

Avaliação audiodosimétrica ocupacional em empresa metalúrgica baseada em modelo matemático para obtenção de valor de dose com fator de duplicação de dose não configurado

Helder Cesar Tinoco

Doutorado em Engenharia de Produção - UFF.

André Luiz do Carmo Leal

Mestrando em Radioproteção e Dosimetria. - IRD/CNEN.

Docente no IFRJ.

Jules Ghislain Slama

Pós-Doutorado - Institut National de Sciences Appliquées, INSA, França.

Docente Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil.

Resumo: Os diferentes fatores de duplicação de dose usados para avaliações da exposição ocupacional ao ruído, basicamente, são definidos segundo critérios de ordem legal ou de cunho preventivista. Para o primeiro, no Brasil, adota-se o fator de duplicação de dose igual a 5 e, para o segundo critério, usa-se o valor igual a 3. Os audiodosímetros são capazes de apresentar o valor de dose em função do fator de duplicação de dose usado. Poucas marcas de dosímetros de ruído, especialmente aquelas de baixo valor comercial, fazem dosimetria simultânea com diferentes valores de taxa de duplicação de dose. Este trabalho visa apresentar um algoritmo que permita ao avaliador obter, mediante os dados de níveis sonoros armazenados pelo audiodosímetro, valores de dose em diferentes configurações da taxa de duplicação. O feito foi mostrado na avaliação audiodosimétrica realizada em um mecânico industrial. A configuração, inicialmente usada, adotou o valor 3 como taxa de troca e, após o algoritmo, foi possível obter o valor de dose adotando fator 5.

Palavras-chave: Ruído, Dose, Fator de duplicação de dose.

Occupational noise dosymetry evaluation in a methalurgical company based on a mathematical model for obtaining dose value with unconfigured dose value duplication

Abstract: The different dose value duplication factors which are used for evaluating occupational exposure to noise are basically defined according to criteria either of legal order or preventive nature. In Brazil it is used dose duplication factor equal to 5 for the former criteria, and dose duplication factor equal to 3 for the latter. Noise dosimeters are capable of presenting dose value according to the dose duplication factor being used. Few brands of noise dosimeters, especially those with a lower commercial price, perform simultaneous dosimetry with different dose duplication values. This paper aims to present a different algorithm that allows the assessor to obtain, through sound level data registered by the noise dosimeter, dose values in different configurations of duplication amounts. The action was shown in the noise dosimetry evaluation performed on an industrial mechanic. The initial configuration that was applied had a value 3 exchange amount, and, after the algorithm, it was possible to obtain the dose value using factor 5.

Keywords: Noise, Dose, Dose duplication factor.

1. INTRODUÇÃO

O agente de risco físico ruído está presente em muitos ambientes ocupacionais, abrangendo ampla faixa de frequências sonoras e variados níveis de intensidade sonora. As avaliações audiodosimétricas ocupacionais visam mensurar a exposição dos trabalhadores ao ruído contínuo e intermitente, sendo realizadas por meio de instrumentos denominados audiodosímetros. Estes possuem, para configuração aberta ao usuário, alguns parâmetros, como, por exemplo, o fator de duplicação de dose, q . Esse parâmetro pode assumir valores definidos pelas normas e legislações, que, no Brasil, em respeito à Norma Regulamentadora No. 15, em seu anexo 1, traz a orientação, implícita, de utilização do fator de duplicação de dose no valor igual a 5. Quanto à norma de procedimento para avaliação da exposição ocupacional ao ruído preconizada pela FUNDACENTRO, através do documento NHO-01 (Norma de Higiene Ocupacional N°1: 2001), há a orientação para utilização do fator de duplicação de dose igual a 3, enquanto a Norma Regulamentadora No 15, em seu Anexo 1, adota, de forma implícita, o fator igual a 5.

Atualmente, os medidores audiodosímetros de algumas marcas realizam a medição de dose em dois canais, ou seja, realizam as medidas de dose usando, simultaneamente, os fatores $q=3$ e $q=5$ para o mesmo evento avaliado. Contudo, muitos outros audiodosímetros não o fazem. A proposta deste trabalho é de apresentar uma metodologia simples que possibilite a obtenção dos valores de dose em parâmetro não configurado.

