

## CÁLCULO DE INCERTEZAS EM LABORATÓRIOS DE ENSAIOS ACÚSTICOS

REFERENCIAS PACS: 43.20.Ye; 43.50.Yw; 43.58.Fm

Jorge Célio Fradique. Isabel Morgado Leal  
Direcção Regional de Lisboa e Vale do Tejo  
Ministério da Economia  
Estrada da Portela, Zambujal, Apartado 7546  
Alfragide, 2721-858 Amadora  
Portugal

### SUMMARY

The new standard ISO 17025 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories – applicable also to testing laboratories, introduces new requirements for accredited laboratories. One of them is the need to evaluate the uncertainty of the measured or calculated values presented by the laboratory. This standard is expected to be published by the end of this year (1999), replacing the EN ISO 45001, which is the present standard. Therefore the evaluation of the measurement uncertainties is an important issue for laboratories. We present an example of this kind of calculation for measurements of sound exposure at work, in our laboratory.

### INTRODUÇÃO

*Medir.* Desde que o Homem procurou organizar a sua vida colectiva que teve necessidade de medir. Por definição a medição é o conjunto de operações que têm por objectivo determinar o valor de uma grandeza, isto é, a comparação de uma grandeza com uma unidade padrão da mesma espécie, contando-se o número de vezes que a unidade de referência nela está compreendida.

Quando se mede deve-se considerar os instrumentos utilizados, o local e as respectivas condições ambientais onde se efectua esse acto e o próprio indivíduo envolvido na medição. Durante centenas de anos, o Homem confiou nos seus sentidos, na sua habilidade manual e em instrumentos simples para medir mas com a evolução tecnológica e científica foram sucessivamente criados instrumentos de medição de grande exactidão.

De facto, não basta medir, é necessário conhecer o rigor dessa medição. Os desafios para encontrar sistemas cada vez mais fiáveis prosseguem em todo o mundo, de forma a permitirem medir com incertezas cada vez menores.

A importância dos sistemas de acreditação de laboratórios integrados no âmbito geral dos sistemas de garantia da qualidade, nomeadamente, de laboratórios de acústica tem vindo a crescer.

Em Portugal a acreditação de laboratórios integra-se no Sistema Português da Qualidade, gerido pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ). Estando este organismo já acreditado pela European Accreditation (EA) garante, a nível europeu, o reconhecimento mútuo dos certificados.

De momento os laboratórios de ensaios não são obrigados a apresentar estudos de incertezas nos resultados finais dos ensaios. No entanto, e à imagem do que é exigido aos laboratórios de calibração, a próxima norma que vai servir de base à acreditação de laboratórios, ISO 17025 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, contempla claramente esse aspecto. Sendo de prever a edição da referida norma



antes do final do corrente ano, compreende-se a necessidade de os laboratórios de ensaios acreditados, bem como aqueles que pretendam vir a sê-lo, efectuarem algum trabalho e investigação ao capítulo do cálculo de incertezas.

## CÁLCULO DE INCERTEZAS EM LABORATÓRIOS DE ACÚSTICA

O estudo das incertezas relativamente a um ensaio deve ser baseado no documento Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement do Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) e no documento EAL - R2 - Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration da European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) que generalizam a aplicação tendo em atenção os modelos matemáticos correspondentes a cada tipo de medição.

Ao efectuar-se um estudo de incertezas é necessário, primeiro que tudo, conhecer quais as grandezas de entrada de forma a fazer-se a sua respectiva classificação. É necessário separar as grandezas do tipo A das do tipo B. As grandezas do tipo A são obtidas de dados experimentais sendo passíveis de um tratamento estatístico. No caso das grandezas sobre as quais não existe um conjunto de dados de medições, grandezas denominadas do tipo B, podem-se aplicar distribuições de probabilidade.

O Laboratório de Acústica da Direcção Regional de Lisboa e Vale do Tejo do Ministério da Economia está acreditado para vários tipos de ensaios de medição de ruído, nomeadamente:

Avaliação do grau de reacção humana ao ruído;  
Avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído;  
Medição de potência acústica de equipamentos.

O tipo de ensaio para efectuar o exemplo do cálculo das incertezas e cálculo da respectiva incerteza expandida foi a avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído.

