



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

João Miguel Fernandes Vilela

IMPACTO SONORO DA MOBILIDADE ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Departamento de Engenharia Civil

João Miguel Fernandes Vilela

IMPACTO SONORO DA MOBILIDADE ELÉTRICA

NOISE IMPACT FROM ELECTRIC VEHICLES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2023



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

As minhas primeiras palavras de agradecimento vão para a minha orientadora de tese, a Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e para o meu coorientador, o Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho, por toda a orientação, conselhos e comentários que fizeram com que conseguisse realizar esta dissertação. Estendo também este agradecimento a todos os professores com quem tive o prazer de ter aulas durante o meu percurso académico.

Em seguida gostaria de agradecer ao meu grande pilar: a minha família, em especial ao meu pai, à minha mãe, ao meu tio Fernando Machado, à minha tia Piedade, ao meu padrinho João Maurício e à minha madrinha Filomena Sousa, por todo o apoio que sempre me prestaram, pelos bons conselhos e acima de tudo por me transmitirem os valores pelos quais me rejo e que me acompanharão em toda a minha vida.

O próximo agradecimento vai para os meus amigos, em especial aos que ingressaram comigo nesta aventura em 2015, por toda a camaradagem e momentos bem passados. Um agradecimento especial também para a turma de 2016/2017 por me terem acolhido da melhor maneira no seu núcleo, após o meu período de interrupção de estudos.

Agradeço ainda aos meus colegas da Leroy Merlin Coimbra, local onde trabalhei durante grande parte do meu percurso académico, por todas as experiências, camaradagem e ensinamentos vividos. Agradeço ainda por sempre terem facilitado quando foi necessário ajustar o horário para que não faltasse às aulas ou para quando tinha de me ausentar para realizar um exame.

O meu último agradecimento vai para a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e para o Departamento de Engenharia Civil, pelas boas condições proporcionadas.

RESUMO

Esta tese propõe-se explorar uma vertente menos falada de poluição: a poluição sonora. A poluição sonora não tem um impacto direto sobre o meio ambiente, mas tem um grande impacto na saúde pública. Este fenómeno verifica-se principalmente em cidades e é causado maioritariamente por ruído proveniente do tráfego rodoviário.

Os veículos elétricos constituem uma oportunidade de mitigar este problema, visto que os motores de propulsão elétrica são mais silenciosos do que os motores de combustão interna. Com este tipo de veículos a ganhar cada vez mais expressão nos mercados de todo o mundo, de que forma podem ter impacto na mitigação da poluição sonora, em particular nas cidades? Que outras medidas estão a ser implementadas com o objetivo de reduzir o ruído proveniente do tráfego rodoviário? De que forma algumas destas medidas poderiam ajudar a melhorar a qualidade sonora de uma avenida (e sua envolvente) situada na cidade de Coimbra?

Nesta tese pretende-se contribuir com respostas que ajudem a encontrar soluções para estas questões. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica focando nas diferenças entre a emissão de ruído em veículos a combustão e em veículos elétricos. São também descritas algumas estratégias de mitigação de ruído implementadas na Europa. Por último, é feito um estudo de modelação de ruído para uma avenida da cidade de Coimbra, onde são experimentadas algumas das estratégias de mitigação de ruído, que incluem a utilização do veículo elétrico.

Os estudos consultados no âmbito da realização desta dissertação permitiram concluir que a transição para mobilidade elétrica poderá ajudar a mitigar o ruído proveniente do tráfego rodoviário, desde que esta seja aliada a um conjunto de medidas de mitigação de ruído proveniente do tráfego rodoviário. No âmbito do estudo realizado para a Avenida Emídio Navarro, situada na baixa da Cidade de Coimbra, conclui-se também que a transição para mobilidade elétrica poderá resultar em benefícios acústicos significativos para o local, desde que esta seja acompanhada de outras medidas de mitigação de ruído.

Palavras-chave: ruído do tráfego rodoviário; veículo elétrico; veículo com motor de combustão interna; modelação de ruído.

ABSTRACT

This thesis proposes to explore a less known form of pollution: noise pollution. Although noise pollution doesn't have a direct impact on the environment itself, it has a big impact on public health. This is a phenomenon majorly occurring in cities and it's caused mostly by noise generated by road traffic.

Electric vehicles constitute an opportunity to mitigate this problem, being that fully electric engines are typically quieter than their internal combustion counterparts. With these types of vehicles gaining more market share as time goes by, how can they mitigate the problem of noise pollution, particularly in cities? What other measures are being adopted to help reduce noise from road traffic? How some of these measures could help improve the sound quality of an avenue (and its surroundings) located in Coimbra?

This thesis aims to contribute with answers that help to find solutions for these questions. For this, a bibliographic review was carried out focusing on the differences on noise emission between combustion vehicles and electric vehicles. Some noise mitigation strategies and measures implemented in Europe are also described. Finally, a noise modeling study is carried out for an avenue in the city of Coimbra, where some of the noise mitigation strategies, which include the electric vehicle, are tried.

The studies consulted in the context of carrying out this dissertation, allowed us to conclude that the transition to electric mobility, if combined with a set of measures to mitigate noise from road traffic, can help to mitigate noise from road traffic. Within the scope of the study carried out for Avenida Emídio Navarro, located in downtown Coimbra, it was also concluded that the transition to electric mobility, combined with other noise mitigation measures, could result in significant acoustic benefits for the location.

Keywords: road traffic noise; electric vehicle; internal combustion engine vehicle; noise modelling.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de quadros	viii
Abreviaturas	ix
Simbologia	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Estrutura da tese	2
2 Veículos Elétricos	3
2.1 Tipos de veículos elétricos	3
2.1.1 Veículo Híbrido (HEV).....	3
2.1.2 Veículo híbrido ‘plug-in’ (PHEV)	4
2.1.3 Veículo elétrico a bateria (BEV).....	4
2.1.4 Veículo elétrico com célula de combustível (FCEV).....	5
2.2 Micromobilidade	6
2.3 Evolução da quota de mercado dos veículos elétricos	7
2.4 Incentivos fiscais para a aquisição de veículos elétricos em Portugal	10
2.5 Perspetivas futuras	12
3 Ruído gerado pelo tráfego rodoviário	13
3.1 Ruído ambiente na Europa	13
3.2 Ruído ambiente em Portugal.....	18

