

INCERTEZA DE AMOSTRAGEM NAS MEDIÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL. INFLUÊNCIA NA PRECISÃO DOS INDICADORES DE LONGA DURAÇÃO, QUANDO OBTIDOS A PARTIR DE MEDIÇÕES DE CURTA DURAÇÃO.

PACS: 43.50.Rq

Mário Mateus; João A. Dias Carrilho; Manuel C. Gameiro da Silva
ADAI, LAETA – Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Pólo II)
3030-201 Coimbra, Portugal,
Tel./fax:(351)239708580/89.
E-mail: mario.mateus@adai.pt, joao.carrilho@dem.uc.pt, manuel.gameiro@dem.uc.pt

ABSTRACT

A methodology based on the bootstrap method to evaluate the influence of the sampling parameters in the environmental noise measurements is presented. The method was applied to a time series of sound levels from road traffic in an urban area which has been continuously characterized by since 2009.

For each of the reference periods, the application of this method allowed to quantify the uncertainty component, depending on the number of sampling episodes and their respective duration. It proved possible to express the uncertainty component by means of a generic power function, with coefficients corresponding to each of the reference periods.

Including this component and considering only the remaining fixed components considered in the ISO / DIS 1996-2:2015 standard, the uncertainty value of the long-term indicator $U(L_{den})$ can increase 2 to 3 times.

RESUMO

É apresentada uma metodologia baseada no método de *bootstrap*, para avaliar a influência dos parâmetros de amostragem, nas medições de ruído ambiental. O método foi aplicado a uma série temporal de níveis sonoros correspondentes a uma fonte rodoviária inserida numa zona urbana que se encontra caracterizada, continuamente, desde 2009.

Para cada um dos períodos de referência, a aplicação deste método permitiu quantificar a componente de incerteza, em função do número de episódios de amostragem e da sua respetiva duração. Verificou-se ser possível expressar esta componente de incerteza através de uma função potência, genérica, adaptando-a a cada um dos períodos de referência.

Incluída esta componente e considerando exclusivamente as restantes componentes fixas, contabilizadas na norma ISO/DIS 1996-2:2015, o valor de incerteza do indicador de longa duração $U(L_{den})$ pode aumentar entre 2 a 3 vezes.

Palavras-chave: Incerteza dos indicadores de ruído de longa duração; Estratégias de amostragem; Monitorização de ruído ambiente; Medição de ruído.

INTRODUÇÃO

A versão atual da norma ISO/DIS 1996-2, preparada pelo ISO/ TC 43/ SC1 e cuja votação final está prevista para 2015/09/02 [1], propõe atualmente dois métodos distintos para estimar os indicadores de ruído de longa duração: recorrendo um a medições de longa duração; e o outro a medições de curta duração. Nos dois métodos é proposto que a amostragem seja composta por distintas campanhas de medição. A amostragem pode assim ser constituída por episódios de medição, distribuídos pelos períodos de referência em avaliação. Embora a norma proponha metodologia para a estimação da incerteza, dando exemplos para diversas situações, nenhum dos modelos tem em consideração a fonte de incerteza associada à estratégia de amostragem escolhida pelo técnico. Este tem a seu cargo decidir não só o momento em que deve concretizar cada episódio de medição, assim como a duração de cada episódio e o respetivo número de episódios de medição. Estes dois últimos parâmetros (duração e número de episódios de medição) podem condicionar a incerteza final e o grau de precisão com que são obtidos os indicadores de longa duração.

Relativamente a estes indicadores é possível encontrar diversa literatura [2-5] que fornece indicações relativamente à precisão possível de obter com uma estratégia de amostragem específica. Contudo a quantificação desta componente, sendo desconhecida, não é ainda contabilizada em [1].

Nesse sentido, os autores desenvolveram uma metodologia de análise sistemática para a avaliar a incerteza associada a qualquer estratégia de amostragem [6,7], baseada em medições de níveis sonoros obtidos a partir de amostragens de curta duração, relacionando a duração e o número de episódios de medições. Na Ref. [8] os autores apresentam a aplicação deste método quantificando a influência da estratégia de amostragem na determinação da incerteza do indicador de longa duração L_{den} .

