

Avaliação do grau de incomodidade provocado por uma fonte sonora. Análise das fontes de incerteza e determinação da incerteza expandida.

Antunes, Sónia

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, santunes@lnec.pt

RESUMO: Durante os meses de Setembro e Outubro de 2003 a Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal (RELACRE) promoveu a realização de um ensaio de comparação laboratorial intitulado: “Avaliação do grau de incomodidade provocada por uma fonte sonora”. Para a determinação do valor de referência foram considerados diferentes factores que poderiam contribuir para a dispersão de resultados relacionados com o equipamento e método de medição. Em ensaios de Acústica existe cada vez mais a necessidade de realização de estudos que permitam avaliar valores de reprodutibilidade e posterior declaração do valor de incerteza de medição associada, de acordo com o guia ISO para a expressão da incerteza de medição (GUM). Neste artigo são discutidas as várias fontes de incerteza presentes num ensaio de avaliação do grau de incomodidade provocada por uma fonte sonora e apresentada uma metodologia para o cálculo da incerteza de medição expandida associada

ABSTRACT: Between September and October of 2003 the Portuguese Association of Accredited Laboratories (RELACRE) promoted the realization of an intercomparison in the field of acoustics named: “Assessment of the degree of annoyance emitted by a sound source”. For the determination of the references values there were taking account different factors could contribute for the dispersion of measurements, like equipment and measuring method. Reproducibility studies in order to achieve the uncertainty of measurement in acoustics are becoming more important nowadays. This article discuss the uncertainty sources and presents a methodology for the calculation of uncertainty according to the Guide of Expression of uncertainty for the measurement of the equivalent continuous A weighted sound pressure level of the ambient and residual noises and the rating level.

1. INTRODUÇÃO

O critério para a avaliação de incomodidade de uma fonte sonora (referenciado neste artigo pela sigla A.I) está expresso no número 3 do artigo 8º do Regime Legal sobre a Poluição Sonora (RLSP), aprovado pelo Decreto-Lei nº 292/2000 de 14 de Novembro [1]. O referido artigo estabelece que a diferença entre o nível sonoro contínuo, ponderado A, do ruído ambiente (referenciado neste artigo pela sigla $L_{Aeq,T}$ R.A) durante a ocorrência do ruído particular e o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, do ruído residual (referenciado neste artigo pela sigla $L_{Aeq,T}$ R.R), não poderá exceder 5 dB(A) no período diurno e 3 dB (A) no período nocturno, consideradas as correcções relativas às características tonais ou

impulsivas do ruído particular (passando-se a designar por nível de avaliação $L_{AR,T}$), como se indica nas expressões seguintes:

$$A.I = L_{AR,T} - L_{Aeq,T} R.R \leq 5 \text{ dB (A) no período diurno (das 7 às 22 horas)} \quad (1)$$

$$A.I = L_{AR,T} - L_{Aeq,T} R.R \leq 3 \text{ dB (A) no período diurno (das 22 às 7 horas)} \quad (2)$$

em que:

$$L_{AR,T} = L_{Aeq,T} R.A + K1 + K2 \quad (K1 \text{ correcção tonal e } K2 \text{ correcção impulsiva}) \quad (3)$$

A legislação portuguesa (Anexo 1 do RLPS) considera que um ruído apresenta características tonais se, no espectro de um terço de oitava, o nível de uma banda excede o das adjacentes em 5 dB ou mais, para o intervalo de tempo em avaliação (verificando-se nesta situação $K1 = 3$ dB(A)). A medição deve ser efectuada na gama de frequências entre os 50 Hz e 8 kHz, utilizando a ponderação em frequência A (como descrito nos procedimentos específicos de medição de ruído ambiente [2]). O método para detectar as características impulsivas do ruído consiste em determinar a diferença entre o nível sonoro contínuo equivalente, $L_{Aeq,T}$, medido em simultâneo com característica impulsiva (*impulse*) e rápida (*fast*). Se esta diferença for superior a 6 dB, o ruído deve ser considerado impulsivo (verificando-se $K2 = 3$ dB(A)). Caso se verifique a coexistência de características tonais e impulsivas a correcção a adicionar é de 6 dB(A). Aos valores limite da diferença das expressões (1) e (2) deverá ser adicionado um valor D em função da ocorrência do ruído particular, como se apresenta na tabela 1.

