



ISEL

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Área Departamental de Engenharia Química



Caracterização do perfil de ruído em vias de grande tráfego em Lisboa

Jacob Torreira de Matos
(Licenciado em Engenharia do Ambiente)

Trabalho Final de Mestrado (Projeto) - para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadores:

Prof. Doutor Manuel José de Matos
Prof.^a Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Alves da Silva
1º Vogal (arguente): Prof. Doutor Joel Vera Cruz Preto Paulo
2º Vogal (orientador): Prof. Doutor Manuel José de Matos

Dezembro de 2018



ISEL

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Área Departamental de Engenharia Química



Caracterização do perfil de ruído em vias de grande tráfego em Lisboa

Jacob Torreira de Matos
(Licenciado em Engenharia do Ambiente)

Trabalho Final de Mestrado (Projeto) - para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientadores:

Prof. Doutor Manuel José de Matos
Prof.^a Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Alves da Silva
1º Vogal (arguente): Prof. Doutor Joel Vera Cruz Preto Paulo
2º Vogal (orientador): Prof. Doutor Manuel José de Matos

Dezembro de 2018

“Once you stop learning, you start dying.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que me apoiaram, colaboraram e contribuíram, direta ou indiretamente, na realização deste trabalho.

Em primeiro lugar gostaria de expressar a minha gratidão aos meus orientadores, professor Doutor Manuel José de Matos e professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos, exprimo um profundo sentimento de agradecimento pela orientação e apoio prestado ao longo de todo o trabalho.

À professora Doutora Sandra Aleixo, pela clareza, rigor e disponibilidade na colaboração do tratamento estatístico dos resultados.

Os agradecimentos mais sentidos não poderiam deixar de ser entregues à minha mãe porque sem o apoio dela a obtenção do curso de Mestrado não seria possível nesta honrada instituição de ensino superior.

À minha namorada, pela compreensão, companheirismo, incentivo e confiança.

A todos, bem hajam!

Resumo

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído proveniente de tráfego rodoviário.

As medições de ruído são habitualmente realizadas com sonómetros devidamente calibrados. Os *smartphones*, dispositivos móveis que possuem uma entrada de áudio incorporada como dispositivo de medição de som conjugados com a utilização de aplicações específicas são um método de registo de níveis de ruído e geolocalização, utilizando o áudio e o *GPS* para mapear os níveis de ruído em ambientes urbanos.

O objetivo do presente estudo é caracterizar uma das vias mais movimentadas de Portugal, a segunda circular, em termos de ruído proveniente do tráfego rodoviário, com a utilização desses mesmos dispositivos.

Com os resultados obtidos desenvolveu-se um modelo matemático que relaciona o número, o tipo de veículos e a velocidade média a que se deslocam, com o ruído.

O modelo adotado baseia-se no IMAGINE, o modelo de emissão de ruído de tráfego rodoviário europeu.

O modelo e resultados obtidos poderão suportar futuras decisões de construção nas proximidades bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais, grandes edifícios, entre outras.

Palavras-chave: ruído, tráfego rodoviário, aplicações de ruído para *smartphone*, modelação, poluição sonora

Abstract

Road traffic noise is the largest source of noise pollution in Europe. It is estimated that around 100 million people are affected by harmful levels of noise from road traffic.

Noise measurements are usually made with properly calibrated sound level meters. Smartphones, mobile devices that have a built-in audio input as a sound meter device combined with the use of specific applications are a method of recording noise levels and geolocation, using audio and GPS to map the noise levels in urban environments.

The objective of the present study is to characterize one of the busiest roads in Portugal, “segunda circular”, in terms of road traffic noise, using these same devices.

With the results obtained a mathematical model was developed relating the number, the type of vehicles and their average speed, with the produced noise.

The adopted model is based on IMAGINE, the European road traffic noise model.

The model and results obtained will support future construction decisions in the vicinity as well as provide guidance on noise mitigation measures in existing facilities such as schools, hospitals, large buildings, among others.

Keywords: noise, road traffic, smartphone noise apps, modelling, noise pollution

Abreviaturas e acrónimos

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ACT	Autoridade para as Condições do Trabalho
AMT	Autoridade da Mobilidade e dos Transportes
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
ANSR	Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
c	Velocidade do som
CAP	Certificado de Competências Pedagógicas
CE	Comunidade Europeia
CML	Câmara Municipal de Lisboa
D	Período
DL	Decreto-Lei
DLI	Detetores de laços indutivos
DRA	Diretiva de Ruído Ambiental
EEE	Espaço Económico Europeu
GIT	Grande Infraestrutura de Transporte
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HPM	Hora de Ponta da Manhã
HPT	Hora de Ponta da Tarde
IC	Intervalo de confiança
IC	Itinerário Complementar
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IMT	Instituto da Mobilidade e Transportes, I.P.
IP	Infraestruturas de Portugal, S.A.

IPAC	Instituto Português de Acreditação
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NP	Norma Portuguesa
OD	Origem-Destino
OMS	Organização Mundial da Saúde
PRN	Plano Rodoviário Nacional
RGR	Regulamento Geral do Ruído
SI	Sistema Internacional
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
TFM	Trabalho Final de Mestrado
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual
UE	União Europeia
VLC	<i>VideoLAN Client</i>

Índice

Abreviaturas e acrónimos	IX
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	3
2. Som.....	4
2.1 Definição e características físicas do som	4
2.2 Fenómenos das ondas sonoras	7
2.3 Nível sonoro.....	12
2.3.1 Nível de Pressão Sonora.....	12
2.3.2 Relação entre os Níveis de Pressão, Potência e Intensidade Sonora....	12
2.3.3 Adição de níveis sonoros.....	13
2.4 Descrição e funcionamento do aparelho auditivo humano	15
2.5 Audição	18
3. Ruído	20
3.1 Ruído ocupacional.....	21
3.2 Ruído ambiente.....	22
3.2.1 Ruído proveniente de tráfego rodoviário	23
3.3 Legislação aplicável	24
3.4 Normalização aplicável	32
3.5 Efeitos na saúde	33
4. Tráfego rodoviário	40
4.1 Instituto da Mobilidade e Transportes, I.P.	40
4.2 Infraestruturas de Portugal.....	41
4.2.1 Rede Rodoviária	41
4.2.2 Plano Rodoviário Nacional.....	42
4.3 Métodos de contabilização de veículos	43
4.3.1 Métodos intrusivos.....	44
4.3.2 Métodos não – intrusivos.....	45

4.4	Caraterização do tráfego rodoviário.....	48
5.	Modelação de ruído	51
5.1	Introdução sobre modelos.....	51
5.2	Modelos de ruído.....	52
5.2.1	Principais modelos.....	54
5.2.2	HARMONOISE.....	54
5.2.3	IMAGINE.....	58
5.3	Comparação entre modelos de ruído.....	60
6.	Equipamentos de medição de ruído.....	63
6.1	Equipamentos de medição oficiais	63
6.2	<i>Smartphones</i> enquanto equipamentos de medição móveis	67
6.2.1	Aplicação móvel <i>NoiseTube</i>	71
7.	Caso de estudo.....	72
7.1	Descrição do local.....	72
7.2	Metodologia	76
8.	Resultados e discussão	79
9.	Conclusões e perspetiva de trabalhos futuros.....	89
9.1	Conclusões	89
9.2	Perspetiva de trabalhos futuros	90
10.	Referências bibliográficas.....	91
11.	Anexos.....	97
	Anexo I – Contabilização de veículos.....	97
	Anexo II – Matriz de correlação multilinear da aplicação do modelo	100
	Anexo III – Poster e resumo Fórum de Engenharia Química e Biológica.....	102
	Anexo IV – Poster e resumo XXIV Encontro Luso Galego de Química	104
	Anexo V – Cálculo de velocidades dos veículos na via em estudo.....	106
	Anexo VI – Código de programação em R para obtenção do modelo.....	109

Índice de Figuras

Figura 1 - Área de audição Humana - (A) Limiar de audição (B) Limiar da dor.....	4
Figura 2 - Propagação de uma onda sonora no ar	5
Figura 3 - Reflexão entre fonte e recetor (o reflexo é fruto da imagem virtual)	9
Figura 4 - Atenuação dos sons de frequência alta pela barreira no lado oposto devido à difração reduzida	10
Figura 5 - Difração proeminente dos sons de baixa frequência pela barreira	10
Figura 6 - Refração dos raios de som provenientes um meio mais denso para um meio menos denso	11
Figura 7 - Representação ilustrativa do aparelho auditivo humano	15
Figura 8 - Desenho exemplificativo do sistema ossicular do ouvido humano	16
Figura 9 - Estrutura do ouvido interno	17
Figura 10 - Representação das linhas isofónicas normais para sons puros	18
Figura 11 - Malhas de ponderação de frequência	19
Figura 12 - Mapa das GIT rodoviárias abrangidas pelo decreto-Lei n. °146/2006	26
Figura 13 - Mapa de Ruído Rodoviário – Período Diurno-Entardecer-Noturno.....	27
Figura 14 - Mapa de Ruído Rodoviário Noturno	27
Figura 15 - Efeitos do ruído obre o ser humano	34
Figura 16 - Interação entre o ruído ambiente e efeitos na saúde humana.....	35
Figura 17 - Rede a cargo da IP, SA	42
Figura 18 - Instalação de tubos pneumáticos numa via de rodagem.....	44
Figura 19 - Esquema de montagem dos sensores laser	46
Figura 20 - Evolução do número de veículos motorizados em circulação por tipo de combustível e veículo entre os anos de 2010 e 2016.....	49
Figura 21 - Fluxograma de construção de modelos	51
Figura 22 - Posições da fonte do ruído	56
Figura 23 - Sonómetro SVANTEK SV971E.....	64
Figura 24 - Representação de funcionamento de um sonómetro	65
Figura 25 - Representação de funcionamento de um sonómetro integrador sem análise em frequência.....	65
Figura 26 - Representação de funcionamento de um sonómetro integrador com análise em frequência.....	66
Figura 27 - Captura de ecrã da aplicação SoundMeter em iOS	69
Figura 28 - Captura de ecrã da aplicação CART_ASUR em Android	70
Figura 29 - Interface da aplicação <i>NoiseTube</i> para dispositivos móveis.....	71
Figura 30 - Representação da extensão 2ª circular.....	72

Figura 31 - Zona de recolha de dados e pontos de referência	75
Figura 32 - Ponte pedonal (local de recolha dos dados) e segunda circular.....	75
Figura 33 - Esquema de captura de som e imagem montado na ponte pedonal	76
Figura 34 - Esquema de captura de dados de imagem	77
Figura 35 - Esquema de distâncias entre pontos de referência	78
Figura 36 - Evolução do número de veículos e som no sentido M1.....	80
Figura 37 - Evolução do número de veículos e som no sentido M2.....	81
Figura 38 - Evolução do número de veículos e velocidade média no sentido M1	81
Figura 39 - Evolução do número de veículos e velocidade média no sentido M2	82
Figura 40 - Perfil de ruído sentido M1	84
Figura 41 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros no sentido M1	84
Figura 42 - Perfil de ruído no sentido M2	85
Figura 43 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros no sentido M2	85
Figura 44 - Perfil de ruído dos sentidos M1 e M2	86
Figura 45 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros dos sentidos M1 e M2.....	86

Índice de quadros

Quadro 1 - Velocidade do som em diversos meios materiais	6
Quadro 2 - Níveis de pressão sonora com pressões sonoras efetivas correspondentes, exemplos práticos e efeitos auditivos.....	14
Quadro 3 - Correção para a ponderação A nas frequências normalizadas	19
Quadro 4 - Classificação do campo sonoro, segundo as suas características	21
Quadro 5 - Valores limite de exposição e valores limite de ação de acordo com o Decreto-Lei n.º 182/2006	22
Quadro 6 - Número de pessoas expostas a níveis médios de ruído diurno-entardecer-noturno ($L_{den} \geq 55$ dB no grupo (EU-28)).....	23
Quadro 7 - Valores limite de acordo com caracterização zonal de acordo com o Decreto-Lei n.º 9/2007.....	29
Quadro 8 - Hierarquização viária.....	43
Quadro 9 - Classificação de veículos segundo o Código da Estrada	44
Quadro 10 - Síntese das tecnologias intrusivas para recolha de dados de tráfego, vantagens e desvantagens	47
Quadro 11 - Síntese das tecnologias não-intrusivas para recolha de dados de tráfego, vantagens e desvantagens	47
Quadro 12 - Veículos motorizados em circulação por tipo de combustível em Portugal entre os anos de 2010 e 2016	48
Quadro 13 - Veículos motorizados ligeiros em circulação por tipo em Portugal entre os anos de 2010 e 2016	48
Quadro 14 - Veículos motorizados pesados em circulação por tipo em Portugal entre os anos de 2010 e 2016	49
Quadro 15 - Tráfego 2ª circular em 2016	50
Quadro 16 - Tráfego 2ª circular em 2017	50
Quadro 17 - Classes de veículos identificadas no projeto HARMONOISE	57
Quadro 18 - Classes de veículos identificadas no projeto IMAGINE	59
Quadro 19 - Parâmetros de tráfego exigidos pelo modelo	59
Quadro 20 - Comparação entre modelos de ruído	60
Quadro 21 - TMDA por OD total.....	74
Quadro 22 - TMDA de pesados por par OD	75
Quadro 23 - Contabilização do número de veículos por tipologia.....	79
Quadro 24 - Média do número de veículos por minuto.....	79
Quadro 25 - Quadro 15 – Extrapolação de dados para um dia de tráfego.....	80
Quadro 26 - Cluster de correlação entre a velocidade e o som.....	82

Quadro 27 - Resíduos de cada perfil.....	87
Quadro 28 - Dados contabilização tráfego sentido M1 dia 20/05/2016.....	97
Quadro 29 - Dados contabilização tráfego sentido M2 dia 20/05/2016.....	98
Quadro 30 - Evolução do número de veículos de passageiros entre os anos de 2010 e 2016 na União Europeia	99
Quadro 31 - Matriz de correlação SPSS	100
Quadro 32 - Cálculo de velocidades médias no sentido M1 dia 20/05/2016.....	106
Quadro 33 - Cálculo de velocidades no sentido M2 dia 20/05/2016	107

1. Introdução

Neste capítulo é feito o enquadramento do tema e são apresentados os objetivos e a estrutura do trabalho.

1.1 Enquadramento

Atualmente, nas cidades vive-se com uma paisagem sonora muito diversificada e intensa o que torna difícil a vida em sociedade com um ambiente sonoro equilibrado.

O som pode ser definido como qualquer variação de pressão que o ouvido humano deteta e, como qualquer onda mecânica carece de um meio para se propagar, seja gasoso, líquido ou sólido. Quanto mais densa a estrutura molecular do meio, mais facilmente as moléculas transferem energia sonora; em comparação com o ar, o som propaga-se mais rapidamente em meios mais densos, como líquidos e sólidos (Everest & Pohlmann, 2009). Geralmente, o ruído representa qualquer som que se torna incomodativo (APA, 2018).

Com o constante aumento da população e conseqüente urbanização, o ruído tornou-se um dos principais poluentes do meio que nos odeia. A poluição sonora traduz-se no excesso de ruído natural ou alteração anormal das características sonoras: taxa de recorrência, volume, etc. Este excesso de ruído natural é hoje reconhecido como irritante biológico, afetando principalmente o sistema nervoso (Kroft, Hnatík, & Bícová, 2017).

O tráfego rodoviário e o ruído estão inerentemente relacionados. Qualquer veículo movido a motor produz ruído e estima-se que o nível de ruído produzido pelo tráfego rodoviário varia, em média, entre os 55 e os 90 dB (European Environmental Agency, 2014) (Cai, Zhong, Wang, Chen, & Zeng, 2017). Os níveis de ruído proveniente de tráfego rodoviário são influenciados por vários fatores, desde as condições do piso, aos componentes constituintes do veículo ou até mesmo à morfologia da via em que circulam (Gardziejczyk & Motylewicz, 2016).

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Ainda num panorama europeu, de acordo com a última avaliação publicada pela Agência Europeia do Ambiente, em 2017, estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído proveniente de tráfego rodoviário, dos quais 32 milhões estão expostos a níveis muito elevados. A OMS classificou o ruído

proveniente de tráfego rodoviário como o segundo elemento mais prejudicial atrás da poluição atmosférica (OMS, 1999).

Os efeitos principais de exposição a ruído, de carácter ambiental ou ocupacional, prendem-se com alterações no sono, problemas cardiovasculares, hipertensão, dificuldades de concentração, maior risco de obesidade abdominal ou diabetes, para além de poder causar surdez crónica, afetar a saúde mental, o sistema metabólico, e, claro, a qualidade de vida como um todo (European Environmental Agency, 2018).

O constante aumento de utilizadores de *smartphones* (Murphy & King, 2016), aliado à utilização de aplicações de medição de níveis de ruído pode tornar-se numa ferramenta de mapeamento de ruído em ambientes urbanos, fornecendo dados importantes às entidades gestoras, sejam nacionais, municipais ou de natureza legislativa acerca da exposição a este agente.

De acordo com a APA, 2017, em Portugal Continental, cerca de 20% da população está exposta a níveis sonoros no período noturno que induzem perturbações no sono e que 15% está exposta a níveis associados a incomodidade moderada, sendo que o tráfego rodoviário é a principal fonte sonora (APA, 2017).

Assim, pretende-se com o presente Trabalho Final de Mestrado (TFM), inserido no Mestrado em Engenharia da Qualidade e Ambiente do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, abordar a temática do ruído ambiente proveniente de tráfego rodoviário, recorrendo a dados recolhidos em ambos os sentidos de uma das vias mais movimentadas de Lisboa, a segunda circular.

1.2 Objetivos

Pretende-se com o presente Trabalho Final de Mestrado, não só caracterizar a via de tráfego em questão, quantitativa e qualitativamente, em termos de ruído e tráfego rodoviário, mas também adaptar, a partir de um modelo existente, um modelo de nível de ruído cujos *inputs* são o número, o tipo e a velocidade média dos veículos que nela circulam. Os resultados obtidos podem suportar futuras decisões de construção nas proximidades, bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais e outros grandes edifícios presentes.

1.3 Estrutura

O presente trabalho está dividido em 8 capítulos, sendo o presente capítulo a introdução onde é feito o enquadramento do tema e se estabelecem os objetivos.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos considerados relevantes, tais como a descrição do sistema sensorial da audição humana, do som e do ruído. É feito o levantamento da legislação e normalização aplicável e respetivos indicadores relevantes ao tema assim como os efeitos negativos do ruído na saúde humana.

No capítulo 3 é abordado o tráfego rodoviário, quais as entidades nacionais responsáveis pela gestão e manutenção da rede rodoviária em Portugal. Também é apresentada uma breve caracterização do tráfego rodoviário Nacional e na via rodoviária em estudo.

O capítulo 4 introduz a modelação sonora e quais os modelos de ruído existentes e aplicáveis.

No capítulo 5 aborda-se a questão dos equipamentos utilizados para as medições de ruído, assim como a utilização de *smartphones* para este mesmo fim, onde se destaca a descrição da aplicação utilizada para as medições de ruído, *NoiseTube*.

No capítulo 6 descreve-se a via rodoviária em estudo e a metodologia adotada para a recolha e tratamento de dados.

No capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados de acordo com os fatores em avaliação e com os procedimentos realizados.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho e as perspetivas futuras.

No âmbito do presente trabalho foram apresentadas duas comunicações em painel, no Fórum de Engenharia Química e Biológica, realizado no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, entre os dias 8 e 10 de maio de 2018 (Anexo III) e no XXIV Encontro Luso-Galego 2018, de 21 a 23 de novembro de 2018, efetuado na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (Anexo IV).

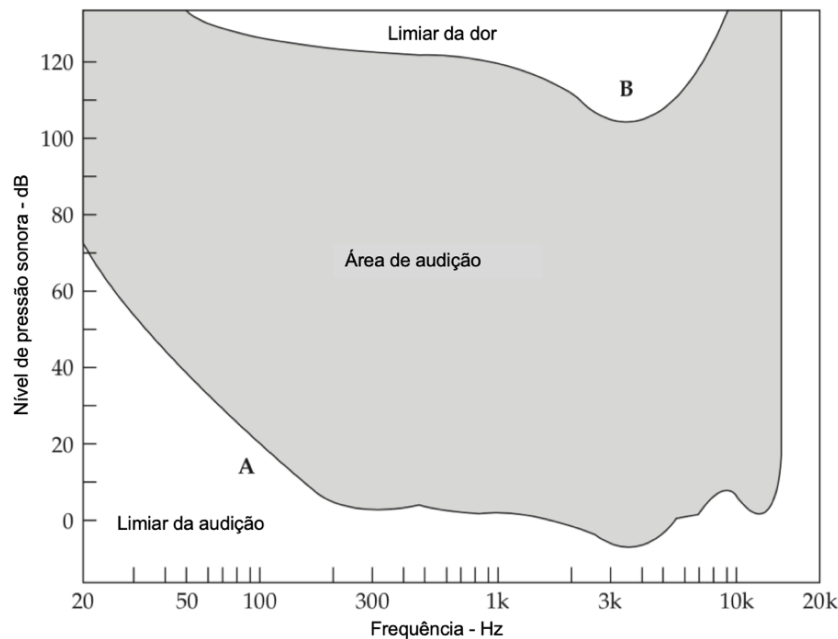
2. Som

Neste capítulo são descritas as propriedades do som e do ruído. São apresentados também os vários efeitos nocivos associados à exposição ao ruído.

2.1 Definição e características físicas do som

O som é a propagação de uma onda longitudinal mecânica através de um meio. As ondas de som são caracterizadas por diversos parâmetros, amplitude, comprimento de onda, frequência e período. No entanto, é mais apropriado descrever as ondas sonoras em termos de flutuações de pressão, especialmente devido ao facto do nosso sistema auditivo ser sensível principalmente a variações de pressão (Hugh & Freedman, 2009).

A medida da pressão sonora numa escala linear é, contudo, impraticável, pois abrange cerca de 1 milhão de unidades. Com efeito, o limiar de audição, para uma frequência de 1 000 Hz, é provocado por uma pressão de 20 μ Pa, enquanto o limiar da dor ocorre a uma pressão de 100 Pa. Além disso, o ouvido Humano não responde linearmente aos estímulos, mas sim logaritmicamente (Kinsler *et al.*, 2000). Assim, o nível de pressão sonora em função da frequência é apresentado na Figura 1, sendo a área de audição do ouvido Humano a marcada a cinzento (Everest & Pohlmann, 2009).



(Adaptado de Everest & Pohlmann, 2009)

Figura 1 - Área de audição Humana - (A) Limiar de audição (B) Limiar da dor

As medidas dos parâmetros acústicos são feitas numa escala logarítmica expressa em decibéis (dB). O decibel é definido como a razão logarítmica entre a pressão sonora medida e o valor de referência (APA, 2018). O valor de referência da pressão sonora de $20 \mu\text{Pa}$ corresponde ao nível sonoro de 0 dB (Everest & Pohlmann, 2009). Para que haja propagação das ondas sonoras, existe a necessidade de transmissão de energia e os fenómenos ondulatórios têm um papel de transmissão de energia – absorção, reflexão, difração e reverberação.

Normalmente, para melhor compreensão sobre a propagação de ondas sonoras no ar (meio gasoso), utiliza-se o exemplo prático do diapasão. Se um diapasão bater contra um objeto ou superfície, este começa a vibrar, mais concretamente as suas duas extremidades. Estas vibrações fazem com que o ar ao redor também vibre e, se o diapasão for colocado num espaço aberto ao centro, as ondas sonoras propagam-se esfericamente. Cada extremidade impulsiona as moléculas de ar vizinhas para longe do diapasão, fazendo com que estas comprimam as moléculas adjacentes, criando uma compressão, ou seja, uma área onde as moléculas são comprimidas juntas (Stevens, 2012). Geralmente é mais apropriado descrever as ondas sonoras em termos de flutuações de pressão, pelo facto de assumirmos que o exemplo prático ocorre a uma pressão atmosférica ambiente de p_{atm} , logo a pressão do ar local em compressões e rarefações é respetivamente maior e menor que p_{atm} . O som é, portanto, uma onda de pressão, um padrão alternado de regiões de pressão mais alta e baixa propagando-se através de um meio. Uma vez que a propagação do som se faz no espaço e no tempo, a representação de uma onda sonora nestes domínios faz-se de acordo com o representado na Figura 2.

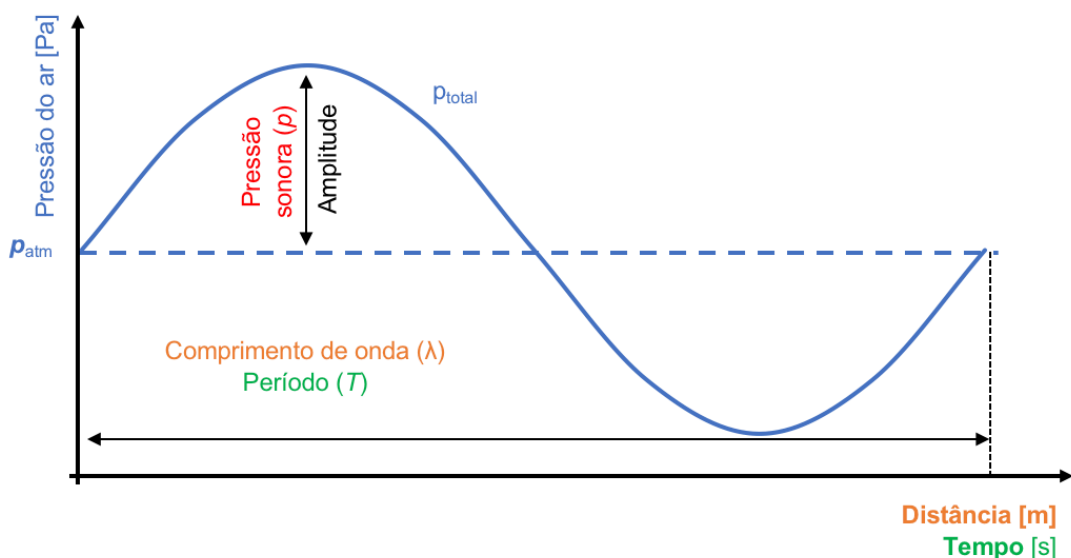


Figura 2 - Propagação de uma onda sonora no ar

No domínio do espaço, se a pressão do ar local (p_{total}) for medida em locais diferentes no mesmo ponto no domínio do tempo e, em seguida, forem representados esses valores em função da distância do diapasão, com o eixo horizontal a representar a distância, o resultado é apresentado na Figura 2. A crista da onda corresponde à compressão e a depressão corresponde à rarefação. Uma vez que o som produzido pelo diapasão se aproxima ao de um chamado som puro ⁽¹⁾, a forma de onda traçada apresenta um padrão sinusoidal.

No domínio do tempo, se a pressão do ar local (p_{total}) for medida em diferentes pontos no tempo em um único espaço físico, e estes valores foram representados em função do seu tempo de medição, obtemos exatamente a mesma forma de onda. Num determinado momento, uma pressão elevada é registada, correspondendo a uma compressão no local e no próximo momento, uma pressão normal (p_{atm}) é medida. De seguida, uma pressão baixa é medida, correspondendo à chegada de uma rarefação no local e novamente uma pressão normal é medida e o ciclo repete-se. A duração de um ciclo completo da onda é denominada por período e representa-se por T. O comprimento de onda, denotado por λ , é a distância que o som percorre durante um período, como definido pela velocidade do som, denotada por c, para o meio transposto (Figura 2). Para ar seco ⁽²⁾ a 20° C a velocidade é cerca de 343 m/s. A velocidade do som em diversos meios materiais é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Velocidade do som em diversos meios materiais

Material	Velocidade do som (m/s)
Gases	
Hélio (20°C)	999
Hidrogénio (20°C)	1330
Líquidos	
Água (0°C)	1402
Água (20°C)	1482
Água (100°C)	1543
Sólidos	
Aço	5941

(Adaptado de Hugh & Freedman, 2009)

¹ Escuta biaural em campo livre e incidência frontal.

² A velocidade do som no ar (c_{ar}) varia de acordo com a temperatura e com a humidade (em menor intensidade).

A frequência, denotada por f , representa o número de ciclos por unidade de tempo, ou seja, o inverso do T . As relações entre esses parâmetros são sintetizadas nas equações 1 e 2.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Eq. 1}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times f \quad \text{Eq. 2}$$

A unidade SI para a frequência é o Hertz⁽³⁾. Os sons puros, que consistem em apenas uma única frequência, são geralmente gerados artificialmente - até mesmo o diapasão não produz um som puro “perfeito”. A maioria dos outros sons ao nosso redor é composta de múltiplas frequências e, portanto, não possui uma forma de onda sinusoidal (Everest & Pohlmann, 2009).

Para uma dada frequência, quanto maior for a amplitude de pressão de uma onda sonora sinusoidal, maior será a intensidade do som, a qual pode ser designada por volume sonoro percebido.

O ouvido não é igualmente sensível a todas as frequências na faixa audível do espectro sonoro. A 1 000 Hz, a faixa mínima de pressão detetável com um ouvido Humano dito normal é de aproximadamente 3×10^{-5} Pa; para produzir o mesmo volume sonoro a 200 ou 15 000 Hz, são necessários cerca de 3×10^{-4} Pa. O volume sonoro percebido também depende do estado saúde do ouvido. É natural que com o decorrer do tempo a sensibilidade do ouvido às altas frequências diminuía (Hugh & Freedman, 2009).

2.2 Fenómenos das ondas sonoras

As ondas sonoras podem sofrer diversos fenómenos como a absorção, a reflexão, a difração e a refração.

A **absorção sonora** consiste na conversão de energia acústica em energia térmica e tem lugar à superfície dos materiais, de onde se destacam os seguintes pontos:

- O espectro do ruído ambiente;
- A densidade e espessura do material absorvente;
- O tipo (absorvente poroso, ressonador) e o modo de fixação do material à parede.

³ $1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$ (ciclos por segundo).

Há dois tipos fundamentais de materiais fonoabsorventes: os materiais porosos e os ressonadores. Nos materiais porosos, a energia sonora é transformada em calor pelo atrito do ar (contido nos poros), vibrando sobre as partículas sólidas. Os materiais ressonadores são constituídos por cavidades ligadas a canais estreitos e a sua ação baseia-se em fenómenos de ressonância que ocorrem a determinadas frequências (Miguel, 2014).

Para efeitos de absorção, tem especial interesse a lei de Sabine, traduzida pela equação 3.

$$T = 0,161 \frac{V}{a} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

T – Tempo de reverberação⁽⁴⁾

V – Volume do recinto, em m³

a – Área de absorção equivalente, em sabin⁽⁵⁾

Para um determinado material, a expressão da área de absorção dada pela equação 4.

$$a = \alpha S \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

α – Coeficiente de absorção sonora do material;

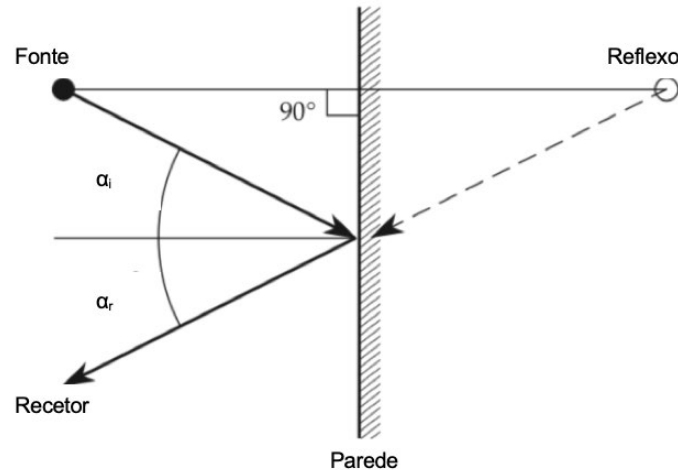
S – Área superficial, em m².

O som segue a mesma regra da luz, o ângulo de incidência (α_i) é igual ao ângulo de reflexão (α_r). A geometria revela que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, como se mostra na Figura 3. Além disso, o som refletido age como se fosse gerado de uma imagem de som virtual. A fonte virtual está acusticamente localizada atrás da superfície refletora. Esta fonte de imagem situa-se à mesma distância atrás da parede, enquanto a fonte real está na frente da parede. Quando o som atinge mais de uma superfície, múltiplos reflexos serão criados. A reflexão do som pode provocar os fenómenos de **reverberação** e eco. Ao absorver uma onda sonora, o efeito subsiste no recetor por aproximadamente 0,1 s, sendo este intervalo conhecido como **persistência acústica**. Se este intervalo de tempo for inferior à persistência acústica, o som ouvido após parecerá apenas um prolongamento do som direto. A este efeito dá-se o nome de **reverberação**. Para intervalos maiores que a persistência acústica ($t > 0,1s$) esta

⁴ O tempo de reverberação é o intervalo de tempo para o qual, num processo de reverberação, a energia volúmica do campo sonoro se reduz a um milionésimo do seu valor inicial. Esta redução de energia corresponde a um abaixamento do nível de pressão sonora de 60 dB.

⁵ 1 sabin equivale a 1 m² de superfície perfeitamente absorvente.

reflexão será ouvida como eco. Quando as ondas sonoras no ar (ondas de pressão) encontram uma superfície dura, não há mudança de fase após a reflexão, ou seja, quando a fase compressiva de uma onda sonora atinge a parede, será refletida como uma compressão e não como uma rarefação (Everest & Pohlmann, 2009).



(Adaptado de Everest & Pohlmann, 2009)

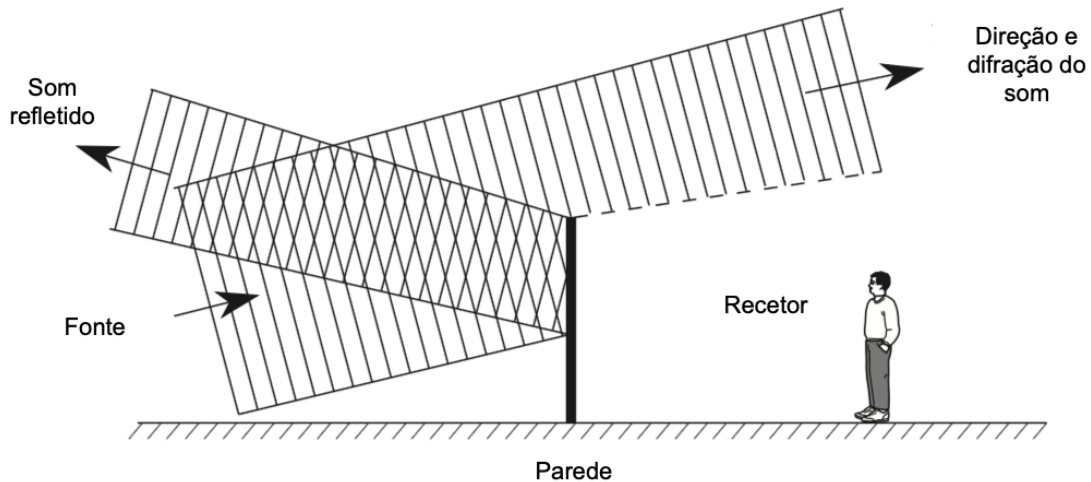
Figura 3 - Reflexão entre fonte e recetor (o reflexo é fruto da imagem virtual)

As frentes de onda propagam-se em linha reta. Os raios sonoros, conceito aplicável em frequências audíveis médias e altas, podem ser considerados como feixes de com que se propagam em linhas retas perpendiculares à frente da onda, exceto quando existem barreiras que podem fazer com que o som mude de direção. Este mecanismo é conhecido por **difração**. Os sons de baixa frequência difratam mais do que os de alta frequência. A eficácia de um obstáculo na difração do som é determinada pelo tamanho acústico do obstáculo. O tamanho acústico é medido em termos do comprimento de onda do som. Um obstáculo é acusticamente pequeno se os comprimentos de onda forem longos, mas o mesmo objeto é acusticamente grande se os comprimentos de onda forem curtos.