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A obtenção do conjunto de dados meteorológicos e de níveis sonoros, foram obtidos entre Maio de 2009 e Dezembro de 2012, numa zona urbana da cidade de Coimbra, em que a fonte dominante corresponde a uma fonte de tráfego rodoviário. Nesta zona o tráfego atravessa uma ponte sobre o rio Mondego. A Figura 1 mostra a fotografia aérea do local, obtida a partir da aplicação Google Earth. No local de medição encontra-se sobreposta a rosa-dos-ventos onde é possível verificar que a direção predominante corresponde a NW. Para esta direção a velocidade média do vento encontra-se no intervalo [1,0 m.s-1 e 2,0 m.s-1].



Figura 1 – Imagem aérea da zona estudada, com a sobreposição da rosa-dos-ventos (adaptado de Google earth)

O ponto de medição situa-se a aproximadamente 150m da via de tráfego considerada O sistema de medição é constituído com base num sistema de aquisição de dados da National Instruments, um microfone modelo 4189 e um pré amplificador modelo 2671. O microfone do sistema de medição está montado no exterior de uma janela do terceiro andar do edifício do Laboratório de Aerodinâmica Industrial, da Universidade de Coimbra [9]. A cadeia de medição cumpre as especificações da norma IEC61672-1:2002, para a classe de precisão I [10].

A Figura 2 mostra, com linha tracejada, os níveis médios horários obtidos ao longo de 4 anos de aquisição contínua e, com linha sólida, os níveis médios horários de uma amostra de 17 dias consecutivos, a amostra utilizada na implementação do método que adiante se referirá. A linha sólida representa a variação média horária de uma amostra de níveis sonoros $L_{Aeq,5min}$, adquiridos em contínuo ao longo de 17 dias. A linha tracejada corresponde á variação média horária dos níveis sonoros $L_{Aeq,30min}$, adquiridos diariamente ao longo de 4 anos. A faixa de incerteza dos níveis sonoros que representam os 4 anos de medição, é representada pelas duas linhas ponteadas, o que considerando uma distribuição Gaussiana, e utilizando um fator de cobertura igual a 2, nos permite definir um intervalo de confiança com 95% de probabilidade. Verifica-se, portanto, que os valores obtidos a partir da amostra de 17 dias são típicos da evolução temporal do nível sonoro no local.

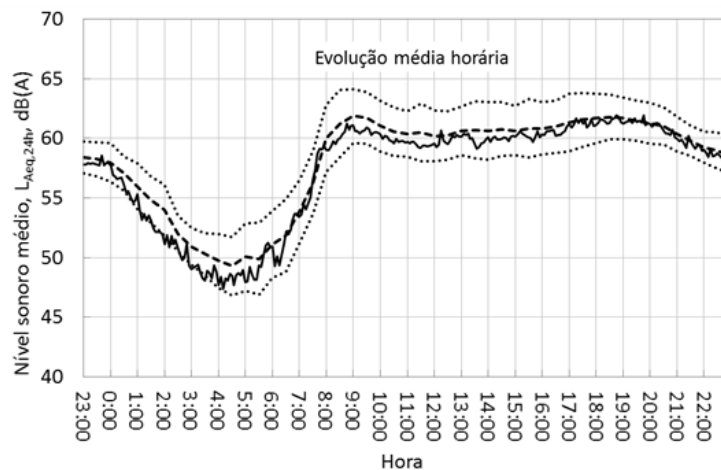


Figura 2 - Comparação entre os níveis médios obtidos ao longo de 17 dias (linha sólida) e os níveis médios obtidos durante 4 anos (linha tracejada).

O ALGORITMO DE BOOTSTRAP

O método de *bootstrap* [11] é um método de reamostragem que pode ser utilizado para estimar propriedades estatísticas de uma população completa, com base apenas numa amostra. A vantagem deste método sobre os métodos propostos em [12] assenta no fato de não ser necessário conhecer *à priori* a distribuição de probabilidade a considerar para cada uma das entradas do modelo de medição. Contudo a amostra a considerar deve ser representativa da população em estudo.