Tabela 1- *Correcção a introduzir em função da duração do ruído particular*

Duração acumulada de ocorrência do ruído particular, T	Correcção dB(A)
T < 1 h	4
1 h < T < 2 h	3
2 h < T < 4 h	2
4 h < T ≤ 8 h	1
T > 8h	0

2.RESULTADOS OBTIDOS

No ensaio de comparação interlaboratorial [2] foram utilizadas 2 salas adjacentes, onde na primeira (designada por sala emissora) foi colocada a fonte sonora, enquanto que na segunda (sala receptora) foram realizadas as medições. A fonte sonora produzia um ruído estacionário com uma componente tonal na banda de terço de oitava centrada na frequência de 2000 Hz, durante 30 minutos e pretendia simular um ruído particular produzido por uma fonte com um período de funcionamento compreendido entre as 7 e 22 horas (período diurno), pelo que, à luz do RGPS, se deve verificar o cumprimento da expressão (1), com $K2 = 3$ dB(A) e $D = 0$. Para a determinação do valor de referência foram seleccionados os resultados obtidos nos três pontos em perfil diagonal, repetindo-se oito vezes a medição em cada ponto (designados nas

tabelas 2, 3 e 4 por P1, P2 e P3). O resultado de cada medição (média espacial) foi obtido a partir da média logarítmica para estes 3 pontos de acordo com a expressão (4).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 10^{(L_{Aeq,t})i/10} \right] \quad (4)$$

Nas tabelas 2 e 3 apresentam-se os resultados das medições do nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, do ruído residual e do ruído ambiente durante a ocorrência do ruído particular, por ponto de medição e respectiva média espacial. Na tabela 4 apresentam-se os valores do nível de avaliação para cada medição. Nas três tabelas apresenta-se igualmente os correspondentes valor médio e desvio padrão experimental da média (expressão 10).

Tabela 2 - Resultados das medições do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A do ruído residual por ponto de medição e respectiva média espacial, correspondentes valores médios e desvio padrão experimental da média

Med.	P1 [dB(A)]	P2[dB(A)]	P3[dB(A)]	$L_{Aeq,T}$ R.R.[dB(A)]
M1	36,8	37,3	37,2	37,105
M2	36,8	37,3	37,8	37,319
M4	36,5	36,6	37,8	37,008
M5	36,9	37,3	38,1	37,462
M6	36,7	36,5	37,7	36,999
M7	36,1	37,8	37,9	37,341
M8	36,5	37,3	37,4	37,085
M9	36,4	36,9	37,2	36,846
V.Medio	36,59	37,13	37,64	37,1
Des.P.Med.	0,082	0,135	0,126	0,08

Tabela 3- Resultados das medições do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A do ruído ambiente durante a ocorrência do ruído particular, por ponto de medição e respectiva média espacial, correspondentes valores médios e desvio padrão experimental da média

Med	P1 [dB(A)]	P2[dB(A)]	P3[dB(A)]	$L_{Aeq,T}$ R.A.[dB(A)]
M1	60,7	60	60,4	60,376
M2	60,3	60,7	60,7	60,571
M3	60,2	60,3	60,5	60,335
M4	60	60,4	59,6	60,012
M5	60	60,8	60,1	60,315
M6	60,2	60,3	59,6	60,044
M8	59,6	59,6	60,2	59,809
M9	60,2	60,3	60	60,168
V.Medio	60,15	60,30	60,14	60,1
Des.P.Med.	0,115	0,116	0,142	0,04

Tabela 4 - Valores do nível de avaliação para cada medição e correspondente valor médio e desvio padrão experimental da média

Med	LAR [dB(A)]
M1	26,271
M2	26,252
M3	26,327
M4	25,550
M5	26,316
M6	25,703
M7	25,556
M8	25,964
M9	26,023
V.Medio	26,0
Des.P.Med.	0,07

