

MODELAÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

D. Alarcão, J. L. Bento Coelho

CAPS-DEEC, Instituto Superior Técnico, P-1049-001 Lisboa, Portugal
diogo.alarcao@ist.utl.pt

Resumo

O ruído de tráfego ferroviário resulta da contribuição de diferentes fontes sonoras, em que os mecanismos de transmissão por via aérea e por via estrutural são responsáveis pela radiação e propagação dos estímulos sonoros. A legislação nacional em vigor requer a elaboração de mapas de ruído para as infra-estruturas de transporte. Este artigo relata a experiência do Grupo de Acústica e Controlo de Ruído do CAPS/IST no mapeamento das principais linhas-férreas portuguesas. O modelo recomendado para a previsão do ruído de tráfego ferroviário, RMR96/SRMII, dos Países-Baixos, foi adoptado para a realização dos mapas de ruído, tendo sido seguida uma metodologia de aferição espectral em bandas de oitava dos resultados de várias campanhas de medição com o intuito de se obter a melhor correspondência entre o material circulante português e as categorias de comboios incluídas no referido modelo. São apresentados os detalhes de implementação, adaptação e validação do procedimento de cálculo utilizado, dando-se especial ênfase aos dados de base requeridos, como sejam os tipos de composições, super-estrutura e perfis de velocidade para cada linha-férrea. É, também, apresentada a equivalência encontrada entre os diferentes comboios portugueses com as unidades ferroviárias das categorias base do modelo RMR96/SRMII.

Palavras-chave: ruído ferroviário, mapa de ruído, modelo holandês RMR96/SRMII

Abstract

Railway noise results from a number of sources, with airborne and structure borne transmission mechanisms being responsible for the radiation and propagation of the sound stimuli. The European Directive 2002/49/EC requires the drawing of noise maps for areas near the major transport infrastructures. The Portuguese Noise Act of 2007 further requires the drawing of noise maps for all transport infrastructures. This paper reports on the experience of the CAPS/IST Group of Acoustics and Noise Control on noise mapping of the major Portuguese railway lines. The interim calculation model RMR96/SRMII, recommended in the Directive 2002/49/EC, was adopted for the prediction of the railway noise, where a 1/1 octave band noise spectrum curve fitting approach was followed, based on a comprehensive noise measurement program. Details on the implementation, adaptation and validation of the calculation procedure are reported.

Keywords: railway noise, noise mapping, RMR96/SRMII calculation model

1. Introdução

O ruído de tráfego ferroviário resulta de um variado número de fontes sonoras: vibração da carroçaria do comboio, ruído de tracção (motor diesel ou eléctrico), ruído de rolamento originado pela interacção roda – carril e ruído aerodinâmico. A dinâmica do sistema composto determina os níveis de ruído emitidos. Os mecanismos de transmissão por via aérea e por via estrutural concorrem para os níveis de ruído num dado receptor.

Um método de previsão dos níveis de ruído num determinado ponto de imissão deve ter em conta todos estes factores para que seja fiável e preciso.

O Grupo de Acústica e Controlo de Ruído do CAPS/IST tem vindo a trabalhar em previsão de ruído ferroviário desde há bastante tempo. Neste âmbito, foi desenvolvido o modelo previsionial (como aplicação informática) FERR, que tem em conta os principais mecanismos de emissão e propagação de ruído ferroviário, e que contém uma base de dados de todos os comboios em circulação nas linhas-férreas portuguesas. A caracterização dos comboios baseou-se numa extensa campanha de registo de dados acústicos para as diferentes composições sob diferentes condições de circulação (velocidades, número de unidades, superestrutura, etc.) e sob diferentes condições de propagação acima do solo (nomeadamente atenuação no ar, efeito de solo). O modelo FERR encontra-se, assim, adaptado à realidade do material circulante nacional. No entanto, o modelo não se encontra, no seu estado actual, apto para mapeamento de ruído.

No âmbito da Assessoria Técnica em Ruído de Tráfego Ferroviário à REFER E. P., requereu esta entidade ao CAPS/IST a elaboração dos mapas de ruído das principais linhas-férreas em exploração, dentro do actual quadro legislativo e normativo.

O Decreto-Lei n. 146/2006 de 31 de Julho, que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva Europeia 2002/49/CE de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente recomenda o método de cálculo “*Standaard-Rekenmethode IP*” dos Países Baixos, publicado na “*Reken — Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 de Novembro de 1996*” (designado abreviadamente por RMR96/SRMII) para a previsão do ruído de tráfego ferroviário. Aquele documento estabelece, ainda, no seu Anexo II, que “em alternativa, desde que seja demonstrada a obtenção de resultados equivalentes, pode ser utilizado outro método adaptado e validado ao material ferroviário e às condições de circulação em território nacional”.

A aplicação do método RMR96/SRMII tem-se revelado, na prática, bastante difícil, porque o material circulante ferroviário, ao contrário dos veículos automóveis, é normalmente muito diferente de país para país, sendo que o método RMR96/SRMII apenas contém um modelo de emissão suportado por uma base de dados muito específica com um limitado número de classes de veículos ferroviários correspondentes ao material circulante nos Países-Baixos. O método permite, contudo, a inclusão de novas classes (o que não é suportado na prática pelos softwares previsionais comerciais existentes) através de um procedimento muito complexo de medições acústicas, o que em termos de aplicação prática se torna completamente desajustado.