Este trabalho aborda as mensurações do risco devido à exposição ao ruído no ambiente de usinagem de uma empresa cuja atividade é a fabricação e montagem de empilhadeiras. A audiodosimetria foi realizada em 26 de agosto de 2016, utilizando-se do equipamento de medição modelo Extech SI355, colocado no trabalhador cuja função é descrita como mecânico industrial.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Estimativa da perda auditiva

As perdas auditivas induzidas pelo ruído são sempre do tipo neurosensorial, geralmente bilaterais e simétricas, iniciando nas frequências da faixa de 3400, 4000 e 6000 Hz, com uma perda mais acentuada nessas frequências do que nas frequências de 500, 1000 ou 2000 Hz, sendo estas últimas tratadas como frequências graves (SILVA e COSTA, 1998).

Os especialistas, no que diz respeito à perda auditiva induzida pelo ruído (PAIR), concordam em afirmar que isso se deve à conjunção de dois fatores, de caráter irreversível, e que afeta, significativamente, a compreensão e a fala (RIOS, 2003). O primeiro é a intensidade sonora (I), e o segundo é o tempo de exposição (t_{exp}), que segue, aproximadamente, a relação dada a seguir (BISTAFA, 2006):

$$PAIR \propto I \cdot t_{exp} \quad (1)$$

Considerando dois eventos de exposição ao ruído, podemos dizer que a PAIR do evento 1 será igual à PAIR do evento 2 se decorrerem no mesmo incremento de perda auditiva e, neste caso, tem-se:

$$PAIR_1 = PAIR_2 \quad (2)$$

Isso significa dizer que a PAIR do trabalhador 1, sujeito ao ruído com pressão sonora p_1 durante o tempo t_1 , será a mesma PAIR do trabalhador 2, sujeito ao ruído com pressão sonora p_2 durante a metade do tempo de exposição do trabalhador 1. Disso decorre que

$$I_2 = 2 \cdot I_1 \quad (3)$$

Com base na Eq (3), pode-se inferir que o incremento no nível de pressão sonora do trabalhador 2 em relação ao trabalhador 1 (BISTAFA, 2006), denominado de fator de duplicação de dose, será dado segundo a expressão a seguir:

$$q = 10 \times \log(2) \quad (4)$$

2.2. Avaliação da exposição ocupacional por meio de audiodosimetria

O Ministério do Trabalho e Emprego, por meio da FUNDACENTRO, desenvolveu a norma para avaliação do ruído ocupacional, denominada de NHO-01 (Norma de Higiene Ocupacional No 1: 2001), a qual estabelece critérios e procedimento para avaliação da exposição ao ruído ocupacional. Um dos parâmetros apresentados pela referida norma é a dose de ruído diária.

De forma semelhante, a ISO1999:1990 (*Acoustics Determination of occupational noise exposure and estimation of noise - induced hearing impairment*) apresenta o conceito de Exposição Sonora ($E_{A,T}$), com unidade em $\text{Pa}^2 \text{ h}$ ou $\text{Pa}^2 \text{ s}$, de forma a estimar o potencial de dano auditivo a que um indivíduo fica submetido devido à exposição prolongada a níveis de ruído excessivos. O cálculo apresentado pela referida norma é

$$E_{A,T} = \left[\int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right] \quad (5)$$

onde:

p_A é a pressão sonora, em Pa, ponderada pelo circuito eletrônico na escala A, integrado no período de tempo compreendido entre t_1 e t_2 .

Ao nível de 85 dB(A) com período de exposição de oito horas, a Exposição ($E_{A,T}$) vale 1,00 Pa^2h . Por base de exposições normalizadas ($E_{A,T} = 1 \text{ Pa}^2 \text{ h}$), pode-se calcular os tempos máximos de exposição em função das pressões sonoras, como:

$$T_{max} = \frac{1}{p_A^2(t)} \quad (6)$$

A Tabela 1, a seguir, apresenta os tempos máximos de exposição para os níveis sonoros de 85 dB(A) a 95 dB(A), evidenciando que, para manter exposição normalizada, à medida que o nível dobra por fator de incremento de 3 dB, o tempo de exposição reduz-se à metade.