3.AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

De acordo com a metodologia descrita no GUM [4], a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ de um resultado de uma medição representa uma estimativa do desvio padrão associado a esse resultado e exprime-se pela raiz quadrada positiva da estimativa da variância $u_c^2(y)$, obtida a partir da combinação das incertezas padrão individuais $u(x_i)$ das estimativas das grandezas de entrada x_i e covariância ($u(x_i, x_j)$) associada a x_i e x_j , segundo a expressão (5). Esta expressão corresponde ao desenvolvimento em série de Taylor de 1ª ordem da função $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, expressão conhecida como a lei de propagação de incertezas. As derivadas parciais, $\partial f/\partial x_i$ (também designadas de coeficientes de sensibilidade) são iguais às derivadas parciais $\partial f/\partial X_i$ avaliadas no ponto $X_i=x_i$.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i, x_j) \quad (5)$$

em que

$$u(x_i, x_j) = \text{cov}(x_i, x_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{ik} - \bar{X}_i) \cdot (X_{jk} - \bar{X}_j) \quad (6)$$

ou em termos de coeficiente de correlação, a expressão (5) escreve-se como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot r(x_i, x_j) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \quad (7)$$

No caso de grandezas de entrada não correlacionadas entre si, a expressão (5) simplifica-se:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (8)$$

em que $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) corresponde à contribuição para a incerteza padrão combinada associada à incerteza padrão referente à estimativa da grandeza de entrada x_i . A incerteza de medição expandida U , é obtida mediante a multiplicação da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída por um factor de expansão k :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (9)$$

É possível agrupar as componentes de incerteza em duas categorias, designadas por “Tipo A” e “Tipo B”. Numa avaliação de tipo A da incerteza padrão a melhor estimativa de uma grandeza (X_i) é dada pela média de n observações estatisticamente independentes e em condições de repetibilidade, enquanto que, a incerteza padrão associada $u_A(x_i)$ é dada pelo desvio-padrão experimental da média (expressão 10). Uma abordagem deste tipo foi utilizada para o cálculo das componentes indicadas em a1 nas tabelas 5 e 6.

$$u_A(x_i) = s(\bar{X}_i) = \frac{s(X_{i,K})}{\sqrt{n}} = \left[\frac{1}{n} \left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{i,K} - \bar{X}_i)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

A avaliação de tipo B da incerteza padrão assenta numa apreciação científica baseada em toda a informação disponível. No caso da determinação do $L_{Aeq,T} R.A$ e $L_{Aeq,T} R.R$ consideraram-se as contribuições devidas ao padrão (calibrador acústico) utilizado no ajuste da sensibilidade global do sonómetro à frequência de 1000 Hz (indicadas como b5, b6 e b7 na tabela 5), as contribuições devidas ao equipamento de medição, designadamente a sua resolução, valor máximo da incerteza expandida para a sua verificação metrológica e valor estimado para a incerteza devida à diferença entre a resposta em campo livre e campo de pressão do sonómetro, para a frequência emitida pelo calibrador (indicadas como b2, b3 e b4 na tabela 5). Considerou-se também a incerteza de medição associada ao cálculo da média espacial (traduzida pela expressão 4) e que é representada na tabela 5 por b1. Para a sua determinação considerou-se a expressão:

$$L_{Aeq,T} R.R \text{ (ou } L_{Aeq,T} R.A) = f [(L_{Aeq,T})_{P1} ; (L_{Aeq,T})_{P2} ; (L_{Aeq,T})_{P3}] \quad (11)$$

pele que, tendo em conta a expressão 4, se verifica:

$$\frac{\partial L_{Aeq,T} RR(ouRA)}{\partial (L_{Aeq,T})_{P_i}} = \frac{10^{0,1(L_{Aeq,T})_{P_i}}}{\sum_{n=1}^3 10^{0,1(L_{Aeq,T})_{P_i}}} \quad (12)$$

Foram também calculadas as covariâncias (expressão 6) entre os diferentes pontos e respectivos coeficientes de correlação, obtendo-se para o $L_{Aeq,T} R.R$ valores de coeficiente de correlação inferiores a 0,3 e para $L_{Aeq,T} R.A$ valores entre 0,3 e 0,5.