3.3	Componentes responsáveis pela geração de ruído em veículos.....	18
3.3.1	Propulsão.....	19
3.3.2	Rolamento.....	19
3.3.3	Ruído aerodinâmico.....	20
3.4	Ruído emitido por EVs e ICEVs.....	21
3.5	Sons exteriores de aviso.....	26
3.6	Estratégias para mitigar o ruído gerado pelo tráfego rodoviário.....	30
3.6.1	Exemplos de medidas de mitigação de ruído em cidades e países europeus ...	32
3.6.2	Exemplos de criação e preservação de Quiet Areas em cidades europeias	34
3.6.3	Low Emission Zone (LEZ) e Zero Emission Zone (ZEZ).....	34
4	Análise de um caso de estudo.....	37
4.1	Descrição da área de estudo.....	37
4.2	Metodologia de cálculo CNOSSOS.....	40
4.3	Dados de entrada.....	43
4.3.1	Definição dos parâmetros dos veículos elétricos.....	43
4.3.2	Contagem de veículos.....	44
4.4	Resultados.....	45
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	52
5.1	Conclusões.....	52
5.2	Trabalhos futuros.....	54
	Referências Bibliográficas.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Funcionamento de três categorias de veículos elétricos (HEV, PHEV e BEV). (Fonte: Angeline et al., 2020).	5
Figura 2.2 - Trotinetes elétricas (Bolt) em Lisboa (Fonte: WELECTRIC, 2020)	7
Figura 2.3 - Evolução do número de veículos elétricos em circulação desde 2010 até 2021. (Fonte: IEA, 2022).	8
Figura 2.4 - Vendas de autocarros e camiões elétricos entre 2015 e 2021. (Fonte: IEA, 2022).	9
Figura 3.1 - Percentagem estimada de pessoas expostas a ruído proveniente de tráfego rodoviário $L_{den} \geq 55$ dB e $L_n \geq 50$ dB nas principais cidades europeias. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).	15
Figura 3.2 - Percentagem estimada de população em zonas urbanas expostas a níveis sonoros iguais ou superiores a 55 dB no período DEN. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).	16
Figura 3.3 - Percentagem estimada do total de população de um país exposta a $L_{den} \geq 55$ dB nas principais estradas fora de zonas urbanas. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).	17
Figura 3.4 - Rotulagem em vigor na União Europeia desde 1 de Maio de 2021 com informações sobre aderência em superfícies molhadas, poupança de combustível e ruído (Fonte: DUNLOP, n.d.).	20
Figura 3.5 - Perturbação de um fluido (ar) por um objeto em movimento (carro). (Fonte: Razão Automóvel, 2019).	21
Figura 3.6 - Ruído máximo emitido por um carro a gasóleo, um EV e um HEV. (Fonte: estudo francês de Joël Lelong e Roger Michelet, contido no relatório COMPETT 2013) (Marbjerg, 2013).	22
Figura 3.7 - Comparação entre o nível de pressão sonora no interior de um EV vs ICEV. Fonte: (Qian et al., 2020).	25
Figura 3.8 - Comparação dos espectros de frequência de EVs e ICEVs conduzidos às velocidades: a) 10 km/h; b) 20 km/h. Fonte: (Pereira, 2014).	29

Figura 3.9 - Exemplos de estratégias de controlo e mitigação da exposição ao ruído (Fonte: EEA, 2020).....	30
Figura 3.10 - Radar de ruído instalado em Villeneuve-le-Roi, perto do aeroporto Orly em Paris (Fonte: The Guardian, 2022).....	33
Figura 4.1 - Descrição visual do local de estudo - Avenida Emídio Navarro (Fonte: Google Maps).....	38
Figura 4.2 - Mapa de ruído da área de estudo e respetiva legenda. (Fonte: Câmara Municipal de Coimbra, 2013)	39
Figura 4.3 - Modelação da área de estudo no CadnaA e identificação dos recetores.	45
Figura 4.4 - Mapa de ruído da Avenida Emídio Navarro, correspondente à caracterização do cenário atual.	50
Figura 4.5 - Mapa de ruído da Avenida Emídio Navarro, correspondente à última simulação.	51

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Coeficientes para o ruído de rolamento e propulsão para veículos ligeiros a combustão segundo a Diretiva 2015/996 da Comissão Europeia	43
Quadro 4.2 - Correção a aplicar nos coeficientes referentes à propulsão (A_p) da categoria 1 (Pallas et al., 2016).....	44
Quadro 4.3 - Contagem de veículos na Avenida Emídio Navarro.....	44
Quadro 4.4 - Resultados da primeira simulação, onde se faz a caracterização da situação atual, considerando uma velocidade de circulação de 50 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 35 km/h para veículos pesados.	46
Quadro 4.5 - Resultados da segunda simulação, considerando uma velocidade de circulação de 30 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 20 km/h para veículos pesados, mantendo os veículos a combustão.....	47
Quadro 4.6 - Resultados da terceira simulação, considerando a mesma velocidade de circulação da simulação 1 e trocando os veículos a combustão por veículos elétricos.....	47
Quadro 4.7 - Resultados da quarta simulação, combinando as medidas das simulações dois e três.	48
Quadro 4.8 - Resultados da quinta simulação, mantendo os parâmetros da simulação anterior e reduzindo o volume de tráfego em 50%.....	49
Quadro 4.9 - Resultados na sexta simulação, mantendo os parâmetros da simulação anterior e eliminando os veículos pesados.	49

ABREVIATURAS

- AVAS – Acoustic Vehicle Alerting System
- BEV – Battery Electric Vehicle
- CCDR – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
- COMPETT – Competitive Electric Town Transport
- CPB – Controlled Pass By
- CPX – Close ProXimity
- DAC – Dense Asphalt Concrete
- DEN – Day-Evening-Night
- EC – European Comission
- EEA – European Environment Agency
- END – European Noise Directive
- EV – Electric Vehicle
- FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle
- HEV – Hybrid Electric Vehicle
- ICE – Internal Combustion Engine
- ICEV – Internal Combustion Engine Vehicle
- IMT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes
- ISG – Integrated Starter Generator
- LEZ – Low Emission Zone

NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration

PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicles

OMS – Organização Mundial da Saúde

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RPM – Revolutions Per Minute

SMA – Stone Mastic Asphalt

SPL – Sound Pressure Level

ZEZ – Zero Emission Zone

SIMBOLOGIA

$A_R B_R$ – Coeficientes de ruído associados ao rolamento

$A_P B_P$ – Coeficientes de ruído associados à propulsão

CO – Monóxido de Carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

f – Frequência em bandas de oitava [63Hz – 8kHz]

H – Hidrogénio

i – Banda de frequência

L_{den} – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno [dB]

L_{LT} – Nível sonoro a longo termo [dB]

L_f – Nível sonoro com condições meteorológicas favoráveis [dB]

L_H – Nível sonoro com condições meteorológicas desfavoráveis [dB]

L_n – Indicador de ruído referente ao período noturno [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_{WR} – Potência sonora resultante do rolamento [dB]

L_{WP} – Potência sonora resultante da propulsão [dB]

$L_{W,i,m}$ - Nível de potência sonora do emissor [dB]

$\Delta L_{WR,road,i,m}$ – Efeito da superfície da estrada no ruído associado ao rolamento [dB]

m – Categoria do veículo

O_2 – Oxigénio

p – Valor eficaz da pressão [Pa]

p_{ref} – Valor da pressão de referência [2×10^{-5} Pa]

p_f – Probabilidade de ocorrência de condições meteorológicas favoráveis [dB]

v – Velocidade de circulação do veículo [km/h]

v_{ref} - Velocidade de referência [70 km/h]

$\alpha_{i,m}$ – Correção espectral em relação à velocidade de referência [dB]

β_m – Coeficiente que traduz o efeito da velocidade na redução do ruído do rolamento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O ruído proveniente do tráfego rodoviário é a segunda maior ameaça ambiental à saúde pública, segundo a OMS (WHO, 2011). De acordo com a mesma, a longa exposição a elevados níveis de ruído, como é exemplo a exposição prolongada a ruído proveniente do tráfego rodoviário acima dos 53 dB, pode causar problemas graves de saúde, como por exemplo tensão arterial elevada, perda de audição e até mesmo ataques cardíacos.

Este é um problema particularmente grave nos centros urbanos, onde situações como tráfego rodoviário congestionado e elevado são frequentes. Segundo (EEA, 2020), nas principais cidades europeias, a percentagem de pessoas expostas a $L_{den} \geq 55$ dB frequentemente excede os 50% (em alguns casos esta percentagem é próxima de 100%). A percentagem de pessoas expostas a $L_n \geq 50$ dB é também preocupante, com algumas cidades a apresentar percentagens entre os 80% e os 90%. L_{den} e L_n são indicadores de ruído para o período dia-entardecer-noite e para o período noturno, respetivamente. No total, estima-se que na Europa o número de pessoas expostas a $L_{den} \geq 55$ dB seja aproximadamente 82 milhões e 31 milhões em zonas urbanas e não urbanas, respetivamente (EEA, 2020). O número de pessoas expostas a $L_n \geq 50$ dB estima-se em 57 milhões e 21 milhões em zonas urbanas e não urbanas, respetivamente (EEA, 2020).