O Grupo de Acústica e Controlo de Ruído do CAPS/IST resolveu, então, adoptar o RMR96/SRMII desenvolvendo uma nova abordagem de utilização e de adaptação do método.

2. Previsões de ruído de tráfego ferroviário

2.1 Procedimentos de cálculo

Dos métodos actualmente disponíveis para o cálculo do ruído de origem ferroviária, o RMR96/SRMII aparece como um dos mais completos e mais poderosos, principalmente devido ao modelo de emissão e propagação ser espectral e devido às possibilidades de correcção de efeitos acústicos encontrados nas situações reais. As suas potencialidades técnicas recomendam, assim, a sua utilização, apesar da sua

base de dados ser, conforme referido, limitada e específica para o material circulante dos Países Baixos, ou exigir procedimentos experimentais complexos para a sua extensão.

A adopção do RMR96/SRMII ao caso nacional exigiu uma abordagem nova de adaptação do método, aferido e validado com base em medições de ruído gerado pelo tráfego de diferentes tipos de composições ferroviárias em linhas nacionais.

Para tal, foi efectuado um vasto programa de medições acústicas em quatro linhas-férreas principais existentes com diferente material circulante com o intuito de se obter a melhor caracterização acústica possível do ponto de vista do ruído ferroviário num dado local.

As medições acústicas consistiram no registo dos espectros de frequência (1/3 oitava) e dos níveis de exposição (L_{Aex}) aquando da passagem distinta de cada composição ferroviária. Em complemento, para cada passagem, foram registadas a velocidade da passagem bem como os comprimentos das composições. Adicionalmente, a geometria e as propriedades da área circundante à linha-férrea, como sejam as alturas relativas, tipos de solos, tipo de carril, superestrutura, etc, foram registadas para cada local de medição. As condições meteorológicas aquando das diferentes medições foram também registadas.

No total, foram realizadas cerca de 180 medições acústicas em 20 locais distintos das diferentes linhas-férreas consideradas neste estudo.

Para cada local de medição, e para cada passagem específica de uma dada composição ferroviária, foram simulados os espectros em bandas de oitava e os níveis totais de diferentes categorias de comboios do modelo RMR96, sob as mesmas condições existentes quando das medições. As curvas de emissão sonora previstas foram depois calibradas para o mesmo nível de ruído total (L_{Aex}), igual ao da medição correspondente. Foi então aplicado um procedimento de “curve-fitting” de modo a se obter a curva (categoria de comboio da RMR96) que melhor se adaptava ao espectro medido, para um nível de exposição L_{Aex} idêntico.

A Figura 1 ilustra o procedimento de ajuste para o espectro de uma composição do tipo suburbano e a Figura 2 para uma composição do tipo *Intercidades*.