No caso da avaliação de incomodidade considerou-se a expressão:

$$A.I = f [L_{Aeq,T} R.A; L_{Aeq,T} R.R] \quad (13)$$

pele que, tendo em conta a expressão 1, se verifica:

$$\frac{\partial A.I}{\partial (L_{Aeq,T})_{R.A}} = \frac{\partial A.I}{\partial (L_{Aeq,T})_{R.R}} = 1 \quad (14)$$

Neste caso foi também calculada a covariância e o coeficiente de correlação entre $L_{Aeq,T} R.A$ e $L_{Aeq,T} R.A$, tendo este último parâmetro o valor de 0,01. Refira-se ainda que no caso da A.I considerou-se a incerteza de medição associada ao arredondamento à unidade do resultado final e representado por b3 na tabela 6.

A tabela 5 apresenta o balanço da incerteza de medição para a determinação do $L_{Aeq,T} R.R$

Tabela 5 – Incertezas de medição na determinação do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A do ruído residual para cada medição ($L_{Aeq,T} R.R$)

Fonte de Incerteza	Simbolo	Valor	Limite sup. de erro (\pm)	Inc. $u(x_i)$ / / Desv.Pad. $s(x_i)$	Dist. De Prob.	Divisor	coef. Sens. C_i	Inc. padrão $u_i(y)$ °C	Variância $u_i^2(y)$ °C ²	Nº G. Liberdade
TIPO A										
a1: Repetibilidade										
	dB			0,08	Normal		1	8,000E-02	6,4000E-03	7
TIPO B										
b1: Média espacial										
	dB			0,07	Normal	1	1	0,070	4,9000E-03	50
b2: Verificação sonómetro										
	dB			0,2	Normal	2	1	1,000E-01	1,0000E-02	50
b3: Resolução sonómetro										
	dB		0,1		Rectangular	1,73	1,00E+00	5,78E-02	3,34E-03	50
b4: Correção CL/CP micro (1000 Hz)										
	dB			0,2	Normal	2	1	1,00E-01	1,00E-02	50
b5: Correção pressão ambiente - calibrador 4226										
	kPa		0,5		Rectangular	1,73	5,5000E-04	1,59E-04	2,53E-08	50
b6: Correção temperatura - calibrador 4226										
	°C		0,25		Rectangular	1,73	2,00E-03	2,89E-04	8,35E-08	50
b7: Calibração Calibrador 4226 (1000 Hz)										
	dB			0,08	Normal	2	1	4,00E-02	1,60E-03	50
b8 : Erro de arredondamento										
	dB		0,005		Rectangular	1,73	1	2,89E-03	8,35E-06	50
Variância (TOTAL):									0,036	
Incerteza Padrao:								0,190393547		124
Incerteza expandida							2	0,4		

Relativamente à determinação da incerteza de medição do $L_{Aeq,T} R.A$, o cálculo efectuado é em todo idêntico ao do balanço anterior. Neste caso as diferenças residem na repetibilidade (igual a 0,04 dB) e na componente associada à média espacial (igual a 0,09 dB). Para este parâmetro o valor da incerteza de medição expandida é igualmente de 0,4 dB(A). Na tabela 6 é apresentado o balanço da incerteza de medição para a determinação do A.I.

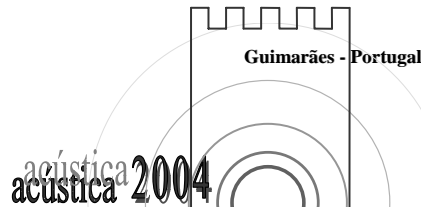
Tabela 6 – Incertezas de medição na avaliação da incomodidade provocada pela fonte de ruído (A.I)

