

Previsão de Ruído de Tráfego Ferroviário em Portugal

Alexandre Pereira^{a,b} e J. L. Bento Coelho^b

^a*Acusticontrol - Consultores em Engenharia e Controlo de Ruído, Lda., Av. Almirante Gago Coutinho, 59 - 5º Dtº A, 1700-027 Lisboa, Portugal, email@acusticontrol.com*

^b*CAPS - Instituto Superior Técnico, 1047-001 Lisboa, Portugal, bcoelho@ist.utl.pt*

RESUMO: Em Portugal e nos últimos anos, tem-se assistido, por parte das entidades competentes, a uma crescente preocupação com o melhoramento da rede de transporte ferroviário.

Assim sendo e tendo estado envolvidos nos estudos acústicos correspondentes à construção e à exploração de novas vias de tráfego ferroviário e/ou ao melhoramento das já existentes, por exemplo, remodelação da Linha do Norte, Linha de Sintra, Linha de Cintura e Transporte Ferroviário de Alta Velocidade, os autores deste artigo consideraram indispensável o desenvolvimento e a implementação de um modelo de tráfego ferroviário actualizado e adaptado às características próprias das composições ferroviárias e das condições das linhas nacionais.

A Acústica Previsional, seguindo as recomendações e as disposições normativas aplicáveis, constitui-se como a ferramenta mais eficaz para o estudo das alterações do ambiente sonoro que se observa na envolvente de novas ferrovias ou de ferrovias melhoradas. Esta eficácia resulta do facto de as previsões serem efectuadas por recurso a técnicas poderosas que são aferidas por campanhas de medições acústicas em condições controladas.

Foi tomado por base o modelo FERR+ desenvolvido em anos anteriores pela equipa do CAPS/IST e já testado em diversos estudos efectuados. No âmbito do presente trabalho, foi desenvolvida uma extensa campanha de medições de emissão sonora de todos os tipos de comboios que circulam em Portugal. Foi desenvolvida uma nova ferramenta previsional, FERR3, tendo sido efectuado um vasto programa de testes de validação e aferição do modelo.

Neste artigo, os autores apresentam a metodologia seguida nos levantamentos efectuados, na construção do modelo matemático de ruído ferroviário implementado em PC, bem como alguns resultados experimentais que comprovam a excelente correlação entre os valores previstos e os valores medidos em campo.

ABSTRACT: During the most recent years, the Portuguese railway authority has shown a growing concern with the improvement of the national railway network.

The authors of the present paper have been involved with acoustical studies of new railway lines as well as of the improvement of existing ones.

A relevant part of such studies is predictive. Predictive Acoustics is usually followed together with selected measurements to study the noise generated by new or renewed railway lines.

A comprehensive and reliable prediction tool is thus absolutely necessary. This must apply to all types of trains and lines in the country and include all emission and propagation factors. Although most existing models include all the relevant physical factors, they usually apply to certain types of trains. Contrary to the road traffic noise, each country has their own types of trains and they may differ considerably to those in another country.

Although a previous model developed by CAPS/IST, FERR+, was available, the newest types of trains were not included in the database. This earlier model was used as a base for the development of the new model. An extensive campaign of measurements of railway noise was made for all types of trains that are circulating in Portugal to obtain reference emission parameters. A new prediction tool was developed, FERR3, and a vast program of validation tests was performed.

This paper describes the method for the development of the mathematic model of railway noise and for the measurements. Tests are also described that prove the excellent correlation between the predicted results and those measured in the field.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as questões relacionadas com a Poluição Sonora tem vindo a ser assumida como uma prioridade em diversos países europeus, tendo culminado na aprovação da Directiva Europeia D2002/49/EC relativa à avaliação e gestão de ruído ambiente [1].

Também a nível nacional, é notório o esforço que as entidades competentes têm efectuado nos últimos anos, no sentido de melhorar as condições acústicas do meio ambiente, protegendo, nomeadamente, as populações residentes em áreas sensíveis ao ruído.

Como resultado desta preocupação, foi publicado o

Regime Legal sobre a Poluição Sonora (anexo ao Decreto-Lei nº 292/2000 de 14 Novembro), também designado Regulamento Geral do Ruído [2].