Recentemente, o número de veículos com motorizações elétricas tem aumentado um pouco por todo o mundo. Estes veículos, para além dos seus conhecidos benefícios a nível de poluição atmosférica, podem também ajudar a atenuar o ruído proveniente do tráfego rodoviário, uma vez que são considerados mais silenciosos quando comparados com veículos tradicionais com motores de combustão interna.

Analisando a perceção do ruído proveniente do tráfego rodoviário, na perspetiva dos peões, este é causado maioritariamente por duas fontes: a propulsão e o rolamento. A velocidades mais elevadas, o ruído proveniente do rolamento acaba por se sobrepor ao ruído proveniente do motor. Estas novas soluções poderão, então, ser particularmente interessantes em contexto citadino, caracterizado por condições de circulação de paragem e arranque frequentes ou com velocidades mais baixas e trânsito elevado.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo investigar de que forma os veículos elétricos podem ajudar a reduzir o ruído proveniente do tráfego rodoviário, em particular nas cidades, onde este problema é particularmente grave e perceber que medidas estão a ser tomadas para incentivar a aquisição deste tipo de veículos, bem como outras medidas que estejam a ser implementadas que promovam paisagens sonoras mais agradáveis. Com este intuito é realizado um trabalho de pesquisa bibliográfica, complementado por uma análise de um caso de estudo, onde se avalia o ruído na envolvente de uma avenida situada na baixa da cidade de Coimbra e o impacto sonoro da implementação de algumas medidas de mitigação de ruído.

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. O Capítulo 1, do qual esta introdução faz parte, consiste num breve enquadramento do trabalho e na definição dos objetivos e estrutura do mesmo. Seguidamente apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre veículos elétricos, com foco nas suas diferentes tipologias e evolução da quota de mercado dos mesmos (Capítulo 2). Depois segue-se uma revisão bibliográfica sobre ruído proveniente dos veículos e do tráfego rodoviário, onde serão analisados dados de ruído na Europa, as fontes de ruído, alguns exemplos de estudos de outros autores que fazem uma comparação entre o ruído emitido por veículos elétricos (EVs) e veículos com motores de combustão (ICEVs), sons exteriores de aviso e sua importância e estratégias de mitigação de ruído (Capítulo 3). Segue-se um trabalho de modelação de ruído aplicado a um caso real, com o objetivo de tentar perceber como é que veículos mais silenciosos, aliados a outras medidas e estratégias de mitigação de ruído, podem impactar a paisagem sonora de uma avenida situada na baixa da cidade de Coimbra (Capítulo 4). Por fim apresentam-se as principais conclusões a retirar deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros (Capítulo 5).

2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

A fonte mais importante de poluição sonora, em termos do número de pessoas afetadas, tanto dentro como fora das zonas urbanas é o tráfego rodoviário (EEA, 2016). Um dos objetivos mais importantes da Comissão Europeia é a redução do número de carros convencionais em zonas urbanas para metade em 2030 e extinguir os mesmos completamente até 2050 (EC, 2017). Apesar desta preocupação resultar maioritariamente do combate às emissões de gases poluentes, a diminuição de ruído poderá surgir como uma consequência positiva.

Tendo em conta que os veículos elétricos são tipicamente mais silenciosos quando comparados com os veículos convencionais (que utilizam motores de combustão interna), esta eletrificação da frota de veículos apresenta uma oportunidade para não só tornar as cidades menos poluídas a nível atmosférico, como também fazer com que as mesmas se tornem mais silenciosas.

O presente capítulo faz uma breve revisão sobre os vários tipos de veículos elétricos, seguida de uma reflexão sobre a evolução da quota de mercado destes e sobre algumas medidas que estão a ser tomadas para promover a sua aquisição.

2.1 Tipos de veículos elétricos

2.1.1 Veículo Híbrido (HEV)

Estes veículos são propulsionados por um motor tradicional a combustão e por um ou mais motores elétricos, que usam energia armazenada num conjunto de baterias (U.S. Department of Energy, n.d.). Estas baterias não são carregadas através da rede elétrica, mas sim através de travagem regenerativa e através do motor de combustão (Ver Figura 2.1).

A travagem regenerativa é uma tecnologia que permite, como o nome sugere, recuperar alguma energia enquanto o veículo abranda. Durante a travagem, o motor elétrico atua como um gerador que transforma a energia cinética em energia elétrica que pode ser armazenada ou utilizada de imediato (Angeline et al., 2020).

Outra tecnologia utilizada por este tipo de veículos é o ISG (*Integrated Starter Generator*). Este dispositivo substitui o tradicional motor de arranque e alternador, permitindo colocar o carro a trabalhar com menor ruído e de forma mais rápida (Khlissa et al., 2016). Como não é necessário enriquecer o combustível, as emissões de poluentes no arranque também são consideravelmente menores, assim como o consumo de combustível (Angeline et al., 2020).

Existem ainda outras vantagens como (Angeline et al., 2020):

- Equipamentos como ar condicionado, luzes e rádio são alimentados com este dispositivo com muito maior eficiência energética;
- Em situações de trânsito, quando o carro é imobilizado o motor desliga-se poupando combustível e reduzindo assim as emissões de gases poluentes e a emissão de ruído;
- É um sistema eficiente que pode ser adotado em todos os novos carros, até mesmo em carros que trabalhem exclusivamente com motores de combustão interna.

Dentro da categoria de veículos híbridos existem diferentes abordagens (veículos híbridos em série, em paralelo ou combinados), que diferem na maneira como os motores elétrico e de combustão cooperam entre si.

2.1.2 Veículo híbrido ‘plug-in’ (PHEV)

Os PHEVs (ver Figura 2.1) operam de forma semelhante aos HEVs, mas possuem baterias de maior capacidade, sendo que as mesmas podem ser carregadas diretamente através da rede elétrica. Estes veículos podem ser movidos exclusivamente através de energia elétrica, através da utilização de combustível fóssil ou através de uma combinação de ambos (Neves et al., 2019).

2.1.3 Veículo elétrico a bateria (BEV)

Veículos elétricos a bateria, como o nome indica, funcionam exclusivamente através de energia elétrica (ver Figura 2.1), proveniente da rede (Neves et al., 2019). Esta energia é armazenada no *pack* de baterias e posteriormente distribuída pelos motores elétricos (Lee et al., 2022). Estas

baterias apresentam maior capacidade resultando numa autonomia elétrica superior à dos veículos híbridos. Estes veículos não emitem gases poluentes e são mais silenciosos do que veículos com motores de combustão. Os BEVs permitem uma aceleração suave e rápida e dispõem ainda de uma rede de estações de carregamento espalhadas pelo território, o que proporciona uma opção de carregamento conveniente (Angeline, P., et al., 2020).

2.1.4 Veículo elétrico com célula de combustível (FCEV)

FCEVs são veículos, à semelhança dos BEVs, não poluentes, com a particularidade de gerarem energia através de uma pilha de células de combustível (Lee et al., 2022). Esta gera eletricidade através de uma reação eletroquímica entre o hidrogénio (H) armazenado e o oxigénio (O_2) presente no ar, sendo o produto resultante desta reação água pura (Ligen et al., 2020). Estes veículos estão equipados com tanques de alta pressão para armazenar o hidrogénio e têm a vantagem de ter autonomia e tempo de reabastecimento comparáveis com os veículos ICE (Pollet et al., 2019).