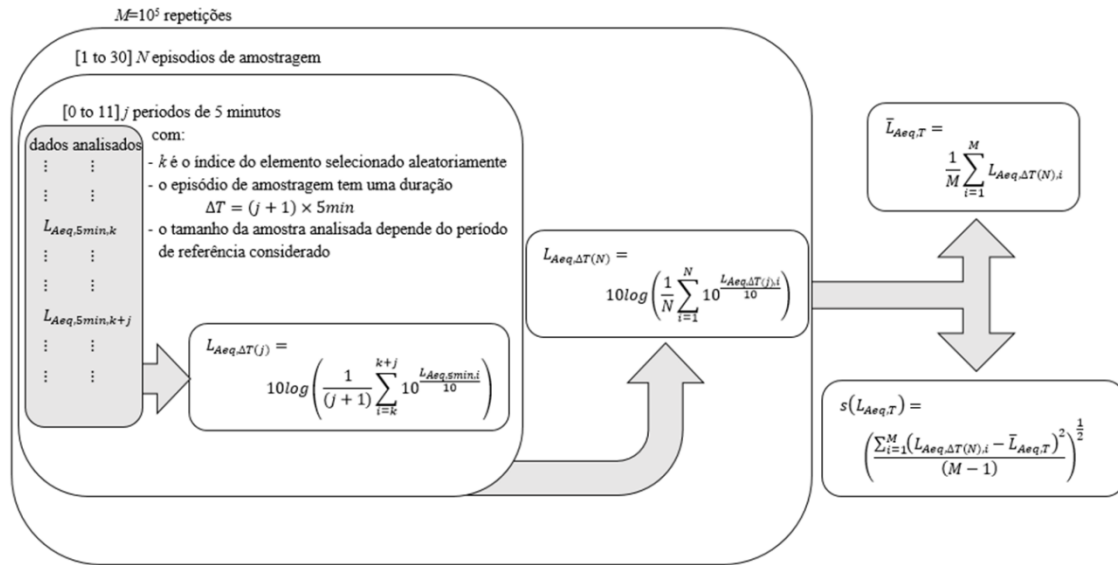


Figura 3 – Algoritmo utilizado no programa de reamostragem para obter o valor médio do desvio padrão dos níveis sonoros.

Para avaliar o efeito das diferentes estratégias de amostragem (das diferentes combinações de duração e número de episódios de amostragem), o algoritmo foi implementado sobre o *software* de desenvolvimento LabVIEW. Cada estratégia de amostragem consiste num número de N episódios de medição e de duração ΔT . É selecionada aleatoriamente uma amostra caracterizada por uma duração ΔT , entre 5 min e 60 min, e fazendo variar o número de episódios, N , entre 1 e 30, obtém-se o nível sonoro $L_{Aeq,\Delta T(N)}$ correspondente. Cada combinação $(\Delta T; N)$ é calculada $M = 10^5$ vezes. Este valor foi determinado tendo em conta o critério de estabilização escolhido ($s(L_{Aeq,T}) = 0,01 \text{ dB}$) [6].

A aplicação do algoritmo representado na Figura 3 a cada um dos períodos de referência da amostra permitiu obter uma família de curvas das quais, para facilidade de leitura e representação, apenas se apresentam nas Figuras 4 a), b) e c) alguns dos resultados retirados de todas as combinações possíveis $(\Delta T; N)$. O ajustamento de curvas sobre os dados resultantes do processo de reamostragem permitiu obter as expressões polinomiais nelas incluídas. Estas expressões polinomiais, para as quais se apresenta também o quadrado dos respetivos coeficientes de correlação, são expressões do tipo $y = Ax^{-B}$. A análise daquelas figuras evidencia a existência de uma dependência com a duração de cada episódio. Foi aplicado então um novo processo de ajustamento que permitiu incluir a influência da duração de cada episódio de amostragem, ficando assim o indicador desvio padrão definido como uma função de duas variáveis: o número e a duração de cada episódio de amostragem.