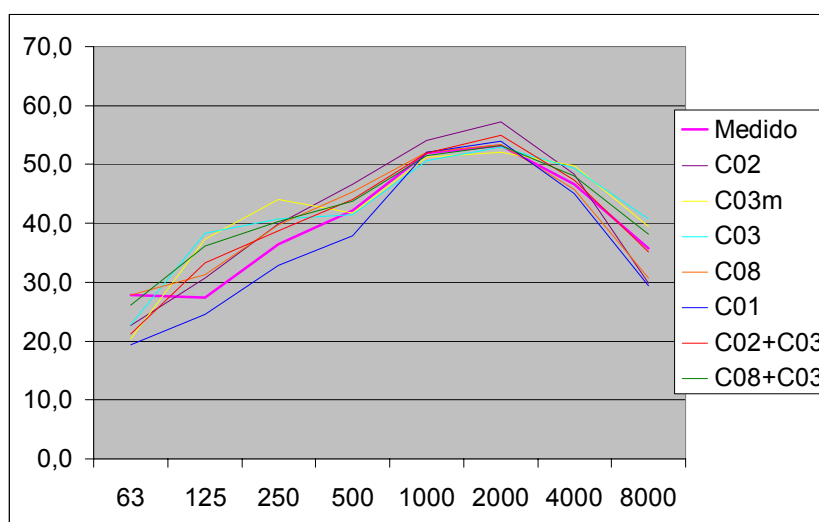


Figura 1. Procedimento de “curve-fitting” para uma composição suburbana UQE3500

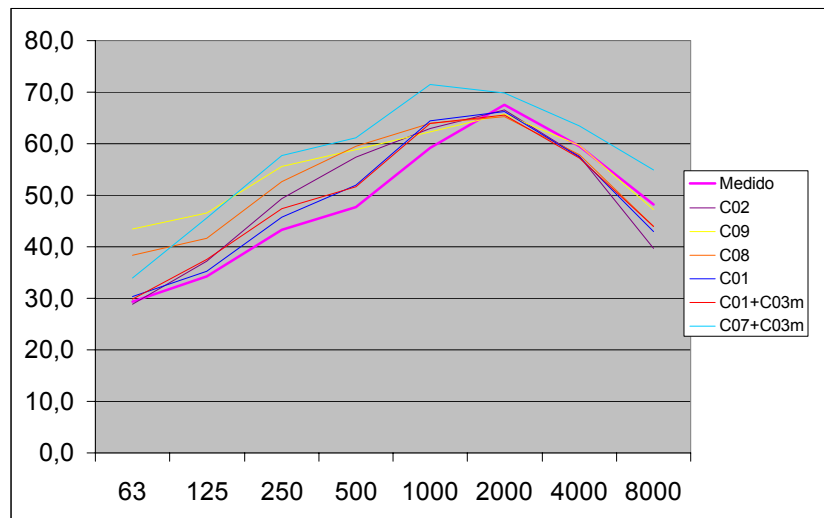


Figura 2. Procedimento de “curve-fitting” para um *Intercidades* (LOC5600 + 5 carruagens Corail)

O procedimento de “curve-fitting” foi efectuado para cada tipo de material circulante sob diferentes condições de circulação, nomeadamente sob diferentes velocidades de passagem. As diferentes condições permitiram discriminar as categorias do material circulante da base de dados do modelo RMR96 e, conseqüentemente, definir a categoria que melhor se adapta ao conjunto dos dados experimentais para aquele material circulante.

A Figura 3 ilustra a comparação das previsões, em termos de espectro de frequências e de nível sonoro, a partir das categorias 2 e 8 do modelo RMR96/SRMII para a UQE3500 com uma velocidade de passagem de 64 km/h. Como se pode constatar, os níveis e espectros previstos por ambas as categorias são muito próximos do valor medido experimentalmente.

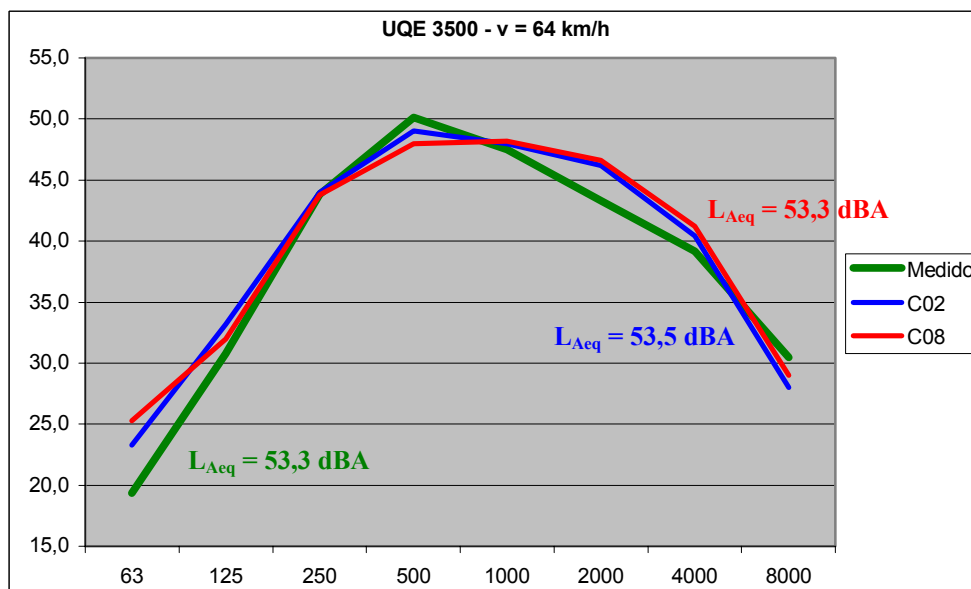


Figura 3 – Espectros previstos a partir das categorias 2 e 8 da norma RMR96/SRMII para uma passagem de uma UQE 3500 a 64 km/h, comparados com o espectro medido

No entanto, para uma velocidade de passagem de 137 km/h, os valores previstos pela categoria 2 afastam-se significativamente do valor experimental, como se pode ver na Figura 4. Conclui-se, então que a melhor aproximação é a correspondência com a categoria 8.