Se um obstáculo for acusticamente pequeno em relação ao comprimento de onda, o som será facilmente difratado. Quando as dimensões de um obstáculo são menores ou iguais ao comprimento de onda, praticamente todo o som será difratado. Por outro lado, se um obstáculo for grande em relação ao comprimento de onda, algum som tenderá a ser refletido. É possível concluir que as obstruções agem como refletores dependentes da frequência (Everest & Pohlmann, 2009).

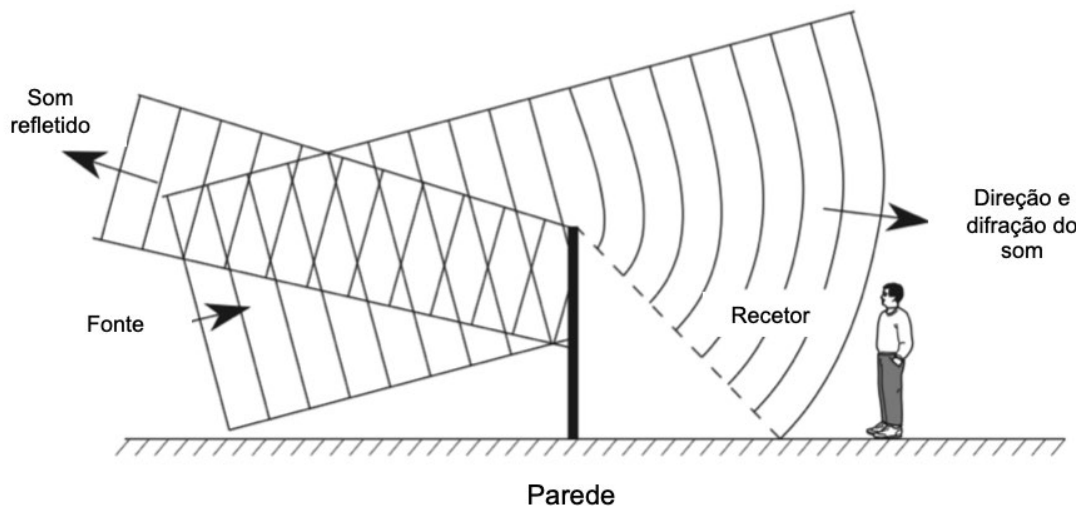
As barreiras sonoras são uma visão comum ao longo de estradas movimentadas, e um exemplo de um obstáculo projetado para isolar os ouvintes (por exemplo, em edifícios) contra os sons de tráfego. O espaçamento das frentes de onda do som indica uma

frequência relativamente maior ou menor da fonte (tráfego). Em frequências mais altas (Figura 4), a barreira torna-se efetivamente grande e protege com sucesso um recetor do outro lado. Mesmo que não haja isolamento completo, pelo menos o ruído do tráfego de frequência mais alta será atenuado. Em frequências mais baixas (Figura 5), a barreira torna-se acusticamente inferior. Baixas frequências difratam sobre a barreira e são audíveis para o recetor. Por causa da mudança na resposta de frequência do ruído, o recetor ouve o ruído de tráfego.



(Adaptado de Everest & Pohlmann, 2009)

Figura 4 - Atenuação dos sons de frequência alta pela barreira no lado oposto devido à difração reduzida



(Adaptado de Everest & Pohlmann, 2009)

Figura 5 - Difração proeminente dos sons de baixa frequência pela barreira

A diferença entre absorção e reflexão do som é óbvia, mas às vezes há confusão entre refração e difração. A **refração** é a mudança na direção do deslocamento do som devido às diferenças na velocidade de propagação. A difração é a mudança na direção do

deslocamento do som quando ele encontra margens afiadas e obstruções físicas. É claro que, em situações práticas, é totalmente possível que ambos os efeitos afetem simultaneamente o mesmo som.

Em meios sólidos, o conceito de raio de som é útil para considerar a direção de propagação. Os raios de som são sempre perpendiculares às frentes de onda sonoras. Na Figura 6 são representados dois raios sonoros passando de um meio sólido denso para um menos denso. A velocidade do som no meio mais denso é maior que a do menos denso. No fundo, em qualquer meio homogêneo, o som viaja retilineamente. Se um meio de outra densidade for encontrado, o som é refratado.

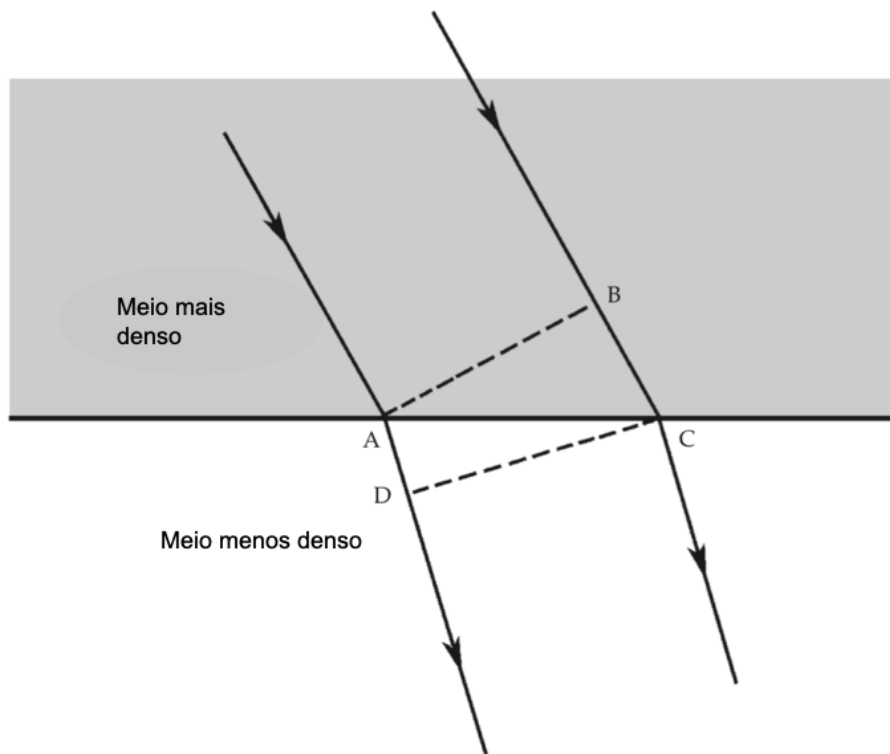


Figura 6 - Refração dos raios de som provenientes um meio mais denso para um meio menos denso

(Adaptado de Everest & Pohlmann, 2009)

A atmosfera da Terra é tudo menos um meio estável e uniforme para a propagação do som. Na ausência de gradientes térmicos, um raio de som pode ser propagado retilineamente. No entanto, o ar não apresenta um gradiente térmico linear. O som propaga-se mais rapidamente no ar quente do que no ar frio, fazendo com que os topos das frentes de onda sejam mais rápidos do que as partes inferiores (Everest & Pohlmann, 2009).

2.3 Nível sonoro

2.3.1 Nível de Pressão Sonora

A **Pressão Sonora** não é mais do que a intensidade das vibrações sonoras ou das variações de pressão e é expressa em Newton por metro quadrado ($N.m^2$) ou pascal (Pa), representando-se pela equação 5.

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

p – Valor eficaz da Pressão Sonora, em pascal;

p_0 – Valor eficaz da pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

De forma análoga pode-se exprimir o Nível de Potência sonora, L_w , em decibéis, pela equação 6 (Miguel, 2014).

$$L_w = 10 \log \frac{W^2}{W_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{Eq. 6}$$

Por vezes, utiliza-se o nível de Intensidade Sonora, L_I , igualmente expresso em decibéis, expresso pela equação 7 (Miguel, 2014).

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

I – Valor eficaz da intensidade sonora, em $W.m^{-2}$;

I_0 – Valor eficaz intensidade sonora de referência (10^{-12} $W.m^{-2}$).

2.3.2 Relação entre os Níveis de Pressão, Potência e Intensidade Sonora

A intensidade do som (potência por unidade de área) é um parâmetro difícil de medir. Em campo livre, sem ondas sonoras refletidas e longe de outras fontes de som, a Intensidade do som está relacionada com a Pressão acústica quadrada média da raiz como se apresenta na equação 8 (Miguel, 2014). A pressão sonora é facilmente medida, por exemplo, com o uso de microfones comuns. Como a intensidade do som é proporcional ao quadrado da pressão sonora, a lei do inverso do quadrado (para intensidade do som) torna-se a lei da distância inversa (para pressão sonora) (Everest & Pohlmann, 2009).

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

I e p , respetivamente, os valores eficazes da intensidade e pressão sonoras;

ρ – Massa específica do ar (em kg.m^{-3});

c – Velocidade de propagação da onda sonora no meio (ar) (em m.s^{-1});

ρc – Impedância acústica do meio (em $\text{kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

Substituindo a equação 8 na equação 7 (L_I) obtém-se a equação 9.

$$L_I = 10 \log\left(\frac{p^2}{\rho c I_0}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

Em condições atmosféricas padrão, $\rho c = 406 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Deste modo, a equação 9 reduz-se à equação 10, tendo em conta que $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

$$L_I = L_p \quad \text{Eq. 10}$$

Para efeitos práticos, os Níveis de Pressão e Intensidade Sonora são iguais (Miguel, 2014).

2.3.3 Adição de níveis sonoros

Os Níveis de Potência Sonora de n fontes de ruído, podem ser representados por L_{W_1} , L_{W_2}, \dots, L_{W_n} então o nível sonoro total é dado pela equação 11.

$$\begin{aligned} L_W &= 10 \log\left(10^{\frac{L_{W_1}}{10}} + 10^{\frac{L_{W_2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{W_n}}{10}}\right) = \\ &= 10 \log\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{W_i}}{10}}\right) \end{aligned} \quad \text{Eq. 11}$$

Se os níveis sonoros das diferentes fontes foram iguais $L_{W_1} = L_{W_2} = \dots = L_{W_n}$, obtém-se a equação 12.

$$L_W = L_{W_1} + 10 \log n \quad \text{Eq. 12}$$

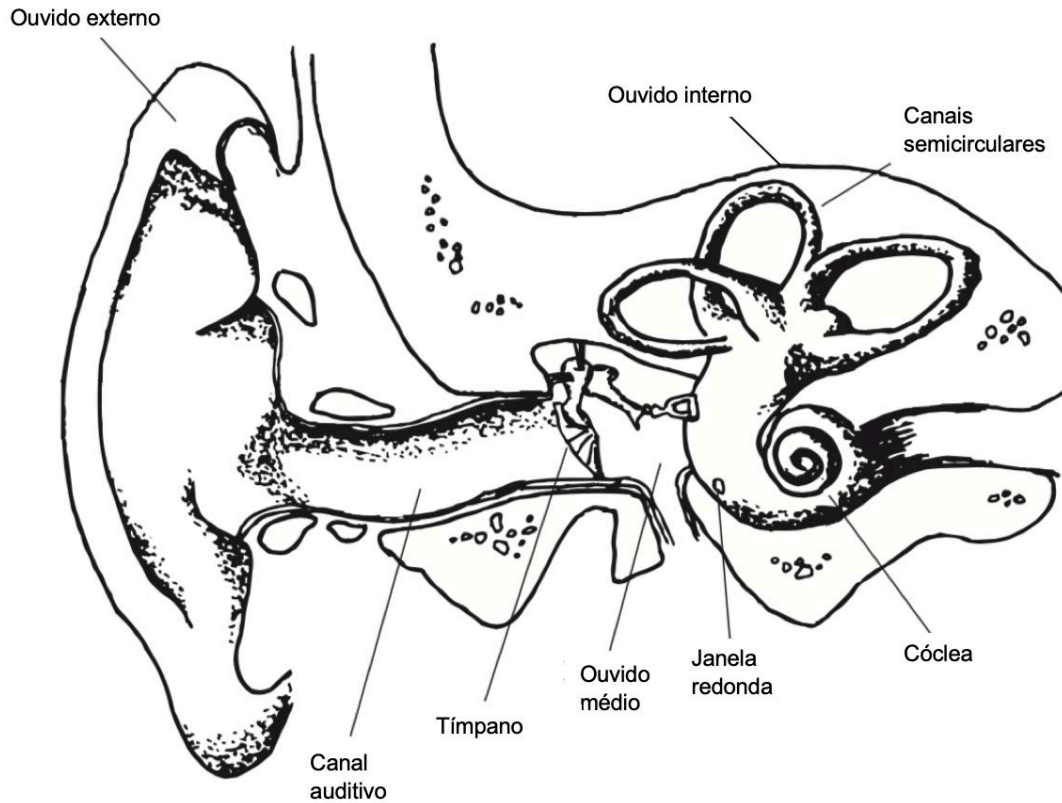
Os níveis de pressão sonora, pressões sonoras efetivas correspondentes e exemplos de fontes de som e efeitos na audição Humana são apresentados no Quadro 2 (Stevens, 2012).

Quadro 2 - Níveis de pressão sonora com pressões sonoras efetivas correspondentes, exemplos práticos e efeitos auditivos

Nível de Pressão Sonora (L_p) (dB)	Valor Eficaz da Pressão Sonora (p_{eff}) (Pa)	Exemplos (Fontes de som ou lugares)		Efeitos na audição
140	200	Tiro a curta distância	Jato <50 m (Descolagem)	≥ 140 dB: Danos auditivos imediatos
130	≈ 63.2	Alarme a 1 m	Buzina a 1 m	≈ 125 dB: Limiar da dor (Pode variar)
120	20			
110	≈ 6.32	Gritar no ouvido	Discoteca; Concerto de música amplificado	≥ 120 dB: Possíveis danos auditivos (Exposição a curto prazo)
100	2	Helicóptero 30 m	Sala de máquinas de indústria	
90	≈ 0,632	Camião a 10 m	Tráfego em uma rua movimentada a 10 m	≥ 85 dB: Possíveis danos auditivos (Exposição a longo prazo)
80	0,2	Martelo pneumático a 15 m		
70	≈ 6.32×10^{-2}	Aspirador a 1 m		Veículo ligeiro de passageiros a 10 m
60	2×10^{-2}	Televisão a 1 m		
50	≈ 6.32×10^{-3}	Lava-louças a 1 m	Discurso de conversação a 1 m	Chuva moderada; Lar tranquilo
40	2×10^{-3}	Biblioteca		
30	≈ 6.32×10^{-4}	Zona rural tranquila		Quarto muito calmo; sussurro a <5 m
20	2×10^{-4}	Sala insonorizada (Ex: Estúdio de música)		
10	≈ 6.32×10^{-5}	Folhas a farfalhar à distância; respiração calma		Pouco audível
0	2×10^{-5}			Limiar auditivo a 1 kHz

2.4 Descrição e funcionamento do aparelho auditivo humano

O ouvido é o órgão responsável pela audição do ser humano, sendo dividido em três partes: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno, conforme a Figura 7.



Adaptado de (Everest & Pohlmann, 2009)

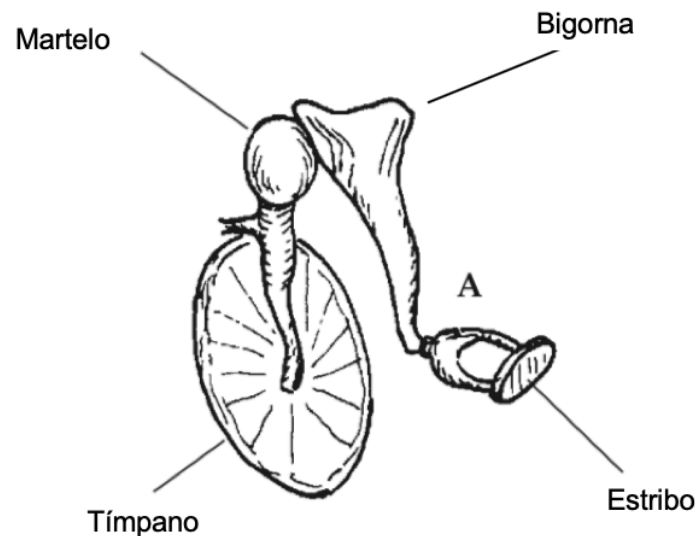
Figura 7 - Representação ilustrativa do aparelho auditivo humano

O ouvido externo é constituído pelo pavilhão auditivo, canal auditivo e tímpano. Os ouvidos externo e médio estão associados à receção dos sons e transformação de energia acústica em energia mecânica. O ouvido interno transforma esta energia numa série de impulsos nervosos que vão representar os fenómenos acústicos.

O pavilhão auditivo tem a função de recolher o som e direccioná-lo para o canal auditivo. É formado por uma cartilagem elástica recoberta pela pele e é fixado na sua posição por ligamentos e músculos e pela continuidade com a cartilagem do canal auditivo (Miguel, 2014). A pressão sonora captada e enviada para o canal auditivo poderá não condizer à pressão sonora do campo no qual está incluído a amplitude de percepção do ser humano, devendo-se este fato, sobretudo, aos ombros e à cabeça, que tal como qualquer corpo de dimensões consideráveis, afetam o campo sonoro. A influência dos ombros e da cabeça deve-se aos efeitos de sombreamento e de reflexão, sendo notáveis para frequências abaixo de 1 500 Hz (Mateus, Mec, & Gameiro, 2014).

O canal auditivo é constituído no seu terço externo pela continuação da cartilagem do pavilhão auricular, que corresponde fisicamente a um tubo cujo comprimento é igual a um quarto de onda para frequências próximas de 4 000Hz. Em consequência desta ressonância resulta um acréscimo de 10 dB no nível de pressão sonora na membrana do tímpano. Nos restantes dois terços é constituído pelas porções timpânica e escamosa do osso temporal. Este conjunto impede que partículas estranhas, que entrem pelo canal, possam chegar à parte mais profunda, onde se poderiam acumular e chegar mesmo a danificar o tímpano (Mateus *et al.*, 2014).

No final do canal auditivo, e funcionando como elemento de fronteira entre os ouvidos externo e o médio (Figura 8), situa-se a membrana do tímpano. Do lado externo, o tímpano encontra-se exposto, através do canal auditivo, à pressão atmosférica; do lado interno, o tímpano encontra-se igualmente exposto à mesma pressão.



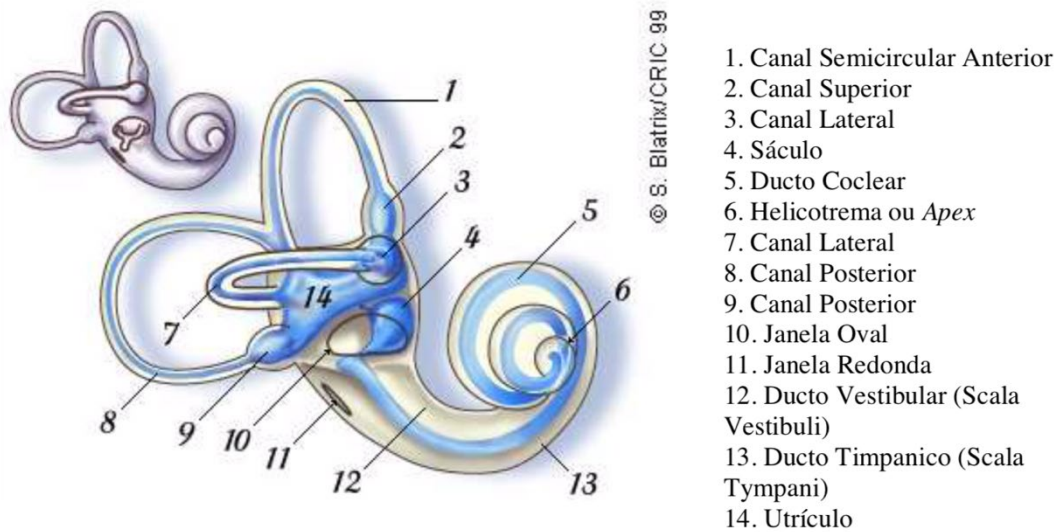
Adaptado de (Everest & Pohlmann, 2009)

Figura 8 - Desenho exemplificativo do sistema ossicular do ouvido humano

Dentro do ouvido médio, as vibrações são transmitidas através de um sistema ossicular constituído por três pequenos ossos o martelo, a bigorna e o estribo, até à cóclea (já inserida no ouvido interno). Da diferença de tamanhos entre os braços das alavancas compostas pelo martelo e a bigorna, que agem como alavancas fixas, resulta uma razão de alavanca entre 1,3 a 2 vezes, o que permite amplificar a força aplicada no tímpano e por sua vez transmitida ao estribo (Mateus *et al.*, 2014).

O ouvido interno é um sistema complexo de canais dividido em dois sistemas: a cóclea, que é um órgão de audição, e os órgãos de equilíbrio, de entre os quais se destacam os canais semicirculares. A cóclea é composta por três canais paralelos que vão desde

a base, onde se situa a janela oval e a janela redonda, até ao helicotrema, conforme a Figura 9.



(Adaptado de Pereira, 2009)

Figura 9 - Estrutura do ouvido interno

A excitação proveniente das vibrações transmitidas dá origem a uma onda de deslocamento na membrana basilar que se desloca desde a base até ao ápice. Os deslocamentos da membrana relacionam-se com a frequência de excitação. Por exemplo, os sons de alta frequência, agudos, produzem os maiores deslocamentos junto à sua base, observando-se menores deslocamentos na restante membrana e atingem o máximo de vibração na base da cóclea. Ao contrário, os sons de baixa frequência, graves, produzem os maiores deslocamentos nas zonas mais afastadas da base, ou seja, nas regiões próximas do ápice, atingem o seu máximo no topo da cóclea.

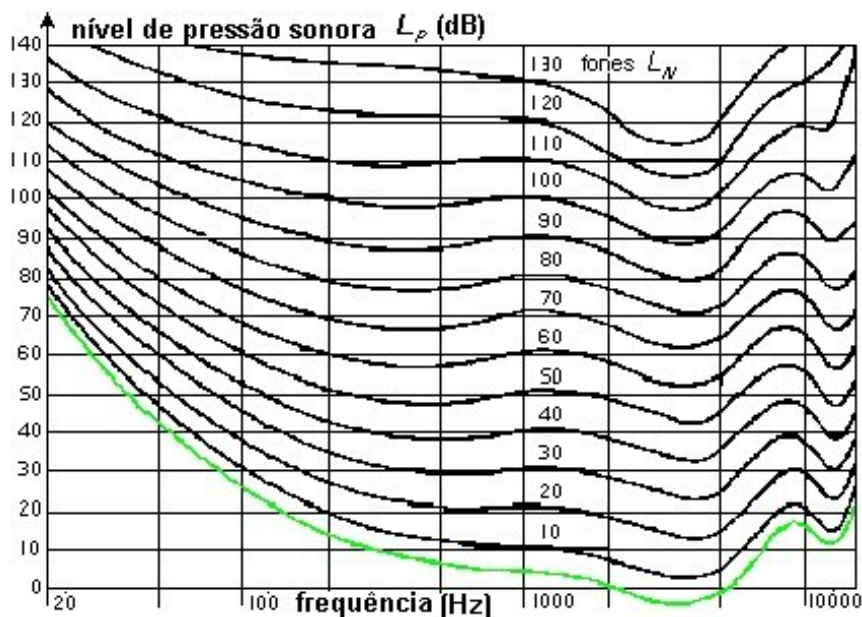
O influxo nervoso é posteriormente levado pelo nervo coclear até ao córtex cerebral, onde se torna consciente. As vibrações propagam-se, então, à membrana basilar, produzindo esforços transversais. Estes esforços culminam na transmissão nervosa ao cérebro através de potenciais de ação (Miguel, 2014).

2.5 Audição

Em virtude da estrutura do aparelho auditivo Humano e das características do sistema nervoso relacionadas com a audição, os Humanos reagem de modo diverso aos sons de diferentes frequências, não obstante de um mesmo nível de pressão sonora (Miguel, 2014).

O nível de audição é medido em fones (F) e corresponde, por definição, ao nível de pressão sonora de um som com uma frequência de 1000 Hz. A unidade de intensidade audível é o sone (S), definido como a intensidade audível de um estímulo sonoro com a frequência de 1000 Hz e um nível de pressão 40 dB. Assim, uma alteração de 10 F em um nível de intensidade audível corresponde a duplicar ou a reduzir a metade a intensidade audível.

As linhas isofónicas, representadas na Figura 10, ou de igual nível de audição, foram determinadas a partir do estudo estatístico das variações na sensação sonora experimentada por um elevado número de indivíduos jovens saudáveis com audição normal, conforme indicado na norma ISO 226: 1987. Cada curva da Figura 10 pode expressar-se em fones (dBwave.i – ISQ, 2018).

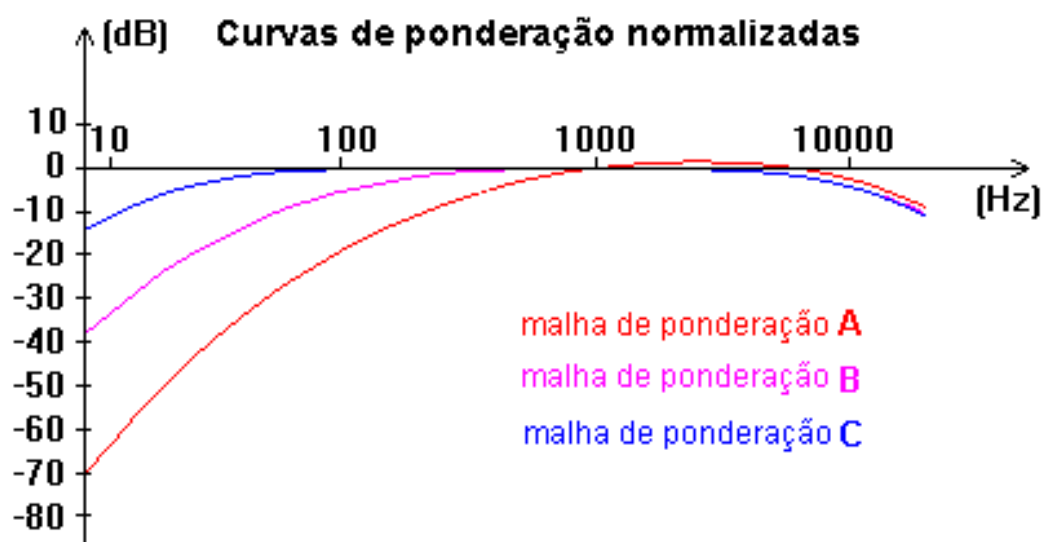


(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 10 - Representação das linhas isofónicas normais para sons puros

Na prática, para que um aparelho de medição do ruído simule o comportamento de um ouvido Humano é necessário introduzir-lhe um filtro. Existem vários tipos de filtros normalizados que correspondem, de uma forma não linear, às diferentes frequências, designando-se geralmente por filtros de ponderação (ou malhas de ponderação)

(dBwave.i – ISQ, 2018). Inicialmente foram desenvolvidos três filtros de frequência, A, B e C (Figura 10) que correspondem aproximadamente ao inverso das linhas isofónicas de 40, 70 e 100 F. Hoje em dia são mais utilizados os filtros de ponderação A e C que são aceites pelas normas internacionais (Miguel, 2014). Os valores das medições feitas através da malha A são seguidos pela designação decibel A, dB (A). As curvas de ponderação para os três filtros são apresentadas na Figura 11.



(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 11 - Malhas de ponderação de frequência

Na prática utiliza-se muito a malha de ponderação A na maioria das avaliações acústicas. De facto, como esta simula a reação do ouvido Humano em função da frequência é a mais apropriada para avaliar a resposta subjetiva do ouvido em relação a vários tipos de fontes sonoras. Os valores de correção para a ponderação A nas frequências normalizadas são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Correção para a ponderação A nas frequências normalizadas

Banda de oitava	63			125			250		
Banda de terço de oitava	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Malha de ponderação A	-30,2	-26,2	-22,5	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6
Banda de oitava	500			1000			2000		
Banda de terço de oitava	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Malha de ponderação A	-4,8	-3,2	-1,9	-0,8	0	0,6	1	1,2	1,3
Banda de oitava	4000			8000					
Banda de terço de oitava	3150	4000	5000	6300	8000	10000			
Malha de ponderação A	1,2	1	0,5	-0,1	-1,1	-2,5			

(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

3. Ruído

Neste capítulo é feito o enquadramento do ruído na sociedade moderna. São abordados os temas de ruído ocupacional e ruído ambiente e legislação aplicável. São descritos também os vários efeitos do ruído na saúde.

O ruído, genericamente, pode ser definido como o nível sonoro indesejado ou desagradável. Pode ser interpretado sem ter em conta as suas propriedades físicas, isto é, consoante o recetor, o nível de som pode ser, classificado como um som indesejado para um recetor e ser ao mesmo tempo, considerado um nível de som aceitável para outro. Hoje em dia o ruído deixa de ter apenas um papel incomodativo e é classificado como poluente ambiental, conhecido por ter consequências negativas na saúde humana. É uma das principais causas da deterioração da qualidade do ambiente urbano e os transportes são os principais responsáveis, embora o ruído de atividades industriais e comerciais possa manifestar relativa influência em situações pontuais (APA, 2018).

A definição de ruído é, portanto, ambígua. Segundo as definições existentes em dois dicionários ingleses, o ruído pode ser definido como: um som, especialmente um som alto e desagradável (*a sound, especially a loud, unpleasant sound*) (Cambridge dictionary, 2018). Um som, especialmente um alto ou desagradável ou que cause perturbação (*a sound, especially one that is loud or unpleasant or that causes disturbance*) (Oxford dictionary, 2018).

Um ruído pode ser descrito pelo seu espectro de frequências, pelas variações de nível com o tempo e pelas características do campo sonoro.

Segundo a dependência do tempo, o ruído pode classificar-se em estacionário (com flutuações de nível mínimas durante o período de observação) e não estacionário (com um nível variando significativamente durante o período de observação). O ruído é estacionário quando a diferença entre os valores máximo e mínimo de L_A , medidos com utilização da característica de resposta lenta ⁽⁶⁾ de ponderação, for inferior a 5 dB (A), durante o período de observação.

O ruído não estacionário pode ser subdividido em três tipos: flutuante, intermitente e impulsivo. A condição máxima de ruído impulsivo verifica-se quando a diferença entre o pico do nível de pressão sonora (valor máximo da pressão sonora, expresso em dB),

⁶Constante de tempo utilizada nos sonómetros - *slow* (resposta lenta), com elevado amortecimento e um tempo de integração de, aproximadamente, 1 s.

L_{PICO} , e o nível sonoro contínuo equivalente ⁽⁷⁾, $L_{A\ eq, T}$, ponderado A medidos num intervalo de tempo representativo de duração superior a 5 min, é igual ou superior a 20 dB (Miguel, 2014).

As características do campo sonoro permitem a classificação apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação do campo sonoro, segundo as suas características

Campo livre	Campo sonoro numa área afastada de superfícies refletoras.
Campo reverberante	Porção do campo sonoro num recinto de ensaio em que a influência do som emitido diretamente pela fonte é desprezável.
Campo semirreverberante	Campo sonoro que prevalece num recinto amplo com superfícies moderadamente refletoras.
Campo divergente hemisfericamente	Campo sonoro de uma fonte omnidirecional que está situada próximo de uma superfície refletora rígida (geralmente, o solo), mas livre de outras obstruções.

(Adaptado de Miguel, 2014)

3.1 Ruído ocupacional

O ruído ocupacional é o nível de som que constitui uma causa de incómodo para o trabalho. É também responsável por efeitos negativos na saúde humana no caso de exposição prolongada e constitui um obstáculo às comunicações verbais e sonoras (Miguel, 2014).

O Decreto-Lei n.º 182/2006, de 6 de setembro, transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2003/10/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 6 de fevereiro, relativa às prescrições mínimas de segurança e saúde em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos derivados ao ruído. Este Decreto, conforme disposto no n.º 2 do art.º 1º é aplicável a todas as atividades dos sectores privado, cooperativo e social da administração pública, central, regional e local, dos institutos públicos e das demais pessoas coletivas de direito público, bem como a trabalhadores por conta própria. O Decreto-Lei encontra-se em vigor desde o dia 6 de outubro de 2006, excetuando-se os trabalhadores que prestam serviço a bordo em alto mar e as atividades de música e entretenimento, entrando em vigor, para estes casos, somente em 15 de fevereiro de 2011 e 15 de fevereiro de 2008, respetivamente.

⁷ $L_{A\ eq}$ ou $L_{Req, T}$ – nível de avaliação ou nível sonoro contínuo equivalente corrigido de acordo com as características tonais ou impulsivas do ruído particular.

A anterior legislação sobre esta matéria (Decreto-lei n.º 72/92 e o Decreto Regulamentar n.º 9/92, ambos de 28 de abril) encontra-se totalmente revogada.

Os princípios gerais da avaliação de riscos a que estão sujeitas as atividades suscetíveis de apresentar riscos de exposição ao ruído, estão consagrados no art.º 4.º do Decreto-Lei. A avaliação feita com base na medição do ruído deverá ser realizada de acordo com o disposto nos Anexos I e II do Decreto-Lei.

O art.º 4.º, n.º 8, vem determinar que a medição do nível de ruído tem sempre que ser realizada por entidades acreditadas pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) ou por Técnicos Superiores de Segurança e Saúde no Trabalho ou Técnicos de Segurança e Saúde, com CAP e formação específica em matéria de métodos e instrumentos de medição do ruído no trabalho.

Referem-se os valores limite de exposição e valores limite de ação a considerar, conforme o Quadro 5 (art.º 3.º ponto 1).

