 anos de ensaios de Comparação Interlaboratorial, EuroRegio 2016, 13-15 de junho, 2016, Portugal.
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. European Commission Working Group: Assessment of exposure to noise. Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Version 2. WG-AEN 004. 2007, 2007.
8. Antunes, Sónia Monteiro – Metodologias para a calibração de equipamento no domínio da audiometria. Coleção teses de mestrado LNEC, n.º 21, Lisboa, LNEC, 2004, ISBN 972-49-1997-8.
9. International Electrotechnical Commission, IEC 61094-1, Measurement microphones, Part 1: Specifications for laboratory standard microphones, IEC 2000.
10. International Electrotechnical Commission, IEC 61094-2, Measurement microphones, Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique, IEC 2009+AMD1:2022.
11. International Electrotechnical Commission, IEC 61094-3, Measurement microphones, Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique, IEC 2016.
12. International Electrotechnical Commission, IEC 61672-1, Electroacoustics – Sound Level Meters, Part 1: Specifications, IEC 2013.
13. International Electrotechnical Commission, IEC 61672-2, Electroacoustics – Sound Level Meters, Part 2: Pattern Evaluation Test, IEC 2013+AMD1: 2017.
14. IEC 61672-3, Electroacoustics – Sound Level Meters, Part 3: Periodic Test, IEC 2013.
15. 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.
16. Wagner, R. e Fick, S. – Pressure reciprocity calibration of a MEMS microphone. J Acoust Soc Am. 2017 Sep; 142(3):EL251.