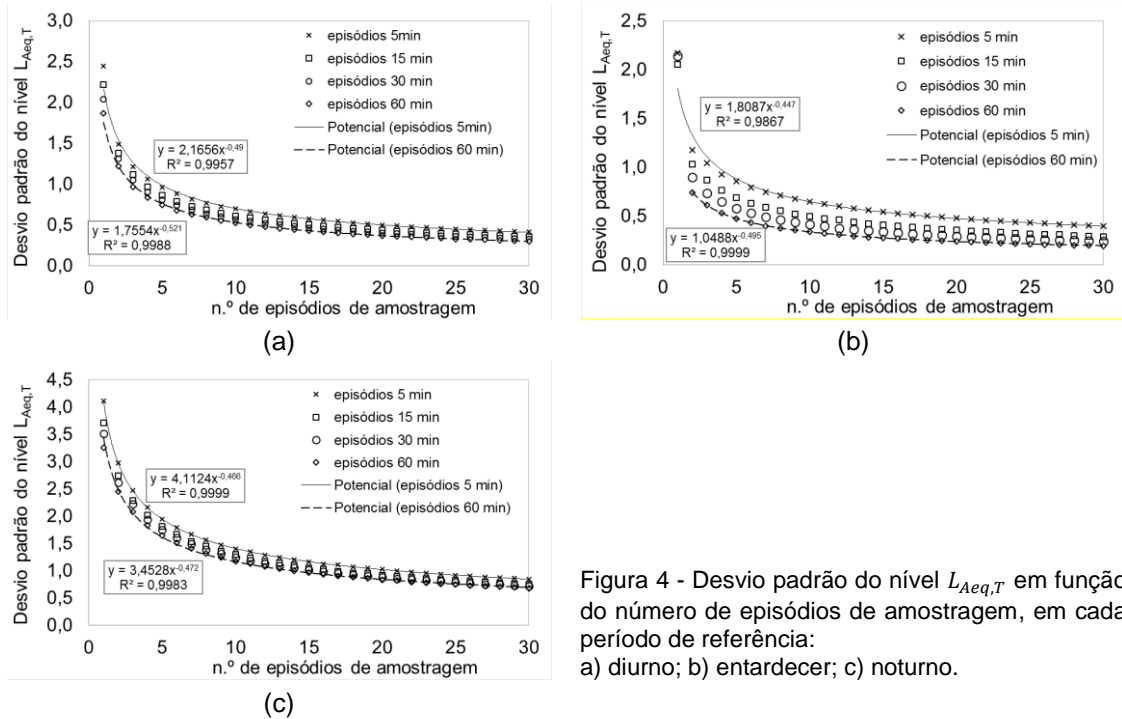


Figura 4 - Desvio padrão do nível $L_{Aeq,T}$ em função do número de episódios de amostragem, em cada período de referência:
a) diurno; b) entardecer; c) noturno.

As expressões obtidas obedecem a uma estrutura formal, na qual variam somente os coeficientes numéricos, em função do período de referência considerado [6, 7], vindo:

$$s = c_1 \times \Delta T^{\alpha_1} \times N^{-(\alpha_2 + \alpha_3 \times \ln(\Delta T))} \quad (1)$$

Verificou-se então ser possível adaptar a expressão (1) a cada um dos períodos de referência, através dos coeficientes apresentados na Tabela. 1.

Coefficiente	diurno	entardecer	noturno
c_1	2,5224	2,2885	4,6034
α_1	-0,086	-0,181	-0,086
α_2	0,408	0,3695	0,4686
α_3	0,010	0,034	0,002

Tabela 1 – Valores numéricos dos coeficientes da Equação (1), aplicáveis a cada período de referência.

Após a adaptação a cada um dos períodos de referência [13], a expressão (1) permite determinar o valor da componente de incerteza associado a uma estratégia de amostragem cujos parâmetros estejam dentro do domínio de validade do modelo considerado. Foram consideradas neste caso medições de curta duração [1]. Doravante esta componente passará a ser referenciada u_{samp} .