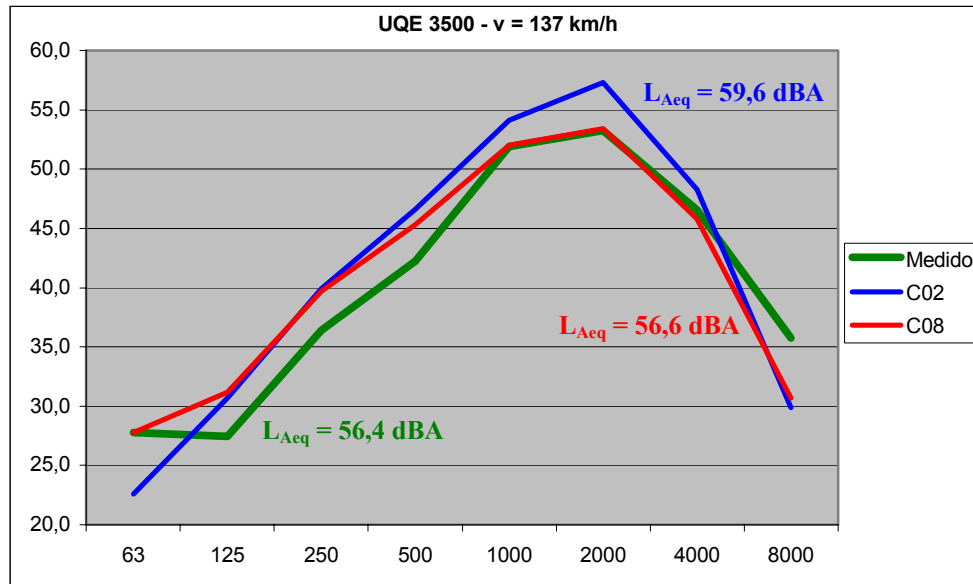


Figura 4 – Espectros previstos a partir das categorias 2 e 8 da norma RMR96/SRMII para uma passagem de uma UQE 3500 a 137 km/h, comparados com o espectro medido

2.2 Linhas-férreas consideradas

As medições acústicas foram efectuadas nas seguintes linhas-férreas:

- Cascais (25,4 km linha dupla / 83800 passagens anuais / 1 Tipo de comboio)
- Sintra (27,1 km linha quádrupla / 95000 passagens anuais / 3 Tipos de comboios)
- Cintura (11,5 km linha quádrupla / 174000 passagens anuais / 9 Tipos de comboios)
- Norte (47,0 km linha quádrupla/dupla / 114000 passagens anuais / 10 Tipos de comboios)

O tipo de superestrutura existente nas diferentes linhas consiste em via balastrada com carril de barra curta ligada por barretas e/ou carril de barra longa soldada.

2.3 Material circulante contemplado

1) UTE 3150/UQE 3250

O material circulante na Linha-férrea de Cascais é unicamente composto pelas séries 3150 e 3250. Estas séries correspondem, respectivamente, a unidades triplas eléctricas (UTE) e a unidades quádruplas eléctricas (UQE). Mais especificamente, encontram-se actualmente em funcionamento as unidades UTE 3100 (3151-3163, 3255 e 3261-3263) e as unidades UQE 3200 (3251-3271).

As unidades UTE e UQE podem ser acopladas originando assim uma unidade múltipla UTE+UQE. A Figura 5 mostra uma fotografia de uma destas unidades múltiplas.

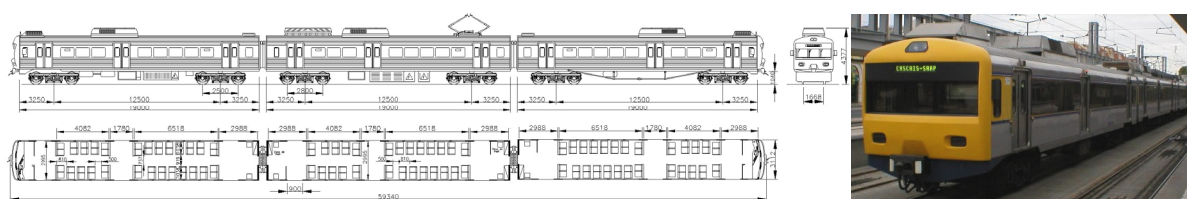


Figura 5. Esquema da UTE3150 e fotografia de unidade múltipla UTE+UQE das séries 3150/3250

Cada UTE possui três unidades simples e um comprimento total de 59,34 m, enquanto que uma UQE possui quatro unidades simples e um comprimento de 78,94 m. Assim, uma unidade múltipla UTE+UQE possui sete unidades simples acopladas e um comprimento total de 138,28 m. A Figura 6 mostra um esquema e uma fotografia de uma UQE3250.

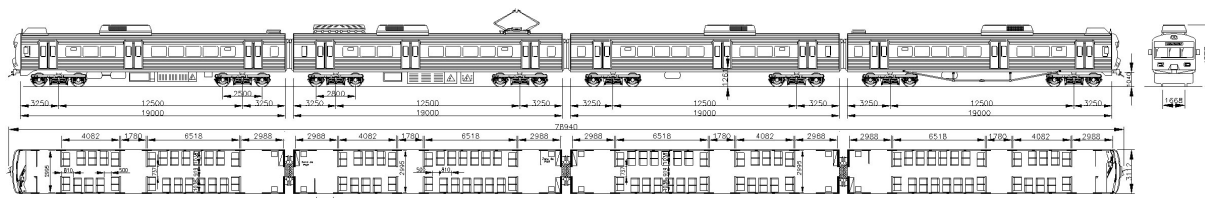


Figura 6. Esquema da UQE3250

2) UQE 2300/2400

As composições ferroviárias das séries 2300 e 2400 da CP efectuam o serviço suburbano da ligação Lisboa/Alverca a Mira Sintra – Meleças.

As séries 2300/2400 correspondem a unidades quádruplas eléctricas (UQE). Encontram-se actualmente em funcionamento as unidades UQE 2300 (2301-2342) e as unidades UQE 2400 (2401-2414). O comprimento de uma UQE é de 96,0 m.