As perdas auditivas derivadas da exposição ao ruído dependem de diversos factores, sendo objecto de estudo por parte da comunidade científica. Estes factores incluem o nível de pressão sonora, o conteúdo espectral do ruído e o facto de o ruído ser uniforme ou variável, impulsivo, contínuo ou intermitente. Sendo também importante a duração dos períodos de repouso bem como os níveis sonoros nesses períodos.

Em Portugal o Regulamento Geral sobre o Ruído, em vigor desde 1 de Janeiro de 1988, e posteriormente a transposição para o direito interno da directiva 86/188/CEE através do Decreto Lei 72/92 e do Decreto Regulamentar 9/92, de 28 de Abril, deu origem a um levantamento da situação da população activa desde essa data.

A metodologia seguida é pois a estabelecida no decreto regulamentar 9/92. Os parâmetros principais são a *Exposição pessoal diária de um trabalhador ao ruído durante o trabalho* –  $L_{EP,d}$  – e o *Pico de nível de pressão sonora* –  $L_{PICO}$  – os quais são definidos por:

$$L_{EP,d} = 10 * \log \left\{ \frac{1}{T_0} \int_0^{T_e} \left[ \frac{(p_A(t))^2}{(p_0)^2} \right] dt \right\} \quad (1)$$

$$L_{PICO} = 10 * \log \left( \frac{p_{MAX}}{p_0} \right)^2 \quad (2)$$

onde

$T_e$  – duração da exposição ao ruído,

$T_0$  – tempo de referência de 8 horas,

$p_{max}$  – valor máximo da pressão sonora instantânea,

$p_0$  – pressão sonora de referência (20µPa).

As medições são efectuadas no local correspondente ao posto de trabalho em questão, preferencialmente, na ausência do trabalhador. O microfone deve ser apontado na direcção do máximo ruído. A duração das medições é escolhida de forma a que se consiga obter uma amostragem representativa do ruído em questão. Sempre que se verifique a existência de ruído impulsivo, ou se os valores de pico, medidos em dB (A), forem superiores a 130 dB



(A), efectua-se nova medição com ponderação em frequência linear, registando-se o valor de máximo de pico em dB.

Os instrumentos de medição devem de ser, preferencialmente de classe de exactidão 1, devendo ainda encontrar-se devidamente verificados e/ou calibrados.

O cálculo do valor da exposição pessoal diária do trabalhador ao ruído –  $L_{EP,d}$  – é dado pela expressão:

$$L_{EP,d} = 10 \cdot \log \frac{1}{T_0} \left[ (T_1 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T1}}) + (T_2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T2}}) \right] \quad (3)$$

## MODELO MATEMÁTICO

### Origem do Modelo

Na utilização prática em avaliação de exposição de trabalhadores ao ruído, considera-se normalmente que o trabalhador se encontra sujeito a um ou mais tipos de trabalho diferentes, em que cada um é caracterizado por meio de um nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A,  $L_{Aeq}$ , e por um valor máximo de pico,  $MaxL_{PICO}$ .

Com base nestes valores de  $L_{Aeq}$  e na duração da exposição a cada um destes tipos de ruído, calcula-se o valor da exposição pessoal diária de cada trabalhador ao ruído,  $L_{EP,d}$ , a partir da expressão geral:

$$L_{EP,d} = 10 \cdot \lg \left[ \left( \frac{1}{8} \right) + \sum_{k=1}^{k=n} T_k \cdot 10^{(0,1 \cdot L_{Aeq,Tk})} \right] \quad (4)$$

onde  $L_{Aeq,Tk}$  é o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A de um ruído, num intervalo de tempo  $T_k$  correspondente ao tipo de ruído  $k$  a que o trabalhador está exposto durante  $T_k$  horas por dia.

Considerando o caso prático em estudo, verificou-se que o trabalhador ocupa habitualmente duas posições diferentes, que foram caracterizadas em termos acústicos pelo correspondente nível sonoro contínuo equivalente, e em termos de duração da exposição por um valor atribuído pelo próprio trabalhador em causa. Assim, a expressão (4) para o caso de apenas dois postos de trabalho diferentes vem:

$$L_{EP,d} = 10 \cdot \lg \frac{1}{T_0} \left[ (T_1 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T1}}) + (T_2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T2}}) \right] \quad (5)$$

De acordo com este modelo a exposição pessoal diária de cada trabalhador ao ruído,  $L_{EP,d}$ , obtém-se a partir da média dos diversos níveis sonoros a que o trabalhador está sujeito ao longo do dia de trabalho, ponderada pela duração de cada uma das actividades.