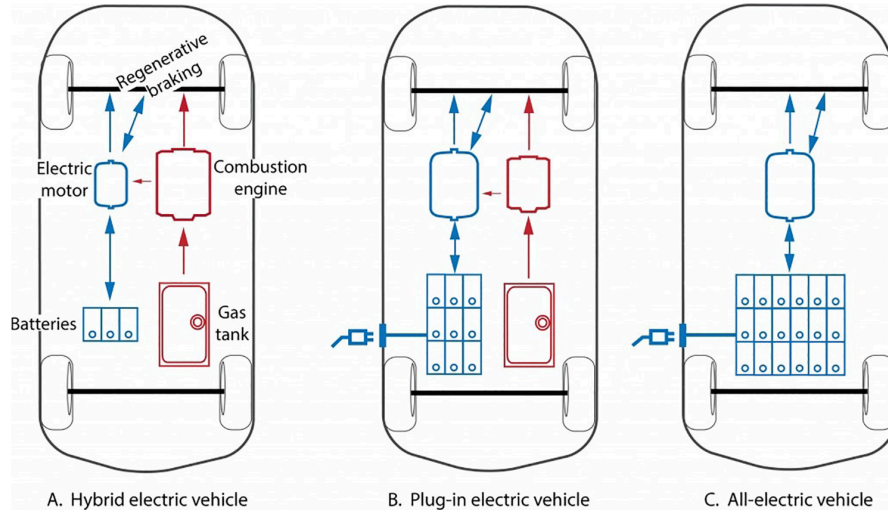


Figura 2.1 - Funcionamento de três categorias de veículos elétricos (HEV, PHEV e BEV). (Fonte: Angeline et al., 2020).

2.2 Micromobilidade

A congestão gerada pelo tráfego rodoviário é um dos maiores desafios atuais dos sistemas de transporte em grandes cidades (Hong et al., 2022). Com o desenvolvimento tecnológico, outras formas de mobilidade como os serviços de micromobilidade partilhada devem ser tidas em conta num panorama de cidade sustentável. Estes veículos de pequenas dimensões têm potencial para substituir os automóveis em viagens curtas, ajudando a descongestionar as estradas e a reduzir a pegada ecológica do transporte urbano (Reck et al., 2021).

Por se tratar de meios de transporte de menor dimensão e que circulam a velocidades tipicamente mais baixas, é expectável que o ruído emitido pelo rolamento seja menor.

(Reck et al., 2021) estima que os principais modos de transporte dentro da categoria da micromobilidade são: trotinetes elétricas, bicicletas elétricas (*dockless*), bicicletas elétricas (*docked*) e bicicletas (*docked*). Os termos *docked* e *dockless* referem-se ao facto de estes meios de transporte se encontrarem ou não em estações, respetivamente. O sistema *docked* apresenta a limitação de não estar distribuída de forma homogénea pelo território. Assim, o sistema *dockless* surge como uma opção bastante mais flexível e conveniente (Meng & Brown, 2021).

(Cao et al., 2021) refere que os serviços de micromobilidade podem inclusive ser alternativas interessantes aos transportes públicos, ou pelo menos servirem como complemento.

Estes meios de transporte inserem-se ainda numa categoria de mobilidade partilhada, podendo ser utilizados por várias pessoas, o que para além de ser bom a nível ambiental, é também uma excelente oportunidade a nível financeiro. Estima-se que em 2019, só em Lisboa, a mobilidade partilhada (bicicletas, trotinetes ou carsharing) foi responsável por cerca de 30 mil viagens/dia, com um número de utilizadores que terá ascendido aos 400 mil, o que terá valido um encaixe financeiro de 50 milhões de euros (Ekonomista, 2021).

Na Figura 2.2 é possível visualizar um exemplo de trotinetes elétricas, no caso da marca *Bolt*, na cidade de Lisboa (WELECTRIC, 2020).



Figura 2.2 - Trotinetes elétricas (Bolt) em Lisboa (Fonte: WELECTRIC, 2020)

Este tipo de mobilidade tem ganho cada vez mais popularidade, mas ainda é encarada com algum ceticismo por parte de alguns, nomeadamente devido às preocupações relacionadas com a segurança rodoviária (Fang, 2022). É comum ver estes meios de transporte a circular nas estradas, em conjunto com o restante tráfego rodoviário, o que constitui um risco. Noutras situações, estes veículos podem partilhar a via com peões, o que constitui outro risco. Em algumas destas vias partilhadas, por vezes são instalados sinais de velocidade máxima (10 km/h) (Haworth et al, 2019). No seu estudo, (Haworth et al, 2019), refere ainda que deve ser assegurado o uso de capacetes nestes veículos e que a polícia deve ter um papel ativo em garantir o cumprimento desta regra. Para além do uso de capacetes, (Fang, 2022) refere no seu estudo que vários outros estudos aconselham o uso de outros equipamentos de proteção, como joelheiras e outros equipamentos almofadados que protejam as extremidades.

2.3 Evolução da quota de mercado dos veículos elétricos

Neste subcapítulo faz-se uma análise sobre a evolução do número de veículos elétricos em circulação, tendo sido utilizado como suporte o documento ‘*Global EV Outlook 2022*’ da Agência Internacional da Energia (IEA, 2022).

O mercado de carros elétricos tem evoluído a um ritmo extraordinário. De 2020 para 2021 as vendas deste tipo de veículos duplicaram, atingindo um valor recorde de 6,6 milhões de veículos vendidos, o que correspondeu a 10% das vendas de veículos em todo o mundo. Ao todo, o

número de EVs a circular nas estradas subiu para os 16,5 milhões, o triplo do verificado em 2018. Em 2022 a tendência de crescimento manteve-se, com 2 milhões de veículos vendidos nos primeiros quatro meses (o relatório foi publicado em Maio do referido ano), um aumento de 75% face ao mesmo período em 2021 (IEA, 2022).

Na Figura 2.3 é possível verificar a evolução do número de veículos elétricos em circulação de 2010 a 2021.

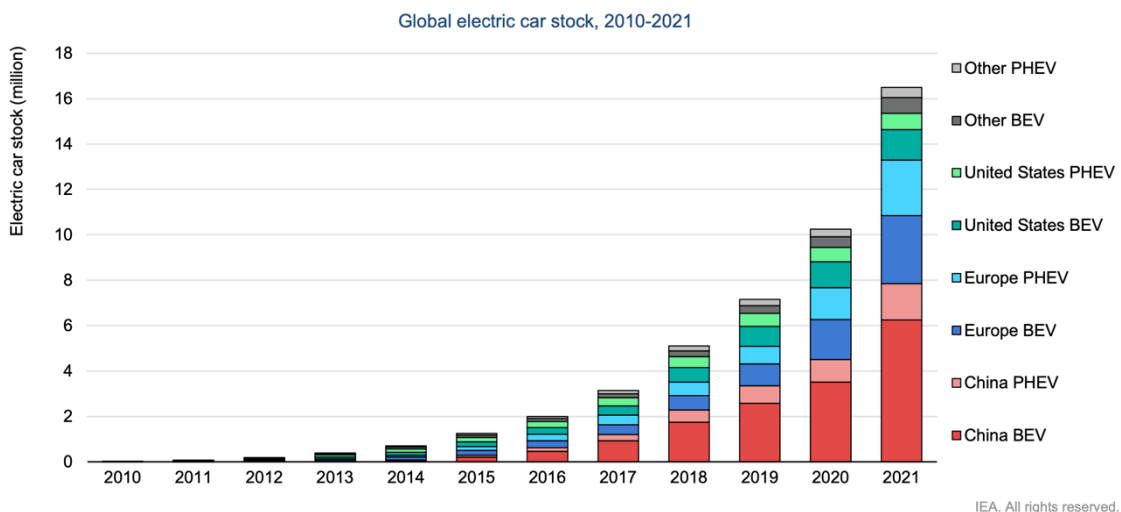


Figura 2.3 - Evolução do número de veículos elétricos em circulação desde 2010 até 2021. (Fonte: IEA, 2022).