O controlo do ambiente sonoro determina a necessidade da avaliação do ruído, utilizando como meio preferencial as correspondentes cartas de ruído e, conseqüentemente, a identificação das fontes sonoras responsáveis pelo estabelecimento das condições acústicas observadas em cada local. Assim sendo, é necessário que os modelos de previsão de ruído (ferroviário, aéreo, rodoviário, industrial ou outro) estejam adequados a cada situação concreta em análise.

Em termos de ruído de tráfego ferroviário, os modelos de previsão que são actualmente usados na Europa, ou são empíricos ou semi-empíricos e tendem a seguir um "padrão" comum.

Em Portugal, o crescimento do tráfego ferroviário e a introdução de novas composições, determina a necessidade do desenvolvimento de um modelo de previsão actual e devidamente adequado à realidade nacional. Foi, em anos anteriores, desenvolvido pela equipa do Grupo de Acústica e Controlo de Ruído do CAPS-IST um modelo de ruído de tráfego ferroviário, FERR+ [3] aplicado aos comboios nacionais, o qual se tem revelado uma ferramenta de utilização simples e fiável. No entanto, este modelo não contempla as tipologias de comboios mais recentes que circulam actualmente nas linhas férreas portuguesas.

Esta foi, então, a motivação que levou os autores do presente artigo à elaboração de um modelo previsional de ruído de tráfego ferroviário que, adaptado aos comboios portugueses, cumpra as normas e a legislação aplicáveis. Este modelo foi implementado em computador, de forma a permitir a realização de previsões de ruído de tráfego ferroviário com grande eficácia, nomeadamente em termos de facilidade de utilização, flexibilidade, rapidez e precisão.



2. METODOLOGIA

A metodologia seguida na elaboração do modelo matemático que permite a previsão do ruído gerado pela passagem de um comboio (segundo as normas portuguesas e as directivas europeias em vigor) considerou quatro fases sequenciais e complementares:

- i) trabalho de pesquisa e análise de modelos para previsão de ruído de tráfego ferroviário, com o objectivo de estabelecer um modelo de base adequado à realidade nacional.

Foram investigados praticamente todos os modelos utilizados no mundo e caracterizadas as fontes e os mecanismos de geração e de transmissão de ruído;

- ii) desenvolvimento de um novo Modelo de previsão do ruído emitido pela circulação de tráfego ferroviário, tendo sido tomado como base do Modelo Proposto o Modelo Português anteriormente desenvolvido [3];

- iii) trabalho experimental para completação e validação do Modelo Proposto. Este foi validado através de uma campanha de medições acústicas efectuadas em locais criteriosamente seleccionados. A análise foi efectuada nas principais linhas férreas do País, tendo em conta as composições que constituem o tráfego regular.

Os índices de ruído de tráfego ferroviário de referência, característicos de cada tipo de comboio, foram obtidos através de medições efectuadas e sua análise.

Procedendo a comparações entre os resultados das medições e as previsões obtidas através do Modelo Proposto, chegou-se a resultados que permitiram considerar o modelo validado.

Depois de optimizado, o Modelo Proposto revelou-se eficaz na previsão do ruído gerado pelos diferentes tipos de comboios que circulam nas linhas férreas nacionais;

- iv) implementação do Modelo Proposto em computador. De forma a automatizar a aplicação do Modelo Proposto, foi desenvolvido e implementado um programa em computador - FERR3, que efectua simulações para a previsão de ruído de tráfego ferroviário.

Este programa permite a introdução de novos tipos de comboios, pois recorre a uma base de dados para armazenar os índices característicos de cada tipo de composição ferroviária.

3. RUÍDO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

Considera-se ruído de tráfego ferroviário o ruído gerado e radiado lateralmente, em relação à linha férrea, somado ao ruído existente dentro das próprias composições.

Este ruído apresenta algumas características particulares:

- i) tem uma "assinatura" temporal, ou seja, a passagem de um comboio tem uma evolução no tempo distinta de outro tipo de fontes;
- ii) a fonte de ruído encontra-se bem situada no espaço.

Em termos teóricos, a modelação do ruído de tráfego ferroviário depende do tipo de fonte sonora considerado.