### Componentes Tipo A da Incerteza de Medição ( $a_1$ e $a_2$ )

Os valores de base que são utilizados no cálculo são os níveis sonoros  $L_{Aeq}$  dos vários locais de trabalho e a duração do trabalho em cada um dos locais. O valor da duração do trabalho só pode ser estimado pelo próprio trabalhador ou por um seu superior. Quanto ao nível sonoro de cada posto de trabalho este terá que ser medido recorrendo a equipamento de medição adequado. O equipamento habitual para este tipo de medições é um sonómetro integrador, que apresenta directamente o valor do nível sonoro contínuo equivalente,  $L_{Aeq}$ , durante o período de medição seleccionado.

A fim de possibilitar a apresentação de resultados com um valor de incerteza associado, as medições foram repetidas várias vezes para cada ponto, tendo também sido utilizados dois instrumentos de medição diferentes:

Sonómetro integrador Brüel & Kjær, modelo 2231

Analizador de frequência em tempo real Brüel & Kjær, modelo 2144



Ambos os equipamentos são da classe de exactidão 1, e encontram-se devidamente verificados/calibrados.

Com os resultados destas medições foi possível calcular as componentes da incerteza de tipo A, que fazem parte do cálculo global da incerteza da avaliação da exposição ao ruído. Estas foram avaliadas tendo por base a dispersão de valores medidos em cada um dos pontos, calculando para cada ponto o desvio padrão e considerando como incerteza padrão o desvio padrão experimental da média. Em virtude de a unidade utilizada ser uma unidade não linear, o decibel (dB), estes cálculos foram efectuados após conversão dos valores para unidades lineares, ou seja para pascal (Pa).

Dada a definição de nível sonoro em decibel:

$$L = 20 \cdot \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (6)$$

onde,

$p_0$  é a pressão sonora de referência ( $=2 \cdot 10^{-5}$  Pa = 20  $\mu$ Pa);

$p$  é o valor eficaz da pressão sonora, expresso em pascal.

É possível obter a incerteza padrão da estimativa da grandeza de saída associada a estas grandezas de entrada efectuando o produto da incerteza padrão da variável de entrada pelo respectivo coeficiente de sensibilidade, de acordo com,

$$u^2(y) = c_i^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7)$$

onde,

$u^2(x_i)$  é a variância experimental associada à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ ;

$c_i^2$  é o quadrado do coeficiente de sensibilidade, definido a seguir;

$u^2(y)$  é a contribuição para a variância associada à estimativa da grandeza de saída  $y$ , resultando da variância associada à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ .

Ou, em termos de desvio padrão,

$$u(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (8)$$

sendo naturalmente,

$u(x_i)$  o desvio padrão experimental associado à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$  ou incerteza padrão;

$c_i$  o coeficiente de sensibilidade, definido a seguir;

$u(y)$  a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída  $y$ , resultando da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ .

O coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada  $x_i$ , é a derivada parcial da função modelo  $f$  em relação a  $X_i$ , avaliada nas estimativas  $x_i$  da grandeza de entrada:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Bigg|_{X_1=x_1 \dots X_n=x_n} \quad (9)$$

Para este caso, face à definição de nível sonoro dada pela expressão (5) virá

$$c_i = \frac{\partial L}{\partial p} = 20 \cdot \frac{\lg e}{p} \quad (10)$$

onde,

$e$  é o número de Neper, base dos logaritmos neperianos;

$p$  é o valor da pressão sonora, em pascal.



### **Componentes Tipo B da Incerteza de Medição**

Neste ponto foram consideradas todas as outras possíveis fontes de incerteza, sobre as quais não existe um conjunto de dados de medições, mas sim conhecimento por outras fontes sobre as distribuições de probabilidade e os valores expectáveis do erro ou da incerteza.