Numa breve análise, é possível constatar que a China é responsável por cerca de metade da quota de mercado de EVs, tendo praticamente duplicado o número de vendas em 2021 em comparação com o ano transato. Na Europa destaca-se o crescimento que se tem verificado nos últimos anos. Em 2021, 17% das vendas automóveis na Europa foram EVs, sendo a Noruega o país onde esta percentagem foi mais significativa, atingindo os 86%. A Islândia surge a seguir, com 72% das vendas automóveis a corresponder a veículos elétricos (IEA, 2022).

No que diz respeito aos veículos pesados, a tendência é semelhante à dos veículos ligeiros (ver Figura 2.4). A eletrificação das frotas de veículos pesados assume uma grande importância na

transição para formas de deslocação mais verdes. Em 2021, as vendas de autocarros elétricos aumentaram 40% em comparação com o ano anterior enquanto as vendas de camiões elétricos aumentaram em mais de 50% no mesmo período (IEA, 2022).

Em 2021, a quota global de autocarros elétricos foi de 670 000 (cerca de 4% da frota mundial de autocarros) enquanto a quota global de camiões foi de 66 000 (cerca de 0,1% da frota mundial de camiões) (IEA, 2022).

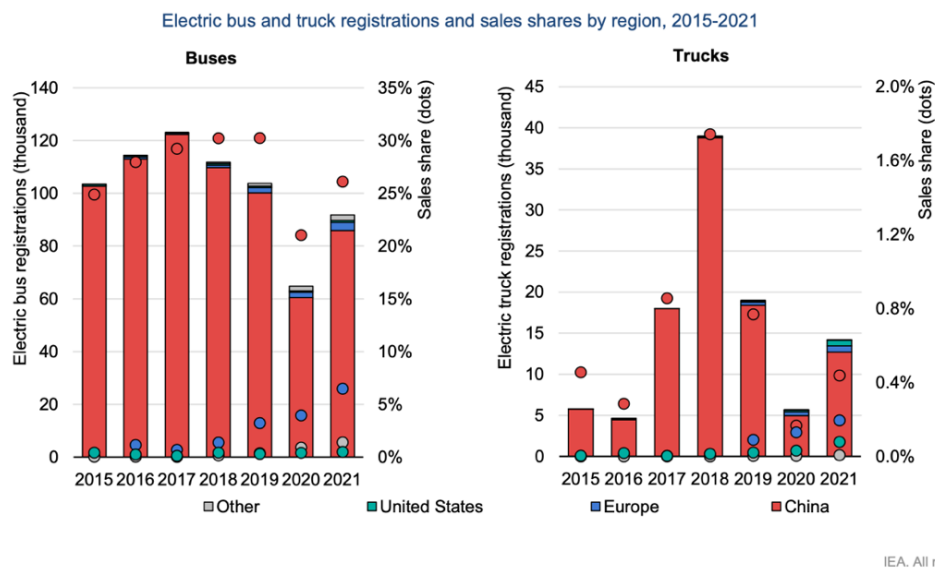


Figura 2.4 - Vendas de autocarros e camiões elétricos entre 2015 e 2021. (Fonte: IEA, 2022).

A China foi responsável por 90% das vendas de veículos pesados elétricos em 2021. Em 2017 a percentagem era de praticamente 100% (IEA, 2022).

Nos centros urbanos, a adoção de veículos pesados elétricos como por exemplo camiões de lixo elétricos (que circulam tipicamente a baixa velocidade e estão parados durante longos períodos) poderia ter um elevado impacto na paisagem sonora.

2.4 Incentivos fiscais para a aquisição de veículos elétricos em Portugal

Os veículos elétricos continuam a ser consideravelmente mais caros do que as alternativas equivalentes convencionais (Magueta et al., 2018). Para ultrapassar esta desvantagem, a maior parte dos países membros da EU introduziram um conjunto de medidas políticas e incentivos (Magueta et al., 2018).

Portugal assumiu o compromisso de atingir a neutralidade carbónica até 2050, sendo o setor dos transportes um dos mais importantes a ter em conta para alcançar esta meta. Com efeito, o Plano Nacional Energia e Clima 2030 tem como um dos seus objetivos a redução das emissões de Gases com Efeito Estufa em 40% (Despacho n.º 2535/2021, 2021).

A atribuição de incentivos no ano de 2022 é regulada pelo (Despacho n.º 3419-B/2022, 2022).

No que diz respeito à aquisição de veículos de baixas emissões, em 2022, o Fundo Ambiental disponibilizou um apoio de 10 milhões de euros, o que corresponde a um aumento superior ao dobro face ao valor disponibilizado em 2021 (4,5 milhões de euros) (Despacho n.º 3419-B/2022, 2022).

Neste, são definidas 7 tipologias de veículos, organizadas da seguinte forma:

Tipologia 1 – Veículos ligeiros de passageiros (categoria M1 – atribuída pelo IMT).

Tipologia 2 – Veículos ligeiros de mercadorias.

Tipologia 3 – Bicicletas de carga, com ou sem assistência elétrica.

Tipologia 4 – Bicicletas elétricas para uso cidadão.

Tipologia 5 – Motociclos, ciclomotores, quadriciclos, triciclos e outros dispositivos de mobilidade pessoal (elétricos).

Tipologia 6 – Bicicletas cidadinas convencionais.

Tipologia 7 – Carregadores para veículos elétricos em condomínios multifamiliares com ligação à rede Mobi.E.

A atribuição de apoios está sujeita a um limite máximo de incentivos por tipologia (tanto em número total de incentivos como em termos de valor total somado), conforme pode ser consultado no Despacho n.º 3419-B/2022.

Para melhorar o setor dos transportes, o governo português introduziu um conjunto de medidas relacionadas com eficiência energética. No site da Agência Internacional da Energia é possível consultar um conjunto de legislação e políticas em vigor em Portugal (IEA, n.d.), como por exemplo:

- Plano de Recuperação e Resiliência/ Mobilidade sustentável/ Descarbonização de transportes públicos (2021);
- Plano de Recuperação e Resiliência/ Mobilidade sustentável/ Investimento na infraestrutura de transportes públicos (2021);
- Plano de Recuperação e Resiliência/ Mobilidade sustentável/ Reforma do sistema de transportes (2021);
- Estratégia do Hidrogénio (2020);
- Incentivos para a descarbonização da frota de táxis (2019);
- Incentivos locais para aquisição de EVs – subsídios (2017);
- Incentivos locais – taxas de pagamento reduzidas ou inexistentes em parques de estacionamento (2017);
- Benefícios fiscais para os proprietários de EVs (2017);
- Programa MOBI.E – Implementação de estações de carregamento – Resolução n.º 49/2016 (2016);
- Subsídios na compra de EVs (2015).

Em 2022 foi anunciada a aquisição de 193 autocarros elétricos e apoiada a instalação de 136 postos de carregamento para as frotas limpas de transportes públicos (Gabinete do Ministro do Ambiente e da Ação Climática, 2022). Estes autocarros prestarão serviço fora das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto.

2.5 Perspetivas futuras

Em Junho de 2022, o Parlamento Europeu apoiou a proposta da Comissão Europeia relativa ao objetivo de zero emissões para os novos automóveis de passageiros e veículos comerciais ligeiros até 2035 (Parlamento Europeu, 2022). Na mesma proposta, foram fixadas metas intermédias para a redução das emissões de CO_2 dos automóveis de passageiros em 55% e 50% para veículos comerciais ligeiros (Parlamento Europeu, 2022).