INCERTEZA DO INDICADOR DE RÚIDO DE LONGA DURAÇÃO

Na Ref. [13] o indicador de ruído de longa duração é dado pela seguinte expressão (2):

$$L_{den} = 10 \times \log_{10} \left[\frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right] \quad (2)$$

Os indicadores L_d , L_e , L_n são os níveis sonoros de longa duração para os períodos de referência: dia, entardecer e noite. A sua obtenção pode ser efetuada a partir de medições de

curta duração [1] desde que sejam consideradas as condições meteorológicas, pois estas podem ter forte influência na propagação da energia sonora entre o emissor e o recetor. O seu efeito é incorporado uma vez que são introduzidas 4 classes meteorológicas: M1 – desfavorável; M2 – neutra; M3 – favorável; e M4 – muito favorável. Se forem efetuadas várias medições numa condição meteorológica específica, n_{M_i} , e para a qual seja conhecida (ou estimada) a sua probabilidade de ocorrência, p_{M_i} , os indicadores de cada período de referência podem ser estimados por

$$L_{[d],[e],[n]} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_i p_{M_i} \times 10^{0.1 L_{M_i}} \right) \quad (3)$$

A incerteza combinada dos indicadores L_d , L_e , L_n pode ser obtida através da aplicação da lei da propagação das incertezas, resultando

$$u(L_{[d],[e],[n]}) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial L_{[d],[e],[n]}}{\partial L_{M_i}} \times u(L_{M_i}) \right]^2 + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial L_{[d],[e],[n]}}{\partial p_{M_i}} \times u(p_{M_i}) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

Assumindo a independência entre as diversas variáveis envolvidas, tal como é assumido em [1], a aplicação da metodologia expressa no GUM [12], e incluindo também agora a componente u_{samp} , permite-nos obter a expressão para a incerteza do indicador L_{den} :

$$u(L_{den}) = \left\{ \left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d} \right)^2 [u^2(L_d) + u_{samp,d}^2] + \left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e} \right)^2 [u^2(L_e) + u_{samp,e}^2] + \left(\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n} \right)^2 [u^2(L_n) + u_{samp,n}^2] + u_{loc}^2 + u_{slm}^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

onde:

- $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d}$, $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e}$ e $\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n}$ são os coeficientes de sensibilidade, isto é, expressão da variação que ocorre em L_{den} , respetivamente, devido a variações em L_d , L_e e L_n ;
- $u(L_d)$, $u(L_e)$ e $u(L_n)$ correspondem à incerteza padrão associada às medições efetuadas para caracterizar o nível sonoro em cada um dos períodos de referência;
- u_{loc} é a incerteza padrão associada com a localização do ponto de medição;
- u_{slm} é a incerteza padrão associada à cadeia de medição;
- u_{samp} é a incerteza padrão associada com o processo de amostragem em cada período.

A equação (5) assume que as componentes de incerteza associadas ao equipamento de medição e à localização do microfone são constantes, ou seja, as medições são sempre efetuadas com o mesmo equipamento e o microfone é colocado sempre no mesmo local. Já a componente u_{samp} poderá variar dependendo da estratégia adotada em cada período.

Os coeficientes de sensibilidade são representados pela expressão (6), onde w é 0 dB, 5 dB ou 10 dB, respetivamente, para os períodos do dia, entardecer e noite.

$$\frac{\partial L_{den}}{\partial L_i} = \frac{t_i 10^{0.1(L_i+w)}}{12 \times 10^{0.1(L_d)} + 4 \times 10^{0.1(L_e+5)} + 8 \times 10^{0.1(L_n+10)}} \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Ref [1] os valores das componentes fixas associadas ao equipamento de medição e à localização do microfone, são respetivamente, 0,5 dB e 0,4 dB. O valor indicado para esta última componente é válido desde que o ruído seja proveniente de tráfego rodoviário, com uma incidência não rasante, relativamente à superfície onde o microfone se encontra colocado. Considerando apenas estas duas componentes fixas, e considerando as restantes componente incluídas em (5) nulas, a incerteza expandida $U(L_{den})$ não será inferior a 1,3 dB.