Quadro 5 - Valores limite de exposição e valores limite de ação de acordo com o Decreto-Lei n.º 182/2006

Valores em causa	L _{Ex,8h} dB (A)	L _{pico} dB (C)
Valor limite de exposição	87	140
Valor de ação superior	85	137
Valor de ação inferior	80	135

3.2 Ruído ambiente

Para efeitos de exposição de ruído incluídos no presente estudo, o ruído a que qualquer pessoa ou entidade possa estar exposta segundo a sua fonte, neste caso, ruído proveniente de tráfego rodoviário, é classificado, segundo a DIRETIVA 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002, como “Ruído ambiente - um som externo indesejado ou prejudicial, criado por atividades humanas, incluindo o ruído emitido por meios de transporte, tráfego rodoviário, ferroviário, aéreo e instalações utilizadas na atividade industrial (...)”.

O ruído ambiente, ao contrário do ruído ocupacional, refere-se à salvaguarda da saúde humana e ao bem-estar das populações, enquanto recetoras de ruído emitido por fontes suscetíveis de causar incomodidade, tais como obras de construção civil; estabelecimentos industriais; equipamentos para utilização no exterior; infraestruturas de transporte, veículos e tráfego; atividades temporárias (espetáculos, feiras, entre outras), sistemas sonoros de alarmes e ruído de vizinhança.

Atualmente, o ruído é dos principais causadores de degradação da qualidade do ambiente urbano, principalmente devido ao elevado número de transportes existentes, também devem referir-se as atividades industrial e comercial, que por vezes podem assumir maior importância neste campo e que tornam os centros urbanos, zonas em que o ruído ambiente assume um papel considerável na má qualidade de vida das sociedades. As diferentes propriedades físicas que o ruído possui são possíveis de quantificar, no entanto, existem aspetos subjetivos cuja avaliação é muito difícil realizar. Por exemplo, o grau de incomodidade que resulta da exposição ao ruído é quase impossível de quantificar, isto porque a perceção do ruído depende das pessoas, dos momentos e dos locais e por isso é difícil determinar objetivamente a incomodidade (Stevens, 2012). Na Europa o número de pessoas expostas a níveis médios de ruído no período diurno-entardecer-noturno é apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Número de pessoas expostas a níveis médios de ruído diurno-entardecer-noturno ($L_{den} \geq 55$ dB no grupo (EU-28))

Fonte ruído	$L_{den} \geq 55$ dB	$L_n \geq 50$ dB	Aglomeração
Estradas	71 663 000	51 866 500	Áreas urbanas
Ferrovias	9 846 100	7 607 400	Áreas urbanas
Aeroportos	3 093 000	1 108 400	Áreas urbanas
Indústria	964 200	455 400	Áreas urbanas
Estradas principais	32 069 700	21 025 900	Fora de áreas urbanas
Ferrovias principais	8 597 800	7 129 700	Fora de áreas urbanas
Aeroportos principais	1 042 200	263 800	Fora de áreas urbanas

(Adaptado de European Environmental Agency, 2018)

3.2.1 Ruído proveniente de tráfego rodoviário

A principal fonte de poluição sonora dentro e fora das áreas urbanas é o tráfego rodoviário. O ruído proveniente de ferrovias e aeronaves tem um impacto muito menor em termos de exposição global ao ruído da população, mas ambos continuam sendo fontes importantes de poluição sonora localizada (European Environmental Agency, 2018).

O ruído proveniente de tráfego rodoviário é causado pela combinação de ruído de rolamento e ruído de propulsão. O ruído de rolamento é a interação entre o pneu do veículo e o asfalto. Estima-se que acima de uma velocidade de 40 km/h para a maioria dos carros, e acima de 70 km/h para camiões o ruído de rolamento constitui a principal

fonte de ruído do tráfego rodoviário. Abaixo dessas velocidades, a principal fonte de ruído do tráfego rodoviário é o ruído de propulsão, que inclui o próprio motor, os sistemas de exaustão, de admissão e de transmissão. Os veículos que mais contribuem para o ruído proveniente de tráfego rodoviário são os automóveis de passageiros e os camiões (European Environmental Agency, 2014).

Estima-se que cerca de 108 milhões de pessoas nos países membros do EEE-33 estão expostas a níveis de ruído L_{den} (exposição média anual ao indicador de ruído diurno, entardecer e noturno) do tráfego rodoviário que são iguais ou superiores a 55 dB. Destes, 34 milhões estão expostos a níveis muito elevados de ruído de pelo menos 65 dB L_{den} .

A fonte dominante de ruído durante a noite é também o tráfego rodoviário. A exposição ao ruído noturno causada pelo tráfego rodoviário afeta mais de 75 milhões de pessoas nos países membros do EEE-33.

3.3 Legislação aplicável

A prevenção do ruído e o controlo da poluição sonora têm como objetivo a ressalva da saúde humana e o bem-estar das populações. Desde 1987 que esta matéria se encontra regulada no ordenamento jurídico português, através da Lei n.º 11/87, de 11 de abril (Lei de Bases do Ambiente), e do decreto-Lei n.º 251/87, de 24 de junho, que aprovou o primeiro regulamento geral sobre o ruído. Este Decreto-Lei já foi revogado pelos Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de novembro, que aprovou o Regime Legal da Poluição Sonora (RLPS), alterado pelos Decreto-Lei n.º 76/2002, de 26 de março, pelo Decreto-Lei n.º 259/2002, de 23 de novembro e pelo Decreto-Lei n.º 293/2003, de 19 de novembro.

Em 17 de Janeiro de 2007 foi publicado o novo **Regulamento Geral do Ruído (RGR)**, Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro, tendo entrado em vigor no dia 1 de fevereiro de 2007, tendo sido retificado pela Declaração de Retificação n.º 18/2007, de 16 de março e alterado pelo Decreto-lei no 278/2007, de 1 de agosto.

A transição entre os diplomas legais, Decreto-Lei n.º 292/200 e o Decreto-Lei n.º 9/2007, deve-se à alteração legislativa face à adaptação e à transposição da Diretiva Comunitária 2002/49/CE transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de julho, retificado pela Retificação n.º 57/2006, de 31 de agosto, tendo como objetivo a sintonização entre a legislação nacional e os indicadores de Ruído Ambiente. Estabelece a obrigação, a nível comunitário, de recolha de dados acústicos,

elaboração de relatórios sobre o ambiente acústico e de planos de ação, de forma a estabelecer a base para a definição da futura política comunitária neste domínio.

O referido diploma é aplicável ao ruído ambiente a que os seres humanos se encontram expostos em zonas que incluam usos habitacionais, escolares, hospitalares ou similares, espaços de lazer, em zonas tranquilas de uma aglomeração, em zonas tranquilas em campo aberto e noutras zonas cujo uso seja sensível ao ruído e que seja produzido nas Aglomerações ou por Grandes Infraestruturas de Transporte (GIT). Este diploma encontra-se estruturado em três pilares fundamentais:

- Elaboração de mapas estratégicos de ruído e planos de ação;
- Informação e participação do público;
- Informação à Comissão Europeia.

Relativamente aos Mapas Estratégicos de Ruído e Planos de Ação, o RGR incide sobre as GIT - aéreo, ferroviário e rodoviário - e as aglomerações que apresentam, do ponto de vista populacional, maior dimensão. Função da dimensão das GIT e das Aglomerações, a elaboração dos respetivos mapas estratégicos de ruído e os consequentes planos de ação serão realizados de forma faseada.

O RGR prevê a informação e participação do público pela disponibilização da informação acústica explicitada em mapas estratégicos de ruído e pelo seu envolvimento na conceção e elaboração dos planos de ação.

A informação à Comissão Europeia sobre os Mapas Estratégicos de Ruído e Planos de Ação, de forma a contribuir para uma base de informação que sustente uma futura política comunitária neste domínio e garantir uma ampla informação ao público, está cometida à Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Possui um âmbito menos alargado do que o do RGR, abrangendo apenas:

- As Grandes Infraestruturas de Transporte:
 - Aéreo: aeroporto com + de 50 000 movimentos/ano;
 - Ferroviário: troços com + de 30 000 passagens/ano e;
 - Rodoviário: troços com + de 3 milhões passagens/ano.
- As Aglomerações de maior expressão populacional:
 - População residente > 100 000 habitantes
 - Densidade populacional $\geq 2\,500$ habitantes/Km²

Tendo em conta o seu âmbito, prevê, em duas fases de cumprimento, a obrigatoriedade de elaboração de mapas estratégicos de ruído (em 2007 e 2012) e de planos de ação

(2008 e 2013), a implementação de métodos de avaliação harmonizados e a obrigação de divulgação e participação do público na informação sobre ruído ambiente.

As GIT em Portugal são apresentadas na Figura 12.



(Adaptado de APA, 2017)

Figura 12 - Mapa das GIT rodoviárias abrangidas pelo decreto-Lei n.º 146/2006

Os mapas de ruído da cidade de Lisboa para os períodos Diurno-Entardecer-Noturno, que compreende os níveis sonoros resultantes da contribuição do tráfego rodoviário, para todos os períodos do dia, representado pelo indicador L_{den} , e para o período noturno, os níveis sonoros resultantes da contribuição do tráfego rodoviário, para o período entre as 23H00 e as 07H00, representado pelo indicador L_n , são apresentados nas Figuras 13 e 14, respetivamente (APA, 2018).

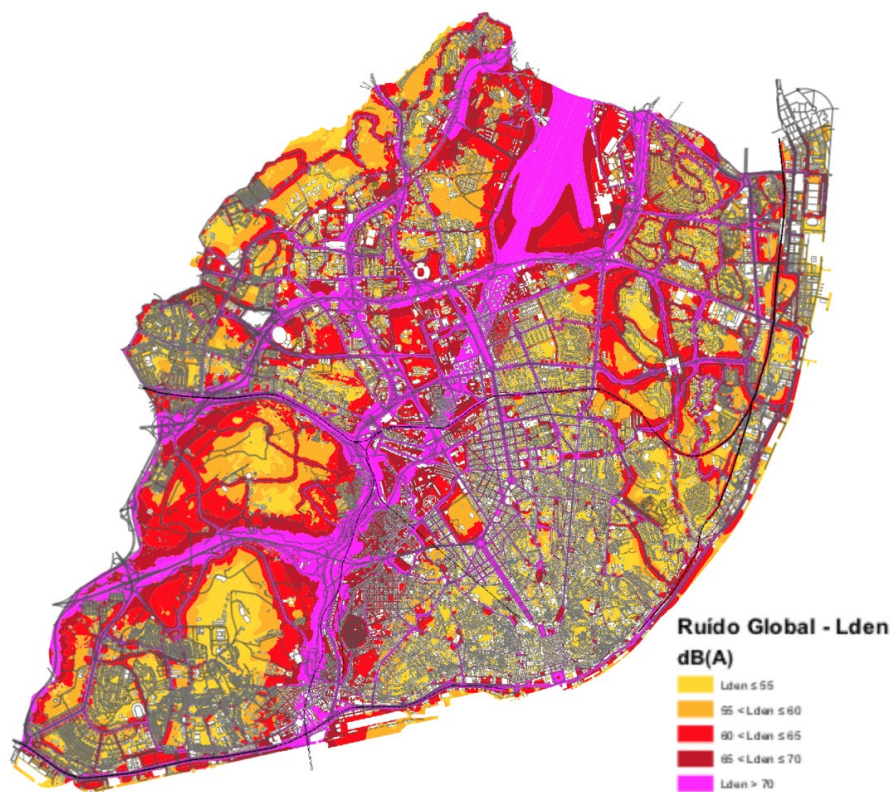


Figura 13 - Mapa de Ruído Rodoviário da cidade de Lisboa – Período Diurno-Entardecer-Noturno

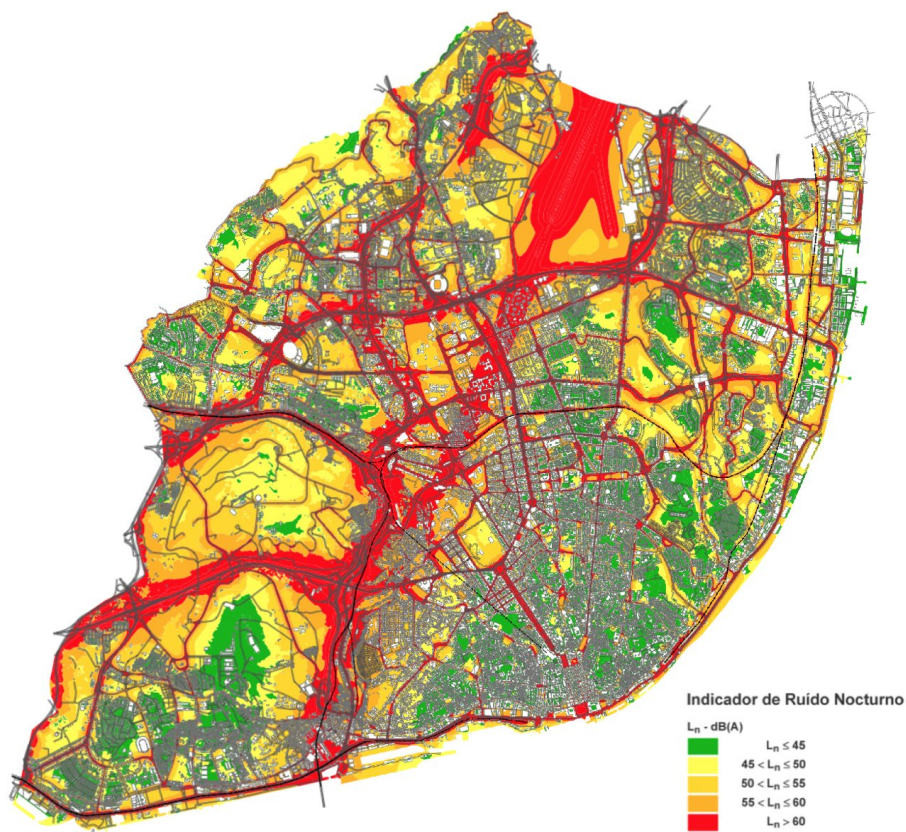


Figura 14 - Mapa de Ruído Rodoviário Noturno da cidade de Lisboa

Desde logo, o primeiro aspeto a merecer um comentário são as novas definições, com especial destaque para as de grande infraestrutura de transporte anteriormente referidas (aéreo, ferroviário e rodoviário) e os novos períodos de referência:

- i. Período diurno - das 7 às 20 horas;
- ii. Período do entardecer - das 20 às 23 horas
- iii. Período noturno – das 23 às 7 horas

O RGR apresenta de novo 3 períodos de referência, o que constitui uma alteração significativa já que o anterior regulamento (Decreto-Lei n.º 292/200), apresenta apenas o período diurno e o período noturno. Nas definições, destaque ainda para os novos indicadores de ruído:

«Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) o indicador de ruído, expresso em dB(A), associado ao incómodo global, dado pela equação 14.

$$L_{den} = 10 \log\left(\frac{1}{24} \left[12 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \right) \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

L_d «o indicador de ruído diurno» é o nível sonoro médio de longa duração, determinado durante uma série de períodos diurnos representativos de um ano;

L_e «o indicador de ruído do entardecer» é o nível sonoro médio de longa duração, determinado durante uma série de períodos do entardecer representativos de um ano;

L_n «o indicador de ruído noturno» é o nível sonoro médio de longa duração, determinado durante uma série de períodos noturnos representativos de um ano.

Relativamente à harmonização com outros regimes jurídicos, designadamente o de ordenamento do território, urbanização e edificação, de autorização e de licenciamento de atividades, a introdução, no regime jurídico que regula a urbanização e edificação, da obrigatoriedade de análise da vertente ruído e fixação dos documentos (projeto acústico, mapa de ruído, relatório de recolha de dados acústicos) a entregar para efeitos de procedimentos de licenciamento ou autorização.

Clarificação de conceitos fundamentais do diploma que permitem a sua ligação com a dinâmica do planeamento e licenciamento municipais, onde se destacam os seguintes pontos:

- a definição de zona sensível, a possibilidade de poder conter pontualmente pequenas unidades de comércio e serviços de complemento à função residencial;
- equiparação de recetores sensíveis a zonas sensíveis ou mistas, permitindo que os valores-limite lhes sejam aplicáveis.

Alteração do regime aplicável a infraestruturas de transporte:

- criado um regime de exceção, dando possibilidade de, em situações específicas, passarem a ser exigidos valores-limite menos restritivos.

Revogação de normas já objeto de regimes próprios, entretanto publicados:

- DL n.º 129/2002, específico sobre acústica de edifícios
- DL n.º 221/2006 relativo a emissão sonora de equipamentos para uso exterior

Fixa a alteração dos valores limite para a caracterização zonal, estabelecidos no artigo 11.º do RGR, representado no Quadro 7.

Quadro 7 - Valores limite de acordo com caracterização zonal de acordo com o Decreto-Lei n.º 9/2007

Tipo de zona	Indicador L_{den} [dB(A)]	Indicador L_n [dB(A)]
Mista	≤ 65 ^{a)}	≤ 55 ^{a)}
Sensível	≤ 55 ^{a)}	≤ 45 ^{a)}
Sensível com uma GIT em exploração na proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma GIT aéreo projetada na proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma GIT que não aéreo projetada na proximidade	≤ 60	≤ 50
Não classificada	≤ 63 ^{b)}	≤ 63 ^{b)}

a) Os municípios podem estabelecer em espaços delimitados, designadamente em centros históricos, valores inferiores em 5 dB(A).

b) Valores limite a aplicar aos recetores sensíveis.

Os recetores sensíveis isolados não integrados em zonas classificadas, por estarem localizados fora dos perímetros urbanos, são equiparados, em função dos usos existentes na sua proximidade, a zonas sensíveis ou mistas.

Para a verificação da conformidade destes valores, a avaliação deve ser efetuada junto do ou no recetor sensível, através da realização de medições acústicas ou da consulta de mapas de ruído.

No que toca a **Atividades Ruidosas Permanentes**, são interditos a instalação e o exercício de atividades ruidosas de carácter permanente em zonas sensíveis. As atividades ruidosas permanentes que se instalem em zonas mistas, junto de zonas sensíveis ou mistas ou na proximidade dos recetores sensíveis isolados, estão sujeitas:

- Cumprimento dos valores limite de exposição;
- Cumprimento do critério de incomodidade.

O critério de incomodidade é considerado como a diferença entre o valor do indicador L_{Aeq} do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da atividade ou atividades em avaliação e o valor do indicador L_{Aeq} do ruído residual, diferença que não pode exceder 5 dB(A) no período diurno, 4 dB(A) no período do entardecer e 3 dB(A) no período noturno, nos termos do anexo I do RGR.

Este critério não apresenta novidades, tirando o limite inerente à inserção do período do entardecer, que foi agora introduzido com a lógica esperada.

No que se refere ao anexo I, não há nada de novo no que se refere à correção tonal e impulsiva, mas, no que obedece à correção a efetuar ao valor limite devido à duração do ruído particular relativamente à duração do período (D), para além da duração da atividade ruidosa agora ser expressa em termos de uma relação percentual, há implicações práticas que são novidade. Por exemplo, se a duração de uma atividade ruidosa permanente for de 9 horas no período diurno, de acordo com o antigo regulamento $D=0$ e o limite seria de 5 dB(A), mas segundo o novo RGR, $D=1$ e o limite passa a 6 dB(A).

Ainda no anexo I, o n.º 4 refere que para efeitos da verificação do critério de incomodidade, o intervalo de tempo a que se reporta o indicador L_{Aeq} corresponde ao período de um mês, devendo corresponder ao mês mais crítico do ano em termos da emissão sonora das fontes de ruído em avaliação, no caso de se notar marcada sazonalidade anual.

O que parece indicar é que se teriam de efetuar medições de ruído ambiente e de ruído residual, em cada local de monitorização e em cada período em que se desenvolver a atividade, com a duração mínima de um mês cada.

Para além disso, este diploma introduz outra agravante para as atividades ruidosas permanentes, que é o facto de a obrigatoriedade destas atividades cumprirem os valores limite de exposição (artigo 11º), requerer que seja sempre determinado o L_{den} , o que implica que se tenha de determinar sempre o L_d , L_e e o L_n , durante uma série de períodos representativos de um ano, mesmo que a atividade ruidosa permanente seja exercida apenas no período diurno. Obviamente, esta alteração vai implicar custos acrescidos para empresas que laborarem apenas em um ou em dois períodos e que tiverem de proceder à avaliação do ruído ambiente.

Outro aspeto inovador deste novo diploma e que parece trazer maior justiça, é o facto de a adoção de medidas de redução de ruído no recetor sensível ser da responsabilidade da atividade ou do proprietário deste mesmo recetor, conforme quem seja titular da autorização ou licença mais recente. Na prática, se for licenciada a

construção de uma habitação próximo de uma unidade de fabrico já em laboração e licenciada ou de uma GIT, compete ao proprietário da habitação reforçar o seu isolamento sonoro.

Por último, importa referir que o critério de incomodidade, não se aplica em qualquer dos períodos de referência, quando o valor do L_{Aeq} do ruído ambiente exterior for igual ou inferior a 45 dB(A) ou o L_{Aeq} do ruído ambiente no interior dos locais de receção for igual ou inferior a 27 dB(A). Este aspeto parece também trazer maior justiça para as empresas, no que se refere ao cumprimento legal, sem por em causa o direito ao sossego dos que habitam e querem descansar.

Não raras vezes, em zonas com ruído residual muito baixo, as atividades ruidosas permanentes produzem acréscimos acima dos respetivos limites legais, com níveis de ruído ambiente junto dos (ou nos) alvos recetores sensíveis muito baixos. Esta situação, embora se possa afirmar que não se traduz em incómodo, constituía (face ao antigo regulamento) incumprimento legal, vindo agora o n.º 5 do artigo 13º excluir estas situações.

Relativamente ao artigo 11º, **Atividades Ruidosas Temporárias**, é proibido o exercício de atividades ruidosas temporárias na proximidade de:

- Edifícios de habitação, aos sábados, domingos e feriados e nos dias úteis entre as 20 e as 8 horas (no antigo RLPS era das 18 às 7 horas);
- Escolas, durante o respetivo horário de funcionamento;
- Hospitais ou estabelecimentos similares.

Estas atividades podem ser autorizadas, em casos excecionais e devidamente justificados, mediante emissão de licença especial de ruído pelo respetivo município, que fixa as condições do exercício da atividade (Instituto do Ambiente, 2007).

3.4 Normalização aplicável

Em Portugal, a atual legislação de ruído ambiente que enquadra a adoção da Norma Portuguesa NP ISO 1996 é o Regulamento Geral do Ruído (RGR) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro, retificado pela Declaração de Retificação no 18/2007, de 16 de março, e alterado pelo DL n.º 278/2007, de 1 de agosto, já anteriormente referido.

A NP ISO 1996 (constituída em 2 partes) de 2011 intitulada "Acústica. Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente.", harmonizada com a Norma Internacional ISO 1996 "*Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise.*", estabelece os procedimentos a adotar na realização de ensaios acústicos para avaliação de exposição a níveis de ruído ambiente exterior e para avaliação da incomodidade devida ao ruído.

O RGR, para além de estabelecer os indicadores de avaliação de ruído ambiente e valores limite associados, contém algumas disposições particulares relativas ao procedimento de medição as quais prevalecem sobre as respetivas disposições da NP ISO 1996. É este o caso, designadamente, do Anexo I do RGR, cuja essência é normativa.

A NP ISO 1996, por seu lado, não estabelece requisitos mínimos de amostragem que garantam a representatividade das amostras para determinação de valores de indicadores de longa duração.

Tendo em vista a boa aplicação desta norma, no contexto do Regulamento Geral do Ruído, a APA publica, na secção "Notas Técnicas e Estudos de Referência", um guia prático para medições de ruído ambiente (APA, 2018).

Do seu conteúdo salientam-se as definições dos vários tipos de ruído e grandezas fundamentais, os fatores a ter em conta para uma correta seleção dos intervalos de avaliação dos níveis sonoros bem como o equipamento a utilizar e correspondente classe de precisão. São ainda estabelecidas recomendações sobre as posições de medição, diferenciadas para medições no exterior e interior de recintos.

Os intervalos de tempo de longa duração são de:

- um ano para os indicadores L_{den} e L_n ,
- e um mês para o indicador $L_{Aeq, T}$, por período de referência, na avaliação do ruído ambiente e do ruído residual.

De acordo com a NP ISO 1996, um nível de avaliação é qualquer nível sonoro ao qual tenha sido adicionado uma correção em função do tipo de fonte, das características tonais e/ou impulsivas da fonte e do período de tempo. Contudo, nos termos do RGR, são considerados os níveis L_{den} , L_d , L_e e L_n , anteriormente referidos e o nível sonoro contínuo equivalente:

L_{Ar} ou $L_{Req, T}$ – nível de avaliação ou nível sonoro contínuo equivalente corrigido de acordo com as características tonais ou impulsivas do ruído particular, dado pela equação 15.

$$L_{Ar} = L_{Aeq,T} + K_1 + K_2 \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

$K_1 = 3\text{dB}$, se o ruído for tonal; o ruído é considerado tonal caso se verifique, no espectro de um terço de oitava ⁽⁸⁾ e medindo com ponderação de malha A, que o nível sonoro de uma banda excede o das adjacentes em 5dB(A) ou mais;

$K_2 = 3\text{dB}$, se o ruído for impulsivo; o ruído é considerado impulsivo caso se verifique uma diferença, entre o nível sonoro contínuo equivalente e medido no intervalo de tempo t , $L_{Aeq, t}$, em simultâneo com característica impulsiva e *fast*, superior a 6dB(A) (APA, 2011).

3.5 Efeitos na saúde

Segundo dados da Agência Europeia do Ambiente, de 2015, o ruído ambiente é responsável pela morte prematura de, pelo menos 10 mil pessoas por ano na Europa (European Environmental Agency, 2015). Todos os anos são admitidos nos hospitais europeus mais de 43 mil pessoas por doenças relacionadas com a poluição sonora e 900 mil casos de hipertensão por ano são originados pelo ruído ambiental. Mais de 8 milhões de adultos sofrem de distúrbios de sono associados ao ruído. A Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou as últimas diretrizes para a Europa em matéria de ruído, alertando para o excesso continuado em ambientes urbanos, com elevada complexidade de medição e quantificação, mas com efeitos isolados identificados por diversos estudos: alterações no sono, problemas cardiovasculares, condutas agressivas, maior risco de obesidade abdominal ou diabetes, hipertensão, dificuldades

⁸ De acordo com o item 8.4.11 da NP ISO 1996-2, os filtros de um terço de oitava abrangem as bandas de frequências centrais entre 50 Hz a 10 000 Hz.

de aprendizagem e de atenção entre os mais jovens, para além de afetar a saúde mental, o metabolismo e, claro, a qualidade de vida como um todo (OMS, 2018). Os efeitos da exposição ao ruído ambiental podem variar de emocionais para fisiológicos e psicológicos (Kinsler *et al.*, 2000). Assim, o efeito do ruído na saúde humana pode dividir-se em efeitos físicos, efeitos fisiológicos e psicológicos.

Relativamente aos efeitos fisiológicos, verifica-se que o ruído lesa não só o sistema auditivo, mas também as diferentes funções orgânicas. Deste modo, contribui para distúrbios gastrointestinais e distúrbio relacionados com o sistema nervoso central. Podem também alterar o equilíbrio psicológico de uma pessoa. Um local de trabalho ruidoso concorre no sentido de aumentar as tensões a que um indivíduo está sujeito.

A exposição prolongada ao ruído ambiente proveniente de estradas, linhas ferroviárias, aeroportos ou zonas industriais contribui para um aumento das doenças relacionadas com o ruído ambiente. Existem evidências epidemiológicas que indicam que, indivíduos cronicamente expostos a elevados níveis de ruído do ambiente têm um maior risco de contrair doenças cardiovasculares, tais como o enfarte do miocárdio. Por isto mesmo, a poluição sonora é considerada, não só, um incómodo ambiental, mas também uma ameaça à saúde pública (OMS, 2011).

Os efeitos do ruído na saúde são uma consequência dos elevados níveis de ruído ou sons ao qual uma pessoa esteve ou está exposta. Mais do que um incómodo, o ruído pode originar problemas de saúde. Esta é a principal razão do motivo de se trabalhar no sentido de reduzir a quantidade de ruído no ambiente. Segundo Lehmann *et al.*, 1985, podem considerar-se 4 zonas de efeitos do ruído, de acordo com o valor da intensidade do mesmo (Miguel, 2014), apresentadas na Figura 15.

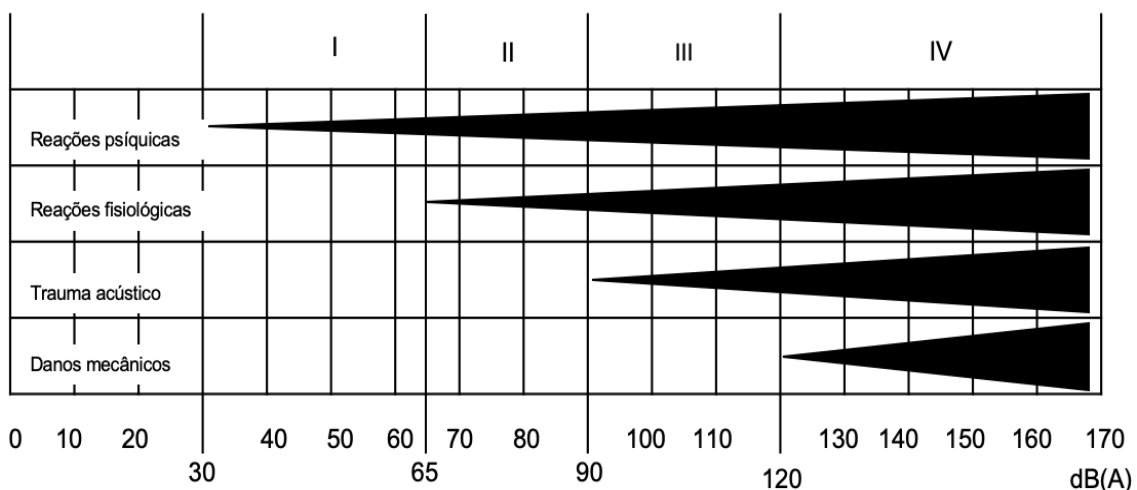


Figura 15 - Efeitos do ruído sobre o ser humano

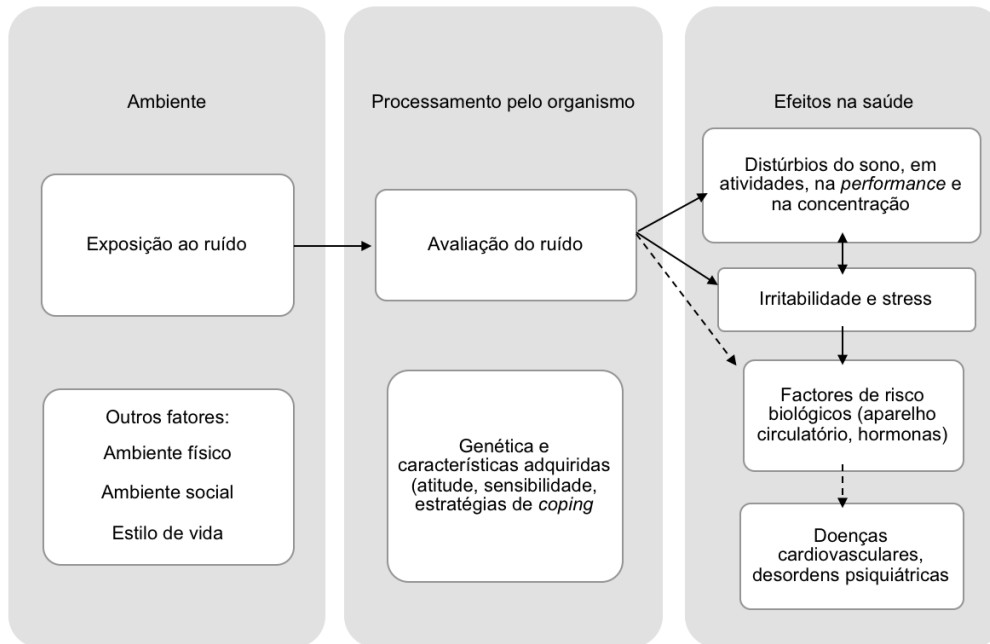
Zona I – Fundamentalmente efeitos psíquicos, e alguns efeitos fisiológicos

Zona II – Efeitos psíquicos e fisiológicos, sobretudo no sistema neurovegetativo

Zona III – Danos irreversíveis no sistema auditivo

Zona IV – Lesões irreversíveis no sistema auditivo

Os mecanismos de interação entre o ruído ambiente e os efeitos na saúde humana apresentam-se esquematizados na Figura 16.



(Adaptado de Boer & Schroten, 2007)

Figura 16 - Interação entre o ruído ambiente e efeitos na saúde humana

O efeito mais notável do ruído no corpo humano é a perda de audição. Este é um processo gradual em que as pessoas costumam tomar consciência do dano, uma vez que se começa a dar pela diferença. Este efeito é sentido em grande parte devido a exposição a ruído ocupacional. O ruído como fator de risco ocupacional é desde há muito tempo estudado, tendo sido investigado amplamente a sua influência na saúde e segurança dos trabalhadores (Everest & Pohlmann, 2009). As perdas de audição são função da frequência e da intensidade do ruído, sendo mais evidentes para os sons puros e para frequências elevadas. A fadiga auditiva traduz-se por um abaixamento reversível da acuidade auditiva e é determinado pelo grau de perda de audição e pelo tempo que o ouvido demora a retomar a audição inicial. Pode ser considerada uma medida indireta de admissibilidade face ao ruído, implicando a fixação de um limite de perda de audição após a exposição (Miguel, 2014). Quando a exposição a ruído excessivo se mantém durante um longo período de tempo, surge um défice permanente

de acuidade auditiva. Inicia-se, então, um processo de destruição das células ciliadas do órgão de Corti. O déficit forma-se para além das frequências de conversação, não sendo, por isso, detetado na atividade do dia a dia. A audição humana considera-se diminuída quando a média aritmética dos limiares tonais permanentes para as frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz for igual ou superior a 25 dB, relativamente ao zero audiométrico de referência obtido a partir da norma NP EN ISO 389 – 1: 2007.

A perda auditiva não tem cura, havendo apenas espaço para a prevenção e dado o impacto que tem em contexto laboral e no dia-a-dia dos trabalhadores é de prever que a grande maioria dos estudos publicados acerca desta temática, abordem o ruído em contexto laboral quando a exposição é elevada e a níveis considerados perigosos, sendo que segundo a legislação portuguesa constituem risco de perda auditiva, exposições acima de 80 dB (A), 8 horas por dia, 5 dias por semana, não havendo no entanto qualquer referência para os efeitos psicofisiológicos aquando de exposições a níveis de pressão sonora inferiores (Margarida et al., 2018).