A Figura 7 mostra um esquema e uma fotografia de uma UQE 2400.

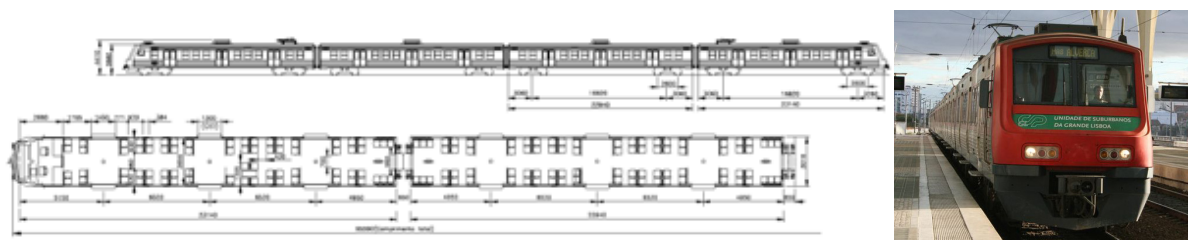


Figura 7 – Esquema e fotografia da UQE2400

As unidades UQE podem ser acopladas originando, assim, uma unidade múltipla UQE+UQE.

3) UQE 3500

A série 3500, utilizada pela CP e pela Fertagus para efectuar serviço suburbano, corresponde, também, a unidades quádruplas eléctricas (UQE), mas, neste caso, cada automotora é de duplo piso, permitindo assim uma maior lotação de passageiros para o mesmo comprimento. Existem actualmente 12 composições em funcionamento na CP (3519/3569 a 3530/3580). Existem também 22 composições UQE 3500 em funcionamento na Fertagus (3501/3551 a 3522/3572), algumas circulando no esquema

UQE+UQE. Cada UQE 3500 possui quatro unidades simples e um comprimento total de 106,6 metros, o que resulta num comprimento prático por unidade simples de 26,7 metros. A Figura 8 mostra o esquema da UQE3500 e uma fotografia desta série pertencente à CP.

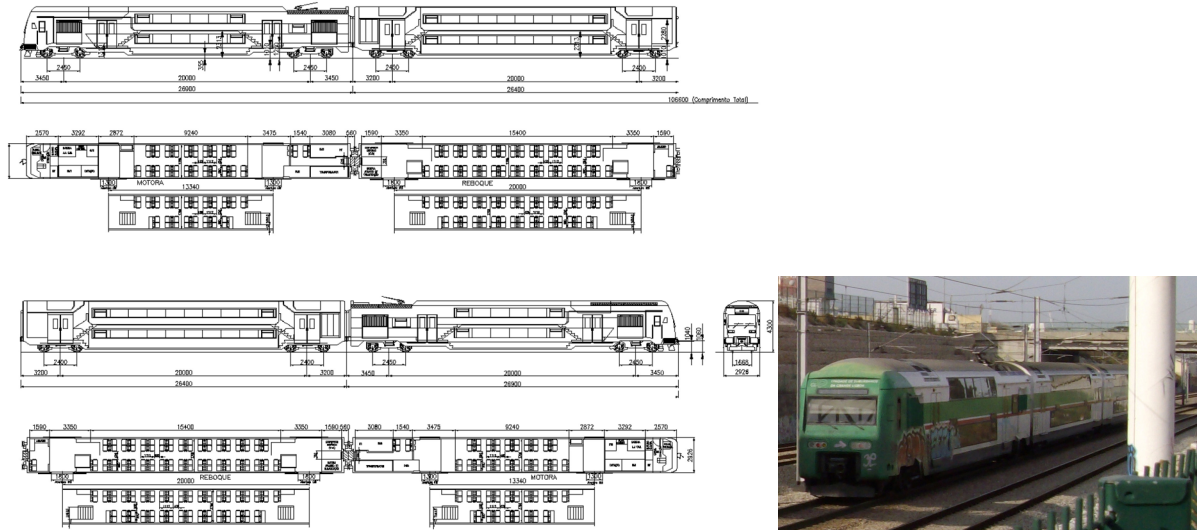


Figura 8 – Esquema de uma UQE da série 3500 e fotografia de uma composição da CP

4) UTE 2240

As unidades triplas eléctricas da série 2240 (UTE 2240), que efectuam serviço regional e inter-regional, são baseadas nas séries UTE 2100/2150/2200. Existem actualmente em circulação 57 UTEs 2240 (2241 a 2297).

Cada UTE 2240 possui um comprimento total de 70,5 metros. Nas horas de ponta circulam 2 UTEs acopladas com um comprimento total de 141 metros.

A Figura 9 mostra um esquema e uma fotografia de uma UTE2240.