#### **Classe de exactidão do sonómetro B&K 2231 (b<sub>1</sub>)**

O sonómetro marca Brüel & Kjær (B&K) modelo 2231, utilizado na medição, é sujeito a verificações periódicas no Laboratório Primário de Metrologia Acústica (LPMA), localizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Tendo sido aprovado nesta verificação existe a garantia de que o instrumento cumpre os requisitos da classe de exactidão 1, de acordo com as normas IEC 651 – Sound Level Meters, 1979 e IEC 804 – Integrating-Averaging Sound Level Meters, 1985. Esta garantia refere-se no entanto a um nível de referência, que é reproduzido no local da medição por meio de um calibrador acústico. Dado que a medição será naturalmente efectuada a um outro nível sonoro que não o de referência, considera-se como fonte de incerteza de tipo B o possível desvio de linearidade do sonómetro, que é especificado pelas normas referidas como tendo o valor máximo de  $\pm 0,7$  dB na gama de medição principal.

Deste modo considerou-se uma distribuição de probabilidade rectangular, com o limite superior de erro de 0,7 dB e número de graus de liberdade infinito.

#### **Classe de exactidão do analisador B&K 2144 (b<sub>2</sub>)**

Tudo o que foi dito no ponto anterior aplica-se também neste ponto, visto tratar-se também de um instrumento pertencente à classe de exactidão 1. Assim considerou-se também uma distribuição de probabilidade rectangular, com o limite superior de erro de 0,7 dB e número de graus de liberdade infinito.

#### **Resultado da calibração do “calibrador” B&K 4231 (b<sub>3</sub>)**

Este instrumento é utilizado para efectuar uma regulação inicial e final do sonómetro e do analisador (“calibração”). Funciona assim como padrão, dado que é muito menos sensível a variações de condições ambientais do que o sonómetro ou o analisador. O certificado de calibração do “calibrador” apresenta uma incerteza de medição expandida de 0,08 dB com factor de expansão  $k=2$ , pelo que se considerou uma distribuição normal com estes valores.

#### **Influência da temperatura sobre o “calibrador” B&K 4231 (b<sub>4</sub>)**

As especificações do fabricante fornecem um valor para o coeficiente de temperatura do calibrador,  $c_T = \pm 0,0015$  dB/°C. Este valor foi considerado como coeficiente de sensibilidade e aplicado à diferença de temperatura medida no local para a temperatura de referência de 20°C. Considerou-se uma distribuição rectangular, uma vez que se trata de um limite superior de erro, e número de graus de liberdade infinito.

#### **Influência da pressão atmosférica sobre o “calibrador” B&K 4231 (b<sub>5</sub>)**

As especificações do fabricante fornecem um valor para o coeficiente de pressão do calibrador,  $c_p = 8 \cdot 10^{-5}$  dB/hPa. Este valor foi considerado como coeficiente de sensibilidade e aplicado à diferença de pressão atmosférica medida no local para a pressão atmosférica de referência de 1013 hPa. Considerou-se uma distribuição rectangular, tratando-se de um limite superior de erro, e número de graus de liberdade infinito.

#### **Influência da humidade relativa sobre o “calibrador” B&K 4231 (b<sub>6</sub>)**

As especificações do fabricante fornecem um valor para o coeficiente de humidade do calibrador,  $c_H = 0,001$  dB/%RH. Este valor foi considerado como coeficiente de sensibilidade e aplicado à diferença de humidade medida no local para a humidade relativa de referência de 65%. Considerou-se uma distribuição rectangular, uma vez que



se trata de um limite superior de erro, e número de graus de liberdade infinito.

### **Incerteza do valor indicado para duração da exposição ao ruído ( $b_7$ e $b_8$ )**

Os tempos associados aos postos de trabalho ocupados por cada trabalhador são naturalmente da responsabilidade da empresa, uma vez que é esta que fornece estes dados. No entanto, mesmo em situações em que se pretende fornecer uma estimativa correcta, pode ser muito difícil atribuir um valor exacto, particularmente quando o trabalhador desempenha várias tarefas em que os tempos de trabalho de cada uma não são determinados de forma rígida pelo funcionamento dos equipamentos. Para contabilizar o efeito desta incerteza no cálculo global, considerou-se que os tempos fornecidos possuíam uma incerteza de 10 minutos, face às durações estimadas de uma hora. Assumindo que o valor da duração de exposição está tão correcto quanto possível, esta incerteza permitirá acautelar variações aleatórias na duração do trabalho, que dependerão dos mais variados factores, introduzindo uma dispersão de valores em torno do valor médio. Face a esta descrição, optou-se por considerar que esta incerteza pode ser modelada por uma distribuição normal, em que é razoável admitir que o valor estimado da incerteza corresponde a 3s, sendo portando o desvio padrão  $s=10/3$  minutos. Naturalmente é necessário aplicar a este factor o respectivo coeficiente de sensibilidade dado por:

$$c_i = \frac{\partial L_{EP,d}}{\partial T_i} \quad (11)$$

o que, aplicado à definição de  $L_{EP,d}$ , da equação (4) resulta:

$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial T_1} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T_1}}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (12)$$

e igualmente,

$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial T_2} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T_2}}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (13)$$

Considerou-se um número de graus de liberdade de 50, uma vez que admitimos à partida que a tolerância considerada correspondia a 3s.

### **Influência do cálculo da média ponderada na incerteza do valor final ( $b_9$ )**

Como vimos inicialmente, a expressão (4), que define o modo como se determina o valor da exposição ao ruído,  $L_{EP,d}$ , é uma média ponderada. Um cálculo deste tipo pode introduzir componentes de incerteza não desprezáveis, pelo que se determinou a sua influência a partir do primeiro termo da lei de propagação:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot u^2(x_i) \quad (14)$$

Calcularam-se assim os diversos coeficientes de sensibilidade, apresentados nas expressões seguintes:

$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial L_{Aeq,T_1}} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot T_1 \cdot 0,1 \cdot L_{Aeq,T_1} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_{Aeq,T_1} - 1)}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial L_{Aeq,T_2}} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot T_2 \cdot 0,1 \cdot L_{Aeq,T_2} \cdot 10^{(0,1 \cdot L_{Aeq,T_2} - 1)}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial T_1} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T_1}}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (17)$$



$$\frac{\partial L_{EP,d}}{\partial T_2} = 10 \cdot \frac{\lg e \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,T_2}}}{T_1 \cdot 10^{L_{Aeq,T_1}} + T_2 \cdot 10^{L_{Aeq,T_2}}} \quad (18)$$

Os resultados obtidos com este cálculo, em que se aplicam os coeficientes de sensibilidade obtidos na expressão (13), encontram-se indicados na folha de cálculo anexa, em que se apresentam os cálculos correspondentes à influência da utilização de uma expressão do tipo média ponderada no cálculo da exposição ao ruído. Considerou-se um número de graus de liberdade de 50, uma vez que este factor diz apenas respeito ao desenvolvimento matemático da expressão.

### EXEMPLO PRÁTICO

Para uma dada situação prática, os valores médios obtidos nas medições, e os tempos de exposição foram os indicados de seguida,

$L_{Aeq,T1}=73,8$  dB(A);  
 $L_{Aeq,T2}=73,1$  dB(A);  
 $T_1=1$  hora;  
 $T_2=1$  hora;

Da aplicação destes valores na expressão (4), obtém-se:

**$L_{EP,d}=67,4$  dB(A)**

Face ao cálculo de incertezas apresentado, a indicação correcta deste valor deve ser feita na forma de:

**$L_{EP,d}=67,4 \pm 1,8$  dB(A)**

Nota:

*"A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k=2$ , o qual para uma distribuição-t com  $n_{ef} = 232$  graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95 %. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EAL-R2"*

#### BIBLIOGRAFIA

- 1 – Brüel & Kjær – Instruction Manual, Modular Precision Sound Level Meter Type 2231 plus Integrating SLM Module BZ 7110, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, 1992.
- 2 – International Electrotechnical Commission – IEC Standard Publication 651 – Sound Level Meters, Geneva, Switzerland, 1979.
- 3 – International Electrotechnical Commission – IEC Standard Publication 804 – Integrating-Averaging Sound Level Meters, Geneva, Switzerland, 1985.
- 4 – Instituto Português da Qualidade – Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração, IPQ, Monte de Caparica, Portugal, Maio de 1998.
- 5 – Brüel & Kjær – Product data, Modular Precision Sound Level Meter Type 2231 plus Integrating SLM Module BZ 7110, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, 1997.
- 6 – Brüel & Kjær – Product Data, Real-time Frequency Analyzer — Type 2143 Dual Channel Real-time Frequency Analyzers - Types 2144, 2148/7667, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark, 1996.
- 7 – European cooperation for Accreditation of Laboratories – Supplement 1 to EAL-R2, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration: Examples, Edition 1, EAL, November 1997.