Surdez Ocupacional e Recreativa

A surdez resultante do ruído ocupacional é reconhecida como um sério risco à saúde. A audição de trabalhadores na indústria é protegida por lei. Quanto maiores os níveis de ruído a que os colaboradores estão expostos, menor a exposição permitida. Os audiologistas determinam a exposição ao ruído a que os trabalhadores estão sujeitos em diferentes ambientes. Os engenheiros de áudio profissionais que operam com altos níveis de monitorização arriscam ferimentos irreparáveis à sua audição (Everest & Pohlmann, 2009).

A exposição perigosa ao ruído é mais do que um problema ocupacional; também é recreativo. Um indivíduo pode trabalhar o dia todo exposto a um ambiente de ruído elevado e depois desfrutar de corridas de automóveis ou ouvir música em alto nível. À medida que a perda de alta frequência se instala, os controles de volume são ativados para compensar e a taxa de deterioração é acelerada.

A perturbação do sono é considerada como o maior efeito causado pelo ruído ambiente (Berglund, Lindvall, & Schwela, 1999). De acordo com a Classificação Internacional de Distúrbios de Sono estas encontram-se divididas em intrínsecas, extrínsecas e perturbações do ritmo cardíaco. Os principais efeitos provocados são a dificuldade em adormecer, despertares e alterações nos estágios do sono ou na sua profundidade. Um sono sem interrupções é um requisito para uma boa função fisiológica e mental nos indivíduos. Assim, os efeitos que o ruído ambiente exerce sobre o sono não se restringem apenas enquanto os indivíduos dormem. Os efeitos secundários da

perturbação sono incluem a percepção da redução da qualidade do sono, fadiga, alterações no humor ou no bem-estar e diminuição da performance (Muzet, 2007).

O distúrbio do sono é um importante problema de saúde associado ao ruído proveniente de tráfego rodoviário, e a evidência da pesquisa é que o efeito fisiológico de tal ruído no sono humano pode depender mais do nível e número de eventos de ruído nos fluxos de tráfego do que em medidas equivalentes de energia. A reação da comunidade aos distúrbios do sono decorrentes do ruído noturno é destacada em uma revisão do aumento das operações de tráfego noturno de carga na Austrália (Basner & McGuire, 2018). Essa análise reconheceu que a reação da comunidade ao ruído produzido por veículos pesados em estradas urbanas, especialmente no período da noite, quando muitos camiões preferem viajar devido a níveis mais baixos de congestionamento, será um grande obstáculo ao futuro movimento de camiões em áreas urbanas.

Em 1999, a Organização Mundial da Saúde (OMS) referiu que para uma boa noite de sono o nível de pressão sonora no interior de uma habitação não deve exceder, aproximadamente, $L_{max} = 45$ dB(A) em mais de dez a quinze vezes por noite, havendo evidências de despertares com picos nos níveis de pressão sonora entre 55-60 dB(A). No entanto, dez anos depois indica que abaixo do nível de pressão sonora $L_n = 30$ dB(A), não são observados efeitos no sono com exceção de um ligeiro aumento na frequência de movimentos do corpo durante o sono devido ao ruído noturno. Remete ainda para a inexistência de provas suficientes de que os efeitos biológicos observados no nível abaixo de $L_n = 40$ dB(A), no ruído ambiente são prejudiciais à saúde. Mantém-se a coerência de que os efeitos adversos são observados no nível acima de $L_n = 40$ dB(A), tais como distúrbios do sono, insónia ambiental e aumento do uso de soníferos e sedativos (Basner & McGuire, 2018).

Sabendo que o sono é importante para a restauração fisiológica e mental, pessoas com má qualidade de sono podem ter capacidades de lidar reduzidas e podem ser mais suscetíveis a stress psicológico. O ruído pode ser mais prejudicial à saúde em situações em que outros fatores de stress interagem entre si (Sygna, Aasvang, Aamodt, Oftedal, & Krog, 2014).

A exposição ao ruído ativa os sistemas autónomos e hormonais, levando a alterações temporárias, tais como, aumento da tensão arterial, aumento da frequência cardíaca e vasoconstrição. Após a exposição prolongada, indivíduos suscetíveis na população em geral podem desenvolver efeitos permanentes, nomeadamente hipertensão e doença isquémica cardíaca associada a exposições a níveis de pressão sonora elevados (OMS, 1999).

As evidências apresentadas fortalecem o conceito de que o ruído proveniente do tráfego rodoviário, por si só, contribui para o desenvolvimento de risco cardiovascular de doenças arteriais, hipertensão arterial, acidente vascular cerebral e insuficiência cardíaca (Salomons, Van Maercke, Defrance, & De Roo, 2011).

Com relação à compreensão dos mecanismos fisiopatológicos, um crescente número de evidências comprova que o ruído está associado ao *stress* e a disfunções vasculares, potenciando não só o impacto adverso dos fatores de risco cardiovasculares, como a hipertensão arterial e diabetes, mas também contribuindo para a progressão da aterosclerose e aumento da suscetibilidade a eventos cardiovasculares (Münzel et al., 2018).

Os efeitos cardíacos revelados estão presentes mesmo em faixas etárias mais jovens. Segundo o estudo de Chang et. al. (2009) em jovens adultos com idades entre os 18 e os 32 anos, que demonstrou que numa exposição ao ruído ambiente com níveis médios de $56,6 \pm 16,5$ dB(A) durante 24h, existe um aumento da tensão arterial sistólica e diastólica (Chang, Lai, Hsieh, Lai, & Liu, 2009). Estes efeitos são significativos com um aumento de 5 dB(A) de exposição ao ruído ambiente. De modo a entender-se a importância do aumento da tensão arterial, é necessário realçar alguns aspetos. Efetivamente, um aumento na ordem de uma unidade na tensão arterial em pessoas saudáveis, sem problemas cardiovasculares, não é significativo; no entanto, se este aumento ocorrer em indivíduos com problemas de hipertensão ou hipotensão arterial os efeitos serão consideráveis e significativos. Isto acontece uma vez que o valor padrão de tensão arterial não é igual para todos os indivíduos, mas nos indivíduos em que o valor da tensão arterial já se apresenta valores bastante alterados, é preciso ter atenção a aumentos com origem externa ao indivíduo, neste caso aumentos causados devido à exposição a ruído ambiente.

Um dos maiores estudos que tenta relacionar o ruído ambiente com os efeitos que este tem no aparelho circulatório humano, é o estudo HYENA (*Hypertension and Exposure to Noise near Airports*) (Babisch, 2008). Um dos artigos científicos publicados com origem neste estudo focou a relação entre o ruído de tráfego aéreo e rodoviário e o risco de hipertensão em indivíduos que residem perto de aeroportos europeus. Os resultados encontrados remetem para um indicador estatístico de exposição-resposta significativo: para o período noturno, um aumento na exposição a ruído de tráfego aéreo de 10 dB(A) foi associado a um *odds-ratio* de 1,14 (IC=95%); a relação exposição-resposta foi idêntica para o ruído de tráfego rodoviário (Chang et al., 2009). Os resultados apontam para o risco de hipertensão relacionada com a exposição a longo prazo ao ruído ambiente provocado por aviões durante o período noturno. Estudos epidemiológicos

demonstram que os efeitos cardiovasculares ocorrem após exposição por longo período ao ruído ambiente com origem no tráfego rodoviário e aéreo, de valores de L_{Aeq} (24h) 65 dB(A) a 70 dB(A) (Basner & McGuire, 2018). Estes pequenos riscos são relevantes porque um grande número de pessoas está exposto aos níveis de ruído mencionados anteriormente, ou podem vir a estar expostas no futuro. Boer e Schroten (2007) referem que indivíduos com doenças crónicas apresentam um ligeiro aumento na probabilidade de contrair algumas doenças cardíacas, em resultado do ruído do tráfego rodoviário, do que aqueles que não estão expostos a esta fonte de ruído (Boer & Schroten, 2007).

A exposição ao ruído ambiente pode levar a perturbações do sono e atividades diárias, ao aborrecimento e ao *stress*. A plausibilidade biológica para a associação de ruído com desfechos de saúde cardiovascular, respiratória e metabólica foi recentemente documentada numa revisão e resumida num modelo integrador (Recio, Linares, Banegas, & Díaz, 2016a). O *stress* causado pelo ruído pode dar origem a uma variedade de reações fisiológicas destinadas a preservar a homeostasia. Quando o *stress* é consideravelmente alto e mantido, a sobrecarga alostática pode levar a respostas ineficientes do corpo, afetando a pressão arterial, a variabilidade da frequência cardíaca, o sistema imunológico, e o tecido conjuntivo, promovendo o acúmulo de gordura nas artérias, coagulação sanguínea, inflamação sistémica e resistência à insulina (Recio, Linares, Banegas, & Díaz, 2016b).

O grau de ruído leva à perturbação dos indivíduos, irritabilidade e *stress* dependendo em parte das características individuais (Basner & McGuire, 2018). A aversão ao ruído está geralmente associada à cadeia de reação "indireta" no organismo humano que está intimamente relacionada com o início do *stress* emocional (isto é, a perceção cortical). De fato, estudos de pesquisa mostraram que indivíduos incomodados pelo ruído tendem a experimentar uma série de emoções negativas (Muzet, 2007), incluindo raiva, desapontamento, infelicidade, abstinência, distração, ansiedade, exaustão e até depressão (Agarwal, 2014).

O ruído de baixa frequência tem um impacto sério na qualidade do sono das crianças. Além disso, a exposição de adultos ao ruído de tráfego de baixa frequência está associada a um humor negativo e tem impacto no desempenho de tarefas periféricas, mais problemas com concentração e memória. Em levantamentos públicos realizados para avaliar o bem-estar subjetivo de indivíduos expostos ao ruído de baixas frequências, múltiplos efeitos para a saúde são referidos, incluindo perturbações ao adormecer, consciência frequente do ruído, irritação e perturbação. Quando lendo, outros efeitos relatados foram insónias, dores de cabeça e palpitações (Agarwal, 2014).

4. Tráfego rodoviário

Neste capítulo são apresentadas as entidades gestoras do tráfego rodoviário no panorama nacional e descrito o tráfego rodoviário em Portugal.

4.1 Instituto da Mobilidade e Transportes, I.P.

O tráfego rodoviário em Portugal é regulado pelo IMT – Instituto da Mobilidade e Transportes, I.P. O IMT é um instituto público integrado na administração indireta do Estado, dotado de autonomia administrativa e financeira e património próprio. É um organismo central com jurisdição sobre todo o território nacional, sediado em Lisboa.

O IMT, I.P. prossegue atribuições dos Ministérios da Administração Interna, do Planeamento e das Infraestruturas, do Ambiente, e do Mar, sob superintendência e tutela do Ministro do Planeamento e das Infraestruturas.

Algumas atribuições genéricas do IMT:

- Apoiar o Governo na implementação e avaliação de políticas para os setores da mobilidade, dos transportes terrestres, assegurando a sua coordenação interna com os subsistemas de circulação e segurança e delineando estratégias de articulação intermodal;
- Apoiar o Governo na elaboração de diplomas legais e regulamentares e na preparação e condução de procedimentos pré-contratuais nos setores dos transportes terrestres na sua vertente económica, e das infraestruturas rodoviárias, no âmbito das suas atribuições.

Num plano mais direcionado para os transportes terrestres, as **atribuições do IMT em matéria de mobilidade e transportes terrestres** são:

- Assessorar o Governo no exercício dos seus poderes de concedente de serviços de transporte público, nomeadamente acompanhando os contratos de fornecimento de serviço público nessa matéria, incluindo contratos de concessão e contratos de prestação de serviços;
- Assegurar, no âmbito das suas atribuições, em ligação com a Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR), o cumprimento das melhores práticas em matéria de segurança rodoviária;
- Aprovar, homologar e certificar veículos e equipamentos afetos aos sistemas de transporte terrestre, garantindo os padrões técnicos e de segurança exigidos.

As atribuições do IMT em matéria de infraestruturas rodoviárias, incluindo matérias específicas relativas à rede rodoviária nacional são:

- Propor o planeamento da rede rodoviária nacional, no âmbito das políticas de planeamento dos transportes e de ordenamento do território;
- Promover a qualidade e a segurança das infraestruturas rodoviárias;
- Promover a definição de normas regulamentares aplicáveis ao setor das infraestruturas rodoviárias em matéria de qualidade e de segurança, após a avaliação do seu impacto por referência aos padrões contratuais em vigor, e fiscalizar o cumprimento das obrigações delas decorrentes pelos operadores do setor;
- Colaborar com a ANSR na elaboração de Planos Nacionais de Segurança Rodoviária (Instituto da Mobilidade e Transportes, IP, 2018).

4.2 Infraestruturas de Portugal

A Infraestruturas de Portugal é a empresa pública que resulta da fusão entre a Rede Ferroviária Nacional e a EP - Estradas de Portugal, SA (EP, SA) e é transformada em sociedade anónima, passando a denominar-se Infraestruturas de Portugal, SA (IP, SA). A IP, SA é uma entidade tutelada pelo IMT.

A IP, SA, cujo único acionista é o Estado Português, está sujeita à tutela dos Ministérios do Planeamento e das Infraestruturas e das Finanças (Infraestruturas de Portugal, 2018).

4.2.1 Rede Rodoviária

A Rede Rodoviária Nacional em exploração compreende atualmente 17 874 km.

A IP, SA é concessionária de 15 253 km, dos quais 13 664 km em gestão direta e 1 589 km de rede subconcessionada (através de parcerias estratégicas com privados). Os restantes 2 621 km respeitam às concessões do Estado.

A Rede de Autoestradas de Portugal Continental estende-se por 3 087 km, dos quais 541 km encontra-se sob gestão direta ou indireta da IP, SA.

A Rede de Alta Prestação sob gestão direta ou indireta da IP, SA corresponde a 305 km e integra autoestradas bem como outras estradas com perfil de autoestrada.

A rede a cargo da IP, SA apresenta-se na Figura 17.



Adaptado de Infraestruturas de Portugal, 2018

Figura 17 - Rede a cargo da IP, SA

4.2.2 Plano Rodoviário Nacional

Um dos fatores estruturais mais importantes para uma harmoniosa política de ordenamento do território é, sem dúvida, o modo como se encontra organizada a Rede Nacional de Estradas, o que se traduz na existência de um Plano Rodoviário Nacional (PRN), que constitui o instrumento regulador das infraestruturas rodoviárias nacionais, otimizando as condições da ocupação do solo e do ordenamento do território (Infraestruturas de Portugal, 2018).

O primeiro PRN surgiu em 1945 com a necessidade de melhorar a rede de estradas existentes (Infraestruturas de Portugal, 2018).

A última revisão foi realizada em 1998, denominou-se PRN2000 e pretende dar resposta ao desenvolvimento socioeconómico após a adesão de Portugal à União Europeia.

Os níveis hierárquicos definidos pelo PRN2000 são (Azevedo, 2008):

- Rede Nacional Fundamental - com 2 600 km de extensão, é constituída pelos Itinerários Principais (IP) que asseguram a ligação entre centros urbanos de influência supra distrital e destes com portos, aeroportos e fronteiras;
- Rede Nacional Complementar – com 8 800 km de extensão, é constituída pelos Itinerários Complementares (IC) e pelas Estradas Nacionais (EN), que asseguram a ligação entre centros urbanos de influência concelhia;
- Estradas Regionais – com 5 100 km de extensão, garantem ligações com interesse supramunicipal e complementar à rede rodoviária nacional.

A hierarquização viária definida pelo PRN2000 é apresentada no Quadro 8.

Quadro 8 - Hierarquização viária

Rede Nacional Fundamental	
IP	2 600 km
Rede Nacional Complementar	
IC	3 500 km
EN	5 400 km
Estradas Regionais	
ER	5 100 km
Total	16 500 km

4.3 Métodos de contabilização de veículos

Para efeitos de contabilização de veículos, a classificação dos mesmos é feita pelo Código da Estrada. O Código da Estrada, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 114/94, de 3 de maio, foi já alterado por diversas vezes, com justificação nas constantes e céleres evoluções das características do trânsito, dos utentes da via pública e das soluções técnicas e jurídicas que visam a promoção da segurança rodoviária. A última alteração a este diploma traduziu-se na 21ª versão, através do Decreto-Lei n.º 151/2017, de 7 de dezembro. Segundo o Código da Estrada, “Automóvel é o veículo com motor de propulsão, dotado de pelo menos quatro rodas, com tara superior a 550 kg, cuja velocidade máxima é, por construção, superior a 25 km/h, e que se destina, pela sua função, a transitar na via pública, sem sujeição a carris.” Assim, a classificação de veículos apresenta-se no Quadro 9.

Quadro 9 - Classificação de veículos segundo o Código da Estrada

Consoante o Peso	
Classificação	Descrição
Ligeiros	Veículos com peso bruto até 3 500 kg e com lotação não superior a 9 lugares.
Pesados	Veículos com peso bruto superior a 3 500 kg ou com lotação superior a 9 lugares.
Consoante a sua utilização (ligeiros ou pesados)	
Classificação	Descrição
Passageiros	Veículos que se destinam ao transporte de pessoas
Mercadorias	Veículos que se destinam ao transporte de carga
Especiais	Veículos (de passageiros ou mercadorias) que se destinam ao desempenho de função diferente do normal transporte de passageiros ou mercadorias.

4.3.1 Métodos intrusivos

Ao longo dos anos, um extenso número de sensores intrusivos foi desenvolvido e aplicado para contabilização de tráfego rodoviário, sendo os mais comuns designados por **tubos pneumáticos** (*pneumatic road tubes*) e **laços indutivos** (*inductive loops*). De um modo geral, os métodos intrusivos compreendem a utilização de um dispositivo que regista os dados recolhidos e um sensor disposto na via de tráfego (Brito, 2013).

Os **tubos pneumáticos** tratam-se de tubos ocultos construídos com material em borracha que são colocados perpendicularmente à via de rodagem. O princípio de funcionamento consiste na compressão aquando da passagem de um eixo do veículo, forçando o ar através do comutador, o qual fecha e envia um sinal elétrico para o sistema eletrónico de registo de dados, representado pela Figura 18.



(Adaptado de AROUND, 2018)

Figura 18 - Instalação de tubos pneumáticos numa via de rodagem

Segundo a AASHTO (2009), os DLI (detetores de laços indutivos) são provavelmente os equipamentos mais regularmente utilizados em deteção permanente de veículos nos Estados Unidos da América. A forma e o tamanho diferem de aplicação para aplicação, podendo ser quadrados, retangulares ou circulares e são constituídos por um fio isolado colocado num corte com pouca profundidade no pavimento, um circuito de excitação e deteção e um cabo que leva o sinal até um dispositivo eletrónico colocado na berma da faixa de rodagem (Brito, 2013).

O princípio de funcionamento dos DLI consiste em fazer passar uma pequena corrente elétrica pelos fios colocados no pavimento com frequências que variam de 10 kHz a 50 2 kHz. A passagem do metal existente num veículo faz com que a indutância do laço diminua o que por consequência permite o aumento da frequência de oscilação do excitador. O circuito de deteção, por último envia um sinal para a unidade de controlo eletrónica.

4.3.2 Métodos não – intrusivos

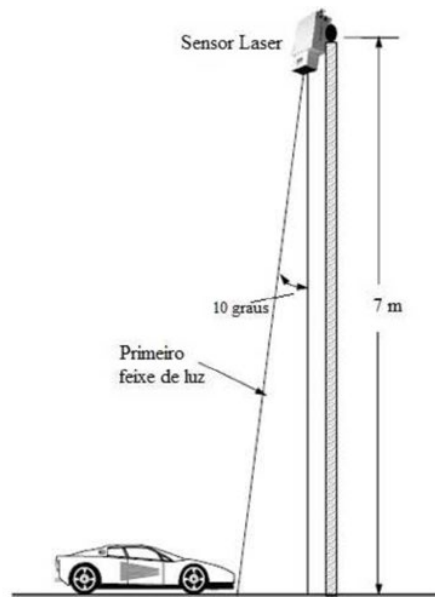
De acordo com a AASHTO (2009), a utilização de métodos intrusivos para a recolha de contagens de pequena duração torna-se inviável se o volume de tráfego for muito elevado ou se as equipas não dispuserem de segurança para a instalação dos sensores, devido ao facto de a entidade responsável pela gestão das vias não proceder ao corte das mesmas. De modo a responder a estas questões, a evolução da tecnologia permitiu o desenvolvimento de sistemas que não necessitam de interromper o tráfego ou comprometer a segurança das equipas, uma vez que com a utilização de métodos não-intrusivos torna-se possível a monitorização das vias de tráfego por cima ou ao lado destas (Brito, 2013).

Os principais métodos não-intrusivos existentes são a **deteção de imagens vídeo, laser e infravermelhos**.

A utilização de **sistemas de deteção de imagens vídeo** começou por ser uma tarefa manual, uma vez que a transmissão de imagens num circuito fechado de televisão permitia a um operador efetuar a gestão de tráfego, mas devido à evolução tecnológica, a recolha é feita agora modo automático. A tecnologia de processamento de imagens vídeo é constituída por câmaras de vídeo, um computador para o processamento dos dados e um programa específico para a interpretação dos dados e conversão das imagens em dados de tráfego com base na identificação de grupos de pontos (*pixels*).

Os sistemas de deteção de tecnologia **laser** operam no espectro eletromagnético numa zona próxima à dos infravermelhos e consistem na transmissão ótica de dois feixes de díodo pulsado laser, em que um primeiro feixe apresenta uma inclinação de 10° face à vertical onde se encontra o emissor e um segundo feixe de luz segue com uma inclinação de 0° . Este sensor *laser* pode-se instalar entre 6,1 e 7,6 m acima da faixa de rodagem, conforme ilustra a Figura 19.

No momento da passagem de um veículo, o feixe de luz é interrompido, detetando o veículo. Se estes sensores forem instalados na berma da via podem identificar e classificar veículos com base no seu perfil.



(Adaptado de Brito, 2013)

Figura 19 - Esquema de montagem dos sensores laser

Os sistemas baseados em **infravermelhos** podem ser divididos em duas classes: passivos e ativos. A diferença entre estes assenta no facto de os sistemas passivos detetarem as alterações de energia provocadas nos comprimentos de onda emitidos pelos objetos na faixa de rodagem, enquanto os sistemas ativos funcionam através da emissão de um feixe de radiação infravermelha de baixa energia, com a medição do tempo de retorno desse mesmo feixe (Brito, 2013).

Existem outros métodos intrusivos e não – intrusivos, são apresentadas as suas vantagens nos Quadros 10 e 11, respetivamente.

Quadro 10 - Síntese das tecnologias intrusivas para recolha de dados de tráfego, vantagens e desvantagens

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Tubos pneumáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Económicos - Fácil montagem 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de precisão em tráfego elevado - Dificuldade de instalação em múltiplas faixas
Laços indutivos	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibiliza os parâmetros básicos de tráfego (presença, volume, faixa ocupada e velocidade) - Insensível às ações climatéricas (chuva, nevoeiro e neve) - Tecnologia com um vasto leque de aplicações e experiência 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer cortes no pavimento - Difícil instalação em caso de tráfego elevado - Fiabilidade dos dados pode diminuir com a quantidade de classes abrangidas na medição - Sujeito a esforços e ação da temperatura

(Adaptado de Brito, 2013)

Quadro 11 - Síntese das tecnologias não-intrusivas para recolha de dados de tráfego, vantagens e desvantagens

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Processamento de imagens de vídeo	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização de múltiplas faixas; - Elevada quantidade de dados disponíveis; - Grande área de deteção quando existem várias câmaras ligadas entre si; - Facilidade de instalação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção periódica às lentes das câmaras; - Suscetibilidade à ação do vento e/ou vibrações; - Recolha de dados fiáveis em condições noturnas requer iluminação pública.
Deteção laser	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de operação em múltiplas faixas; - Medição precisa através do envio de vários feixes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção periódica às lentes do equipamento; - Operação pode ser afetada pelo nevoeiro (a menos de 6m) ou neve.
Infravermelhos	<ul style="list-style-type: none"> - Múltiplas zonas de deteção permitem conhecer a velocidade dos veículos. 	<ul style="list-style-type: none"> - A sensibilidade à deteção de veículos é diminuída com a presença de nevoeiro denso, chuva e neve.

(Adaptado de Brito, 2013)

4.4 Caraterização do tráfego rodoviário

O tráfego rodoviário em Portugal é alvo de flutuações, em termos quantitativos, no que se refere ao tipo de combustível. Uma das causas prováveis deste efeito, nomeadamente do decréscimo do número total de veículos, é a crise económica que se fez sentir no período compreendido entre os anos de 2010 e 2013, aproximadamente. O número de veículos rodoviários motorizados movidos a gasolina tem vindo a decrescer ao longo dos anos. Já os veículos movidos a gasóleo seguem uma tendência inversa, como mostra o Quadro 12.

Quadro 12 - Veículos motorizados em circulação por tipo de combustível em Portugal entre os anos de 2010 e 2016

Anos	Tipo de combustível				
	Total	Gasóleo	Gasolina	GPL	Outros
2010	6 182 106	3 546 717	2 587 484	38 990	8 915
2011	6 181 188	3 619 670	2 513 202	38 210	10 106
2012	5 556 041	3 334 430	2 172 762	37 899	10 950
2013	5 615 073	3 393 572	2 168 388	41 136	11 977
2014	6 095 506	3 746 210	2 286 681	47 775	14 840
2015	6 083 694	3 818 327	2 197 118	48 821	19 428
2016	6 208 350	3 964 235	2 168 246	50 016	25 853

(Adaptado de IMT – PORDATA, 2018)

A evolução do número de veículos ligeiros entre os anos de 2010 e 2016 segue a mesma tendência do número total de veículos em circulação, independentemente do tipo de combustível, como é possível concluir a partir do Quadro 13.

Quadro 13 - Veículos motorizados ligeiros em circulação por tipo em Portugal entre os anos de 2010 e 2016

Anos	Tipo de veículos				
	Total	Ligeiros			
		Total	Passageiros	Mercadorias	Outros
2010	6 182 106	6 049 889	4 692 000	1 337 373	20 516
2011	6 181 188	6 054 508	4 712 354	1 321 711	20 443
2012	5 556 041	5 450 699	4 258 746	1 172 906	19 047
2013	5 615 073	5 512 858	4 327 478	1 164 956	20 424
2014	6 095 506	5 982 096	4 699 645	1 259 725	22 726
2015	6 083 694	5 970 710	4 722 963	1 224 821	22 926
2016	6 208 350	6 095 470	4 850 229	1 221 913	23 328

(Adaptado de IMT – PORDATA, 2018)

A quantidade de veículos motorizados pesados em circulação por tipo, entre os anos de 2010 e 2016 é exibido no Quadro 14.

Quadro 14 - Veículos motorizados pesados em circulação por tipo em Portugal entre os anos de 2010 e 2016

Anos	Tipo de veículos					
	Pesados					
	Total	Passageiros	Mercadorias			Outros
			Total	Camiões	Tratores	
2010	132 217	15 425	106 893	65 236	41 657	9 899
2011	126 680	15 181	101 840	61 482	40 358	9 659
2012	105 342	12 358	84 980	50 971	34 009	8 004
2013	102 215	12 111	81 485	50 111	31 374	8 619
2014	113 410	14 941	88 874	51 562	37 312	9 595
2015	112 984	14 717	88 398	49 112	39 286	9 869
2016	112 880	14 850	88 561	47 386	41 175	9 469

(Adaptado de PORDATA – IMT, 2018)

Uma interpretação geral dos dados anteriormente apresentados, incluindo as categorias de veículos ligeiros e pesados, fazendo distinção entre ligeiros de passageiros e mercadorias para evidenciar a tendência já referida é apresentada na Figura 20.

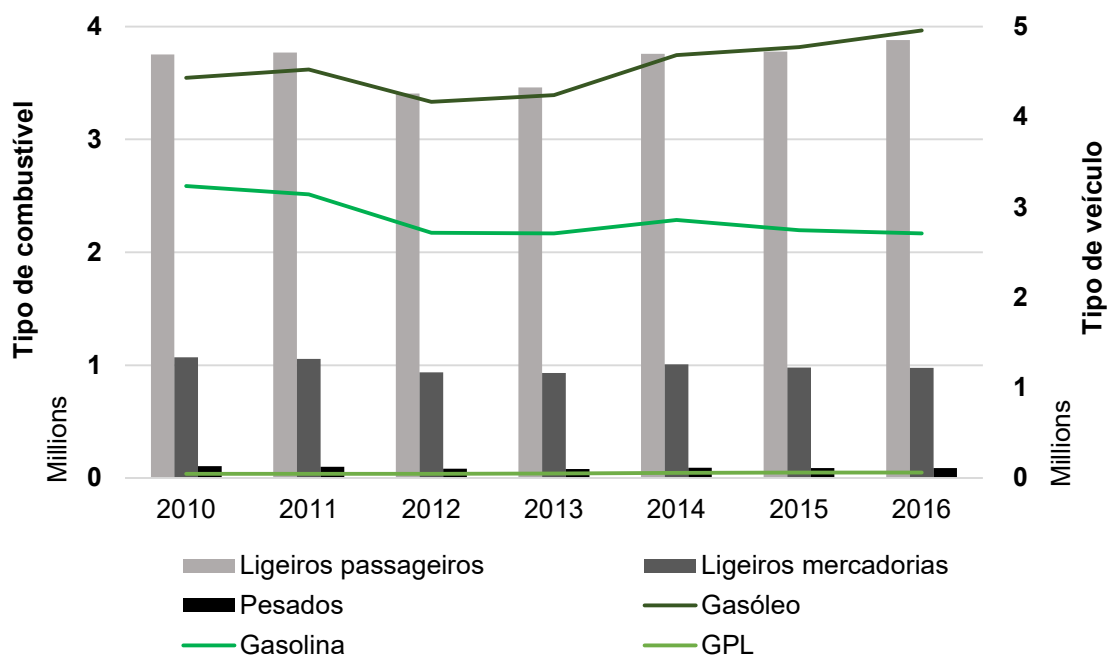


Figura 20 - Evolução do número de veículos motorizados em circulação por tipo de combustível e veículo entre os anos de 2010 e 2016

Relativamente ao tráfego na segunda circular, os dados do Relatório de Tráfego da Rede Nacional Automóvel (RNA), nos sublanços que cruzam o local de recolha de dados, são apresentados nos Quadros 15 e 16.

Quadro 15 - Tráfego 2ª circular em 2016

Mês	Sublanço		Média
	Telheiras – 2ª Circular/Eixo NS	2ª Circular/Eixo NS – Av. Lusíada	
Janeiro	103 402	103 933	103 668
Fevereiro	106 288	106 448	106 368
Março	108 038	108 701	108 370
Abril	109 943	111 163	110 553
Maio	111 289	115 684	113 487
Junho	111 672	114 232	112 952
Julho	112 650	114 977	113 814
Agosto	100 233	105 915	103 074
Setembro	113 314	116 626	114 970
Outubro	108 913	114 174	111 544
Novembro	112 514	115 209	113 862
Dezembro	109 440	112 323	110 882

(Adaptado de IMT-IP, 2018)

Quadro 16 - Tráfego 2ª circular em 2017

Mês	Sublanço		Média
	Telheiras – 2ª Circular/Eixo NS	2ª Circular/Eixo NS – Av. Lusíada	
Janeiro	108 188	110 112	109 150
Fevereiro	109 403	111 322	110 363
Março	111 325	113 886	112 606
Abril	109 600	111 461	110 531
Maio	115 143	116 115	115 629
Junho	114 730	117 352	116 041
Julho	112 294	116 957	114 626
Agosto	102 256	107 181	104 719
Setembro	116 428	117 922	117 175
Outubro	113 542	117 366	115 454
Novembro	114 035	115 937	114 986
Dezembro	108 427	108 377	108 402

(Adaptado de IMT-IP, 2018)

Quando comparados, os dados, apresentam, em média, valores superiores em 2017, convergindo com a tendência do aumento do número de veículos nos últimos anos.

5. Modelação de ruído

Neste capítulo é abordado o tema de modelação ambiental e quais os modelos de ruído mais utilizados.

5.1 Introdução sobre modelos

Um modelo é uma representação simplificada da realidade, embora distorcida e eventualmente "errada", mas que revela alguns componentes essenciais de uma realidade complexa. Deve conter as características do sistema que são essenciais no contexto do sistema ambiental em estudo. Para o desenvolvimento do modelo é fundamental responder à questão: "quais são os processos e os componentes importantes no contexto do modelo?" Para responder a esta questão é necessário conhecer o problema e o sistema em causa (Aral, 2010).

A modelação ajuda-nos a separar o essencial do supérfluo, providenciando uma oportunidade para explorar ideias que, por razões logísticas, políticas ou, grande parte das vezes, económicas, são difíceis de testar no campo. O processo de formulação de um modelo é extremamente útil para a organização do pensamento, e pode ser representado pela Figura 21.

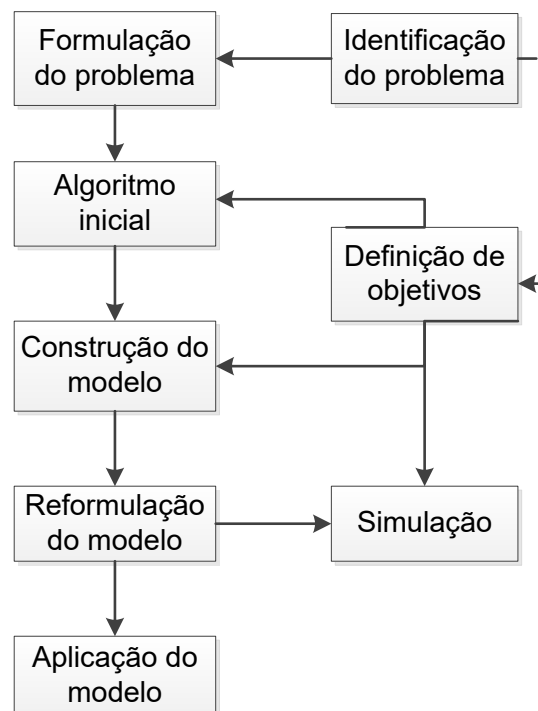


Figura 21 - Fluxograma de construção de modelos

5.2 Modelos de ruído

A DRA afirma que [173: Anexo II]: “os valores de L_{den} e L_n podem ser determinados por computação ou por medição”.

Na prática, no entanto, os valores de exposição nos mapas de ruído compatíveis com a DRA, como os das Figuras 10 e 11, são virtualmente sempre computados. A razão principal é a escalabilidade devido à impossibilidade de medição do nível de ruído em todos os lugares e horários pelas autoridades competentes. Assim, a maioria dos mapas provenientes da DRA, se não todos, é produzida com um software especializado que simula (isto é, calcula) os níveis esperados em diferentes locais e horários. Esse *software* usa modelos de propagação de som específicos da fonte que são alimentados com estatísticas sobre a presença de fonte(s) considerada(s), por ex. o número médio de veículos em estradas, a frequência de aviões em trajetórias de voo de baixa altitude, etc. - e informações sobre topologia urbana - por ex. a altura dos edifícios, a largura e o tipo de superfície das estradas, a presença de barreiras acústicas, etc (Stevens, 2012).