De acordo com o modelo assumido neste trabalho, a componente u_{samp} é sempre afetada pelos coeficientes de sensibilidade associados a cada período. Verifica-se que os coeficientes têm uma forte dependência com os níveis sonoros em cada período (ver Tabela 2).

Caso	L_d (dB(A))	L_e (dB(A))	L_n (dB(A))	$\frac{\partial L_{den}}{\partial L_d}$	$\frac{\partial L_{den}}{\partial L_e}$	$\frac{\partial L_{den}}{\partial L_n}$
A	61	60	50	0,423	0,354	0,224
B	61	60	54	0,316	0,264	0,420
C	61	60	58	0,193	0,162	0,645

Tabla 2. - Níveis sonoros para três situações diferentes, e seus respectivos coeficientes de sensibilidade, para análise da influência da amostragem na incerteza expandida $U(L_{den})$.

A inclusão da componente u_{samp} , nos três casos considerados, cujos resultados se apresentam nas Figuras 5 a), b) e c), evidencia a influência da componente de amostragem na incerteza expandida $U(L_{den})$. É também realçada a sua dependência com o número e a duração de cada episódio, assim como com as diferenças entre os níveis dos indicadores L_d , L_e e L_n .

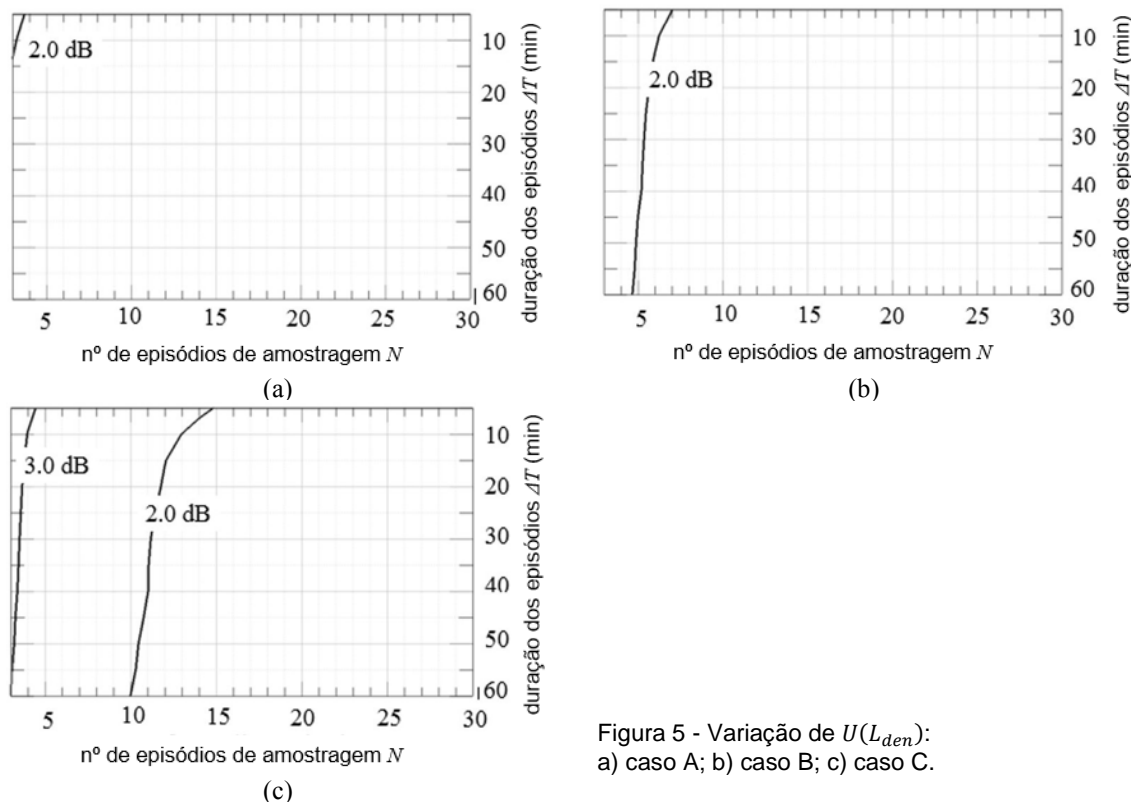


Figura 5 - Variação de $U(L_{den})$:
a) caso A; b) caso B; c) caso C.