Tabela 1. Tempos máximos de exposição.

Nível sonoro [dB(A)]	T _{max} [h]	E _{A,T} [Pa ² h]
85	8,0	1,00
86	6,3	
87	5,0	
88	4,0	
89	3,2	
90	2,5	
91	2,0	
92	1,6	
93	1,3	
94	1,0	
95	0,8	

Fonte: Autores

A exposição ao ruído pode ocorrer de forma diversificada, uma vez que o indivíduo fica exposto a ruídos de diferentes níveis ao longo da jornada de trabalho. Desta forma, como recomendado pela ISO 9612:2009, deve-se avaliar a exposição por meio de dosimetria de ruído. Utilizando-se o conceito de dose de exposição formulado pela ISO 1999:1990, matematicamente tem-se :

$$D = \frac{\int_0^T p_A^2(t) dt}{p_0^2 T_0 10^{0,1 L_{max}}} \times 100\% \quad (7)$$

onde:

p₀ = diferencial da pressão sonora do limiar da audibilidade (20μPa)

T₀= período de critério da exposição (8 horas)

De forma simplificada, a dose pode ser obtida por (SALIBA, 2009):

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{T_{exp,i}}{T_{max,i}} \times 100\% \quad (8)$$

onde:

T_{exp} é o tempo de exposição ou de avaliação

T_{\max} é o tempo máximo de exposição

Contudo, o princípio de operação do audiodosímetro é descrito, em termos matemáticos (ANSI S1.25:1984), como:

$$D(q) = \frac{100}{8} \int_0^T 10^{\left(\frac{L-85}{q}\right)} dt \quad (9)$$

onde:

q é o valor do fator de duplicação de dose.

Para cada nível sonoro registrado, o audiodosímetro calcula o valor de dose relativo ao nível registrado, segundo a Equação (9) e em função do valor da taxa de duplicação de dose. Por fim, faz a somatória de todos os valores de dose calculados, apresentando o valor em porcentagem para o período de avaliação. Com base no valor de dose, pode-se obter, após rápida manipulação algébrica, o valor do nível sonoro equivalente (L_{eq}) usando $q=3$, dado por:

$$Leq = 85 + 10 \times \log\left(\frac{8 \times D_3}{T}\right) \quad (10)$$

Para o caso de se usar $q=5$, o nível médio correspondente à dose é escrito por:

$$L_{avg}(q) = 85 + 16,61 \times \log\left(\frac{8 \times D_5}{T}\right) \quad (11)$$

onde:

L_{eq} e L_{avg} são definidos como nível médio contínuo.

D_3 e D_5 são, respectivamente, os valores de dose tomados com $q=3$ e $q=5$.

Para exposição normalizada para jornada de trabalho de 480 minutos, é necessário usar a equação fornecida pela NHO-01, como se segue:

$$NEN(q, T, NE) = NE + 10 \times \log\left(\frac{T_{\text{exp}}}{480}\right) \quad (12)$$

Para o caso de se usar $q=5$, a equação fica:

$$TWA(q, T, L_{\text{avg}}) = L_{\text{avg}} + 16,61 \times \log\left(\frac{T_{\text{exp}}}{480}\right) \quad (13)$$

onde:

NEN, que também pode vir escrito como $L_{\text{eq}}(8h)$, é o nível de exposição normalizado para 480 horas de trabalho;

L_{avg} é o nível médio da exposição, tomado a $q=5$;

T_{exp} é o tempo de exposição, em minutos;

TWA (*time weighted avarege*) é o nível normalizado tomado a partir de $q=5$.

Cabe ressaltar que as constantes de valor 10 e 16,61 que multiplicam a função logarítmica de base decimal resultam da aplicação da conversão do valor q , definido pela legislação, pela função matemática que define o fator de duplicação de dose, como apresentado na Equação (4).