Mesmo que a medição seja permitida, a DRA pressupõe implicitamente a modelação. Por exemplo, a exigência de fazer mapas separados por fonte sonora é difícil de ser realizada com a medição, pois os sonómetros não distinguem as fontes.

Dois desses “papéis suplementares” para medições são a inicialização de modelos e a verificação (e possivelmente a correção) dos resultados. Normalmente, requer apenas quantidades limitadas de dados que são recolhidos por oficiais elegidos que estão equipados com sonómetros de nível profissional, ou através de uma rede de sensores.

Vantagens da simulação:

A principal vantagem da simulação é que permite prever níveis sonoros em grandes áreas com pouca ou nenhuma medição no campo - desde que as estatísticas sobre as fontes consideradas estejam disponíveis.

Limitações:

Custos elevados - A aplicação desse método requer grandes conjuntos de dados (que podem não estar disponíveis publicamente), *software* caro, computadores poderosos e muita experiência em recursos humanos. Consequentemente, muitas autoridades locais ou regionais subcontratam a criação de mapas estratégicos de ruído para empresas especializadas.

Incerteza - Como a saída dos modelos é validada apenas com uma quantidade limitada de medições, é difícil estimar as margens de erro. Além disso, a modelação precisa de muitos parâmetros de entrada diferentes, os quais podem influenciar a precisão do resultado. Por exemplo, para modelar o tráfego rodoviário, é necessário ter em conta a frequência de diferentes tipos de veículos, superfície da estrada, condições climáticas, dimensões e o material da superfície de edifícios próximos, etc.

Quantidade limitada de fontes - Na realidade, a diversidade de fontes de ruído potencialmente incómodas é muito mais ampla do que as 4 fontes consideradas pela DRA (tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo e indústria). Assim, como mencionado anteriormente, os mapas em conformidade com a DRA ignoram o ruído produzido por seres humanos (por exemplo, vizinhos barulhentos), obras, passagem de serviços de emergência, voos não programados, manifestações ou eventos, etc. Por exemplo, para mapas de tráfego rodoviário, apenas estradas com mais de 6 milhões de passagens de veículos por ano são modeladas.

Foco estratégico - Os mapas de ruído compatíveis com a DRA são válidos por 5 anos e representam níveis de som médio esperados para um dia ou uma noite. Não informam acerca de variações incidentais ou de curto prazo na exposição. Por exemplo, se o tráfego rodoviário é desviado devido a obras rodoviárias ou uma manifestação, pode alterar significativamente a paisagem sonora de um bairro por dias, semanas ou até meses, mas isso não é refletido nos mapas.

Exposição simulada vs. desconforto real - A percepção do ruído e o incómodo causado são altamente dependentes de diversos fatores contextuais, que não são levados em consideração nos modelos de simulação nem representados nos mapas de ruído. Além disso, as simulações não modelam os níveis de ruído interno, embora seja onde passamos a maior parte do tempo. Assim, as estatísticas sobre o número de habitações e habitantes expostos a determinados níveis de ruído, baseiam-se em níveis externos simulados. Além de serem influenciados pelo que acontece no exterior, os níveis de som no interior também dependem de aspetos arquitetónicos (por exemplo, orientação, isolamento e vidros) e, claro, da presença de fontes de ruído no interior.

Os mapas simulados são úteis para as autoridades entenderem as tendências globais na paisagem urbana, fornecendo um limite mais baixo para a exposição real do cidadão. No entanto, não capturam níveis de exposição centrados na pessoa, nem modelam muito bem as variações locais. Portanto, permanecem de pouco interesse para os cidadãos, que ou percebem o óbvio (por exemplo, a sua rua é ruidosa) ou, pior, não podem associar os padrões do mapa à sua própria experiência.

5.2.1 Principais modelos

Os modelos mais utilizados para avaliação da exposição a ruídos, em conjunto com a poluição do ar, são o SoundPLAN, o CadnaA e o TRANEX. O SoundPLAN é indicado como o principal software de previsão de ruído ambiente. É um pacote de *software* comercial que oferece módulos de simulação de alto nível para cálculos de poluição atmosférica e sonora. Para calcular o ruído do tráfego rodoviário, vários métodos de modelação europeus são implementados no SoundPLAN, incluindo, por exemplo, o modelo francês, NMPB2008, alemão, RLS 90 e vários métodos nórdicos: RTN 96 e Nord2000. Khan *et al.* (2018) usaram o SoundPLAN para avaliar os efeitos da exposição ao ruído do tráfego na saúde humana na Dinamarca (Khan, Ketznel, Kakosimos, Sørensen, & Jensen, 2018).

Para além dos métodos enunciados, o modelo europeu de emissões de ruído de tráfego rodoviário, IMAGINE - *Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment* que tem como fundação o HARMONOISE, é o modelo no qual se baseia a modelação de dados apresentados no presente trabalho.

5.2.2 HARMONOISE

Sempre foi intenção da Comissão Europeia estabelecer métodos de avaliação comuns para a produção de mapas de ruído. No entanto, até que esses métodos estivessem disponibilizados, a DRA definiu métodos provisórios. Estes métodos intercalares ou o método nacional de um Estado-Membro, se se puder mostrar equivalente ao método provisório, foram utilizados na primeira ronda de mapeamento em 2007. Como primeiro passo para o desenvolvimento de um método comum, o projeto HARMONOISE foi iniciado em agosto de 2001.

O projeto HARMONOISE pretendia desenvolver e validar métodos para a Avaliação e Gestão do Ruído do Tráfego Rodoviário e Ferroviário. O principal objetivo era estabelecer métodos harmonizados, precisos e fidedignos entre os futuros utilizadores em toda a CE. Os métodos a fornecer seriam implementados como obrigatórios ao abrigo da DRA e, como tal, iriam de encontro a uma ampla utilização para fins de planeamento, mapeamento, zoneamento, medidas e estratégias de redução do ruído e para verificações de conformidade (CORDIS, 2012).

No projeto HARMONOISE, é dada ênfase ao desenvolvimento da definição completa da emissão do veículo rodoviário europeu médio em bandas de 1/3 de oitava.

O modelo de emissões de ruído rodoviário descreve as emissões sonoras de um veículo rodoviário europeu "médio" em termos de potência sonora.

O modelo de emissão consiste em um conjunto de equações matemáticas representando as duas principais fontes de ruído:

1. Ruído de rolamento devido à interação pneu / estrada;
2. Ruído de propulsão produzido pela transmissão (motor, escape, etc.) do veículo.

As fórmulas matemáticas exibem a forma geral apresentada na equação 16.

$$L_{i,m}(v, a) = A_{i,m} + B_{i,m} \cdot f(v) \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

$f(v)$ sendo uma função logarítmica da velocidade do veículo v no caso de ruído de rolamento e aerodinâmico, e uma função linear com v no caso de ruído de propulsão. O nível de potência sonora $L_{i,m}$ é calculado em 1/3 de oitavas de 25 Hz a 10 kHz, onde o índice i indica a banda de frequência espectral. O índice m representa o tipo de veículo.

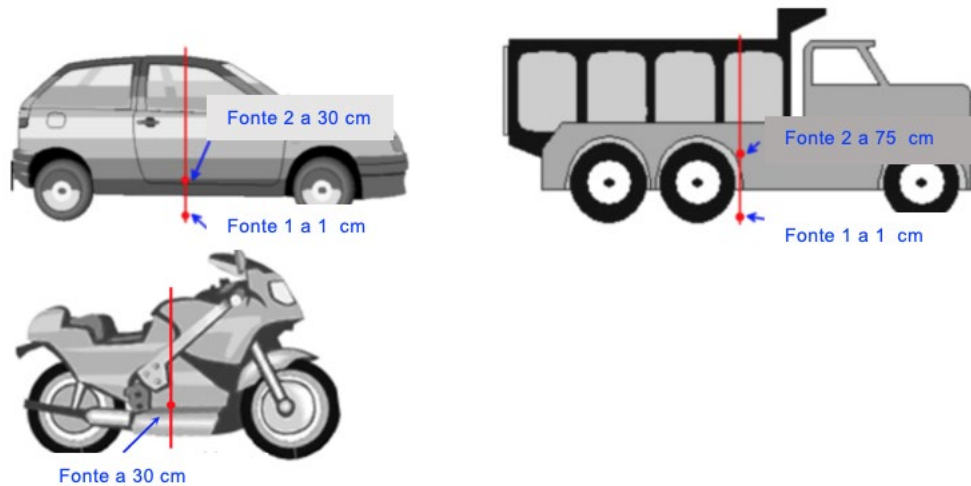
A produção de ruído de rolamento e de propulsão do veículo rodoviário à velocidade de referência de 70 km / h é representada pelos valores $A_{i,m}$. $B_{i,m} \cdot f(v)$ representam a mudança na produção de ruído devido a uma diferença na velocidade do veículo em relação a uma velocidade de referência (IMAGINE, 2007).

O modelo desenvolvido patenteia as seguintes características:

1. Cada veículo rodoviário tem dois tipos de fontes de ruído, um para o ruído de rolamento e outro para o ruído do sistema de propulsão;
2. As diferenças entre as características de emissão sonora dos veículos rodoviários são distinguidas através de categorias de veículos;
3. O efeito da superfície da estrada é implementado no ruído de rolamento e no nível de ruído de propulsão;
4. O efeito do comportamento de condução (velocidade e aceleração) é tido em conta na formulação da força de fonte para propulsão e ruído de rolamento.

Para o cálculo da propagação de ruído, a emissão L_W , cada veículo é representado por duas fontes pontuais, que são representadas na Figura 22. A fonte mais baixa situa-se a 0,01 m acima da estrada, a fonte mais alta situa-se a 0,3 m para veículos ligeiros e a 0,75 m para veículos pesados. O mais baixo carrega 80% da potência sonora de rolamento e 20% da potência de som de propulsão, o mais alto representa 20% do ruído de rolamento e 80% do ruído de propulsão. Para veículos de duas rodas, apenas é

definida uma fonte pontual a 30 cm de altura, uma vez que a contribuição do ruído de rolamento para estes veículos pode ser considerada insignificante (IMAGINE, 2007).



Adaptado de IMAGINE, 2007

Figura 22 - Posições da fonte do ruído

Ruído de rolamento

Para o ruído de rolamento, é utilizada a relação logarítmica geralmente aceite e amplamente validada entre a potência sonora e a velocidade de rolamento. A emissão L_{WR} é formulada equação 17.

$$L_{WR} = A_R + B_R \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad \text{Eq. 17}$$

Onde:

os coeficientes A_R e B_R são dados em bandas de 1/3 de oitava para cada classe de veículo, e $v_{ref} = 70 \text{ km / h}$.

Ruído de propulsão

A emissão de ruído de propulsão L_{WP} inclui todas as contribuições do motor, escape, engrenagens, entrada de ar, etc. Para o ruído de propulsão, a emissão L_{WP} é formulada pela equação 18.

$$L_{WP} = A_P + B_P \cdot \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \quad \text{Eq. 18}$$

Onde:

os coeficientes A_P e B_P são dados em bandas de 1/3 de oitava para cada classe de veículo, e $v_{ref} = 70 \text{ km / h}$. Isto é baseado no efeito combinado do efeito da velocidade

do veículo na velocidade do motor e o efeito da velocidade do motor no ruído (Salomons et al., 2011).

A emissão de ruído do veículo em termos de uma força de fonte de linha equivalente (potência sonora média por unidade de comprimento) $L_{W,line,eq}$ é dada pela equação 21.

$$L_{W,line,eq} = L_{W,0} + 10 \lg \frac{Q}{v} \quad \text{Eq. 21}$$

Onde:

$L_{W,0}$ é o nível de potência sonora instantânea do ruído de rolamento ou o ruído de propulsão de um único veículo. $L_{W,line,eq}$ é expresso em dB por m, Q em veículos por segundo e v em m / s.

As classes de veículos consideradas no projeto HARMONOISE são apresentadas no Quadro 17.

Quadro 17 - Classes de veículos identificadas no projeto HARMONOISE

Categoria principal (tipo de veículos)	Número	Subcategorias: Exemplos de veículos	Notas
Veículos ligeiros	1a	Carros ligeiros	2 eixos, máximo 4 rodas
	1b	Carrinhas, monovolumes, caravanas	2-4 eixos, máximo 2 rodas por eixo
	1c	Veículos elétricos, veículos híbridos	Motor de combustão
Veículos pesados médios	2a	Autocarros	2 eixos (6 rodas)
	2b	Camiões leves e carrinhas pesadas	2 eixos (6 rodas)
	2c	Camiões médios pesados	2 eixos (6 rodas)
	2d	Autocarros 2 pisos	2 eixos
	2e	Veículos de condução de baixo ruído ⁹	2 eixos
Veículos pesados	3a	Autocarros	3-4 eixos
	3b	Camiões pesados ¹⁰	3 eixos
	3c	Camiões pesados ⁹	4-5 eixos
	3d	Camiões pesados ⁹	≥ 6 eixos

⁹ Por exemplo, existem alguns camiões de entrega projetados para um ruído extra baixo combinados com um modo de direção chamado "modo silencioso".

¹⁰ Se for detetado um escape alto, deve ser categorizado como 3b', 3c', 3d' ou 4a'.

	3e	Autocarros 2 pisos	3-4 eixos
	3f	Veículos projetados para uma condução de baixo ruído ⁸	3-4 eixos
Veículos de duas rodas	4a	Ciclomotores, scooters	Inclui triciclos
	4b	Motociclos	

(Adaptado de IMAGINE, 2007)

Fatores de correção do modelo

No projeto HARMONOISE, foi demonstrado como os níveis de ruído são influenciados por condições meteorológicas como a velocidade e direção do vento e efeitos de inversão térmica. Para a determinação dos níveis médios de ruído a longo prazo, os níveis de curto prazo, válidos sob condições meteorológicas específicas, devem ser ponderados de acordo com sua frequência de ocorrência.

O tipo de superfície da estrada também influencia significativamente a produção de ruído de um veículo. São registadas diferenças de até 15 dB (A) para o mesmo veículo e velocidade. A superfície da estrada afeta principalmente o nível de ruído de rolamento, mas superfícies porosas e de absorção sonora também afetam o ruído de propulsão.

A expressão da emissão de ruído do fluxo do veículo em termos de uma força de fonte de linha equivalente mantém-se, uma vez que a forma das principais equações para o ruído de rolamento e propulsão não mudou, **nem o modelo de fonte pontual** (IMAGINE, 2007).

5.2.3 IMAGINE

O projeto IMAGINE, que começou em novembro de 2003, é um projeto de pesquisa que visa alargar as bases de dados de fontes HARMONOISE, no qual é dada ênfase ao desenvolvimento da definição completa da emissão do veículo rodoviário europeu médio em bandas de 1/3 de oitava. Os valores globais de emissões baseiam-se em medições extensas de eventos de passagem de diferentes tipos de veículos realizadas em diferentes áreas da UE. O objetivo geral de ambos os projetos é fornecer um modelo que satisfaça os requisitos do método de avaliação comum. O objetivo principal do IMAGINE é “Fornecer bases de dados predefinidas para a descrição da fonte do ruído rodoviário, ou seja, categoria do veículo e tipo de superfície da estrada, para uma frota típica do tráfego rodoviário europeu e fornecer orientações sobre como lidar com situações que se desviem do valor predefinido.” (IMAGINE, 2007).

Os pontos que foram adicionados e melhorados relativamente ao HARMONOISE foram:

- Uso de dados externos de SIG na modelação de ruído;
- Estimativa de populações expostas ao ruído;
- Determinação de L_{den} e L_n como grandezas médias a longo prazo;
- Pré-processamento de dados meteorológicos para calcular o L_{den} e o L_n .

A classificação de veículos segundo o IMAGINE é apresentada no Quadro 17.

Quadro 18 - Classes de veículos identificadas no projeto IMAGINE

Categoria	Nome	Descrição	Categoria de veículo segundo aprovação UE
1	Veículos ligeiros a motor	Ligeiros de passageiros, monovolumes e caravanas	M1 e N1
2	Veículos pesados médios	Veículos pesados médios, carrinhas de entrega com peso >3,5 toneladas com 2 eixos	M2, M3 e N2, N3
3	Veículos pesados	Veículos pesados, autocarros com 3 ou mais eixos	M2- e N2 com atrelado, M3 e N3
4	Veículos de duas rodas	4a Ciclomotores ou quadriciclos com 50 cm ³	L1, L2, L6
		4b Motociclos ou quadriciclos > 50 cm ³	L3, L4, L5, L7

(Adaptado de IMAGINE, 2007)

Existem parâmetros de entrada obrigatórios. Os principais parâmetros a considerar são a velocidade e a aceleração por classe de veículo e o número de veículos em cada classe. Uma lista completa das variáveis de tráfego necessárias é dada no Quadro 19.

Quadro 19 - Parâmetros de tráfego exigidos pelo modelo

Parâmetro	Descrição	Unidade
Fluxo de veículos: – Ligeiros de – Pesados – Motociclos	O número total de veículos por classe de veículo, por unidade de tempo, para toda a via ou faixa rodoviária; Um número de fluxo de veículos separado é necessário para camiões e pesados.	1/h
Velocidade dos veículos: – Ligeiros – Pesados – Motociclos	A velocidade dos veículos, por classe de veículo, pode ser dada como: – Um valor de velocidade “spot” para cada veículo; – Uma distribuição de velocidade, em que um valor de velocidade média é dado para intervalos de velocidade sucessivos, e a % de veículos para cada faixa; – Uma velocidade média para toda a classe de veículos.	km/h
Aceleração do veículo / desaceleração: – Ligeiros – Pesados – Motociclos	o valor de aceleração por classe de veículo, sendo negativo para a desaceleração de veículos, pode ser dado como: – um valor para cada veículo; – uma distribuição, para aceleração média e % de veículos; – uma aceleração média para toda a classe de veículos.	m/s ²

(Adaptado de IMAGINE, 2007)

5.3 Comparação entre modelos de ruído

Vários modelos de ruído são desenvolvidos com base noutros já existentes. Assentando num princípio de melhoria contínua, a estrutura, correções, equações, restrições e principais conclusões de alguns modelos utilizados na Europa são apresentados no Quadro 20.

Quadro 20 - Comparação entre modelos de ruído

Referência(s)	Modelo	Estrutura	Fatores de correção	Equação	Restrições	Principais conclusões
(IMAGINE, 2007) (Salomons <i>et al.</i> , 2011)	HARMONOISE	Modelo de propagação de ruído de tráfego rodoviário e ferroviário; Trabalha em bandas de 1/3 de oitava; Distingue classes de veículos; Distingue ruído de rolamento e ruído de propulsão	Categoria de veículos; Correções meteorológicas; Superfície da estrada; Correções de reflexão, difração e refração.	$L_{W,line,eq} = L_{W,0} + 10 \lg \frac{Q}{v}$	Restrito a perfis de velocidade sonora lineares; Não considera a reflexão de ruído pelos edifícios.	Mais preciso que o Nord2000; Emprega refração sonora através da curvatura do solo (melhor para simulações de curta a média distância).
(IMAGINE, 2007)	IMAGINE	Apresenta a mesma estrutura que o HARMONOISE exceto: <ul style="list-style-type: none"> A contribuição do ruído de propulsão diminuiu significativamente; Removida a categoria “Outros veículos pesados. 	Adota as mesmas correções do HARMONOISE e acrescenta; Modo de condução (aceleração e desaceleração); Correções regionais; Dados de motociclos.	$L_{W,line,eq} = L_{W,0} + 10 \lg \frac{Q}{v}$	Não considera a reflexão de ruído pelos edifícios; Insuficiência de dados para velocidades inferiores a 70 km/h.	Permite o cálculo do nível sonoro instantâneo a uma dada velocidade e aceleração. Destaca o facto da velocidade não ser um parâmetro linear.

Referência(s)	Modelo	Estrutura	Fatores de correção	Equação	Restrições	Principais conclusões
(Salomons <i>et al.</i> , 2011) (Jonasson, 2006)	Nord2000	Modelo de propagação de ruído de tráfego rodoviário e ferroviário; Trabalha em bandas de 1/3 de oitava; Distingue classes de veículos;	Categoria de veículos; Correções meteorológicas; Superfície da estrada; Refração.	$L_E = L_{Wp} - 10 \lg(4\pi r) + 10 \lg \left[\int_{t_1}^{t_2} \frac{\delta(t) \cdot \Delta W(t)}{r^2 r^2 + a^2 + (h_r - h_s)^2} dt \right]$	Restrito a perfis de velocidade sonora lineares; Não considera a reflexão de ruído pelos edifícios; Não distingue ruído de rolamento e ruído de propulsão	Emprega refração sonora curva (melhor para simulações a longa distância);
(Gulliver <i>et al.</i> , 2015)	TRANEX	Desenvolvido em Londres com base em outro modelo, CoRTN, modelo utilizado no mapeamento estratégico de ruído no Reino Unido Modelo de propagação de ruído de tráfego rodoviário;	Categorias de veículos; Velocidade do tráfego; Superfície da estrada; Existência de barreiras de som; Reflexo de ruído dos edifícios envolventes; Código-postal (para precisão da localização).	$L = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right]$	Restrito a perfis de velocidade sonora lineares; Não considera refração e absorção atmosférica; Não considera efeitos meteorológicos; Não considera secções elevadas (pontes, etc.)	Devido à informação sobre o tráfego, incluindo velocidades e informação detalhada acerca da cobertura e altura dos edifícios individuais em Londres, pode ser aplicado em áreas que estejam disponíveis estes dados.

O modelo de propagação HARMONOISE é um modelo de engenharia elegante para propagação de som ao ar livre e representa um "passo adiante" em relação a modelos de engenharia mais antigos. O HARMONOISE difere do Nord2000 pelo modo como a refração atmosférica é levada em conta. Enquanto o Nord2000 emprega raios de som curvos, o HARMONOISE é responsável pela refração pela curvatura do solo (Salomons *et al.*, 2011). A boa ideia de curvatura do solo parece funcionar bem, pelo menos para distâncias moderadas de propagação. Para grandes distâncias, no entanto, múltiplos reflexos do solo tornam-se importantes (em particular para o solo duro), e essas reflexões não são levadas em consideração (explicitamente) pelo HARMONOISE. Em contraste, o Nord2000 inclui um termo de correção para explicar múltiplos reflexos do solo em uma atmosfera refratária para baixo.

Verificou-se neste estudo (Salomons *et al.*, 2011) que o HARMONOISE apresenta um desempenho melhor do que o Nord2000 para um caso com refração descendente sobre um fundo plano de 300 m, tanto para o solo rígido como para a absorção do solo. Ambos os modelos estão restritos a perfis de velocidade de som linear.

Os modelos de código aberto para mapeamento / simulação de ruído estão a tornar-se cada vez mais populares devido à sua fácil disponibilidade e bom desempenho. TRANEX (Gulliver *et al.*, 2015) é um dos modelos de código aberto frequentemente utilizados. Trata-se de um modelo de ruído parametrizado baseado no método modificado CoRTN (*UK's Calculation of Road Traffic Noise*). Uma comparação das medições de campo e relatou que o CoRTN superestimou os níveis de ruído na maioria das vias urbanas. No entanto, o TRANEX mostrou altas correlações entre o ruído modelado e medido em duas cidades inglesas, Leicester ($r = 0,95$) e Norwich ($r = 0,85$) (Gulliver *et al.*, 2015). Apresenta assim, um potencial significativo para uso em mapeamento de ruído e / ou estudos relacionados à saúde.

Um recente estudo, que se propôs a realizar a modelação e caracterização do ruído ambiental para a autoestrada A23, no troço entre Castelo Branco e Alcains, utilizando *software* comercial de previsão de ruído (NMPB-Routes-96) para contribuir para a sua mitigação. Os resultados em termos de níveis de ruído foram validados através da comparação entre valores medidos e valores calculados em pontos e recetores. O estudo concluiu que, um aspeto crucial para garantir a eficiência e a sustentabilidade das medidas de controle de ruído que podem ser implementadas no futuro nessas rodovias é o planeamento territorial a nível municipal, para evitar o aparecimento de novas zonas residenciais com alta sensibilidade acústica (Carvalho, Cavaleiro, Albuquerque, & Silva, 2018).

6. Equipamentos de medição de ruído

Neste capítulo são apresentados os equipamentos de medição oficiais e dispositivos móveis para aplicações de medição de ruído.

6.1 Equipamentos de medição oficiais

Os sonómetros destinados a medições de ruído ambiente possuem um papel fundamental no âmbito em como se enfrentam os desafios acústicos dos dias que correm, orientados, principalmente, para a proteção do público contra o ruído. A incomodidade sonora tem muitas fontes possíveis: transportes, desde automóveis e camiões a comboios e aeronaves; atividades industriais, como oficinas, estaleiros de construção e indústria; atividades de lazer como discotecas, festivais e estádios; e atividades pessoais em casa (ruído de vizinhança).

A avaliação acústica de incomodidade através da medição dos níveis sonoros na envolvente da instalação para avaliação das emissões acústicas é feita com sonómetros.

Em Portugal isto é feito, utilizando sonómetros e verificando a conformidade com o Critério de Incomodidade previstos no nº 1 do artigo 13º do RGR, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro (dBwave.i – ISQ, 2018).

Das características que influenciam a incomodidade surgem os requisitos de medição dos sonómetros:

1. Nível de pressão sonora - Elevada precisão porque estão envolvidas questões legais, homologados por laboratórios fidedignos.
2. Espetro - Com capacidade de análise de espectro de frequência. Normalmente requer-se a capacidade de medir o espectro em 1/3 de oitava.
3. Características temporais impulsivas ou constantes - Com capacidade de medir com as constantes de tempo de *fast* e *impulse* em simultâneo;
4. Tempo de exposição - Com memória para medir durante períodos prolongados (dBwave.i – ISQ, 2018).

Quase todos os aparelhos apresentam várias constantes de tempo, sendo as mais utilizadas as seguintes:

- *slow* (resposta lenta), com elevado amortecimento e um tempo de integração de, aproximadamente, 1 s;
- *fast* (resposta rápida), com um amortecimento pequeno e um tempo de integração de 125 ms;
- *impulse* (impulso), com um tempo de subida muito rápido e um tempo de descida amortecido (35 ms);
- *peak* (pico), com um tempo de subida muito rápido e sem tempo de descida.

Segundo o Guia prático para Medições de Ruído Ambiente (APA, 2011), contextualizado no Regulamento Geral do Ruído e tendo em conta a NP ISO 1996, deve ser utilizado um sonómetro de modelo homologado pelo IPQ, que detenha certificado de verificação válido para esse ano, preferencialmente, da classe de exatidão 1 e possuir devida homologação do IPQ, como o da Figura 23 (dBwave.i – ISQ, 2018).

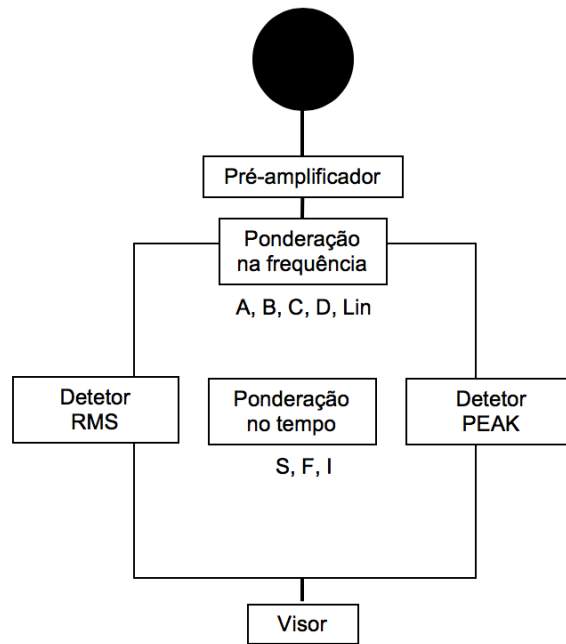


(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 23 - Sonómetro SVANTEK SV971E

Para a validação dos dados, antes e após das medições, deve ser feita uma verificação com um calibrador portátil. Se o desvio verificado for superior a 0,5 dB, os resultados não serão aceites.

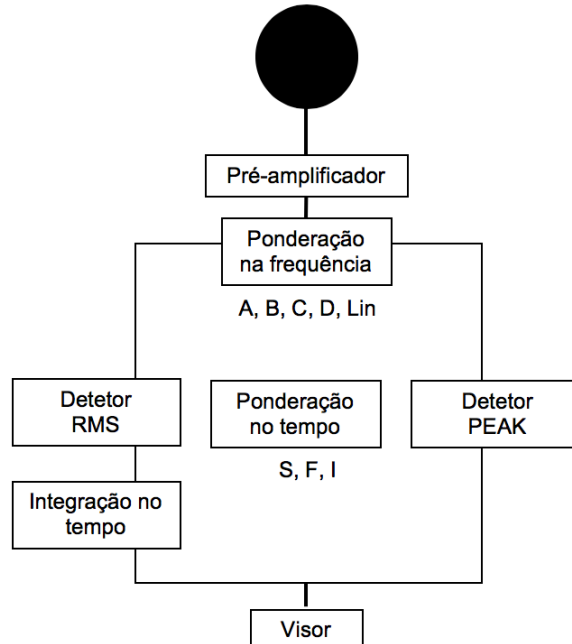
De um modo simplificado, um sonómetro funciona do modo apresentado na Figura 24.



(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 24 - Representação de funcionamento de um sonómetro

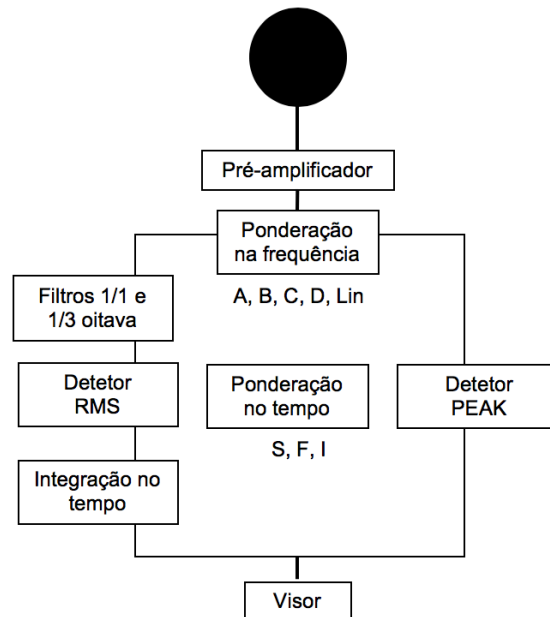
Já um sonómetro integrador sem análise em frequência funciona do modo apresentado na Figura 25.



(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 25 - Representação de funcionamento de um sonómetro integrador sem análise em frequência

Finalmente, um sonómetro integrador com análise em frequência funciona do modo apresentado na Figura 26.



(Adaptado de dBwave.i – ISQ, 2018)

Figura 26 - Representação de funcionamento de um sonómetro integrador com análise em frequência

O exemplo de modelo de sonómetro apresentado, SVANTEK SV971E, aprovado pelo Instituto Português da Qualidade, no âmbito do regime geral do controlo metrológico, pelo Despacho n.º 10675/2014 de aprovação de modelo n.º 245.71.14.3.03 de 23 de junho de 2014, publicado no Diário da República, 2.ª série, n.º 158, de 19 de agosto de 2014, o sonómetro da marca SVANTEK, modelo SVAN 971 é um sonómetro de classe I, extremamente pequeno com opção de análise em 1/3 de oitava. O SVAN 971 oferece uma forma de utilização extremamente simples apenas com *Start/Stop*. Esta inovação torna o SVAN 971 a escolha ideal para muitas aplicações, incluindo ruído ocupacional, ruído ambiente, e medições de ruído em geral (dBwave.i – ISQ, 2018).

O controlo metrológico dos métodos e instrumentos de medição em Portugal obedece ao regime geral aprovado pelo Decreto-Lei n.º 291/90, de 20 de setembro, que tem como objetivo fundamental a completa harmonização do regime anteriormente aplicável ao controlo metrológico (Decreto-Lei n.º 202/83, de 19 de maio) com o direito comunitário. Pressupõe a atribuição das marcas CEE de aprovação de modelo e de primeira verificação a que as competentes entidades portuguesas poderão passar a proceder às disposições regulamentares gerais previstas no Regulamento Geral do Controlo Metrológico, aprovado pela Portaria n.º 962/90, de 9 de Outubro, e ainda às disposições constantes das portarias específicas de cada instrumento de medição e à Portaria n.º 977/2009, que aprova o Regulamento do Controlo Metrológico dos Sonómetros e revoga a Portaria n.º 1069/89, de 13 de Dezembro.

6.2 *Smartphones* enquanto equipamentos de medição móveis

Os *smartphones* tornaram-se indispensáveis para a maioria dos cidadãos adultos nos países desenvolvidos do mundo. Em outubro de 2014, 64 por cento dos adultos dos Estados Unidos da América possuíam algum género de *smartphone* (Murphy & King, 2016). Para demonstrar a rapidez com que os *smartphones* se infiltraram no mercado dos EUA, o valor correspondente para a primavera de 2011 foi de 35 por cento. Internacionalmente, pesquisas mais recentes cobrindo 32 países estimam que 80% dos usuários de internet possuem um *smartphone*. Destes, 54 por cento dos telefones utilizam o sistema operacional *Android*, 16 por cento operam o iOS e o restante vem de sistemas operacionais alternativos, como o *Windows*, etc. (Murphy & King, 2016).

Tornou-se comum os profissionais de acústica utilizarem os seus *smartphones* para alguns tipos de caracterização do campo sonoro. Está claro que nunca um *smartphone* será um sonómetro homologado, com as devidas homologações necessárias para efetuar medições para fins legais, mas por outro lado já é uma ferramenta ágil para a caracterização de alguns parâmetros acústicos, como seja por exemplo a identificação de uma frequência de um som.