Na prática, esta proposta significa que a partir de 2035 será proibida a venda de carros novos com motores de combustão (Lavrador, 2022). O eurodeputado holandês Jan Huitema, que elaborou o relatório sobre a revisão das normas de CO_2 da EU para os novos carros e carrinhas, refere que os carros a combustão em circulação poderão continuar a ser conduzidos até ao fim da sua vida útil, contudo, como é estimado que a vida útil de um carro seja aproximadamente 15 anos, esta lei permitirá que em 2050, quase todos os carros em circulação sejam neutros em CO_2 (Parlamento Europeu, 2022).

Tal como já foi abordado neste trabalho, esta mudança obrigatória para veículos neutros em CO_2 implica também uma mudança para veículos mais silenciosos, o que poderá resultar em benefícios para os centros urbanos europeus.

3 RUÍDO GERADO PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Segundo a (APA, 2021b), som é qualquer variação de pressão no ar que o ouvido pode detetar. Quando este som se torna desagradável ou indesejável devido às suas características, local onde ocorre e respetiva duração, passa a denominar-se ruído. A *European Noise Directive* (END) define ruído ambiente como todo o som exterior indesejado ou prejudicial criado por atividades humanas, como por exemplo, ruído emitido pelos transportes e por atividades industriais (EEA, 2020).

Neste capítulo faz-se uma revisão sobre a situação atual de ruído na Europa, com foco no ruído proveniente do tráfego rodoviário. São analisados componentes responsáveis pela geração de ruído e faz-se a comparação entre veículos elétricos e veículos com motores de combustão. Por fim, é feita uma revisão de algumas medidas que estão a ser tomadas para mitigar o problema que é o ruído proveniente do tráfego rodoviário.

3.1 Ruído ambiente na Europa

Esta secção e a próxima são suportadas pelo relatório *Environmental Noise in Europe 2020*, que apresenta uma análise do ruído ambiente na Europa, tendo por base dados submetidos pelos países membros ao abrigo da diretiva END (*European Noise Directive*) (EEA, 2020). Este é um relatório muito detalhado, que tem em conta várias fontes de ruído. O autor optou por focar-se na análise de dados de ruído provenientes do tráfego rodoviário por ser a situação de maior relevância para esta dissertação.

Na Europa, a END é a principal ferramenta legislativa para reduzir as emissões de ruído. Entre outros, esta diretiva obriga os países membros a:

- Produzir mapas de ruído para as principais estradas (onde circulem mais de 3 milhões de veículos por ano em zonas não urbanas e em zonas urbanas com mais de 100 mil habitantes), caminhos de ferro e aeroportos. Um mapa de ruído consiste numa representação gráfica, utilizando uma escala de cor. Esta escala pode traduzir níveis de ruído emitido, número de pessoas afetadas numa dada área ou o número de habitações expostas a certo nível de emissão de ruído numa certa área (*Directive 2002/49/EC*, 2002). Esta é uma das principais ferramentas para perceber o ponto de situação referente ao ruído proveniente do tráfego rodoviário de um

dado local. Os métodos para construção destes mapas baseiam-se em recolha de dados, equações empíricas, modelos probabilísticos e algoritmos. Em termos de estradas, isto equivale a cerca de 420 791 quilómetros mapeados. De salientar que alguns dos dados foram estimados, por falta de informação (cerca de 40% para zonas urbanas e 30% para zonas não urbanas) (EEA, 2020).

- Determinar o número de pessoas expostas às fontes de ruído citadas acima, dentro e fora das zonas urbanas. São considerados valores elevados de ruído: $L_{den} \geq 55$ dB e $L_n \geq 50$ dB. L_{den} é o indicador de ruído expresso em dB, durante as 24 horas de um dia, incluindo os períodos diurno (entre as 7 horas e as 20 horas), o período de entardecer (entre as 20 horas e as 23 horas) e o período noturno (entre as 23 horas e as 7 horas) (Matos et al., 2020). L_n é o indicador de ruído para o período noturno, medido em dB (Matos et al., 2020). Ambos os indicadores têm uma representatividade correspondente a 1 ano (Matos et al., 2020).

Na Europa há uma média de 500 veículos por cada 1000 habitantes (EEA, 2020). Uma das conclusões que facilmente se retira deste relatório é que o ruído proveniente do tráfego rodoviário excede largamente o ruído proveniente das outras fontes.

Estima-se que cerca de 82 milhões de pessoas são expostas a níveis de ruído de pelo menos 55 dB (L_{den}) proveniente de tráfego rodoviário dentro de zonas urbanas, e cerca de 31 milhões de pessoas são expostas a estes valores fora de zonas urbanas. Para o período noturno, estes valores são de 57 milhões e 21 milhões de habitantes, respetivamente. Significa, portanto, que em contexto europeu cerca de 20% da população está exposta a elevados níveis de ruído no período DEN e 15 % no período noturno.

A Figura 3.1 reflete as percentagens estimadas de população expostas a $L_{den} \geq 55$ dB e $L_n \geq 50$ dB em algumas das principais cidades europeias.

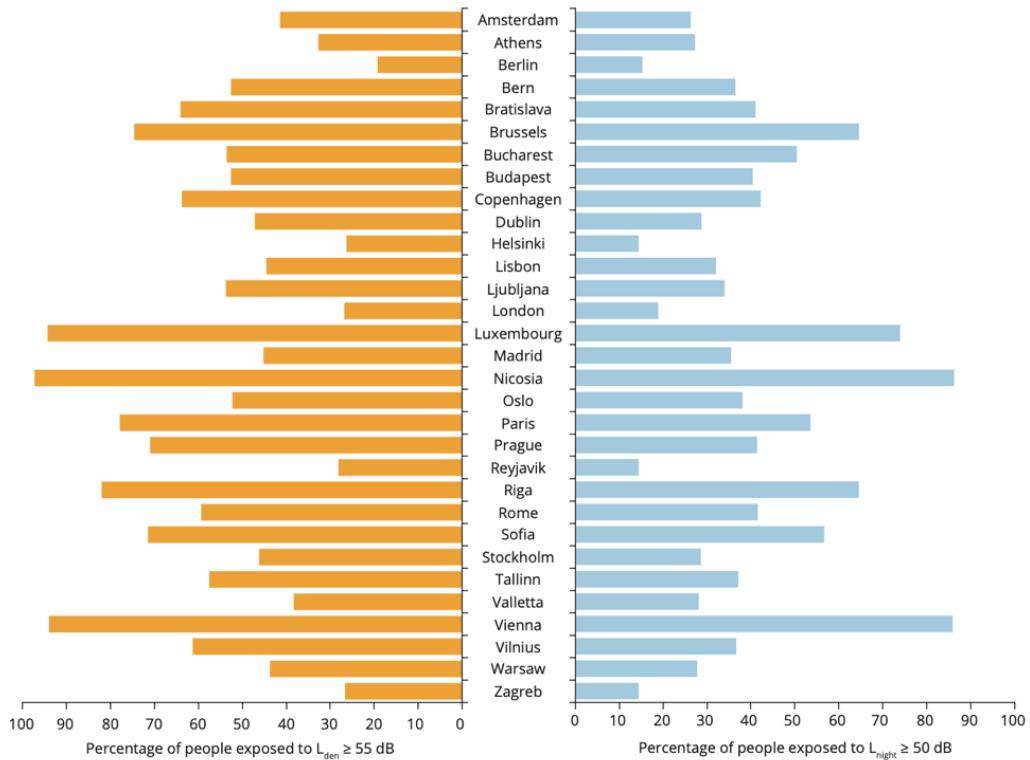


Figura 3.1 - Percentagem estimada de pessoas expostas a ruído proveniente de tráfego rodoviário $L_{den} \geq 55$ dB e $L_n \geq 50$ dB nas principais cidades europeias. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).