As equações que descrevem a exposição normalizada em função da dose são (BISTAFA, 2006):

$$TWA(q, T, L_{\text{avg}}) = 85 + 16,61 \times \log\left(\frac{D_5 \cdot 480}{T_{\text{exp}}}\right) \quad (14)$$

e

$$Leq(8h)(q, T, L_{\text{eq}}) = 85 + 10 \times \log\left(\frac{D_3 \cdot 480}{T_{\text{exp}}}\right) \quad (15)$$

2.3. Cálculo dos tempos máximos de exposição em função de q

O cálculo dos tempos máximo de exposição segue como apresentado pela Equação (6). Contudo, fica implícito que o cálculo derivado da Exposição Sonora

($E_{A,T}$) corresponde ao uso do fator $q=3$ e apresenta grandes diferenças quando se usa o fator $q=5$. A partir da Equação (12), tomando-se o nível de critério estabelecido pelo NIOSH e usado pela legislação brasileira como sendo de 85 dB(A) para oito horas diárias de exposição ao ruído (NIOSH, 1972; NR15, 1978) e a definição do fator q (BISTAFA, 2006), é possível, após alguma manipulação algébrica, obter a expressão para os tempos máximos de exposição em função do fator de duplicação de dose, como segue:

$$T_{\max}(q) = \frac{28.800}{2^{\left(\frac{L-85}{q}\right)}} \quad (16)$$

onde:

L é o nível médio medido (L^{avg} ou L_{eq}), em dB(A);

28800 é o tempo de jornada diária, em segundos.

3. ANALÍSE E METODOLOGIA

A metodologia proposta para obtenção do valor de dose vale-se de um equipamento de canal único, ou seja, aquele tipo de equipamento que realiza medidas de audiodose em função de uma única entrada do fator de duplicação de dose (q).

Por meio da Equação (16), é possível calcular os diferenciais de dose para cada nível sonoro registrado em função da taxa de duplicação de dose não utilizada na avaliação.

3.1. Cálculo dos valores diferenciais de dose D3 e D5

O audiodosímetro, após registrar todos os níveis sonoros que chegam ao microfone do equipamento, procede os cálculos dos diferenciais de dose ($D_{1s,\%}$) para os níveis maiores, que o nível de limiar (80 dB(A)). Entende-se por valor diferencial de dose a quantidade de exposição ocorrida durante o tempo de resposta Δt , que pode ser de 1 s. Dessa forma, o audiodosímetro executa o seguinte algoritmo: calcula a razão entre Δt e tempo máximo de exposição ($T_{\max,q}$)

para todos os valores de nível sonoro registrados pelo medidor, como descrito pela Equação (15).

$$D_{1s}^{\%} = \frac{2^{\left(\frac{L-85}{q}\right)}}{28.800} \quad (15)$$

Por fim, somam-se todos os valores diferenciais de dose para ter a dose total do período avaliado ($D_{q,T}$).

$$D(q,T) = \sum_{i=1}^N \frac{2^{\left(\frac{L_i-85}{q}\right)}}{28.800} \quad (16)$$

A Tabela 2 apresenta os valores diferenciais de dose usando $q=3$ e $q=5$ para níveis de 81 a 90 dB(A), com incremento de 0,5 dB.

Tabela 2. Valores diferenciais de dose.

Nível sonoro dB(A)	Dose(q=3) %	Dose(q=5) %
81,0	0,001378	0,001994
81,5	0,001547	0,002137
82,0	0,001736	0,002291
82,5	0,001949	0,002455
83,0	0,002187	0,002631
83,5	0,002455	0,002820
84,0	0,002756	0,003023
84,5	0,003093	0,003240
85,0	0,003472	0,003472
85,5	0,003897	0,003721
86,0	0,004375	0,003989
86,5	0,004910	0,004275
87,0	0,005512	0,004582
87,5	0,006187	0,004910
88,0	0,006944	0,005263
88,5	0,007795	0,005641
89,0	0,008749	0,006045
89,5	0,009821	0,006479
90,0	0,011024	0,006944

Fonte: Autores

A Tabela 2 permite verificar importantes informações. A primeira diz respeito aos valores de dose com $q=5$ (D_5) maiores que as doses com $q=3$ (D_3)

para níveis sonoros inferiores a 85 dB(A). A segunda informação condiz com a equivalência de dose quando o nível sonoro for de 85 dB(A) e, por último, mostra que as doses D_3 são maiores que as doses D_5 quando os níveis são maiores que 85 dB(A).