Algumas tendências tecnológicas que vão condicionar o futuro da aplicação dos *smartphones* como sonómetros homologados são:

1. A capacidade de cálculo existente num *smartphone*, que cresce de forma exponencial e é maior do que tínhamos nos computadores portáteis há alguns anos;
2. A constante miniaturização de todo o tipo de instrumentação;
3. Integração da instrumentação com servidor de internet e;
4. Renitência dos laboratórios de acreditação em homologarem instrumentação baseada em PC e similares como sejam nomeadamente os *smartphones*;

É possível conceber um sonómetro de dimensões reduzidas que contenha as seguintes funcionalidades:

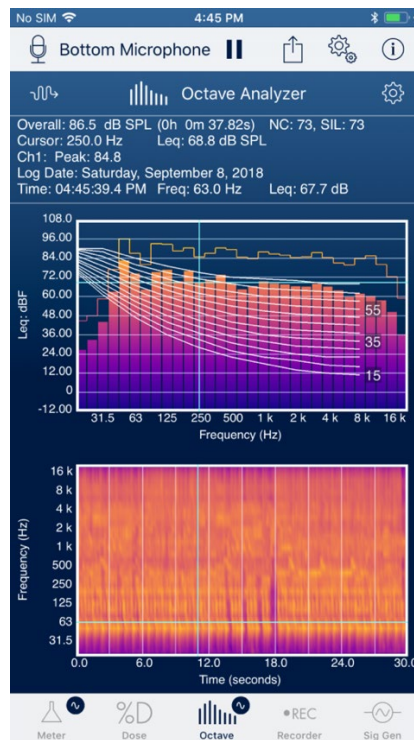
- Microfone e pré-amplificador;
- Funcionalidades de medição (L_{Aeq} , etc.);
- Registo em memória;
- Servido de web para visualização de resultados, configuração e comunicação com *smartphone*;

Resultados de desempenho obtidos pelo *Geekbench*, que é uma ferramenta popular de *benchmark* de desempenho entre plataformas, mostram que o *iPhone 7* funciona tão

bem quanto o processador *Intel Core i5*. Os sistemas *Android* e *iOS* são as duas principais plataformas operacionais móveis em todo o mundo e respondem por quase 99,7% do mercado de *smartphones* atualmente, com 85% e 14,7% de participação de mercado, respetivamente, tornando-se assim as duas escolhas naturais para desenvolvimento de aplicações móveis. Aplicações móveis como *NoiseTube*, *SoundPrint* e *iHEARu* são alguns dos exemplos de aplicações em que os utilizadores podem usar seus *smartphones* para relatar os níveis de ruído e geolocalização usando o áudio e GPS dos dispositivos (sistema de posicionamento global) para mapear níveis de ruído em cidades ou classificar restaurantes e locais de entretenimento com base no ruído ambiente (Celestina, Hrovat, & Kardous, 2018).

Embora os *smartphones Android* dominem a participação no mercado mundial, o *iOS* continua a ser a plataforma de desenvolvimento preferida para aplicações de medição de áudio e de som. Isto deve-se principalmente ao facto de todos os dispositivos móveis *iOS* compartilharem uma arquitetura de áudio comum chamada *Core Audio* e porque normalmente não há mais de 15 variações atuais de dispositivos móveis *iOS* (incluindo variantes com tamanho de ecrã diferente) com 86% executando a versão mais recente do *iOS* e 97% desses dispositivos executando um *iOS* que não tem mais de dois anos. Em contraste, o mercado do *Android* é muito mais fragmentado, com muitos fabricantes diferentes produzindo um grande número de dispositivos móveis que vão desde dispositivos menos potentes, de baixo custo a poderosos e de alta qualidade, e muitas vezes dependendo de muitos fornecedores diferentes para microfones e áudio. ferramentas de processamento e *chipsets*, além disso, apenas 11,5% dos dispositivos *Android* executam a versão mais recente do *Android* (Celestina *et al.*, 2018).

Há apenas um pequeno número de estudos que investigaram questões relevantes para a pesquisa atual (Murphy & King, 2016). Num teste de precisão de 10 aplicações *iOS* e 4 aplicações *Android* para medir o ruído em âmbito ocupacional em 8 *smartphones* e um *tablet*, a aplicação de ruído do *iOS* – *SoundMeter* (Figura 27), desenvolvido pela *Faber Acoustical* - tem a melhor concordância em níveis ponderados A (-0,52), com valores de referência, enquanto outras três aplicações para o *iOS* estavam dentro de ± 2 dB (A) de referência valores. Conduz a conclusões de que os dispositivos que executam o *iOS*, em particular, têm um objetivo significativo para serem utilizados como dispositivos de avaliação para ambientes ocupacionais. Os dispositivos que correm o sistema operacional *Android* são menos adequados para ambientes ocupacionais, porque geralmente, são construídos por diversos fabricantes o que origina uma falta de conformidade nos microfones aplicados e outros componentes de áudio nestes dispositivos (Murphy & King, 2016).



(Adaptado de Faber Acoustical, 2018)

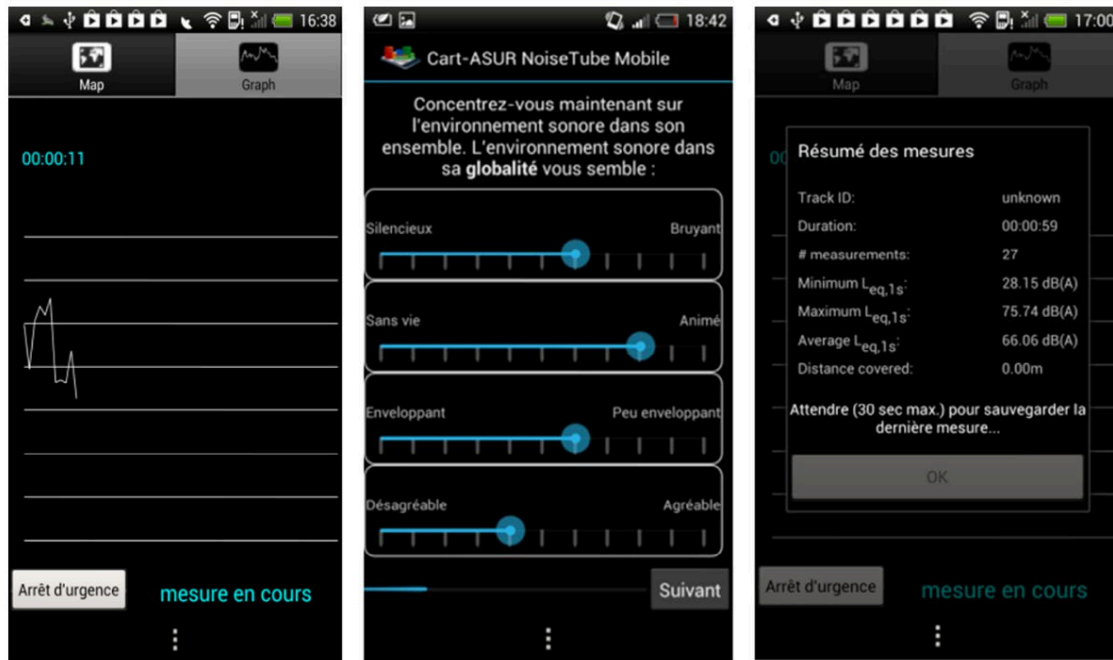
Figura 27 - Captura de ecrã da aplicação SoundMeter em iOS

Um estudo examinou 100 telefones móveis (modelos e sistemas operacionais diferentes) com várias aplicações de medição de som (Murphy & King, 2016). Os resultados mostram que há uma variabilidade significativa entre dispositivos (desvio padrão de 6,81 dB) e, em média, o nível medido desviou 2,93 dB(A) do valor verdadeiro em dispositivos iOS e 2,79 dB(A) em dispositivos *Android*. Concluíram que os dispositivos móveis não estão totalmente prontos para substituir os medidores de nível de som e que a precisão geral geralmente depende da idade e das condições do *smartphone* e do microfone interno.

Aumond *et al.* (2017) examinaram a precisão dos dispositivos móveis para medir a poluição sonora urbana. Realizaram um total de 3409 medições de ruído usando 60 telefones celulares em 28 locais selecionados em Paris, em paralelo com estações fixas de monitorização de ruído e um sonómetro. Ao processar a abundância de dados de ruído reunidos por 60 participantes, atenuaram o efeito da variabilidade entre dispositivos e concluíram que os telefones móveis poderiam ser uma ferramenta útil de medição de ruído.

Embora a pesquisa tenha sido realizada apenas em dispositivos baseados no sistema operativo *Android* (HTC-One X), demonstrado na Figura 28, demonstraram que os níveis de ruído medidos com telefones móveis calibrados se correlacionam fortemente

com a estação de monitorização de ruído e medições do sonómetro (*root mean square error* menor que 3 dBA).



(Adaptado de Murphy & King, 2016)

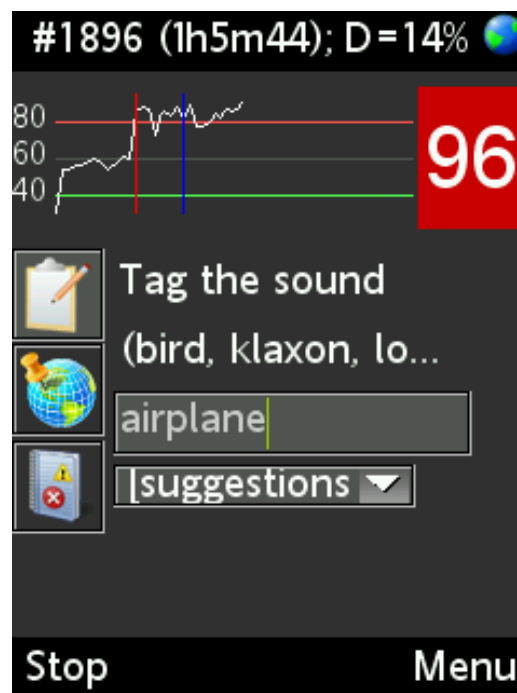
Figura 28 - Captura de ecrã da aplicação CART_ASUR em Android

A questão mais importante com o uso de *smartphones* e aplicações de medição de som até hoje é que nenhum deles cumpre com os padrões internacionais de sonómetro, como a norma internacional IEC 61672-1: 2013 e, como resultado, não podem ser utilizados para fazer monitorizações de ruído ambiente ou ocupacional regulamentadas. Para abordar esta questão, submeteu-se um sistema de medição de nível de ruído, que consiste numa aplicação de medição de ruído desenhada para dispositivos iOS desenvolvido internamente; um microfone externo, compatível com a Classe 2, disponível comercialmente; e um *smartphone* baseado em iOS para os requisitos de Classe 2 do padrão IEC 61672. Concluindo, ao executar uma calibração de nível profissional, a entrada de áudio de um *smartphone* tem um bom desempenho, e os resultados da maioria dos testes estão dentro dos limites da Classe 2 do padrão IEC. Concluiu-se que o medidor de nível de som baseado de uma aplicação tem um bom desempenho, dado que um microfone de medição externo é utilizado e mostra potencial para ser usado como um dispositivo de medição adequado (Celestina *et al.*, 2018).

6.2.1 Aplicação móvel *NoiseTube*

A poluição sonora é um problema sério em muitas cidades. O *NoiseTube* é um projeto de pesquisa iniciado em 2008 no *Sony Computer Science Lab*, em Paris, e atualmente a sua gestão é feita pelo *Software Languages Lab* na *Vrije Universiteit Brussel*. O projeto *NoiseTube* propõe uma abordagem participativa para monitorizar a poluição sonora, envolvendo o público em geral. A aplicação móvel *NoiseTube* amplia o uso atual de telefones móveis transformando-os em sensores de ruído, permitindo que os cidadãos meçam a exposição do som no ambiente quotidiano. Além disso, cada utilizador pode participar da criação de um mapa coletivo de poluição sonora ao partilhar os dados de medição geolocalizados com a comunidade *NoiseTube*.

A aplicação é gratuita e é possível medir o nível de ruído em dB (A) e marcar as medidas obtidas (por exemplo, nível subjetivo de aborrecimento, fonte de som, etc), como é possível observar pela Figura 29, que representa a interface da aplicação. Quando carregado para o site (através de rede móvel, Wi-Fi ou manualmente), é possível verificar a trajetória do som suas medições no *Google Maps* (*NoiseTube*, 2008).



(Adaptado de Noisetube, 2008)

Figura 29 - Interface da aplicação *NoiseTube* para dispositivos móveis

7. Caso de estudo

Neste capítulo é caracterizado o local de estudo, quais as principais vias de acesso, passagens de veículos e apresentado o método de recolha e tratamento de dados.

7.1 Descrição do local

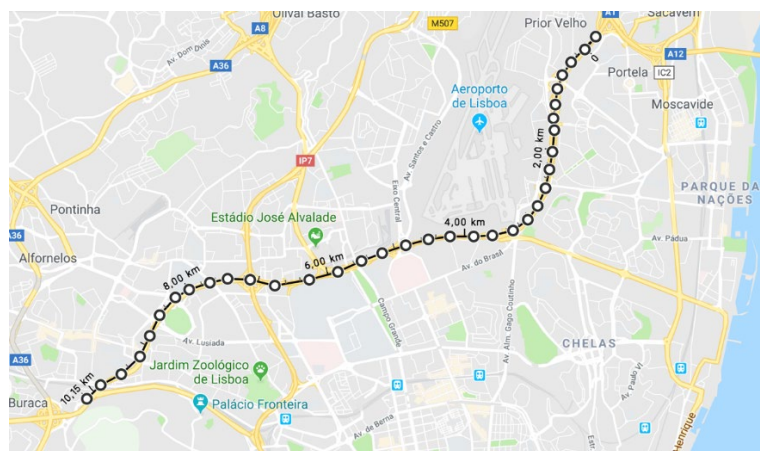
Para o caso de estudo foi selecionada uma via de tráfego rodoviário intenso, classificada como GIT Rodoviário, com mais de 3 milhões passagens/ano.

Atualmente, a Segunda Circular atravessa a cidade de Lisboa na sua coroa norte, ligando (a poente) o nó rodoviário entre a CRIL e o IC19 ao nó rodoviário (a nascente) entre a A1, a CRIL e a Ponte Vasco da Gama, conforme a Figura 30.

Esta via encontra-se frequentemente congestionada, tem funções desadequadas e alguns dos troços estão em mau estado de conservação.

Em detalhe, o traçado da Segunda Circular é constituído pelas seguintes artérias:

- Avenida Eusébio da Silva Ferreira (entre o nó com o IC17/IC19/Radial de Benfica e o nó do C. C. Colombo/Estádio da Luz);
- Avenida General Norton de Matos (entre o nó do C. C. Colombo/Estádio da Luz e o nó do Campo Grande); e,
- Avenida Marechal Craveiro Lopes (entre o nó do Campo Grande e o nó do Prior Velho).



Adaptado de *Google Maps*, 2018

Figura 30 - Representação da extensão 2ª circular

Os dados de tráfego rodoviário apresentados têm como referência o Estudo de Requalificação da 2ª circular elaborado pela TIS (Transportes, Inovação e Sistemas) em 2015, e como tal, não se considerou uma projeção futura de evolução do tráfego atendendo, por um lado, devido à evolução no passado recente na cidade de Lisboa e, por outro, ao maior impacte esperado por via das intervenções pensadas para o sistema de infraestruturas da cidade e geração do aeroporto.

No âmbito do processo de requalificação, estava equacionada a hipótese de transformação da Segunda Circular numa Via Estruturante Urbana da cidade, perdendo definitivamente as funções de âmbito regional que desempenha até aos dias de hoje. Esta alteração decorreria e tornar-se-ia possível devido ao fecho da CRIL e do Eixo Norte-Sul.

As intervenções mais relevantes e de maior impacte previstas no âmbito do projeto de reordenamento e beneficiação da 2ª Circular centram-se no troço compreendido entre o nó do Centro Comercial Colombo/Estádio da Luz e o nó do Campo Grande. Estas alterações terão naturalmente impactes não só na própria via, mas também no tráfego da rede rodoviária existente na sua envolvente imediata.

A TIS considerou como base de trabalho o modelo de tráfego da cidade de Lisboa, atualizado em 2015 no âmbito do estudo realizado para a Câmara Municipal de Lisboa. Por se tratar de um modelo atualizado, constituiu uma boa base de trabalho para o presente estudo, tendo sido alvo de uma pormenorização adicional na zona envolvente à 2ª Circular e dotado de novos trabalhos de campo de modo a auxiliar a caracterização da procura (TIS, 2015).

Trata-se de um modelo de tráfego à escala da Área Metropolitana de Lisboa (AML), considerando as principais ligações regionais de ligação à cidade de Lisboa. Para uma caracterização mais rigorosa, o modelo rodoviário é mais rico em detalhe e pormenor no interior do município de Lisboa, considerando toda a malha do sistema de transporte individual, devidamente caracterizada de acordo com a sua hierarquia e funcionalidade.

O período de análise considerado respeita à hora de ponta, com distinção entre a Hora de Ponta da Manhã (HPM, 08:00 – 09:00) e a Hora de Ponta da Tarde (HPT, 18:00 – 19:00), com posterior conversão para valores de Tráfego Médio Diário Anual (TMDA), com base na análise de contagens horárias das vias principais de acesso à cidade de Lisboa (A1, IC17, IC19, IC2, IC22 e IP7).

Observando os volumes de tráfego na rede de Lisboa, verifica-se que a 2ª Circular é, claramente, o eixo municipal mais carregado da cidade, equiparando-se a vias de grande importância regional, como são os casos do IC19, Ponte 25 de Abril ou A5.

A ligação entre a Azinhaga das Galhardas e a Rotunda do Relógio apresenta volumes de tráfego muito próximos dos 130.000 veículos/dia (2 sentidos).

Segundo o estudo, a 2ª Circular apresentava um TMDA de 105.000 veículos/dia nos dois sentidos. Apesar de a velocidade máxima permitida ser 80 km/h, a velocidade média em hora de ponta é de 45,7 km/h, fruto de um rácio volume / capacidade acima de 90%. Em média, cada veículo percorre cerca de 3,0 km na 2ª Circular, correspondente a cerca de 30% da sua extensão total (≈ 10 km).

Os 3 principais pares Origem Destino (OD) de entrada e saída na 2ª Circular ocorrem a partir do nó da CRIL/IC19, com destino ao Eixo Norte-Sul, à Rotunda do Relógio e à Av. Lusíada (Quadros 21 e 22).

Estes 3 pares OD representam cerca de 58 500 veículos por dia (nos 2 sentidos), equivalente a cerca de 15 % do total de viagens que utilizam a 2ª Circular.

Considerando apenas a categoria de pesados (veículos com peso bruto superior a 3 500 kg ou com lotação superior a 9 lugares, incluindo o do condutor), constata-se que um dos pares OD com maior volume médio diário é o percurso integral da 2ª Circular, com cerca de 365 veículos por dia, nos 2 sentidos, correspondente ao 3º par OD mais representativo desta categoria de veículos.

No caso da categoria de veículos ligeiros (veículos com peso bruto igual ou inferior a 3 500kg e com lotação não superior a 9 lugares, incluindo o do condutor), esta mesma viagem tem uma expressão na ordem dos 5 500 veículos por dia, nos 2 sentidos, com uma representação mais residual face ao total de viagens desta categoria (TIS, 2015).

Quadro 21 - TMDA por OD total

Par OD	TMDA (Total)
Nó CRIL/IC19 – Nó Eixo-NS	20 200
Nó CRIL/IC19 – Nó Rotunda do Relógio	20 100
Nó CRIL/IC19 – Nó Colombo/Estádio da Luz	18 200
Nó Calvanas – Nó Rotunda do Relógio	14 900
Nó Aeroporto/Av. Berlim – Nó CRIL/A1	14 600

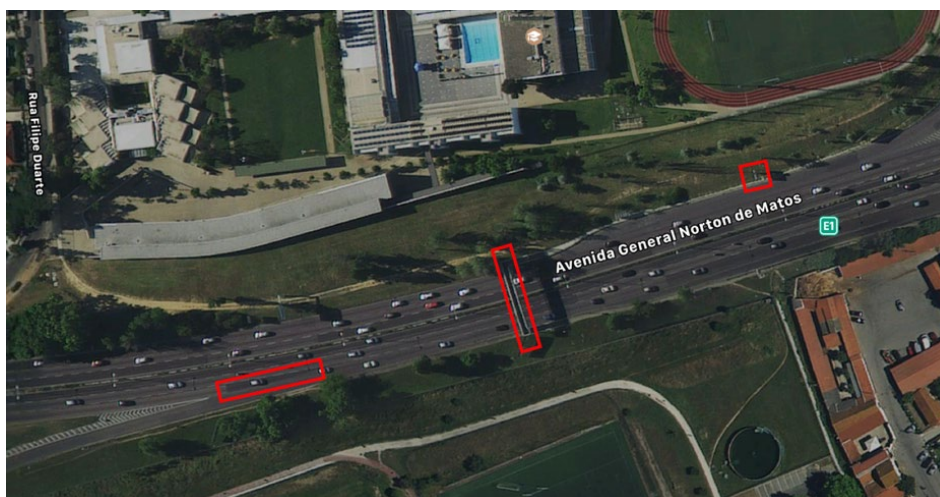
(Adaptado de TIS, 2015)

Quadro 22 - TMDA de pesados por par OD

Par OD	TMDA (Pesados)
Nó CRIL/IC19 – Nó Rotunda do Relógio	435
Nó CRIL/IC19 – Nó Eixo-NS	390
Nó CRIL/IC19 – Nó CRIL/A1	365
Nó Aeroporto/Av. Berlim – Nó CRIL/A1	310
Nó Calvanas – Nó Rotunda do Relógio	280

(Adaptado de TIS, 2015)

O local de recolha de dados situa-se na ponte pedonal da 2ª circular, junto ao Colégio Alemão (Figuras 31 e 32).



Adaptado de *Apple Maps*, 2018

Figura 31 - Zona de recolha de dados e pontos de referência



Figura 32 - Ponte pedonal (local de recolha dos dados) e segunda circular

7.2 Metodologia

A metodologia aplicada no presente trabalho consistiu em:

- Pesquisa bibliográfica;
- Recolha de dados de imagem, vídeo e fotografias;
- Recolha de dados de som;
- Levantamento de informação relevante acerca da via de tráfego;
- Visitas ao local de ensaio;
- Tratamento dos dados de vídeo e som;
- Desenvolvimento de matriz de correlação multilinear com o *software* SPSS;
- Desenvolvimento de modelo de ruído.

De modo a enquadrar o tema, a pesquisa bibliográfica incidiu sobre livros, artigos, teses, sites da especialidade e outras fontes.

A recolha de dados de imagem e som consistiram no trabalho de campo efetuado por um estagiário ao qual é dado o devido crédito. Os telemóveis, para captura de som e câmaras de vídeo, para captura de imagem, estavam num suporte de arame na ponte pedonal sobre a segunda circular, junto ao colégio Alemão, como é possível observar pelas Figuras 33 e 34. Os telefones usados foram um *iPhone 6 Plus* e um *iPhone 5* com a aplicação *NoiseTube* instalada, já descrita no capítulo 5.2.1.



Figura 33 - Esquema de captura de som e imagem montado na ponte pedonal

Posteriormente foi feito o levantamento de informação relevante sobre o tráfego em Portugal e na via em questão, assim como da legislação aplicável sobre o tema.

O tratamento de dados de vídeo e som foi feito a partir da conversão, com recurso ao *website* <https://json-csv.com>, de ficheiros com a extensão .json (dados em bruto provenientes do *NoiseTube*) para .csv, em *Microsoft Excel* para maior facilidade de tratamento de dados. Em simultâneo, foi feita a contagem manual do número de viaturas com recurso a imagens vídeo para os dois sentidos, sentido M1 (Campo Grande – Benfica) e sentido M2 (Benfica – Campo Grande) para cruzar com os dados de som, já em .xlsx. Para tal, foram contabilizados 60 intervalos de 20 segundos para ambos os sentidos de contagem de veículos do dia 20 de maio de 2016. Para cada segmento de contagem existem 3 intervalos de 20 segundos, conforme o Anexo I.



Figura 34 - Esquema de captura de dados de imagem

Para o cálculo da velocidade, um dos *inputs*, foi necessária uma visita ao local de ensaio, para medir distâncias entre pontos facilmente reconhecíveis nos ficheiros de vídeo, representado pelo esquema da Figura 35, esquema este elaborado manualmente a partir da Figura 31. Com o auxílio do *software* VLC (videolan, 2018) e a extensão *Time* (addons.videolan, 2018) foi possível calcular o tempo que cada veículo demorava

entre os pontos de referência. O tempo que cada veículo demorou entre os pontos de referência foi calculado com a precisão até milésimos de segundo. Para o cálculo da velocidade foram utilizados os pontos de referência A e D, para os sentidos M1 e M2, respetivamente. Foi calculada, assim, a velocidade média para um veículo em cada intervalo de 20 segundos para todas as faixas de rodagem, em ambos os sentidos, conforme o Anexo V.

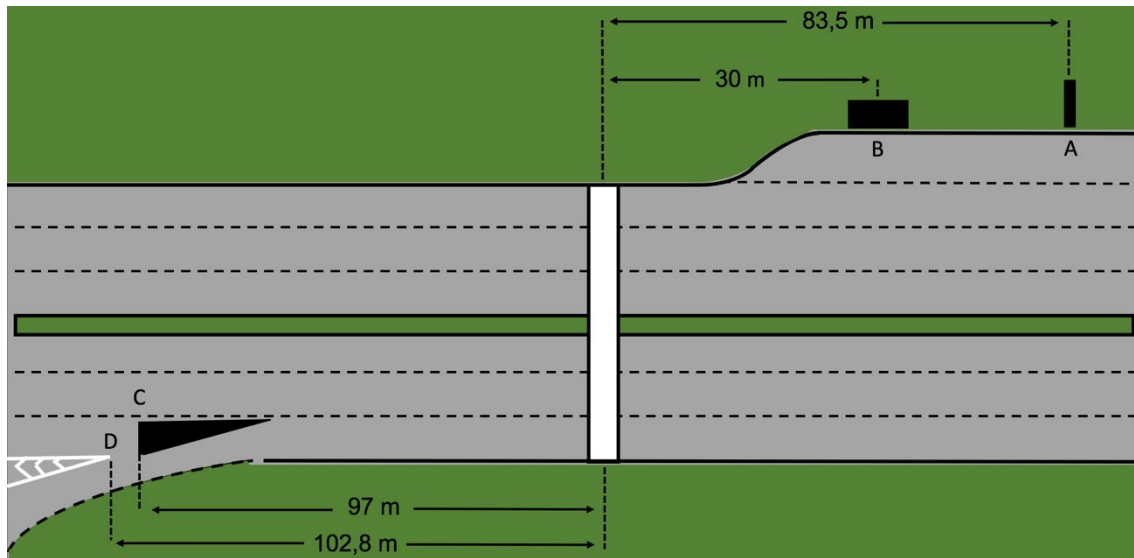


Figura 35 - Esquema de distâncias entre pontos de referência

Estes dados permitiram o desenvolvimento de uma matriz de correlação multilinear, conforme o Anexo II, recorrendo ao *software* SPSS, com vários *inputs*.

Posteriormente, para o desenvolvimento do modelo de nível de ruído em função da velocidade e quantidade de veículos, foi utilizado o RStudio, *software* gratuito de tratamento estatístico de dados. O modelo construído baseia-se na expressão do modelo IMAGINE em função da velocidade e quantidade de veículos. O código que permitiu o seu desenvolvimento e respetivos resultados encontra-se no Anexo VI.

De modo a entender o nível de aceitação do modelo obtido, foi feita a análise de dados reais *versus* dados simulados e os respetivos resíduos.

8. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de acordo com os fatores em avaliação e com os procedimentos realizados.

Numa primeira instância, para fazer face aos resultados apresentados pelo estudo da TIS, foi feita a quantificação do número de veículos por tipologia, representada no Quadro 23. Estes dados permitem efetuar uma extrapolação para comparar com dados diários/anuais de tráfego na via em consideração.

Quadro 23 - Contabilização do número de veículos por tipologia

Tipologia	Sentido	
	M1	M2
Ligeiros	785	775
Pesados	16	24
Motociclos	12	33
Veículos emergência ¹¹	0	2
Total	813	834

Como já foi apresentado no capítulo da metodologia adotada, foram contabilizados 60 intervalos de 20 segundos para ambos os sentidos. É de seguida apresentada a média de veículos para cada sentido, no Quadro 24.

Quadro 24 - Média do número de veículos por minuto

Segmento	Sentido		Segmento	Sentido	
	M1	M2		M1	M2
Segmento 1	20	48	Segmento 6	119	103
Segmento 2	34	67	Segmento 7	69	111
Segmento 3	64	107	Segmento 8	94	73
Segmento 4	100	86	Segmento 9	84	91
Segmento 5	107	55	Segmento 10	122	93
Média M1	81,3		Média M2	83,4	

¹¹ Para este efeito os dois veículos de emergência registado são dois motociclos no mesmo intervalo com as sirenes ligadas.

Tendo em conta os resultados obtidos, ao fazer a extrapolação para os dados diários de um dia completo de tráfego na via considerada, os resultados são apresentados no Quadro 25:

Quadro 25 - Quadro 15 – Extrapolação de dados para um dia de tráfego

	Sentido	
	M1	M2
Minuto	81,3	83,4
Hora¹²	4878	5004
Dia¹³	117072	120096

A evolução do número de veículos e do som no sentido M1 e M2 é apresentada na Figuras 36 e 37, respetivamente.

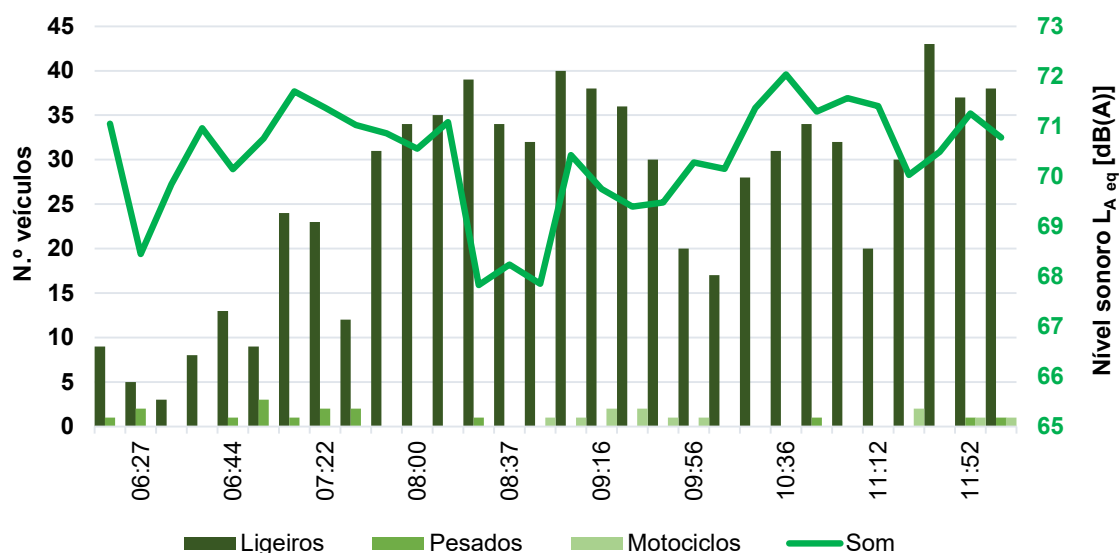


Figura 36 - Evolução do número de veículos e som no sentido M1

Os valores de maior volume de tráfego registam-se entre as 08:00 e as 09:16, segundo os dados recolhidos. Estes volumes de tráfego podem ser explicados pelo facto de a segunda circular ser uma via utilizada pelos cidadãos que se deslocam de e para o emprego. Registam-se dados elevados no intervalo que se inicia às 11:52. Pode ser explicado pelo facto de cidadãos se deslocarem à hora de almoço. São registados níveis de ruído entre os 68 dB(A) e os 72 dB(A).

¹² Multiplicação da linha dos minutos por 60 (1 hora = 60 minutos).

¹³ Multiplicação da linha da Hora por 24 (1 dia = 24 horas).

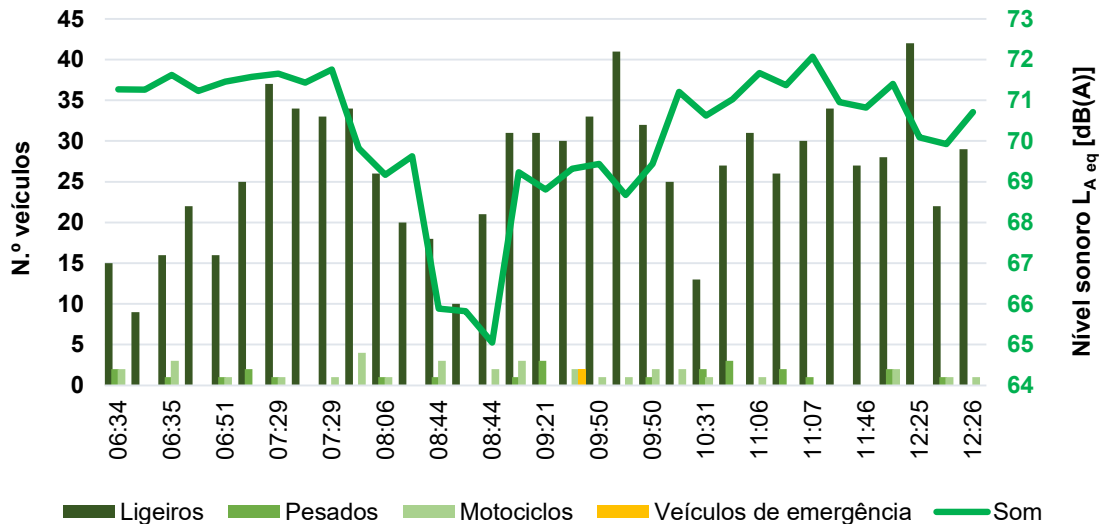


Figura 37 - Evolução do número de veículos e som no sentido M2

Ao invés de explicitar os intervalos de maior volume de tráfego, no sentido M2 (Benfica – Campo Grande), o registo de menor número de veículos compreende-se entre as 06:34 e 06:51 e no período entre as 09:50 e as 10:31, justificado pelo número reduzido de veículos nestes períodos. Novamente, estes dados podem ser justificados pelas deslocações casa-emprego, incluindo a hora de almoço. Os menores valores de nível de ruído, 65 dB(A) são registados no período entre as 09:50 e as 10:31, período de congestionamento.

Face a outro *input* presente, a velocidade, é apresentada a evolução do número de veículos e som no sentido M1 e M2, nas Figuras 38 e 39, respetivamente.