Fonte de Incerteza	Simbolo	Valor	Limite sup. de erro (\pm)	Inc. $u(x_i)$ / Desv.Pad. $s(x_i)$	Dist. De Prob.	Divisor	coef. Sens. C_i	Inc. padrão $u_i(y)$ $^{\circ}C$	Variância $u_i^2(y)$ $^{\circ}C^2$	N ^o G. Liberdade
TIPO A										
a1: Rep. Avaliacao Incomodidade										
	dB			0,07	Normal	1	1	7,000E-02	4,9000E-03	50
a2: Cont.Corr. R.A/R.R										
	dB			1,15E-03	Normal	1	1	1,15E-03	1,33E-06	50
TIPO B										
b1: Inc LAR.R										
	dB			0,4	Normal	2	1	0,200	4,0000E-02	50
b2: Inc.LAR.A										
	dB			0,4	Normal	2	1	2,000E-01	4,0000E-02	50
b3: Erro de arredondamento										
	dB		0,25		Rectangular	1,73	1,0000E+00	1,45E-01	2,09E-02	50

Variância (TOTAL):		0,106
Incerteza Padrao:	0,32524465	153
Incerteza expandida	2	0,7

4. CONCLUSÕES

Os resultados de um ensaio de comparação laboratorial, designadamente o desvio padrão de todos os participantes, pode ser utilizado como estimativa do valor da incerteza padrão para o parâmetro em avaliação [5]. Tendo em conta os resultados do ensaio de comparação interlaboratorial efectuado [3] em que o desvio padrão para os parâmetros $L_{Aeq,T} R.A$ e $L_{Aeq,T} R.R$ têm, respectivamente, os valores $s(L_{Aeq,T} R.A) = 0,26$ dB(A) e de $s(L_{Aeq,T} R.R) = 0,52$ dB(A), pode-se estimar que os valores de incerteza de medição associados a cada parâmetro são respectivamente iguais a $u_{95\%}(L_{Aeq,T} R.A) = 0,5$ dB(A) e $u_{95\%}(L_{Aeq,T} R.R) = 1$ dB(A). Relativamente a avaliação de incomodidade o desvio padrão obtido é de $s(A.I) = 0,56$ dB(A), pelo que a incerteza de medição associada é de $u_{95\%}(A.I) = 1,04$ dB(A). Comparativamente com aos valores de incerteza de medição calculados neste trabalho, ($u_{95\%}(L_{Aeq,T} R.A) = 0,4$ dB(A), $u_{95\%}(L_{Aeq,T} R.R) = 0,4$ e $u_{95\%}(A.I) = 0,7$ dB(A)), verifica-se que estes últimos apresentam um valor ligeiramente inferior, em particular o valor de incerteza de medição correspondente ao $L_{Aeq,T} R.R$. Este facto permite salientar a importância da selecção do numero de pontos de medição a utilizar assim como a respectiva localização, de forma a contemplar as variações espaciais do nível sonoro contínuo equivalente, no recinto em avaliação.



AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Direcção Regional do Ministério da Economia do Norte pela cedência das instalações onde decorreram os ensaios. Agradece-se igualmente aos técnicos Fernando Mateus e Sandra Sousa do LNEC e ao técnico Rui Sousa da Direcção Regional do Ministério da Economia do Norte pelo contributo que deram na realização de medições. Finalmente agradece-se às firmas Ambergo e MRA Instrumentação pela cedência de equipamentos que foram utilizados pela comissão técnica.

REFERENCIAS

- [1] Regime Legal da Poluição Sonora- Aprovado pelo Decreto-Lei nº 292/2000 de 14 de Novembro.
- [2] Procedimentos Específicos de Medição de Ruído Ambiente. Instituto do Ambiente- Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente. Abril de 2003 (acessível em www.iambiente.pt)
- [3] S. Antunes, L. Cortez, A. Falcão, J. Fradique, F. Inglês ; *Avaliação do grau de incomodidade provocado por uma fonte sonora. Ensaio de comparação interlaboratorial.* . In Proceedings do IV Congresso Ibero-americano de Acústica e IV Congresso Ibérico de Acústica, Guimarães, Portugal, Setembro, 2004.
- [4] 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.
- [5] Eurolab- *Technical Report nº 1/200 : Measuring Uncertainty in Testing-* Eurolab, Germany, 2002.