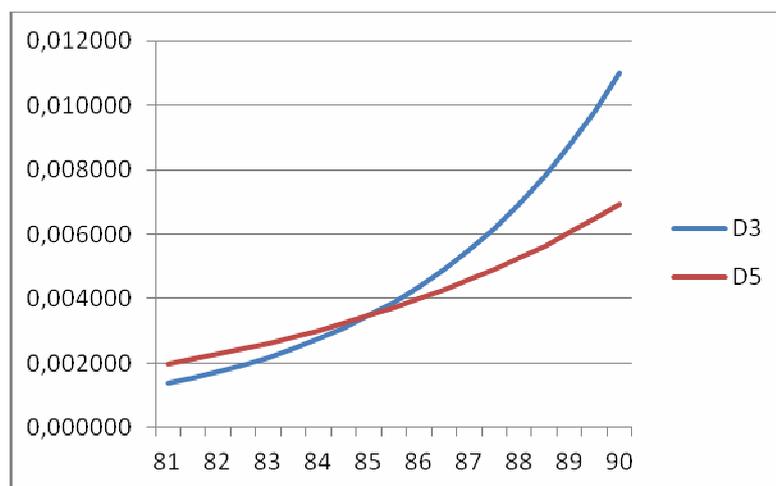


Figura 1: Comportamento das funções de dose.

O gráfico da Figura 1 apresenta o comportamento das curvas de dose, mostrando o ponto de equivalência. Por fim, somam-se os diferenciais de dose para obter a dose apurada para o período avaliado.

4. RESULTADOS

4.1. Avaliação audiodosimétrica

A avaliação audiodosimétrica considerada neste trabalho foi realizada em um electricista de manutenção industrial, com evento gravado a partir das 7h37min e finalizando por volta das 11h, quando foi pausada a dosimetria para almoço. A taxa de resposta de amostragem foi de um segundo, totalizando 14551 eventos registrados. A configuração da dosimetria seguiu os parâmetros da NHO-01, como pode ser visto no cabeçalho do relatório do equipamento. A Figura 2 mostra parte inicial do relatório. O equipamento usado para avaliação audiodosimétrica foi o modelo SL355 da Extech.

Criterion Level:85			
Exchange Rate:3			
Peak Value:138,1			
Range:70-140			
Calibrated Time: 2016/08/27 14:32:53			
0			
Times	Pause	Release Period	
Dose	TWA		
	35,2	80,4	
No.s	Date Time	dB	
1	27/08/2016	68,2	
2	27/08/2016	64,4	
3	27/08/2016	64,1	
4	27/08/2016	64,4	
5	27/08/2016	63,9	
6	27/08/2016	70,4	
7	27/08/2016	72,1	
8	27/08/2016	69,3	
9	27/08/2016	72,2	
10	27/08/2016	70	
11	27/08/2016	72,6	
12	27/08/2016	70,4	

Figura 2: Relatório de audiosimetria gerado pelo equipamento (parte).