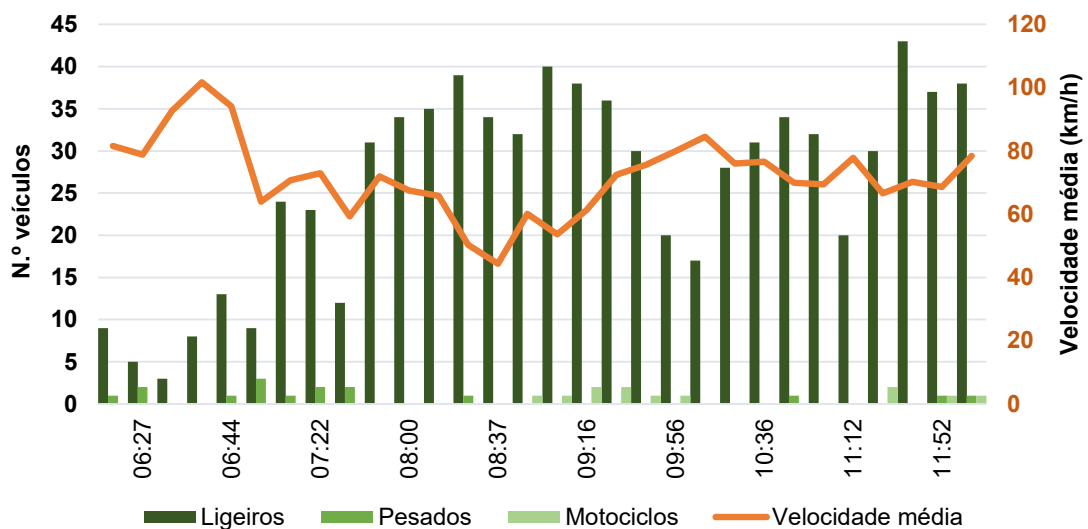


Figura 38 - Evolução do número de veículos e velocidade média no sentido M1

No sentido M1, o maior valor de velocidade registado é no período compreendido entre as 06:27 e as 06:44. Devido ao reduzido tráfego rodoviário, existe a possibilidade de poderem ser praticadas estas velocidades superiores.

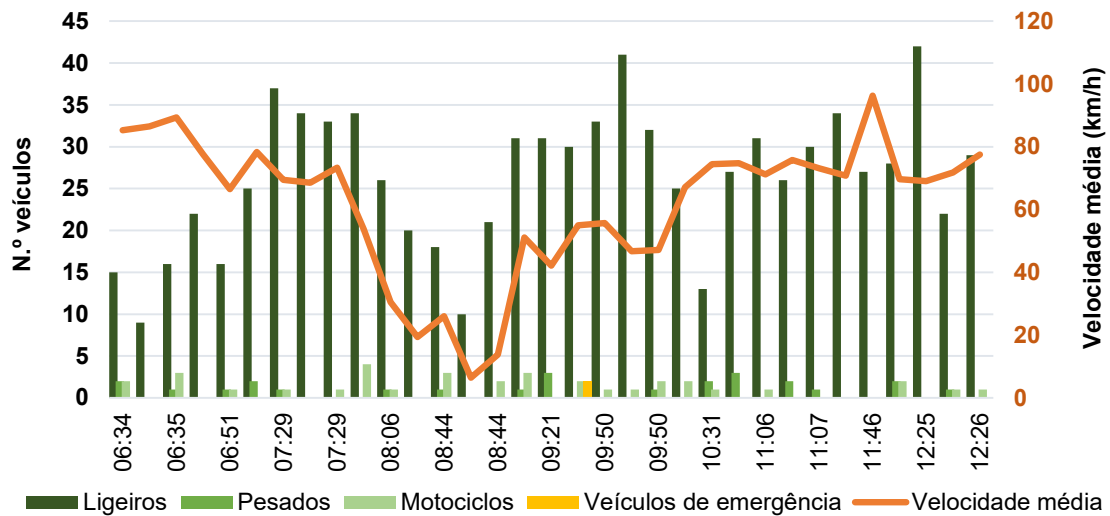


Figura 39 - Evolução do número de veículos e velocidade média no sentido M2

No sentido M2, o período da manhã sofre o mesmo efeito do sentido M1. No entanto, no período compreendido entre as 08:06 e 08:44 o número de veículos e a velocidade média apresentam a mesma tendência devido à baixa velocidade dos veículos.

O tratamento dos dados foi feito no SPSS *Statistics*. Ao desenvolver a matriz de correlação, conforme o Anexo II, é possível identificar um *cluster* de correlação significativa entre o ruído e a velocidade, representado no Quadro 26.

Quadro 26 - Cluster de correlação entre a velocidade e o som

	V1	V2	V3	
dBMAX	Pearson Correlation	,592**	,699**	,623**
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000
	N	63	63	63
dBMIN	Pearson Correlation	,384**	,436**	,564**
	Sig. (2-tailed)	0,002	0,000	0,000
	N	63	63	63
dBMED	Pearson Correlation	,589**	,631**	,660**
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,000	0,000
	N	63	63	63

De acordo com a expressão utilizada no modelo adotado, IMAGINE, para a modelação de ruído de tráfego rodoviário, conforme o ponto 5.2.1, pretende-se ajustar o modelo de ruído com as variáveis velocidade e quantidade de veículo. O ajuste do modelo foi desenvolvido recorrendo ao *software* RStudio.

De modo a ajustar a expressão genérica à expressão do modelo, indicada na Eq. 21, através da transformação, dada pelas equações 19 e 20.

$$\hat{y} = a + b \ln x \quad \text{Eq. 19}$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + e \quad \text{Eq. 20}$$

A expressão transformada do modelo de regressão linear múltiplo populacional é dada pela equação 21.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e \quad \text{Eq. 21}$$

Onde:

$$X_1 = \log Q$$

$$X_2 = \log v$$

Os resultados obtidos são definidos pela seguinte expressão, **o modelo de regressão linear é significativo**, para $p\text{-value} = 1,017 \times 10^{-11}$ (equação 22).

$$\hat{y} = 59,2884 + 0,6015X_1 + 5,6552X_2 \quad \text{Eq. 22}$$

Ao testar a rejeição dos coeficientes de regressão, **o coeficiente da quantidade de veículos (X_1) demonstrou-se irrelevante para o modelo de regressão linear**.

O melhor modelo, através de regressão *Stepwise* é identificado pela equação 23.

$$\hat{y} = 60,162 + 5,638X_2 \quad \text{Eq. 23}$$

Com o modelo obtido, foi feita a simulação com base na equação obtida.

O perfil de resultados, simulados e reais, e respetivos resíduos, variando a tipologia de tráfego, é apresentado de seguida. No sentido M1, não obstante da tipologia de tráfego presente, o perfil é apresentado na Figura 40.

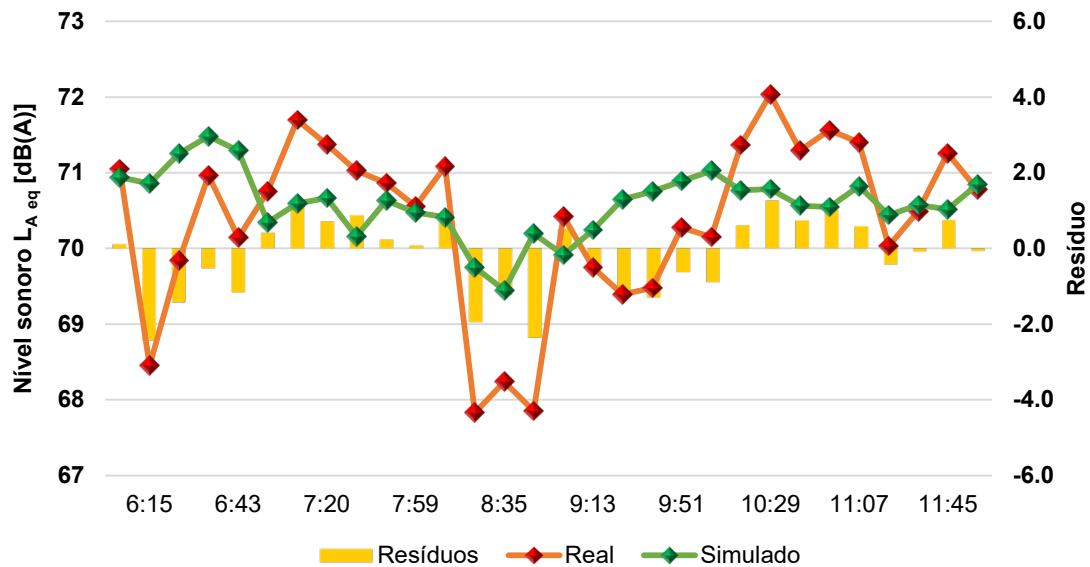


Figura 40 - Perfil de ruído sentido M1

Destacam-se dois pontos do som medido pelos dispositivos, de cerca de 68 dB(A). O primeiro desvio relativamente ao som simulado é justificado pelo fluxo de tráfego reduzido. Já o segundo desvio caracteriza-se exatamente pelo oposto, ou seja, os veículos deslocam-se em marcha lenta devido ao congestionamento.

No sentido M1, relativo apenas a veículos ligeiros, o perfil é apresentado na Figura 41.

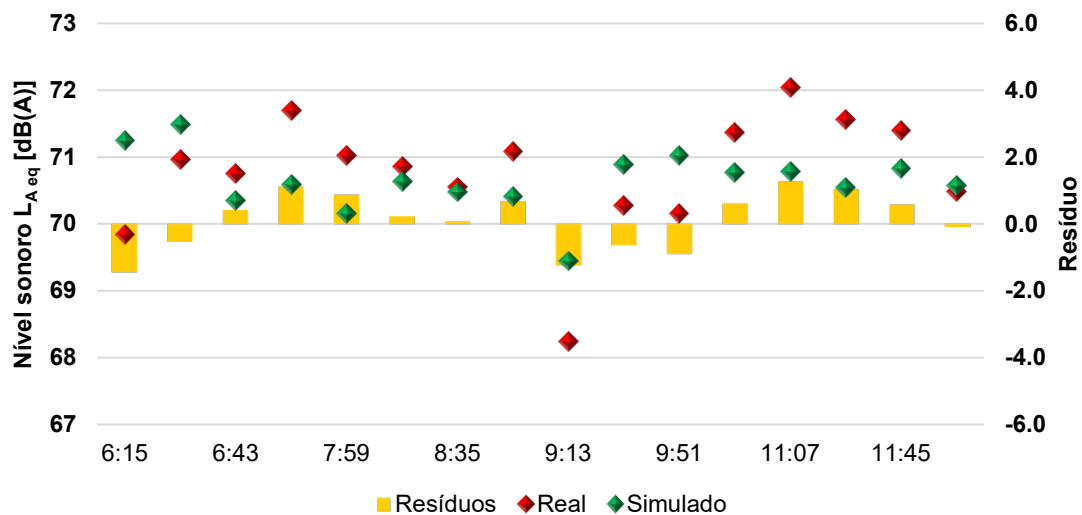


Figura 41 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros no sentido M1

O perfil apresentado demonstra uma menor variação entre os dados reais e os dados simulados. Apesar de existirem resíduos, estes são inferiores ao perfil apresentado sem filtro de tipo de veículos, nomeadamente os dois segmentos onde existe a maior diferença entre dados reais e simulados.

No sentido M2, não obstante da tipologia de tráfego presente, o perfil é apresentado na Figura 42.

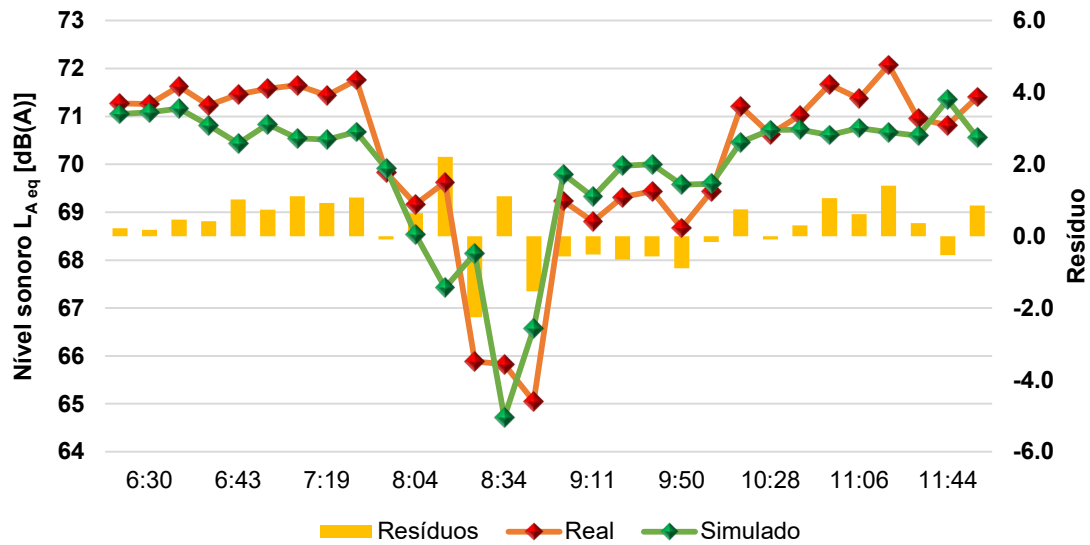


Figura 42 - Perfil de ruído no sentido M2

O perfil de ruído no sentido M2, relativamente ao perfil do sentido M1 revela uma subtil conformidade entre dados reais e simulados apesar da existência de resíduos em segmentos onde o tráfego é menos constante. Os valores divergentes entre nível real e simulado, no período compreendido entre as 08:04 e as 08:34 são explicados pelo mesmo motivo do segmento análogo do sentido M1 – o tráfego encontra-se congestionado e a velocidade é inversamente proporcional a este – refletindo o relevo da velocidade no modelo.

No sentido M1, relativo apenas a veículos ligeiros, o perfil é apresentado na Figura 43.

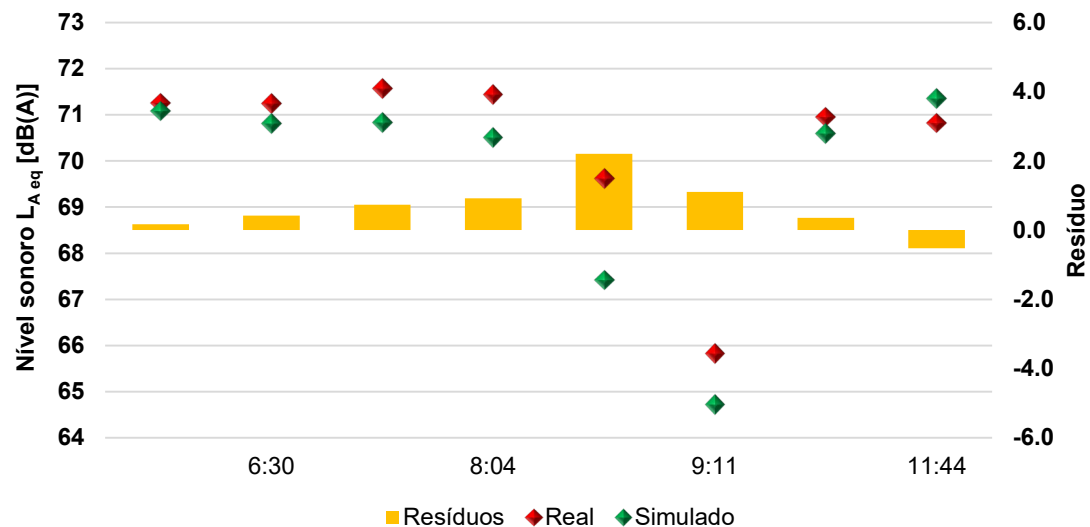


Figura 43 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros no sentido M2

O sentido M2, no período considerado, é caracterizado por um volume fluxo de veículos pesados e motocicletas superior ao sentido M1. Como tal, quando filtramos por tipologia de veículos, os segmentos que contêm exclusivamente veículos ligeiros são reduzidos.

É notável a convergência da tendência e dos valores entre os níveis reais e simulados, exceto no período compreendido entre as 08:04 e as 08:34, já discutido.

De um modo global, e para uma interpretação ao longo do tempo nos dois sentidos, M1 e M2, é apresentado o perfil na Figura 44.

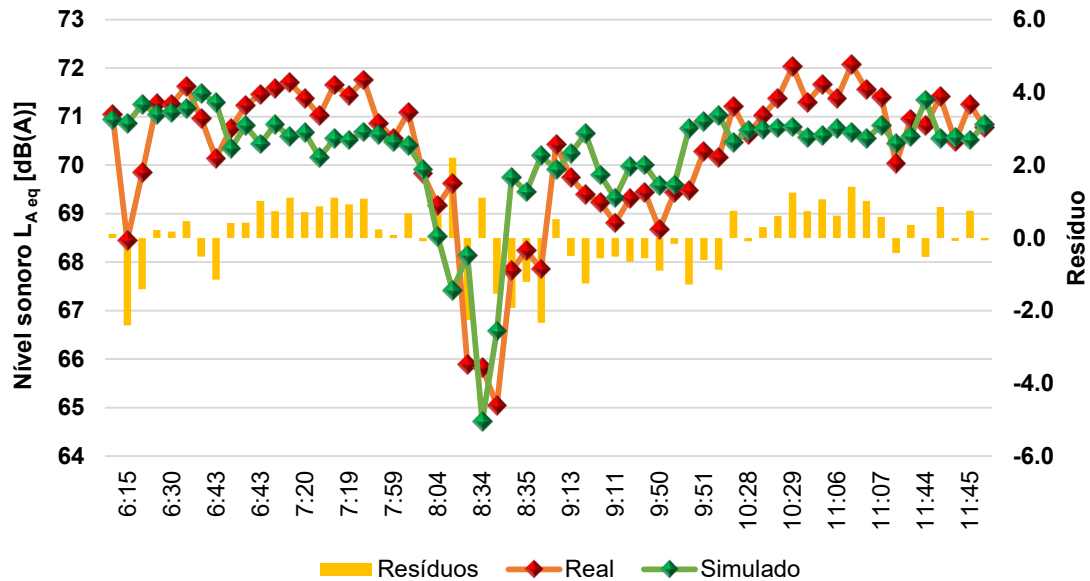


Figura 44 - Perfil de ruído dos sentidos M1 e M2

Do mesmo modo, ao longo do tempo nos dois sentidos, M1 e M2, é apresentado o perfil na Figura 45, exclusivamente para veículos ligeiros.

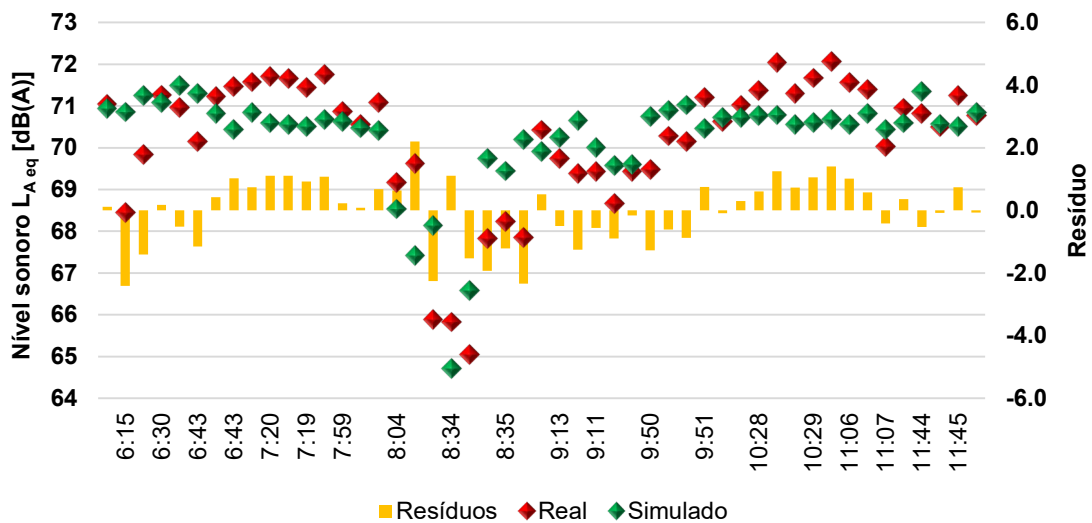


Figura 45 - Perfil de ruído exclusivo a veículos ligeiros dos sentidos M1 e M2

De modo a interpretar o perfil que exhibe os valores mais convergentes com os valores reais, é apresentado o resumo dos resíduos elevado ao quadrado de cada perfil no Quadro 27.

Quadro 27 - Resíduos de cada perfil

Perfil de simulação	n	Σ Resíduos²
M1	30	32,6
M1 – Ligeiros	12	8,3
M2	30	26,6
M2 – Ligeiros	7	7,6
M1 + M2	60	59,2
M1 + M2 – Ligeiros	18	15,9

O perfil com o menor valor de resíduos corresponde ao perfil exclusivo a ligeiros do sentido M2. É um perfil que apresenta um número de dados reduzido, devido ao fluxo elevado de motociclos e veículos pesados. Efetivamente é o perfil que mais se aproxima dos valores medidos e pode ser apontado como o mais fiável, no entanto, o perfil exclusivo a ligeiros do sentido M1 apresenta 42% mais dados que o análogo no sentido M2.

Como concluído no estudo IMAGINE, a velocidade não é um parâmetro linear e é efetivamente um parâmetro complexo. Determina as rotações do motor, e respetivo ruído, mas também o ruído associado ao rolamento e à aerodinâmica. O número de veículos revelou explicar pouca variância no modelo aplicado a este caso concreto de um segmento da Segunda Circular em Lisboa. Haverá, no entanto, que ter a precaução de assumir a validade do modelo nesta forma simplificada (sem componente de fluxo de veículos) é de aplicação particular a este caso concreto. Noutras situações de tráfego o modelo deverá ser efetivamente reavaliado na sua forma originalmente proposta.

Em relação às perspetivas a longo prazo para a exposição ao ruído ambiental na Europa, existem uma série de desafios para reduzir a exposição da população à poluição sonora. O crescimento económico e a expansão das redes de transporte podem levar a um aumento dos níveis de transporte, o que pode, por sua vez, aumentar a poluição sonora do mesmo modo que as tendências para o aumento da urbanização (Eurostat, 2016) podem levar a um maior número de pessoas expostas. A procura de transporte, incluindo automóveis de passageiros, deverá aumentar até 2050 (CE, 2016),

o que contribuirá para que o ruído do tráfego rodoviário continue a fonte predominante de ruído ambiental.

No entanto, a nova regulamentação da UE sobre os níveis de ruído dos veículos motorizados (UE, 2014) exige a instalação de geradores de som artificial em todos os veículos elétricos e híbridos para melhorar a segurança dos peões. A exposição ao ruído pode aumentar ou diminuir para além de 2020 dependendo das contribuições relativas a estes e outros desenvolvimentos.

9. Conclusões e perspetiva de trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões a partir dos dados obtidos e exibido o panorama de perspetiva de trabalhos futuros na sequência do trabalho feito.

9.1 Conclusões

No estudo realizado foi possível obter dados de ruído na via rodoviária em análise e relacioná-los com o tráfego rodoviário.

É possível concluir, a partir da matriz de correlação multilinear, disponível no Anexo II, que o ruído produzido pelos veículos está diretamente relacionado com a velocidade. A matriz apresenta coeficientes suficientemente fortes para poder relacionar a velocidade calculada dos veículos com o nível de ruído produzido pelos mesmos. Os períodos de maior velocidade registadas correspondem, na maior parte das vezes, com os períodos onde se regista menor tráfego rodoviário, sem congestão, o que possibilita aos veículos e/ou seus condutores praticar velocidades superiores do que em momentos que se regista um maior tráfego rodoviário.

Os valores de ruído registados são de facto, elevados em certos momentos e sendo a 2ª Circular uma das vias mais movimentadas de Portugal, devem ser seriamente considerados os seguintes pontos:

- Nos edifícios vizinhos deverão ser implementados isolamentos de ruído;
- Deve ser evitada a construção de edifícios como escolas e hospitais nas zonas vizinhas muito ruidosas;
- Deveria ser equacionada a criação de uma barreira verde para a contenção de ruído em toda a zona da 2ª Circular.

Sabe-se que a componente de ruído dos veículos mudará no futuro nomeadamente pela adoção de motores elétricos. Embora o uso de carros elétricos contribua atualmente para reduzir os níveis de ruído em baixas velocidades em áreas urbanas, nomeadamente devido à ausência de ruído de propulsão, o ruído de rolamento permanecerá componente ativa, a qualquer velocidade. Nos últimos anos, notou-se que a contribuição do ruído de propulsão diminuiu e a contribuição do ruído de rolamento aumenta. Os pneus ficam mais ruidosos devido ao aumento da largura, o ruído de

propulsão aumenta ligeiramente devido a motores a diesel, mas diminui sob pressão da regulamentação do veículo e dos requisitos do consumidor.

9.2 Perspetiva de trabalhos futuros

Integração com modelação da qualidade do ar

Os modelos apresentados distinguem a contribuição do ruído de propulsão e a contribuição do pneu. A contribuição do ruído de propulsão é baseada nas condições de condução do veículo de tal forma que pode ser feita uma ligação quase direta ao desempenho do mesmo. Isto, juntamente com os dados disponíveis sobre o tipo de motor e a composição da idade do veículo, permite a previsão da qualidade dos gases de escape. Uma vez que tanto o ruído como a qualidade do ar podem ser considerados diretamente causados pelo tráfego rodoviário e exibem modelação de propagação similar, a integração de métodos de previsão para ambos os componentes é muito vantajosa para os utilizadores e já desenvolvida em modelos integrados, como o SoundPlan.

Ligação com incomodidade / incomodidade específica

Sabe-se que certas condições de tráfego provocam mais incómodos do que o nível equivalente, este aspeto é referido como incómodo específico, que aparece principalmente em situações em que o tráfego acelera e desacelera. Relações inequívocas de incómodo específico com características de ruído ou características de condução do veículo permitiriam que este aspeto também fosse levado em conta. O incómodo é maioritariamente sentido no interior dos edifícios, onde os sons de menor frequência, provenientes do tráfego rodoviário, se propagam através das janelas e paredes e daí a necessidade de se avaliar o incómodo específico.

10. Referências bibliográficas

- AASHTO. (2009). American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guidelines for Traffic Data Programs. United States: AASHTO
- APA. (2011). Agência Portuguesa do Ambiente, Guia prático para medições de ruído ambiente - outubro 2011. Disponível em http://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/NotasTecnicas_EstudosReferencia/GuiaPraticoMedicoesRuidoAmbiente.pdf, consultado a 22 de setembro de 2018
- APA. (2017). Agência Portuguesa do Ambiente, Exposição da população a ruído ambiente em Portugal Continental. Disponível em http://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/DadosPop_expostaNov2017_1.pdf, última visualização a 30 de setembro de 2018
- APA. (2018). Agência Portuguesa do Ambiente, Mapas de ruído municipais, 2018. Disponível em http://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/MapasRuidoMunicipais/Mapasderuidomunicipais_ago2018.pdf, consultado a 30 de setembro de 2018
- APA. (2018). Agência Portuguesa do Ambiente, Som, Ruído e Incomodidade. Disponível em <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=529>, última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Aral, M. (2010). Environmental and Health Risk Analysis. Springer, London New York. ISBN: 978-90-481-8607-5
- AROUND. (2018). Improving capacity and emission models of roundabouts. Disponível em <https://around-fct.weebly.com>, última visualização a 30 de novembro de 2018
- Aumond, P., Lavandier, C., Ribeiro, C., Gonzalez Boix, E., Kambona, K., D'hondt, E., & Delaitre, P. (2017). A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.011>
- Agarwal, M. (2014). Environmental noise and hearing. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 5(2), 625–635. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411595-8.00003-3>
- Azevedo, C. M. L. (2008). Métodos de estimativa de volumes anuais de tráfego rodoviário. Instituto Superior Técnico - Tese Mestrado. Disponível em <http://repositorio.Inec.pt:8080/jspui/handle/123456789/15542>, última visualização a

3 de dezembro de 2018

- Babisch, W., et al.(2008). Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA Study. *Environmental Health Perspectives*. 2008, Vol. 116, pp. 329-333
- Basner, M., & McGuire, S. (2018). WHO environmental noise guidelines for the european region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph15030519>
- Berglund, B., Lindvall, T., and Schwela, D.H (1999). Guidelines for community noise. World Health Organization: Protection of the Human Environment
- Boer, L. C., & Schroten, A. (2007). Traffic noise reduction in Europe - Health effects , social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise. *Delf: T&E Brussels*, (August)
- Brito, J. (2013). Caracterização da flutuação do tráfego na cidade de Lisboa. 7º Congresso Rodoviário Português, d. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89101972000200008>
- Cai, M., Zhong, S., Wang, H., Chen, Y., & Zeng, W. (2017). Study of the traffic noise source intensity emission model and the frequency characteristics for a wet asphalt road. *Applied Acoustics*, 123, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.006>
- Cambridge University Press, 2018. Disponível em <https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles-portugues/noise>. Última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Carvalho, A., Cavaleiro, V., Albuquerque, A., & Silva, F. (2018). Modeling and Mitigation of Noise on the A23 Motorway Using GIS. *Proceedings*, 2(20), 1306. <https://doi.org/10.3390/proceedings2201306>
- CE. (2016). EU reference scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions: trends to 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union (<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aed45f8e-63e3-47fb-9440-a0a14370f243/language-en>). Última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Celestina, M., Hrovat, J., & Kardous, C. A. (2018). Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. *Applied Acoustics*, 139, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.011>

- Chang, T. Y., Beelen, R., Li, S. F., Chen, T. I., Lin, Y. J., Bao, B. Y., & Liu, C. S. (2014). Road traffic noise frequency and prevalent hypertension in Taichung, Taiwan: A cross-sectional study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-37>
- Chang, T. Y., Lai, Y. A., Hsieh, H. H., Lai, J. S., & Liu, C. S. (2009). Effects of environmental noise exposure on ambulatory blood pressure in young adults. *Environmental Research*, 109(7), 900–905. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.05.008>
- CORDIS. (2012). IMAGINE Report Summary, 2012. Disponível em https://cordis.europa.eu/result/rcn/47869_en.html, última visualização a 3 de dezembro de 2018
- dBwave.i – ISQ. (2018). Disponível em <https://www.dbwave.pt/noticias/artigos-tecnicos/>, última visualização a 18 de setembro de 2018
- dBwave.i – ISQ. (2018). Disponível em <https://www.dbi.pt/noticias/>, última visualização a 18 de setembro de 2018
- Decreto-Lei n.º 291/90, Diário da República n.º 218/1990, Série I de 1990-09-20. Disponível em <https://dre.pt/application/conteudo/557469>, última visualização a 26 de setembro de 2018
- Decreto-Lei n.º 146/2006, Diário da República n.º 146/2006, Série I de 2006-07-31. Disponível em <https://dre.pt/application/conteudo/539393>, última visualização a 26 de setembro de 2018
- Decreto-Lei n.º 9/2007, Diário da República n.º 12/2007, Série I de 2007-01-17. Disponível em <https://dre.pt/application/conteudo/522807>, última visualização a 26 de setembro de 2018.
- Decreto-Lei n.º 278/2007, Diário da República n.º 147/2007, Série I de 2007-08-01. Disponível em <https://dre.pt/application/conteudo/636389>, última visualização a 26 de setembro de 2018
- Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de junho de 2002, Jornal Oficial nº L 189 de 18/07/2002 p. 0012 - 0026. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=PT>, última visualização a 26 de setembro de 2018
- European Environmental Agency. (2014). *Noise in Europe 2014*. <https://doi.org/10.2800/763331>

- European Environmental Agency. (2017). *Managing exposure to noise in Europe*. Disponível em https://www.eea.europa.eu/publications/managing-exposure-to-noise-in-europe/at_download/file, última visualização a 26 de setembro de 2018
- European Environmental Agency. (2018). Population exposure to environmental noise. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-2>, última visualização a 3 de dezembro de 2018
- European Environmental Agency. (2018). Environmental noise. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/environment-and-health/environmental-noise>, última visualização a 9 de dezembro de 2018
- Eurostat. (2018). Urban Europe - Statistics on cities, towns and suburbs, 2018. Disponível em http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Urban_Europe_%E2%80%94_statistics_on_cities,_towns. Última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Eurostat. (2018). *Stock of vehicles by category and NUTS 2, 2018*. Disponível em http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_r_vehst&lang=en, última visualização a 3 de setembro de 2018
- Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics. Animal Genetics* (Vol. 39). Fifth editions TAB Books
- Faber Acoustical. (2018.) Disponível em <https://www.faberacoustical.com>, última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Gardziejczyk, W., & Motylewicz, M. (2016). Noise level in the vicinity of signalized roundabouts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.016>
- Gulliver, J., Morley, D., Vienneau, D., Fabbri, F., Bell, M., Goodman, P. Fecht, D. (2015). Development of an open-source road traffic noise model for exposure assessment. *Environmental Modelling and Software*, 74, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.022>
- Hugh, Y., & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria Vol.1. Pearson Educación*.
- Infraestruturas de Portugal. (2018). Disponível em <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>, última visualização a 26 de setembro de 2018
- IMT. (2018). Disponível em <http://www.imt-ip.pt>, última visualização a 26 de setembro de 2018

- Instituto do Ambiente. (2004), "O ruído e a cidade" – janeiro 2004. Disponível em https://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/o_rudo_e_a_cidade.pdf, última visualização a 9 de dezembro de 2018
- Instituto do Ambiente. (2007). Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, O novo quadro legal do ruído ambiente, abril 2007. Disponível em https://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/ApresentacaoNovoQuadroLegal.pdf, última visualização a 24 de outubro de 2018
- Jonasson, H. (2006). *Acoustic source modelling of Nordic road vehicles. SP Rapport*. <https://doi.org/10.1016/j.cardiores.2005.02.018>
- Khan, J., Ketzler, M., Kakosimos, K., Sørensen, M., & Jensen, S. S. (2018). Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. *Science of the Total Environment*, 634, 661–676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppers, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470612439>
- Kroft, L., Hnatík, J., & Bícová, K. (n.d.). 28TH DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION THE EFFECT OF THE STRATEGY OF FINISHING ON DIMENSIONAL ACCURACY (pp. 926–929). <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.081>
- Margarida, A. (2018). Perceções sobre o ruído e desempenho de tarefas do quotidiano laboral. Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa - Tese de Mestrado
- Mateus, S., Mec, E., & Gameiro, M. C. (2014). *A Influência Dos Parâmetros DeA influência dos parâmetros de amostragem na incerteza das medições de ruído ambiental*. Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra - Tese Doutoramento
- Miguel, A. S. S. R. (2014). *Manual de higiene e segurança do trabalho*. 14ª edição PORTO EDITORA
- Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., & Sørensen, M. (2018). Environmental Noise and the Cardiovascular System. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688–697. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.12.015>
- Murphy, E., & King, E. A. (2016). Testing the accuracy of smartphones and sound level meter applications for measuring environmental noise. *Applied Acoustics*, 106, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.012>

- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2006.09.001>
- NoiseTube. (2008), Sony Computer Science Laboratory Paris & Software Languages Lab. Disponível em <http://www.noisetube.net/index.html#&panel1-1>, última visualização a 26 de outubro de 2018
- OMS. (1999). New Who Guidelines for Community Noise. *Noise & Vibration Worldwide*. OMS. <https://doi.org/10.1260/0957456001497535>
- OMS. (2018). ENVIRONMENTAL NOISE GUIDELINES for the European Region. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080873>
- Oxford University press, 2018. Disponível em <https://en.oxforddictionaries.com/definition/noise>. Última visualização a 3 de dezembro de 2018
- Pereira, A. S. de A. B. (2009). Avaliação da Exposição dos Trabalhadores ao Ruído (Análise de Casos). *Universidade Do Minho Escola de Ciências - Dissertação de Mestrado em Ciências do Ambiente*
- Recio, A., Linares, C., Banegas, J. R., & Díaz, J. (2016a). Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.036>
- Recio, A., Linares, C., Banegas, J. R., & Díaz, J. (2016b). The short-term association of road traffic noise with cardiovascular, respiratory, and diabetes-related mortality. *Environmental Research*, 150, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.014>
- Salomons, E., Van Maercke, D., Defrance, J., & De Roo, F. (2011). The Harmonoise sound propagation model. *Acta Acustica United with Acustica*, 97(1), 62–74. <https://doi.org/10.3813/AAA.918387>
- Stevens, M. (2012). Community memories for sustainable societies: the case of environmental noise. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00154-1>
- Sygna, K., Aasvang, G. M., Aamodt, G., Oftedal, B., & Krog, N. H. (2014). Road traffic noise, sleep and mental health. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.02.010>
- Waye, K. P. (2011). Effects of Low Frequency Noise and Vibrations: Environmental and Occupational Perspectives. *Encyclopedia of Environmental Health*, 240–253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00245-2>
- TIS. (2015). Requalificação da 2ª Circular, Estudo de Tráfego – Modelo Macro. CML

11. Anexos

Anexo I – Contabilização de veículos

Quadro 28 - Dados contabilização tráfego sentido M1 dia 20/05/2016

Sentido	Hora real	Ligeiros	Pesados	Motociclos	Ambulâncias
M1	06:27:00	9	1	0	0
	06:27:20	5	2	0	0
	06:27:40	3	0	0	0
	06:44:25	8	0	0	0
	06:44:45	13	1	0	0
	06:45:05	9	3	0	0
	07:22:25	24	1	0	0
	07:22:45	23	2	0	0
	07:23:05	12	2	0	0
	08:00:15	31	0	0	0
	08:00:35	34	0	0	0
	08:00:55	35	0	0	0
	08:37:14	39	1	0	0
	08:37:34	34	0	0	0
	08:37:54	32	0	1	0
	09:16:01	40	0	1	0
	09:16:21	38	0	2	0
	09:16:41	36	0	2	0
	09:56:10	30	0	1	0
	09:56:30	20	0	1	0
	09:56:50	17	0	0	0
	10:35:49	28	0	0	0
	10:36:09	31	0	0	0
	10:36:29	34	1	0	0
	11:12:11	32	0	0	0
	11:12:31	20	0	0	0
	11:12:51	30	0	2	0
	11:51:43	43	0	0	0
	11:52:03	37	1	1	0
	11:52:23	38	1	1	0
Total		785	16	12	0

Quadro 29 - Dados contabilização tráfego sentido M2 dia 20/05/2016

Sentido	Hora real	Ligeiros	Pesados	Motociclos	Ambulâncias
M2	06:34:23	15	2	2	0
	06:34:43	9	0	0	0
	06:35:03	16	1	3	0
	06:51:04	22	0	0	0
	06:51:24	16	1	1	0
	06:51:44	25	2	0	0
	07:29:06	37	1	1	0
	07:29:26	34	0	0	0
	07:29:46	33	0	1	0
	08:06:12	34	0	4	0
	08:06:32	26	1	1	0
	08:06:52	20	0	0	0
	08:44:00	18	1	3	0
	08:44:20	10	0	0	0
	08:44:40	21	0	2	0
	09:21:03	31	1	3	0
	09:21:23	31	3	0	0
	09:21:43	30	0	2	2
	09:50:10	33	0	1	0
	09:50:30	41	0	1	0
	09:50:50	32	1	2	0
	10:30:40	25	0	2	0
	10:31:00	13	2	1	0
	10:31:20	27	3	0	0
	11:06:21	31	0	1	0
	11:06:41	26	2	0	0
	11:07:01	30	1	0	0
	11:46:16	34	0	0	0
	11:46:36	27	0	0	0
	11:46:56	28	2	2	0
Total		775	24	33	2

Quadro 30 - Evolução do número de veículos de passageiros entre os anos de 2010 e 2016 na União Europeia

GEO/TIME	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Bélgica	5 276 300	5 407 000	5 444 000	5 493 000	5 555 499	5 623 579	5 712 061
Bulgária	2 602 000	2 695 000	2 807 000	2 910 200	3 013 863	3 162 037	3 143 568
República Checa	4 496 000	4 582 000	4 706 300	4 729 000	4 833 386	5 115 316	5 307 808
Dinamarca	2 163 676	2 197 831	2 237 122	2 278 121	2 329 578	2 390 823	2 465 538
Alemanha	41 737 627	42 301 563	42 929 647	43 397 459	43 851 230	44 403 124	45 071 209
Estónia	552 680	574 000	602 100	628 500	652 950	676 596	703 151
Irlanda	1 873 000	1 962 000	1 951 000	1 985 000	2 018 180	2 059 990	2 092 050
Grécia	5 216 873	5 203 591	5 167 557	5 124 208	5 110 873	5 107 620	5 160 056
Espanha	22 147 455	22 277 244	22 250 000	22 024 538	22 029 512	22 355 549	22 876 830
França	32 675 972	32 611 510	32 865 346	32 856 502	32 529 927	32 324 999	32 074 202
Croácia	1 515 400	1 518 300	1 445 200	1 448 300	1 474 495	1 499 802	1 552 904
Itália	36 724 000	37 095 000	37 060 000	36 945 500	37 063 708	37 334 334	37 859 458
Chipre	462 700	469 500	475 500	474 600	478 492	487 692	508 284
Letónia	636 700	612 000	618 300	634 600	657 799	679 048	664 177
Lituânia	1 691 855	1 713 277	1 753 407	1 808 982	1 205 668	1 244 063	1 298 737
Luxemburgo	337 239	345 575	355 850	363 247	372 827	381 103	390 935
Hungria	2 984 063	2 967 808	2 986 028	3 040 732	3 107 695	3 196 856	3 313 206
Malta	240 960	247 174	249 612	256 096	265 950	275 380	282 921
Holanda	7 735 547	7 858 712	7 915 613	7 932 290	7 979 083	8 100 864	8 222 974
Áustria	4 441 000	4 513 000	4 584 000	4 641 000	4 694 921	4 748 048	4 821 557
Polónia	17 239 800	18 125 500	18 744 000	19 389 400	20 003 863	20 723 423	21 675 388
Portugal	4 692 000	4 712 400	4 258 700	4 327 500	4 699 645	4 722 963	4 850 229
Roménia	4 319 700	4 334 500	4 487 300	4 695 700	4 907 564	5 155 059	5 472 423
Eslovénia	1 061 646	1 066 495	1 066 028	1 063 795	1 068 362	1 078 737	1 096 523
Eslováquia	1 669 000	1 749 000	1 824 000	1 880 000	1 949 055	2 034 574	2 121 774
Finlândia	2 877 480	2 978 730	3 057 500	3 127 400	3 179 800	3 248 000	3 334 609
Suécia	4 334 400	4 400 600	4 446 300	4 494 700	4 584 711	4 668 262	4 767 262
Reino Unido	28 647 255	28 733 746	28 946 849	29 345 923	29 923 519	30 505 010	31 163 706

Fonte: Eurostat, 2018

Anexo II – Matriz de correlação multilinear da aplicação do modelo**Quadro 31 - Matriz de correlação SPSS****Correlations**

		Ligeiros	Pesados	Motas	Ambulâncias	Nvtotal	dBMAX	dBMIN	dBMED	V1	V2	V3
Ligeiros	Pearson Correlation	1	-,289*	0,140	0,048	,991**	-0,194	,257*	0,054	-,308*	-,261*	0,050
	Sig. (2-tailed)		0,022	0,273	0,709	0,000	0,127	0,042	0,676	0,014	0,039	0,700
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Pesados	Pearson Correlation	-,289*	1	-0,067	-0,094	-0,210	0,117	0,018	0,117	0,063	0,037	0,014
	Sig. (2-tailed)	0,022		0,604	0,462	0,098	0,362	0,887	0,362	0,626	0,772	0,914
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Motas	Pearson Correlation	0,140	-0,067	1	0,163	0,237	-0,236	-,266*	-,267*	-0,215	-0,231	-0,203
	Sig. (2-tailed)	0,273	0,604		0,201	0,061	0,062	0,035	0,034	0,091	0,069	0,111
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Ambulâncias	Pearson Correlation	0,048	-0,094	0,163	1	0,081	-0,103	-0,010	-0,082	-0,056	-0,025	-0,120
	Sig. (2-tailed)	0,709	0,462	0,201		0,528	0,420	0,938	0,523	0,663	0,843	0,349
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Nvtotal	Pearson Correlation	,991**	-0,210	0,237	0,081	1	-0,210	0,233	0,036	-,325**	-,282*	0,028
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,098	0,061	0,528		0,098	0,067	0,780	0,009	0,025	0,828
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63

Correlations

		Ligeiros	Pesados	Motas	Ambulâncias	Nvtotal	dBMAX	dBMIN	dBMED	V1	V2	V3
dBMAX	Pearson Correlation	-0,194	0,117	-0,236	-0,103	-0,210	1	,721**	,895**	,592**	,699**	,623**
	Sig. (2-tailed)	0,127	0,362	0,062	0,420	0,098		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
dBMIN	Pearson Correlation	,257*	0,018	-,266*	-0,010	0,233	,721**	1	,911**	,384**	,436**	,564**
	Sig. (2-tailed)	0,042	0,887	0,035	0,938	0,067	0,000		0,000	0,002	0,000	0,000
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
dBMED	Pearson Correlation	0,054	0,117	-,267*	-0,082	0,036	,895**	,911**	1	,589**	,631**	,660**
	Sig. (2-tailed)	0,676	0,362	0,034	0,523	0,780	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
V1	Pearson Correlation	-,308*	0,063	-0,215	-0,056	-,325**	,592**	,384**	,589**	1	,803**	,532**
	Sig. (2-tailed)	0,014	0,626	0,091	0,663	0,009	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
V2	Pearson Correlation	-,261*	0,037	-0,231	-0,025	-,282*	,699**	,436**	,631**	,803**	1	,620**
	Sig. (2-tailed)	0,039	0,772	0,069	0,843	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
V3	Pearson Correlation	0,050	0,014	-0,203	-0,120	0,028	,623**	,564**	,660**	,532**	,620**	1
	Sig. (2-tailed)	0,700	0,914	0,111	0,349	0,828	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	N	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Anexo III – Poster e resumo Fórum de Engenharia Química e Biológica



ISEL FORUM DE ENGENHARIA QUÍMICA E BIOLÓGICA

Caracterização do perfil de ruído em vias de grande tráfego de Lisboa

J. T. Matos^{1*}, M. Matos¹, M. T. Santos¹

¹Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.

*jacobtmatos@gmail.com



Resumo

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa, sendo prejudicial para a saúde pública. O objetivo deste estudo é caracterizar uma das vias mais movimentadas de Portugal, a 2ª circular. Posteriormente, pretende-se desenvolver um modelo matemático que relacionará o número, o tipo de veículos e a velocidade média a que se deslocam, com o ruído.

Introdução

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído proveniente de tráfego rodoviário [1]. A equação que define o indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) em decibel [dB(A)] é a seguinte [2]:

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

Tabela 1 : Limites máximos de exposição segundo o Regulamento Geral do Ruído em função da classificação da zona [3]

Tipo de zona	Indicador L_{den} [dB(A)]	Indicador L_n [dB(A)]
Mista	≤ 65 a)	≤ 55 a)
Sensível	≤ 55 a)	≤ 45 a)
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte em exploração na proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte aéreo projetada para a proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte que não aéreo projetada para a proximidade	≤ 60	≤ 50
Não classificada	≤ 63 b)	≤ 63 b)

a) Os municípios podem estabelecer em espaços delimitados, designadamente em centros históricos, valores inferiores em 5 dB(A).

b) Valores limite a aplicar aos recetores sensíveis

Os efeitos nocivos do ruído surgem principalmente das reações de stress causadas no corpo humano. Estes efeitos podem potencialmente levar à morte prematura, causar doenças cardiovasculares, distúrbios do sono, hipertermia e, no mínimo, incómodo [4].

Materiais e Métodos

As medições de som foram efetuadas em ambos os sentidos da 2ª circular, entre as 06:27 e as 12:26, na ponte pedonal junto à Escola Alemã (Nó Azinhaga das Galhardas/Campo Grande), sempre acompanhadas por vídeo (Figura 1).



Figura 1 : Método utilizado para medição de som e gravação de vídeo

Para as medições de som foram utilizados 2 telemóveis da marca Apple (iPhone) com a aplicação NoiseTube instalada.

Referências Bibliográficas

- [1] EEA Briefing 01/2017, Managing exposure to noise in Europe, European Environment Agency, 2017.
- [2] Decreto-Lei n.º 146/2006 31 de julho.
- [3] Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro.
- [4] E. Murphy, O. Douglas, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 58, 70-79.

Para cada sentido, M1 e M2 (Figuras 2 e 3) foram contabilizados os números de veículos ligeiros, pesados, motociclos e veículos de emergência durante um minuto, dividido em segmento de 20 segundos.



Figura 2 : Sentido M1 (Campo Grande - Benfica)



Figura 3 : Sentido M2 (Benfica - Campo Grande)

Resultados

Na Figura 4, apresentam-se o perfil de ruído e o número de veículos obtidos para os dois sentidos da 2ª circular. O modelo e resultados obtidos poderão suportar futuras decisões de construção nas proximidades bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais, grandes edifícios, entre outras.

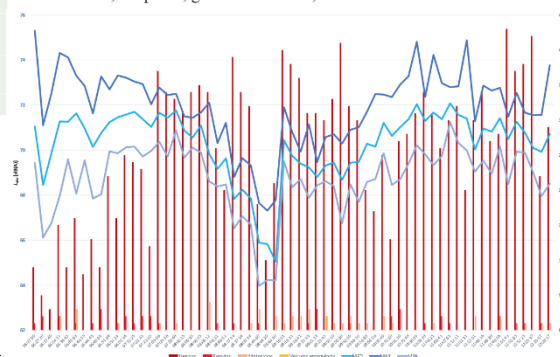


Figura 4 : Perfil de ruído e número de veículos

Tabela 2 : Medições de som expresso em decibéis (dB)

Sentido		L [dB(A)]
M1	M2	MAX
75,30	74,31	
66,12	63,97	MIN
70,43	70,16	MED

Tabela 3 : Número de veículos em ambos os sentidos

Sentido		Tipologia
M1	M2	Ligeiros
785	775	
16	24	Pesados
12	33	Motociclos
0	2	Veículos emergência

Conclusões

Após a análise das medições feitas, os níveis médios de ruído situam-se entre os 64 e 75 dB, aproximadamente.

O tráfego rodoviário tem efeito no ruído ambiente registado e, mesmo sendo a maioria dos veículos ligeiros, registam-se valores superiores aos limites máximos de exposição legislativos.

Agradecimentos

Agradece-se ao estagiário a colaboração na recolha dos dados de vídeo e som.

Caracterização do ruído em vias de grande tráfego de Lisboa

J. T. Matos.^{1*}, M. Matos¹, M. T. Santos¹

¹Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

*jacobtmatos@gmail.com

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído proveniente de tráfego rodoviário [1]. As medições de ruído são habitualmente realizadas com sonómetros devidamente calibrados. No entanto, diversos estudos neste âmbito têm sido desenvolvidos com a utilização de “smartphones” juntamente com a instalação de aplicações móveis como NoiseTube, SoundCity, Cart_ASUR, etc [2]. O objetivo do presente estudo é caracterizar uma das vias mais movimentadas de Portugal, a segunda circular (Figura 1), em termos de ruído proveniente do tráfego rodoviário, com a utilização destes mesmos dispositivos. Posteriormente, pretende-se desenvolver um modelo matemático que relacionará o número, o tipo de veículos e a velocidade média a que se deslocam, com o ruído. O modelo e resultados obtidos poderão suportar futuras decisões de construção nas proximidades bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais, grandes edifícios, entre outras.

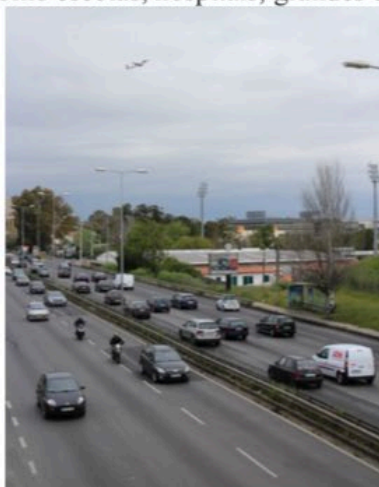


Figura 1. Vista da ponte pedonal junto à Escola Alemã, Nó Azinhaga das Galhardas/Campo Grande

REFERÊNCIAS

- [1] EEA Briefing 01/2017, Managing exposure to noise in Europe, European Environment Agency, 2017.
- [2] Pierre Aumond, Catherine Lavandier, Carlos Ribeiro, Elisa Gonzalez Boix, Kennedy Kambona, Ellie D'Hondt, Pauline Delaitre, *Applied Acoustics*, 2017, 117, 219-226.

> área científica - ambiente

Anexo IV – Poster e resumo XXIV Encontro Luso Galego de Química



Caracterização do ruído em vias de grande tráfego de Lisboa

J. T. Matos *, M. Matos, M. T. Santos

Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.

*jacobtmatos@gmail.com



Resumo

O ruído proveniente de tráfego rodoviário é a principal fonte de poluição sonora, sendo prejudicial para a saúde pública. O objetivo é caracterizar uma das vias mais movimentadas de Portugal, a 2ª circular. Pretende-se desenvolver um modelo que relaciona as características mais importantes do tráfego rodoviário com o ruído.

Introdução

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído rodoviário [1]. A Tabela 1 apresenta os limites máximos de exposição ao ruído.

Tabela 1 : Limites máximos de exposição segundo o Regulamento Geral do Ruído em função da zona [2]

Tipo de zona	Indicador L_{den} [dB(A)]	Indicador L_n [dB(A)]
Mista	≤ 65 a)	≤ 55 a)
Sensível	≤ 55 a)	≤ 45 a)
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte em exploração na proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte aéreo projetada para a proximidade	≤ 65	≤ 55
Sensível com uma grande infraestrutura de transporte que não aéreo projetada para a proximidade	≤ 60	≤ 50
Não classificada	≤ 63	≤ 63

a) Os municípios podem delimitar, designadamente em centros históricos, valores inferiores em 5 dB(A).

A equação que define o indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) em decibel [dB(A)] é a seguinte [3]:

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

Materiais e Métodos

A 2ª Circular atravessa a cidade na sua coroa norte, ligando o nó rodoviário entre a CRIL e o IC19 ao nó rodoviário entre a A1, a CRIL e a Ponte Vasco da Gama. É a via com maior volume de tráfego de Lisboa.

Os dados de som foram recolhidos para ambos os sentidos da 2ª circular, na ponte pedonal junto à Escola Alemã (Nó Azinhaga das Galhardas/Campo Grande), sempre acompanhadas por captura de vídeo (Figuras 1 e 2). A velocidade média dos veículos foi calculada tendo em conta dois pontos de referência (Figuras 3 e 4).



Figura 1: Vista da ponte pedonal

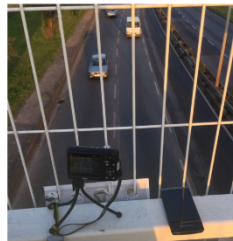


Figura 2: Esquema de recolha de dados de imagem e som

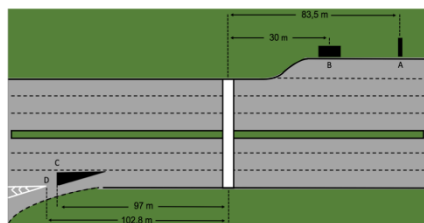


Figura 3: Zona da recolha de dados e pontos de referência

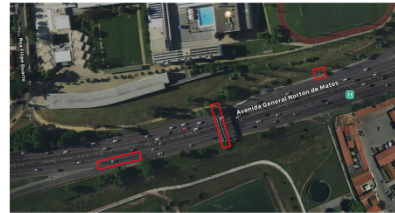


Figura 4: Esquema representativo da zona de estudo

Apresentação e discussão de resultados

Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os perfis de velocidade média, de ruído e o número de veículos.

- O nível de ruído mínimo nunca desce abaixo dos 65 dB(A), enquanto que o nível máximo pode atingir os 72 dB.
- Verifica-se que os níveis de ruído são inversamente proporcionais à velocidade dos veículos. As zonas circundantes a esta via estão expostas a razoáveis níveis de ruído e também a níveis elevados de poluentes.



Figura 5: Perfil da evolução do nº de veículos e da velocidade média

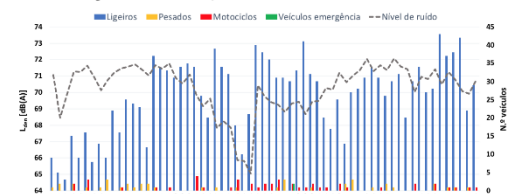


Figura 6: Perfil da evolução do nº de veículos e do nível de ruído médio

O desenvolvimento do modelo tem como base o IMAGINE, modelo europeu de emissões de ruído de tráfego rodoviário [4], equação seguinte:

$$L_w = L_{w0} + 10 \log \left(\frac{Q}{v} \right)$$

L_w – Pressão sonora instantânea
 Q – Número de veículos
 v – Velocidade em m/s

Conclusões

- O modelo e os resultados obtidos podem suportar futuras decisões de construção nas proximidades bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais, grandes edifícios, entre outras.
- Deve ser evitada a construção de edifícios como escolas e hospitais nas zonas vizinhas. Deveria ser equacionada a criação de uma barreira verde para a contenção de ruído em toda a zona da 2ª circular assim como a implementação de isolamentos de ruído nos edifícios já existentes.

Referências Bibliográficas

- [1] EEA Briefing 01/2017, Managing exposure to noise in Europe, European Environment Agency, 2017.
- [2] Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro.
- [3] Decreto-Lei n.º 146/2006 de 31 de julho.
- [4] B. Peeters, G. Blokland, Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment, 2007

Caracterização do ruído em vias de grande tráfego de Lisboa

J. T. Matos^{1,*}, M. Matos¹, M. T. Santos¹

¹Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

*jacobtmatos@gmail.com

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas são afetadas por níveis prejudiciais de ruído proveniente de tráfego rodoviário [1] e das emissões de poluentes por eles gerados. As medições de ruído são realizadas com sonómetros devidamente calibrados. No entanto, diversos estudos apontam para a utilização de *smartphones*, como dispositivo de medição de som, com a utilização de aplicações como NoiseTube, SoundPrint e iHEARu. Os utilizadores podem partilhar os níveis de ruído e a geolocalização utilizando o áudio e GPS dos dispositivos para mapear níveis de ruído em cidades [2].

Para todos os tipos de veículos, o nível de pressão sonora aumenta com a velocidade nas estradas de asfalto seco e molhado e, além disso, o ruído do pneu / estrada domina o ruído do motor em qualquer velocidade. Assim, o ruído do pneu / estrada é cada vez mais provável de dominar o ruído do veículo à medida que a velocidade aumenta [3].

O objetivo do presente estudo é caracterizar uma das vias mais movimentadas de Portugal, a segunda circular, mais especificamente no Nó Azinhaga das Galhardas/Campo Grande (Figura 1) com a utilização destes mesmos dispositivos. Posteriormente, pretende-se desenvolver um modelo matemático que relacionará o número, o tipo de veículos e a velocidade média a que se deslocam, com o ruído e com a emissão de gases poluentes. O modelo e resultados obtidos poderão suportar futuras decisões de construção nas proximidades bem como fornecer orientações nas medidas de mitigação do ruído em instalações já existentes como escolas, hospitais, grandes edifícios, entre outras.

Numa primeira instância, os resultados obtidos permitem relacionar os dados de som obtidos com o número de veículos. Nas horas de maior tráfego rodoviário observa-se um maior número de veículos a circular, logo uma menor velocidade, devido ao congestionamento. Regista-se assim um menor valor de ruído como se mostra na Figura 2.



Fig.1. Vista da ponte pedonal junto à Escola Alemã, Nó Azinhaga das Galhardas/Campo Grande

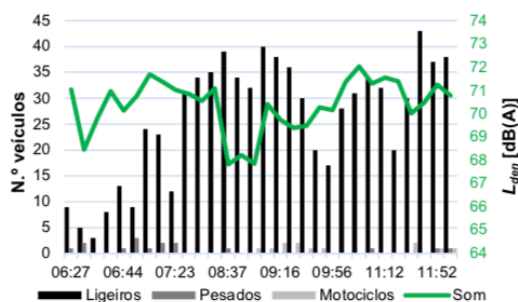


Fig.2. Perfil da evolução do número de veículos e som entre as 06:27 e as 11:52

Os dados de ruído permitirão, assim estimar o número de veículos e a sua obtenção é bastante mais simples que a contagem dos mesmos. A partir do número de veículos poderá ser estimada a qualidade do ar a partir de uma medida simples de ruído.

Referências

- [1] EEA Briefing 01/2017, Managing exposure to noise in Europe, European Environment Agency, 2017.
- [2] M. Celestina, J. Hrovat, C. Kardous, Applied Acoustics, 139 (2018), 119-128.
- [3] M. Cai, S. Zhong, H. Wang, Y. Chen, & W. Zeng, Applied Acoustics, 123 (2017), 55-63

Anexo V – Cálculo de velocidades dos veículos na via em estudo**Quadro 32** - Cálculo de velocidades médias no sentido M1 dia 20/05/2016

Sentido	Tempo (s)		Velocidade média ¹⁴ (m/s)			Velocidade média (km/h) ¹⁵			
	M1	4,398	3,301	3,525	18,99	25,30	23,69	68,3	91,1
3,925		3,723	3,8	21,27	22,43	21,97	76,6	80,7	79,1
3,052		3,422	3,27	27,36	24,40	25,54	98,5	87,8	91,9
3,352		2,595	3,013	24,91	32,18	27,71	89,7	115,8	99,8
2,859		3,148	3,673	29,21	26,52	22,73	105,1	95,5	81,8
4,727		4,331	5,101	17,66	19,28	16,37	63,6	69,4	58,9
4,359		4,332	4,062	19,16	19,28	20,56	69,0	69,4	74,0
4,921		4,254	3,448	16,97	19,63	24,22	61,1	70,7	87,2
4,803		5,608	4,865	17,38	14,89	17,16	62,6	53,6	61,8
3,943		4,552	4,077	21,18	18,34	20,48	76,2	66,0	73,7
3,967		4,286	5,323	21,05	19,48	15,69	75,8	70,1	56,5
6,002		4,62	3,661	13,91	18,07	22,81	50,1	65,1	82,1
8,75		6,104	4,474	9,54	13,68	18,66	34,4	49,2	67,2
8,641		7,016	5,423	9,66	11,90	15,40	34,8	42,8	55,4
5,141		5,255	4,636	16,24	15,89	18,01	58,5	57,2	64,8
7,372		5,462	4,622	11,33	15,29	18,07	40,8	55,0	65,0
4,762		5,24	4,722	17,53	15,94	17,68	63,1	57,4	63,7
4,05		4,416	4	20,62	18,91	20,88	74,2	68,1	75,2
4,902		4,451	3,072	17,03	18,76	27,18	61,3	67,5	97,9
4,537	4,569	2,787	18,40	18,28	29,96	66,3	65,8	107,9	

¹⁴ $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$ (m/s)¹⁵ Multiplicação das colunas da velocidade média (m/s) por 3,6

Sentido	Tempo (s)		Velocidade média ¹⁴ (m/s)			Velocidade média (km/h) ¹⁵			
	4,434	3,589	2,951	18,83	23,27	28,30	67,8	83,8	101,9
	5,534	3,974	3,062	15,09	21,01	27,27	54,3	75,6	98,2
	4,607	4,175	3,247	18,12	20,00	25,72	65,2	72,0	92,6
	5,569	4,017	3,709	14,99	20,79	22,51	54,0	74,8	81,0
	4,68	4,466	3,91	17,84	18,70	21,36	64,2	67,3	76,9
	4,752	3,924	3,213	17,57	21,28	25,99	63,3	76,6	93,6
	5,213	5,176	3,576	16,02	16,13	23,35	57,7	58,1	84,1
	5,101	4,449	3,571	16,37	18,77	23,38	58,9	67,6	84,2
	4,756	4,659	3,847	17,56	17,92	21,71	63,2	64,5	78,1
	5,522	4,036	2,828	15,12	20,69	29,53	54,4	74,5	106,3

Quadro 33 - Cálculo de velocidades no sentido M2 dia 20/05/2016

Sentido	Tempo (s)		Velocidade média (m/s)			Velocidade média km/h			
M2	3,675	3,854	4,969	26,39	25,17	19,52	95,0	90,6	70,3
	4,8	3,423	4,122	20,21	28,34	23,53	72,8	102,0	84,7
	3,528	3,716	4,649	27,49	26,10	20,86	99,0	94,0	75,1
	3,892	4,501	5,34	24,92	21,55	18,16	89,7	77,6	65,4
	5,222	6,061	4,664	18,58	16,00	20,80	66,9	57,6	74,9
	4,204	4,126	5,196	23,07	23,51	18,67	83,1	84,6	67,2
	5,217	5,324	4,609	18,59	18,22	21,05	66,9	65,6	75,8
	4,922	5,952	4,588	19,71	16,30	21,14	70,9	58,7	76,1
	5,897	5,899	3,435	16,45	16,44	28,24	59,2	59,2	101,7
	8,643	7,378	4,75	11,22	13,15	20,42	40,4	47,3	73,5
	12,976	8,578	14,629	7,48	11,31	6,63	26,9	40,7	23,9
	19,251	11,155	39,856	5,04	8,70	2,43	18,1	31,3	8,8

TFM - Caracterização do perfil de ruído em vias de grande tráfego em Lisboa

Sentido	Tempo (s)		Velocidade média (m/s)			Velocidade média km/h			
	11,376	11,726	20,051	8,53	8,27	4,84	30,7	29,8	17,4
	18,124	0	0	5,35	0,00	0,00	19,3	0,0	0,0
	27,384	23,349	25,705	3,54	4,15	3,77	12,8	15,0	13,6
	11,512	6,856	4,841	8,43	14,15	20,04	30,3	50,9	72,1
	11,024	11,393	5,453	8,80	8,51	17,79	31,7	30,7	64,0
	6,703	5,673	6,824	14,47	17,10	14,21	52,1	61,6	51,2
	4,741	8,7	6,571	20,46	11,15	14,76	73,7	40,1	53,1
	9,87	7,022	6,363	9,83	13,81	15,24	35,4	49,7	54,9
	7,067	7,281	7,946	13,73	13,32	12,21	49,4	48,0	43,9
	7,33	5,78	3,744	13,23	16,78	25,91	47,6	60,4	93,3
	5,033	5,564	3,822	19,27	17,43	25,38	69,4	62,8	91,4
	5,194	4,5	4,397	18,68	21,56	22,06	67,2	77,6	79,4
	5,757	5,095	4,133	16,85	19,04	23,47	60,7	68,5	84,5
	6,57	6,819	2,84	14,76	14,22	34,15	53,2	51,2	123,0
	5,168	4,559	4,65	18,77	21,28	20,86	67,6	76,6	75,1
	4,91	5,419	4,539	19,76	17,90	21,37	71,1	64,4	76,9
	4,128	2,905	4,157	23,50	33,39	23,33	84,6	120,2	84,0
	5,75	4,715	4,702	16,87	20,57	20,63	60,7	74,1	74,3
	5,92	6,083	3,852	16,39	15,95	25,18	59,0	57,4	90,7
	5,988	3,895	5,174	16,20	24,90	18,75	58,3	89,7	67,5
	5,274	3,7	4,847	18,39	26,22	20,01	66,2	94,4	72,0

Anexo VI – Código de programação em R para obtenção do modelo

```
#Importar os dados da Amostra a partir de um ficheiro txt alojado no computador
```

```
A<-read.table(file.choose(),header=TRUE)
```

```
A
```

```
#Extrair as amostras e associar as variáveis
```

```
y<-A$Som
```

```
q<-A$Num_Veiculos
```

```
v<-A$Velocidade
```

```
x1<-log10(q)
```

```
x2<-log10(v)
```

```
#Resultados do modelo ajustado à velocidade e quantidade de veículos
```

```
result<-lm(y~x1+x2)
```

```
summary(result)
```

```
Residuals:
```

```
  Min   1Q Median   3Q   Max
-2.4158 -0.6264 0.2491 0.6708 2.2762
```

```
Coefficients:
```

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 59.2884    1.4098  42.055 < 2e-16 ***
x1           0.6015    0.5633   1.068  0.29
x2           5.6552    0.6371   8.877 1.59e-12 ***
```

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.9911 on 60 degrees of freedom
```

```
Multiple R-squared:  0.5699,    Adjusted R-squared:  0.5556
```

```
F-statistic: 39.75 on 2 and 60 DF,  p-value: 1.017e-11
```

```
#Erros ou resíduos
```

```
e<-resid(result)
```

```
#K-S-L
```

```
#Testar a normalidade dos resíduos
```

```
library(fBasics)
```

```
lillieTest(e)
```

```
Title:
```

```
Lilliefors (KS) Normality Test
```

```
Test Results:
```

```
STATISTIC:
```

```
  D: 0.1088
```

```
P VALUE:
```

```
  0.06164
```

#Testar a relevância das variáveis, velocidade e quantidade

```
library(leaps)
leap <- leaps(x=cbind(x1,x2),y=y, method=c("r2"), nbest=3)
combine <- cbind(leap$which,leap$size, leap$r2)
n <- length(leap$size)
dimnames(combine) <- list(1:n,c("x1=log(q)","x2=log(v)","size","r2"))
round(combine, digits=3)
```

```
x1=log(q) x2=log(v) size  r2
1      0      1  2 0.562
2      1      0  2 0.005
3      1      1  3 0.570
```

##Stepwise

```
step(lm(y ~ 1), direction="both",scope=~x1 + x2)
```

Start: AIC=50.95

y ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ x2	1	76.970	60.055	0.984
<none>		137.025	50.953	
+ x1	1	0.689	136.336	52.635

Step: AIC=0.98

y ~ x2

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>		60.055	0.984	
+ x1	1	1.12	58.935	1.798
- x2	1	76.97	137.025	50.953

Call:

```
lm(formula = y ~ x2)
```

Coefficients:

```
(Intercept)      x2
  60.162      5.638
```