De facto, cada comboio pode ser tratado como um conjunto de fontes sonoras pontuais em movimento, ou como uma fonte sonora em linha. Esta consideração reflecte-se no tipo de expressões usadas para calcular a propagação sonora resultante destas fontes.

➤ No caso de se considerar um comboio como um conjunto de fontes pontuais em movimento, as expressões a usar serão do tipo da equação seguinte:

$$L_p = L_w - 10 \log(2\pi r^2) = L_w - 20 \log(r) - 8 \quad [dB]$$

➤ Quando se considera um comboio como uma fonte linear finita com comprimento l , dever-se-á usar expressões do tipo da equação seguinte:

$$L_p = L_w - 10 \log(2\pi rl) = L_w - 10 \log(rl) - 8 \quad [dB]$$

4. MODELO PORTUGUÊS

O Modelo Português FERR+ [3] aproxima o comboio a uma fonte em linha finita, pressupõe o cálculo em condições de campo livre e toma o comprimento do comboio como constante. Neste modelo, todos os cálculos são realizados em valores absolutos, sendo utilizada, para o cálculo do ruído lateral gerado pela passagem de um comboio, a expressão seguinte:

$$L_{m\acute{a}x} = L_0 - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} + D_c$$

sendo:

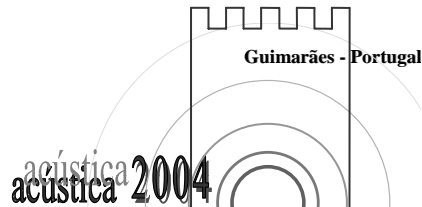
- L_0 Nível sonoro de referência para um comboio de um determinado tipo com um comprimento de referência (l_0), a uma velocidade de referência (V_0), a uma distância da via (d_0) e a uma altura (h_0), normalizadas;
- A_{div} Atenuação devida à divergência geométrica;
- A_{atm} Atenuação devida à absorção atmosférica;
- A_{gr} Atenuação devida ao efeito do solo;
- D_c Correção da directividade.

5. MODELO PROPOSTO

O algoritmo desenvolvido teria de ser adaptável à realidade portuguesa, pelo que, teria necessariamente que ter em conta as categorias de todos os comboios existentes em Portugal. Consequentemente, optou-se por tomar como base o Modelo Português [3], tornando-o mais completo no cálculo das atenuações e com a capacidade de prever o ruído gerado por diferentes categorias de comboios.

5.1. Cálculo de $L_{m\acute{a}x}$

O Modelo Proposto calcula o nível sonoro máximo resultante da passagem de um comboio, através da expressão seguinte:



$$L_{m\acute{a}x} = L_0 - A_{div} - A_{atm} - A_{gr} - A_{veg} + D_c + C_F$$

sendo:

- $L_{m\acute{a}x}$ Nível sonoro máximo que um receptor regista durante a passagem de um comboio. (Será referenciado em dB ou em dB(A), dependendo da unidade referenciada para L_0);
- L_0 Nível sonoro de referência para um comboio de um determinado tipo, a uma velocidade igual a V_0 , a uma determinada distância da via e a uma altura normalizada;
- A_{div} Atenuação devida à divergência geométrica;
- A_{atm} Atenuação devida à absorção atmosférica;
- A_{gr} Atenuação devida ao efeito do solo;
- A_{veg} Atenuação devida à vegetação;
- D_c Correção da directividade;
- C_F Factor de correção do modelo (valor livre).

➤ O valor L_0 depende da velocidade de deslocação do comboio, do seu comprimento (número de elementos de rolagem), do tipo de alimentação (eléctrica ou a diesel), do tipo de linha e do seu traçado, das condições de propagação sonora em cada local, das condições meteorológicas e de outras que por vezes não são identificadas.

Deste modo, tornou-se imperativo efectuar uma campanha de medições acústicas do ruído gerado por diferentes composições, com diferentes velocidades de deslocação e em diferentes locais de medição.

Obteve-se, assim, um conjunto de valores que permitiram, através de regressão, obter o valor de L_0 mais representativo para cada tipo de comboio.

Seguidamente, foi traçada uma característica dos níveis de ruído máximos em função da velocidade de circulação para a distância de referência ($d_0 = 7,5$ m).