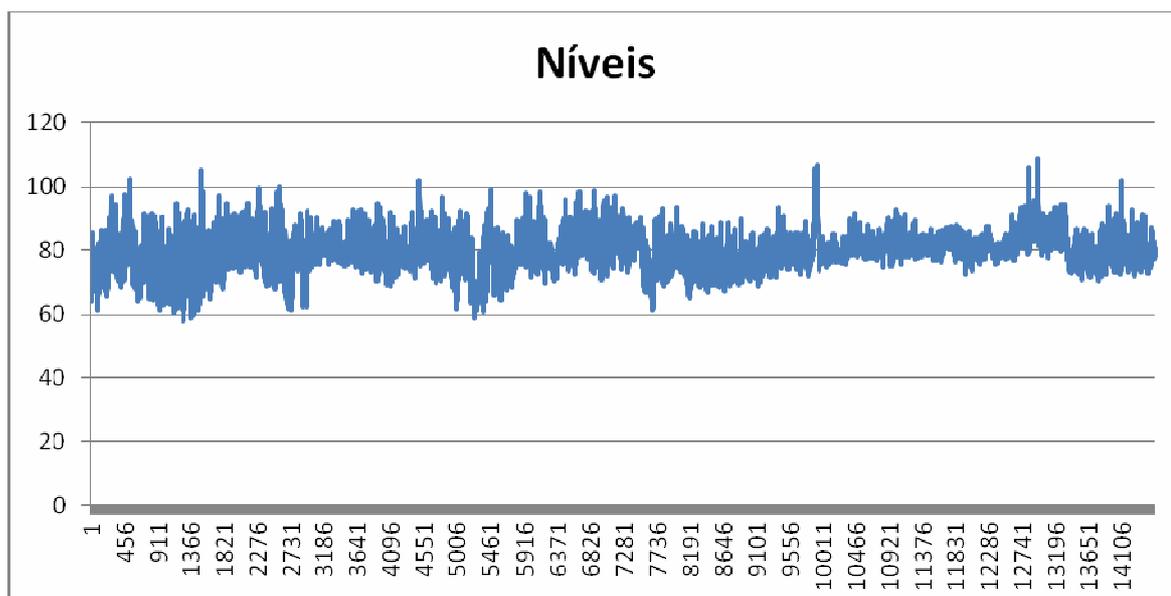


Figura 3: Gráfico temporal dos registros de níveis sonoros.

Na Figura 3, apresenta-se o gráfico dos 14551 registros armazenados em dB(A). Para os 14551 registros sonoros, foram calculados os valores diferenciais de dose valendo-se do fator de duplicação de dose configurado no equipamento ($q=10\text{Log}(2)$), usando o Excel 2010. Em seguida, foram calculados os diferenciais de dose usando $q=5$. O valor da dose total apurada com $q=5$ resultou em 23,3 %, ao passo que a dose apurada com $q=3$ resultou em 35,29 %. Não são computadas as doses cujos níveis sonoros sejam inferiores a 80 dB(A).

5. CONCLUSÃO

O propósito do trabalho é de apresentar o algoritmo usado pelos audiodosímetros de forma que permita ao avaliador obter, por meios próprios, valores de dose com parâmetros não configurados. A metodologia apresentada contempla registros de dose para as taxas de troca 3 e 5.

Deve-se ressaltar que as doses calculadas através da taxa de valor 3 sempre serão maiores que aquelas calculadas pela taxa igual a 5, salvos os casos em que os registros sonoros estejam abaixo de 85 dB(A), quando ocorre o inverso.

Também vale observar que os valores para os níveis médios, sejam L_{eq} ou L_{avg} , serão diferentes, uma vez que são obtidos por equações distintas, salvo momento em que ambos sejam 85 dB(A). Verifica-se, dessa forma, que o nível médio obtido por dose oriunda do fator 5 será menor que aquele oriundo do fator 3. Esse detalhe é de suma importância como critério para o melhor dimensionamento da proteção auditiva.

REFERÊNCIAS

- BISTAFA, S. R. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. 1. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.
- BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-09 Programa de Prevenção de Riscos Ambientais. *Manual da Editora Atlas*, 63. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-15 Atividades e Operações Insalubres. *Manual da Editora Atlas*, 63. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

FUNDENTRO. Avaliação da exposição ocupacional ao ruído. *Norma de Higiene Ocupacional NHO-01*. São Paulo, 2001.

GERGES, Samir. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. 2. ed.. Florianópolis: Editora Imprensa Universitária UFSC, 2000.

ISO 1999:1990 (E). “*Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noiseinduced hearing impairment*”. *International Organization for Standardization*, Genève, Suíça, 1990.

SALIBA, T. M. *Curso básico de segurança e saúde ocupacional*. São Paulo: LTr, 2004.

SILVA, A. A., da COSTA, E. A. Avaliação da surdez ocupacional. *Revista da Associação Médica Brasileira*, Campinas, v. 44, n. 1, jan./mar., 1998.

RIOS, A.N. *Efeito do ruído tardio na audição e na qualidade do sono em indivíduos expostos a níveis elevados*. Ribeirão Preto. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Medicina da USP/Ribeirão Preto, 2003.