A influência que o nível sonoro no período noturno tem sobre os resultados apresentados para a incerteza expandida $U(L_{den})$ é tanto maior quanto menor for a diferença entre os níveis nos restantes períodos. Este fato resulta do peso que é dado pelo respetivo coeficiente de sensibilidade e também devido à incerteza da amostragem do nível de ruído nesse período.

Os resultados apresentados nestas figuras referem-se apenas às componentes fixas, não contêm ainda o valor da incerteza inerente à repetibilidade das medições o que naturalmente deverá aumentar os limites apresentados.

CONCLUSÃO

Para avaliar a qualidade das estratégias de amostragem que permitam estimar os indicadores de ruído ambiental de longa duração, num determinado local, os autores propuseram um método de análise sistemática, baseado no método de *bootstrap*.

Esta metodologia permite determinar a melhor estratégia de amostragem que garanta um dado nível de precisão. Implicitamente ficou também demonstrado que se pode ajustar o esforço a colocar nas medições tendo em conta a contribuição que cada componente tem sobre o resultado final, bem como a precisão que se lhe queira atribuir.

REFERÊNCIAS

- [1] ISO/DIS 1996-2:2015, Acoustics – description, measurement and assessment of environmental noise - Parte 2: determination of environmental noise levels; 2015.
- [2] Gaja E., Gimenez A., Sancho S., Reih A. Sampling Techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions, *Applied Acoustics* 2003; 64(1); 45-53.
- [3] Kuehne D. Long-term Leq Errors Expected and how long to Measure (Uncertainty and Noise Monitoring), *ForumAcusticum* 2005, Budapest (Hungary), Aug 29 - Sep 2; 2005.
- [4] Brambilla G., Lo Castro F., Andrea C., Verardi P. Accuracy of temporal samplings of environmental noise to estimate the long-term Lden value, *Internoise* 2007, Istanbul (Turkey), August 28-31; 2007.
- [5] Jagiatinskis A., Fiks B. Assessment of environmental noise from long-term window microphone measurements, *Applied Acoustics* 2014; 76; 377-385.
- [6] Mateus, M. 2014. The influence of the sampling parameters on the uncertainty in environmental noise measurements, University of Coimbra, 2014, PhD Thesis in Portuguese, ISBN 978-972-8954-39-0.
- [7] Mateus M, Dias Carrilho J and Gameiro da Silva M. Assessing the influence of the sampling strategy on the uncertainty of environmental noise measurements through Bootstrap method. *Applied Acoustics* 2015; 89; 159-165. doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.021.
- [8] M. Mateus; J Dias Carrilho; M. C. Gameiro da Silva. Influence of short-term sampling parameters on the uncertainty of de Lden environmental noise indicator. In: IMEKO JOINT - SYMPOSIUM 2014, 2014. Funchal – Madeira. In Proceedings Book - IMEKO Joint - Symposium 2014 TC1+TC7+TC13. IOP Conference Series, 2014. doi:10.1088/1742-6596/588/1/012026.
- [9] Mateus, Mário; Dias Carrilho, João; Gameiro da Silva, Manuel. 2015. An experimental analysis of the correction factors adopted on environmental noise measurements performed with window-mounted microphones. *Applied Acoustics*, 2015; 87, p. 212-218, 2015. doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.021.
- [10] IEC 61672-1:2002, Electroacoustics: Sound level meters. Part 1: Specifications; IEC; 2002.
- [11] Efron B. Better Bootstrap Confidence Intervals, *Journal of the American Statistical Association* 1987; 82;171-185.
- [12] JCGM 100, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, Paris: Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.
- [13] Directive 2002/49/EC, of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise; 2002.