➤ A atenuação devida à dispersão de energia (A_{div}) representa a perda de potência sonora com a propagação no espaço, e é dada pela expressão seguinte:

$$A_{div} = k \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad [dB]$$

onde, d_0 é a distância de referência e d a distância a que se pretende prever o nível de ruído, ambos em metros.

O factor de dispersão (k), é um compromisso entre a distância da linha férrea ao receptor e o comprimento do comboio. Toma valores entre 10 e 20, correspondendo o primeiro à propagação de uma fonte linear infinita (propagação cilíndrica) e o segundo à propagação de uma fonte pontual (propagação esférica).

➤ As atenuações, resultantes da absorção atmosférica (A_{atm}), no solo (A_{gr}) e na vegetação (A_{veg}), adoptadas no Modelo Proposto, são as recomendadas pela Norma Portuguesa NP 4361-2 [4].

➤ O campo sonoro em estudo não é radiado de forma uniforme no plano vertical, tendo uma radiação mais intensa segundo um ângulo com o solo, de aproximadamente 30°.



É, portanto, necessário efectuar as adequadas correcções (D_c) para ângulos superiores a 30°. Os valores assumidos para estas correcções são os indicados na tabela seguinte:

α [°]	até 30	40	50	60	70	80	90
D_c [dB]	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9

➤ O factor de correcção do modelo (C_F), é utilizado para quantificar alterações do nível sonoro que são provocadas por factores excepcionais. Qualquer valor que seja considerado relevante, poderá ser introduzido neste factor de correcção do modelo.

5.2. Cálculo de L_{eq}

O cálculo do nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}) é efectuado com base nos valores de $L_{máx}$ e no tempo de exposição durante a passagem de um comboio (t_e). Este último pode ser obtido através da expressão seguinte:

$$t_e = \frac{3.6 \cdot l}{V} + \frac{6 \cdot d}{100} \quad [s]$$

onde:

- l é o comprimento do comboio, em m ;
- V é a velocidade do comboio, em km/h ;
- d é a distância entre o receptor e a via férrea, em m .

➤ A expressão para o cálculo do nível sonoro contínuo equivalente do ruído gerado por um comboio em campo livre (L_{Aeq}) é então:

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left(\frac{t_e}{T} \cdot 10^{\frac{L_{máx}}{10}} \right) \quad [dB(A)]$$

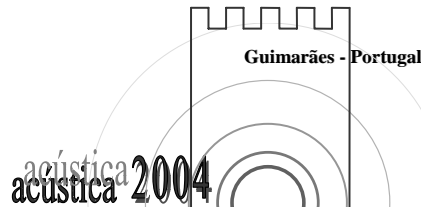
onde:

- t_e é tempo de exposição, em s ;
- T é o período de análise, em s ;
- $L_{máx}$ é o nível sonoro máximo recebido durante a passagem de um comboio, em $dB(A)$.

➤ O valor de L_{Aeq} para um determinado período de tempo, pode contabilizar um número n de comboios idênticos (do mesmo tipo, com comprimentos e velocidades iguais, que transitem na mesma linha e no mesmo sentido) que circulem nesse período. Neste caso será:

$$(L_{Aeq})_{n^\circ \text{ comboios}} = (L_{Aeq})_{1 \text{ comboio}} + 10 \log_{10}(n) \quad [dB(A)]$$

➤ Finalmente, o nível sonoro contínuo equivalente total para M categorias de comboios diferentes é dado somando o ruído produzido pelos comboios de cada categoria individualmente.



Assim:

$$(L_{Aeq})_{Total} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^M 10^{\frac{(L_{Aeq})_i}{10}} \right] [dB(A)]$$

6. IMPLEMENTAÇÃO EM COMPUTADOR

Com base no Modelo Proposto foi elaborado um programa em computador, FERR3, que permite, para um dado número de comboios (a introduzir pelo utilizador) a circular, prever o resultante nível sonoro contínuo equivalente num determinado ponto de observação.