Importante destacar Lisboa, onde se estima que 40-50% da população esteja exposta a níveis de ruído considerados elevados no período DEN e cerca de 40% no período noturno.

Ainda analisando a Figura 3.1, destacam-se algumas cidades, como Luxemburgo, Nicósia e Viena onde a percentagem de pessoas expostas a $L_{den} \geq 55$ dB quase atinge os 100%. A percentagem de pessoas expostas a $L_n \geq 50$ dB nestas cidades é igualmente bastante elevada, situando-se entre os 80% e os 90%.

A Figura 3.2 contém as percentagens estimadas de habitantes de zonas urbanas europeias expostos a $L_{den} \geq 55$ dB.

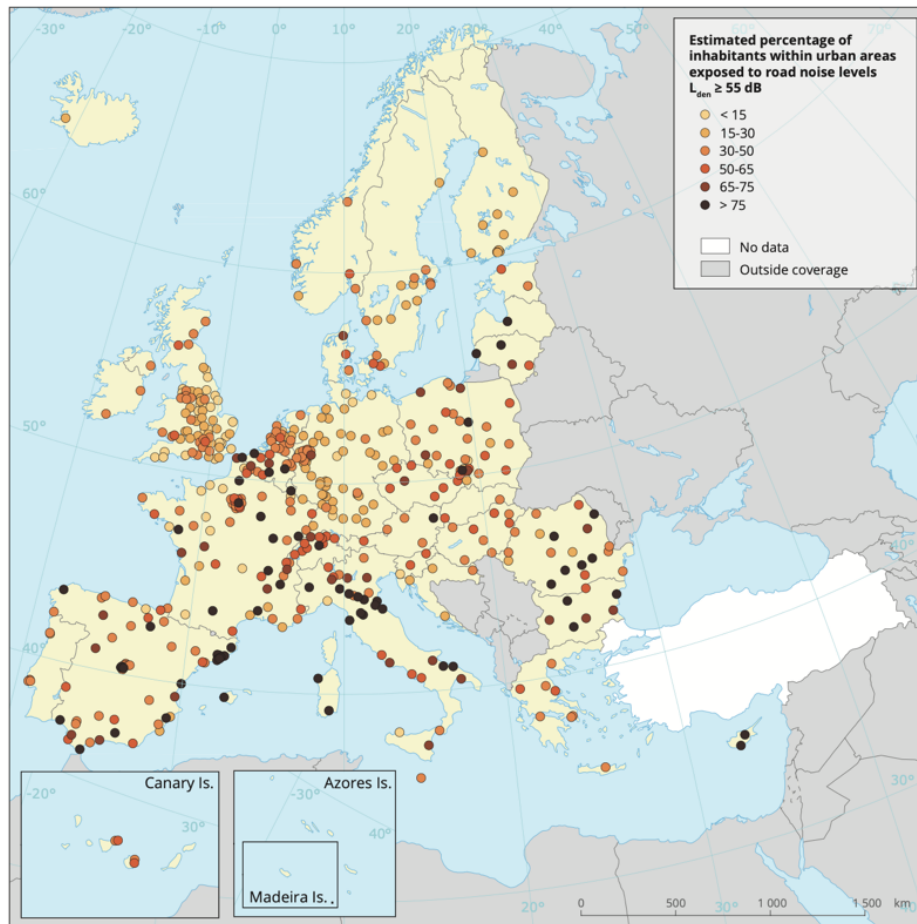


Figura 3.2 - Percentagem estimada de população em zonas urbanas expostas a níveis sonoros iguais ou superiores a 55 dB no período DEN. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).

É possível constatar que em muitas zonas urbanas, a percentagem de pessoas expostas a $L_{den} \geq 55$ dB ultrapassa os 75%.

Na Figura 3.3 é possível consultar a percentagem estimada de população europeia, por país, exposta a $L_{den} \geq 55$ dB nas principais estradas fora de zonas urbanas.

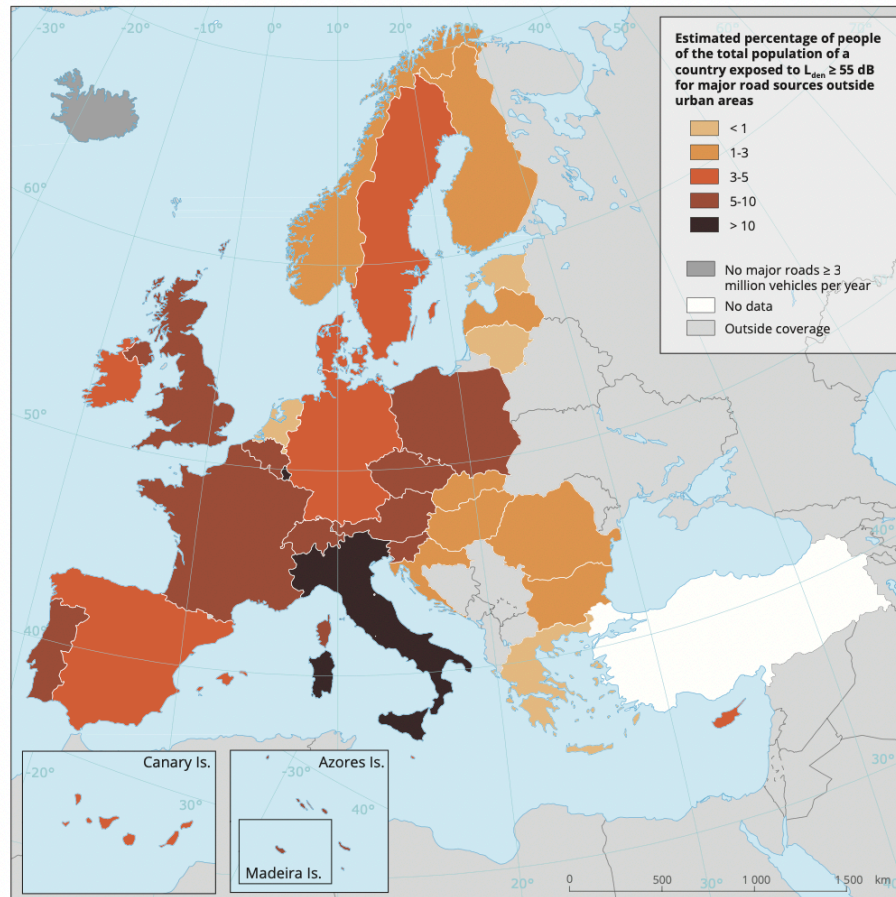


Figura 3.3 - Percentagem estimada do total de população de um país exposta a $L_{den} \geq 55$ dB nas principais estradas fora de zonas urbanas. Dados de 2017 (Fonte: EEA, 2020).

Como seria expectável, em zonas não urbanas, a percentagem de pessoas expostas a $L_{den} \geq 55$ dB é menos significativa, destacando-se a Itália, onde a mesma ultrapassa os 10%. Em Portugal continental, esta percentagem situa-se entre os 5% e os 10%.

O relatório prevê ainda que, apesar dos esforços de eletrificação de veículos e de todas as outras medidas que estão a ser implementadas, a tendência é para o número de pessoas expostas a elevados níveis de ruído continuar a aumentar, pelo menos até 2030.

3.2 Ruído ambiente em Portugal

A produção de ruído ambiente em Portugal é regulada pelo Regulamento Geral do Ruído (RGR) (APA, 2021b). O RGR adota a norma NP ISO 1996, foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º9/2007, retificado pela Declaração de Retificação n.º18/2007, de 16 de março, e alterado pelo Decreto-Lei n.º278/2007, de 1 de Agosto (Matos et al., 2020).