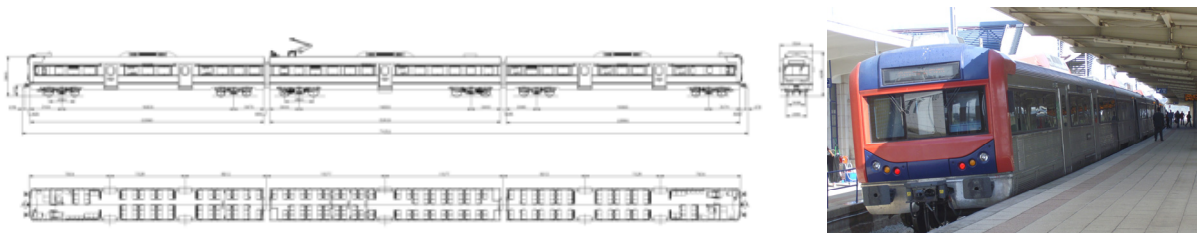


Figura 9 – Esquema e fotografia da UTE2240

5) UDD 450

As unidades duplas diesel da série 450 (UDD 450) asseguram serviço regional e inter-regional. Cada UDD 450 possui um comprimento total de 52 metros.

A Figura 10 mostra um esquema e uma fotografia de uma UDD450.

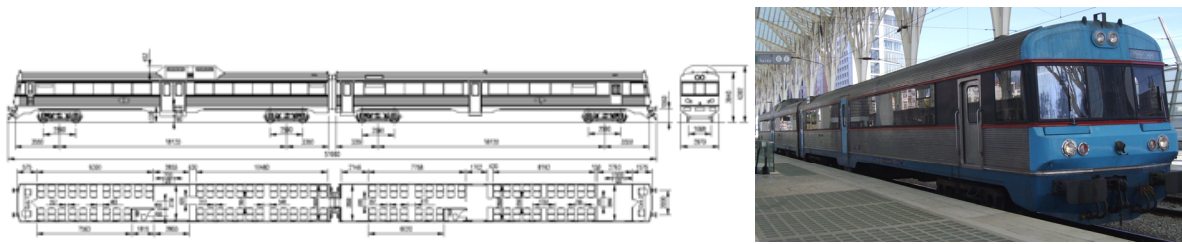


Figura 10 – Esquema e fotografia da UDD450

6) CPA 4000

As composições do serviço *Alfa Pendular* (Lisboa-Faro e Lisboa-Porto/Braga) são efectuadas pelo material circulante da série CPA 4000. Cada comboio *Alfa Pendular* é composto por seis veículos interligados (dois motores e quatro reboques – UME6) medindo aproximadamente 159,0 metros de comprimento. Existem actualmente 10 composições em funcionamento (4001 – 4010 e 4051 – 4060). A Figura 11 mostra um esquema e uma fotografia do CPA4000.

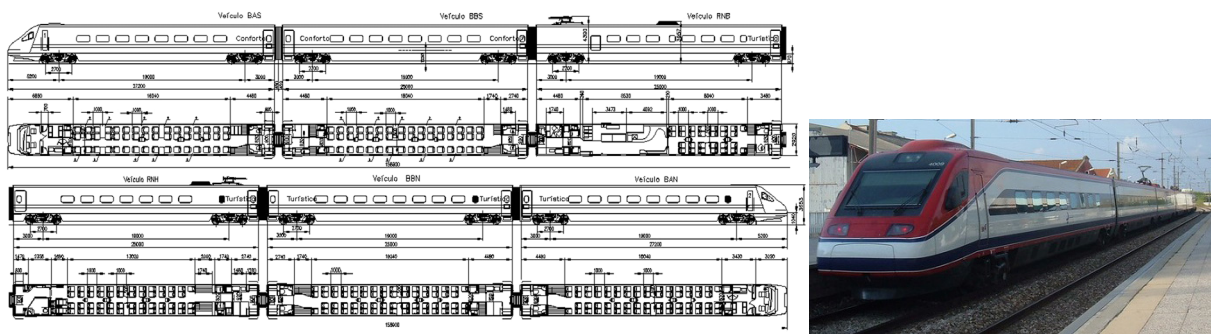


Figura 11 – Esquema e fotografia do CPA 4000

7) LOC1900/LOC1930 – Diesel

Estas locomotivas de tracção diesel são utilizadas no serviço de passageiros *Intercidades*, e no serviço de transporte de mercadorias.

Na Figura 12 mostra-se o esquema e fotografia da locomotiva diesel da série 1900 (1930).

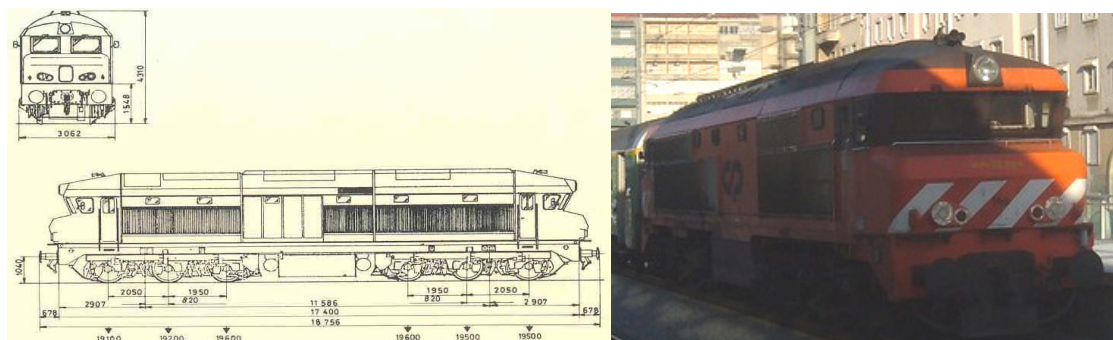


Figura 12 – Esquema e fotografia da locomotiva diesel 1930

8) LOC5600/LOC2600 – Eléctricas

Estas locomotivas de tracção eléctrica são utilizadas no serviço de passageiros *Intercidades*, e no serviço de transporte de mercadorias.