Os dados contemplam as características de cada tipo de comboio (tipologia, comprimento, velocidade média), do tipo de carris e das linhas. São contabilizadas, para cada comboio, as atenuações e as correcções aplicáveis, nomeadamente, as atenuações devidas à divergência geométrica, à absorção atmosférica, ao efeito do solo, à vegetação, bem como a correcção da directividade e o factor de correcção do modelo.

O programa foi escrito em linguagem *Visual C++*, tendo sido utilizado o compilador da *Microsoft*. Esta linguagem foi escolhida para que se obtivesse uma interface com o utilizador simples e agradável, mas sem que se perdesse rapidez, precisão e eficácia.

O FERR3 simula eficazmente o Modelo Proposto, calculando o nível sonoro contínuo equivalente produzido pela passagem dos comboios escolhidos.

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O Modelo Proposto para a previsão de ruído de tráfego ferroviário tem como base o Modelo Português já existente [3]. Aproveitando o estudo dos modelos utilizados na Europa e seguindo as normas em vigor em Portugal, foi desenvolvido um novo modelo teórico para a previsão do ruído emitido pelo tráfego ferroviário.

Foram então comparados, para os mesmos combóios, valores reais, retirados de diversas e extensas campanhas de medições acústicas, com os obtidos através das simulações efectuadas com o programa FERR3 que implementa em computador o Modelo Proposto.

A análise dos resultados obtidos demonstra, claramente, que o programa FERR3 prevê eficazmente o nível sonoro contínuo equivalente produzido pelo tráfego ferroviário.

A tabela seguinte mostra valores típicos dos desvios encontrados entre os valores dos níveis sonoros previstos e os medidos, em dB(A), em diferentes linhas férreas.

Linha	Linha de Sintra			Linha do Estoril		Linha do Norte		
	Braço Prata	Campolide	Alverca	Cruz Quebrada	Paço d'Arcos	Braço Prata	Campolide	Alverca
Desvios	+0,1	-2,4	+0,9	-0,7	+0,7	+0,5	+2,3	+0,9



Os desvios obtidos mostram que o Modelo Proposto e, conseqüentemente, o programa FERR3, se encontra adequado à realidade nacional, já que os desvios não são, em nenhum dos casos simulados, superiores a $\pm 2,4$ dB.

Ora, sendo os erros típicos cometidos neste tipo de previsões da ordem de 2 a 3 dB, mas sendo considerável aceitáveis erros até 4 dB para trajectos suburbanos [5], o Modelo Proposto apresenta-se como um bom algoritmo de cálculo para a previsão de ruído de tráfego ferroviário.

O FERR3 foi implementado, com todos os tipos de comboios que circulam nas linhas férreas nacionais, permitindo a introdução de novos tipos bem como a remoção dos existentes.

O modelo FERR3 considera todas as atenuações apresentadas no Modelo Proposto, possibilita a alteração dos coeficientes considerados e prevê, ainda, a introdução de valores de correcções suplementares.

O programa apresenta dois tipos de resultados: o primeiro, numérico, calcula o nível sonoro contínuo equivalente ponderado (A) de todo o tráfego introduzido pelo utilizador, permitindo até 30 eventos distintos num mesmo local de análise para uma distância referida; o segundo, apresenta graficamente a previsão desse mesmo ruído em função da distância, desde a distância de referência até a um valor máximo introduzido pelo utilizador.

Foram, já, efectuados estudos de intercomparação com outros modelos, para várias situações de tráfego ferroviário em diferentes linhas férreas nacionais, tendo sempre os resultados do modelo FERR3 mostrado a melhor correlação com valores experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] Directiva 2002/49/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão de ruído ambiente.
- [2] Regime Legal sobre a Poluição Sonora, Anexo ao Decreto-Lei nº 292/2000 de 14 de Novembro.
- [3] Joel V. C. P. Paulo e J. L. Bento Coelho; “*Previsão de Ruído de Tráfego Ferroviário*”, Proc. Acústica 98, pp. 509-512, 1998.
- [4] Norma Portuguesa NP 4361-2; “*Acústica - Atenuação do Som na Sua Propagação ao Ar Livre. Parte 2: Método Geral de Cálculo*”. Instituto Português da Qualidade, Dezembro 1997.
- [5] EU Noise Policy Working Group 3, Computation and Measurement, Progress Report June 2001.