Na Figura 13 mostra-se os esquemas das locomotivas eléctricas das séries 5600 (*Siemens*) e 2600 (*Alstom/Sorefame*), e fotografias das mesmas.

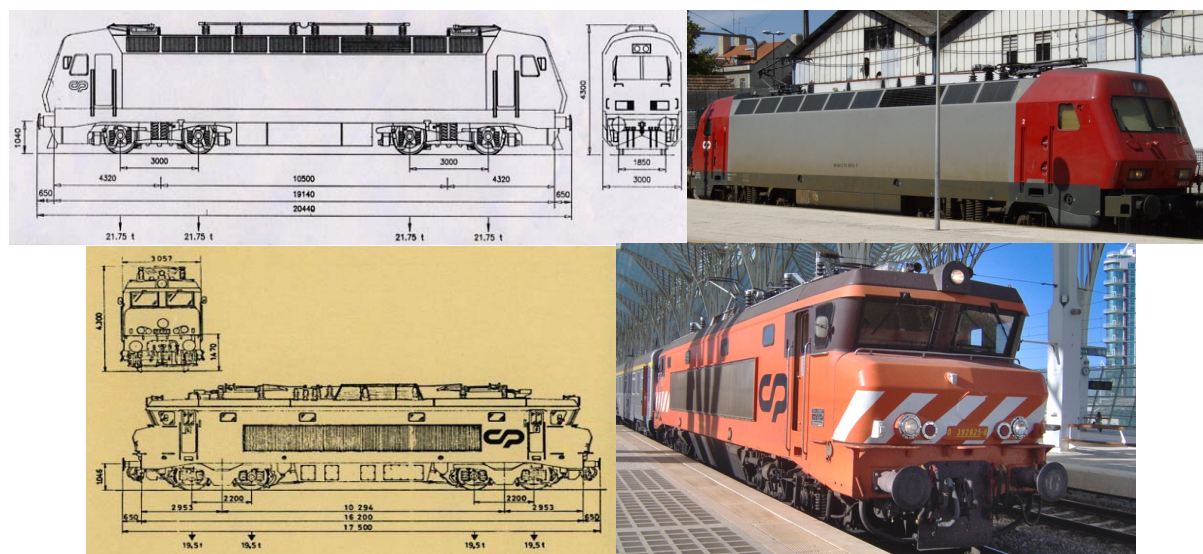


Figura 13 – Esquemas e fotografias das locomotivas eléctricas da série 5600 (em cima) e 2600 (em baixo)

9) Carruagens Corail e carruagens Sorefame

Estas carruagens são utilizadas nos comboios do serviço *Intercidades* entre Lisboa e Évora, Beja, Faro, Covilhã, Guarda, Porto e Guimarães, nos comboios do serviço *Sud Expresso* que efectua a ligação ferroviária entre Lisboa St.^a Apolónia e Paris, e nos comboios do *Lusitânia Comboio Hotel*, que faz a ligação entre Lisboa St.^a Apolónia e Madrid.

Na Figura 14 mostra-se o esquema de uma carruagem do tipo *Sorefame* utilizada no serviço *Intercidades*. Estas carruagens são similares às carruagens do tipo *Corail*. O comprimento médio de cada uma destas carruagens é de 26,0 metros.

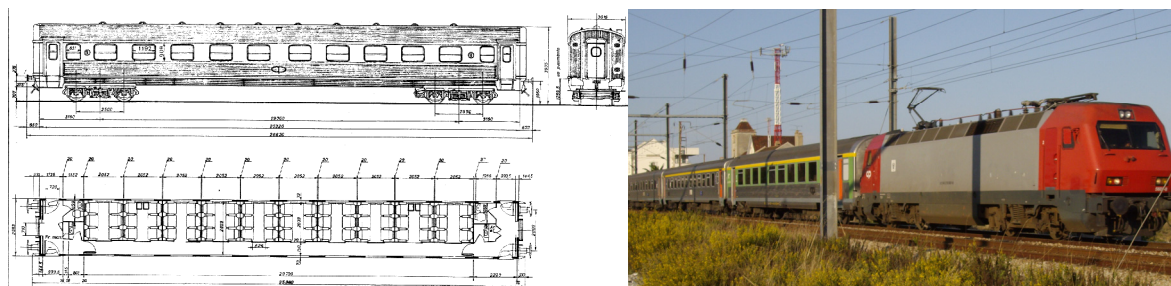


Figura 14 – Composição Intercidades – LOC5600 Siemens/Sorefame + 5 carruagens Corail/Sorefame

10) Vagões de mercadorias

Dentro da classe vagões de mercadorias contam-se veículos ferroviários de comboios realizam o transporte de cereais, contentores e mercadorias diversas.

3. Resultados e conclusões

A Tabela 1 mostra os resultados da equivalência entre as diferentes classes do material circulante nacional e as categorias de comboios da base de dados do modelo RMR96/SRMII encontradas no âmbito deste estudo. Para além da equivalência directa, é também indicado qual o factor utilizado em termos de unidades do modelo RMR96 para o material circulante indicado, no sentido de obter idênticas características de emissão sonora.

Tabela 1 – Equivalência entre material circulante nacional e as categorias do modelo RMR96/SRMII com respectivos factores de correcção

Material Circulante	N.º unidades	Cat. SRMII	Factor unid. material circulante /unid. cat. RMR96	Unidades cat. RMR96 por composição
UQE 3150/3250	4	C02	1,143	4,6
UQE 2X00+UQE2X00	8	C02	3,125	25
UQE 3500	4	C08	3,65	14,6
UTE 2240	3	C03	1	3
UDD 450	1	C05(diesel)	1	1
	1	C06	1	1
CPA 4000	2	C09(railcar)	1	2
	4	C09(carriage)	1	4
LOC5600/2600	1	C03(motor)	1	1
LOC1930/1960	1	C05(diesel)	1	1
Carruagem <i>Corail/Sorefame</i>	1	C01	2,5	2,5
Vagão mercadorias	1	C04	1	1

Isto significa que se, por exemplo, ocorrer uma passagem de uma unidade múltipla UQE2X00+UQE2X00 (com 8 unidades) numa dada secção da linha-férrea por hora, então ocorrerá a passagem de 25 unidades da categoria 2 do modelo RMR96 na mesma secção da linha-férrea por hora. Para as restantes composições, a tabela fornece todos os dados necessários.

Os dados constantes na Tabela 1 foram utilizados para o cálculo do ruído de tráfego ferroviário nas quatro linhas-férreas atrás mencionadas, para efeitos previsionais. Em todos os casos, foi obtida uma muito boa concordância entre valores experimentais e valores previstos. Desvios locais raramente ultrapassam os 3 dB, e os desvios médios típicos situam-se abaixo dos 2 dB.

A Tabela 2 constitui um excerto dos dados de validação para diferentes composições e sob diferentes condições de circulação.

Como se pode constatar, os níveis previstos são muito bons, com desvios individuais sempre bastante pequenos.

Tabela 2 – Comparação entre valores medidos e previstos para diferentes composições ferroviárias sob diferentes condições de circulação

Tipo	l [m]	tpass [s]	v [km/h]	Medido		Previsto	Desvio
				LAex	LAeq (1hora)	LAeq (1hora)	D dB
3500 A	106,6	8,1	47	86,5	50,9	51,4	-0,5
3500 A	106,6	3,2	120	94,5	58,9	58,1	0,8
3500 A	106,6	6,0	64	88,9	53,3	53,2	0,1
3500 A	106,6	9,4	41	86,1	50,5	50,7	-0,2
3500 A	106,6	3,0	128	94,5	58,9	58,7	0,2
3500 A	106,6	8,0	48	87,5	51,9	51,5	0,4
3500 D	106,6	6,4	60	90,3	54,7	55,2	-0,5
3500 D	106,6	7,9	49	88,6	53,0	54,1	-1,1
3500 D	106,6	4,2	91	90,6	55,0	57,8	-2,8
3500 D	106,6	8,4	46	86,4	50,8	53,6	-2,8
3500 D	106,6	8,0	48	88,3	52,7	54,0	-1,3
2240 A	70,5	2,1	121	84,1	48,5	46,9	1,6
2240 A	70,5	2,1	121	83,8	48,2	46,9	1,3
2240 D	70,5	3,2	79	80,7	45,1	43,8	1,3
2240 D	70,5	2,4	106	81,5	45,9	46,5	-0,6
4000 Alfa A	159	5,0	114	87,4	51,8	52,0	-0,2
4000 Alfa D	159	4,1	140	89,5	53,9	54,3	-0,4
4000 Alfa D	159	4,1	140	92,2	56,6	58,8	-2,2
IC 5600 + 4 Corail A	127	3,8	120	93,2	57,6	58,4	-0,8
IC 5600 + 5 Corail A	153	3,6	153	99,5	63,9	63,2	0,7
Loc 1960 A	19,9	0,8	90	90,7	55,1	55,0	0,1
Loc 5600+18 vag content A	326	10,3	114	99,8	64,2	65,3	-1,1

Estes resultados validam o procedimento de cálculo descrito, permitindo, assim, que o modelo RMR96/SRMII possa ser utilizado na maioria das linhas-férrreas nacionais sem a necessidade de um programa complexo e oneroso de medições para a determinação dos valores de emissão do diferente material circulante.

Agradecimentos

Este trabalho foi efectuado ao abrigo do Protocolo de Assessoria Técnica em Ruído de Tráfego Ferroviário com a REFER E. P. Parte da investigação foi suportada pelo financiamento plurianual FCT-CAPS/IST através do programa POS_C e fundos do FEDER.