Este é responsável, em particular, pelo estabelecimento de valores limite de exposição a ruído exterior (APA, 2021b). Entre outros, o RGR é ainda responsável por estabelecer disposições de regulação da produção de ruído e envolve diversas entidades competentes em matéria de licenciamento e de fiscalização: as entidades licenciadoras de atividades, os municípios, as comissões de coordenação e desenvolvimento regional (CCDR), a Inspeção Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território e as autoridades policiais (APA, 2021a). Ainda no âmbito do RGR, a APA é a entidade responsável por prestar apoio técnico às demais entidades com competências em matéria de ruído ambiente, e por centralizar e disponibilizar informação ao público geral (APA, 2021a).

Através da consulta do relatório (EEA, 2020), é possível constatar que dentro de zonas urbanas, a percentagem média de população portuguesa exposta a níveis de ruído superiores a 55 dB proveniente do tráfego rodoviário no período DEN é de cerca de 5,2%. Fora das zonas urbanas, estima-se que este valor seja de cerca de 8,6%.

Destacam-se no entanto as grandes metrópoles de Lisboa e Porto com valores entre 30% e 50% de população exposta a níveis elevados de ruído (L_{den}).

3.3 Componentes responsáveis pela geração de ruído em veículos

Em zonas urbanas, o ruído emitido pelos veículos provém essencialmente de duas fontes: a propulsão (motor e sistemas de admissão e exaustão) e o rolamento (causado pelo contacto entre os pneus e a estrada) (Pereira, 2014). No passado, os estudos focaram-se na redução de ruído e vibrações provenientes do motor (Pereira, 2014). Como resultado, os veículos atuais apresentam já níveis de ruído mais reduzidos, fazendo com que outras fontes de ruído, como o rolamento, ganhem outra relevância (Pereira, 2014). Em zonas com velocidades de circulação

elevadas, como por exemplo autoestradas, é ainda importante considerar o ruído aerodinâmico (Pereira, 2014).

3.3.1 Propulsão

Este é certamente uma das fontes mais importantes de ruído proveniente de um ICEV. Com efeito, nos carros com motores de combustão interna, o motor desempenha um papel relevante a nível sonoro e de vibrações. As vibrações do motor provêm essencialmente das massas rotacionais, como pistões e eixos e de outras fontes como por exemplo a caixa de velocidades (Pereira, 2014). Quanto maior for a velocidade rotacional de um motor (RPM), maior será o ruído emitido pelo mesmo (Braun et al., 2013). Motores que utilizam gasóleo como combustível são tipicamente mais ruidosos quando comparados com motores a gasolina, embora esta diferença se dissipe quando são atingidas velocidades rotacionais (RPM) mais elevadas (Braun et al., 2013).

Os motores dos veículos elétricos, por conterem menos peças em movimento, são bastante mais silenciosos quando comparados com os motores dos ICEVs.

Ainda associado à propulsão do veículo é necessário considerar os sistemas de admissão e exaustão de gases, pois estes representam fontes de ruído de características semelhantes às do motor, contribuindo assim bastante para o ruído exterior de veículos com motores de combustão interna (Braun et al., 2013).

3.3.2 Rolamento

Os pneus desempenham um duplo papel na geração de ruído. Uma das formas é através do contacto com o solo e as vibrações que se geram devido a esse mesmo contacto. Outra forma é através da aerodinâmica, ou seja, o ar ao entrar em contacto com a superfície do pneu em movimento vai gerar ruído. A partir de certas velocidades, o som emitido pelo contacto pavimento-pneu acaba por se sobrepor ao som produzido pelo próprio motor. Alguns estudos, como, por exemplo, o projeto COMPETT (Marbjerg, 2013), referem inclusive que esta situação se verifica a partir de velocidades relativamente baixas, entre os trinta e os quarenta quilómetros por hora. Por este motivo, para que se sinta o impacto positivo dos veículos elétricos no som, é

fundamental a adoção de pneus considerados silenciosos. A União Europeia utiliza um sistema de rotulagem que dá informações sobre aderência em superfícies molhadas, eficiência ao nível de consumo de combustível e, mais importante (no contexto do presente trabalho), ruído (DUNLOP, n.d.). Na Figura 3.4 é possível consultar a etiqueta que se encontra em vigor na União Europeia desde 1 de Maio de 2021, no seguimento do Regulamento 2020/70 da UE.

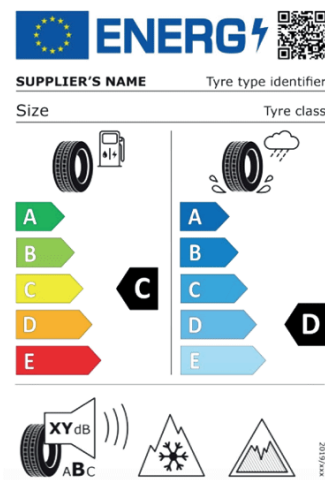


Figura 3.4 - Rotulagem em vigor na União Europeia desde 1 de Maio de 2021 com informações sobre aderência em superfícies molhadas, poupança de combustível e ruído (Fonte: DUNLOP, n.d.).

Na União Europeia, o nível de ruído exterior emitido pelo pneu é medido em dB e é classificado em A, B ou C (DUNLOP, n.d.). Pneus silenciosos apresentam níveis de ruído entre 67 e 71 dB, enquanto o nível mais elevado representa ondas sonoras entre 72 e 77 dB (DUNLOP, n.d.). O decibel utiliza uma escala logarítmica, sendo que um aumento de apenas 3 dB duplica a quantidade de ruído que um pneu produz.

3.3.3 Ruído aerodinâmico

Esta é uma fonte com grande relevância a elevadas velocidades, causada principalmente pela perturbação que o veículo cria no ar ao deslocar-se. Um carro com um bom coeficiente de

resistência aerodinâmica irá produzir menos ruído aerodinâmico e será também mais eficiente a nível energético, visto que estará sujeito a uma força de atrito menor. Esta é hoje uma preocupação importante dos fabricantes no momento de conceção de um novo modelo. A título de exemplo, o recorde mundial de coeficiente de resistência aerodinâmica mais baixo pertence ao carro chinês *GAC ENO.146*: 0,146 (trata-se apenas de um protótipo) (Razão Automóvel, 2019). A nível de EVs de produção, o *Tesla Model 3* apresenta um valor deste coeficiente de 0,23 e o *BMW i8* um valor de 0,26 (Razão Automóvel, 2019).



Figura 3.5 - Perturbação de um fluido (ar) por um objeto em movimento (carro). (Fonte: Razão Automóvel, 2019).

O facto desta fonte só ter impacto a velocidades mais elevadas, faz com que seja de grande importância em locais como autoestradas mas de pouca importância a nível citadino.

Outras fontes de perturbações sonoras podem ainda surgir de travões e de componentes eletrónicos e mecânicos (Pereira, 2014).

3.4 Ruído emitido por EVs e ICEVs

Nesta secção pretende-se tentar perceber a diferença entre o som emitido por um veículo com motor de combustão interna (ICEV) e por um veículo elétrico (EV), através de uma recolha bibliográfica de estudos de diversos autores.

Na Europa, a avaliação experimental em condições normais de trânsito urbano é feita através do conjunto de normas ISO 362 (Braun et al., 2013).

Fazendo uma comparação direta, é fácil de concluir que um EV é mais silencioso que um ICEV, mas é importante perceber como se pode quantificar esta diferença quando o veículo se encontra numa matriz de tráfego e perceber como é que diferentes velocidades de circulação podem impactar esta diferença.

Tal como foi referido anteriormente, o ruído emitido pelos veículos deve-se principalmente à propulsão e ao rolamento. Com o aumento da velocidade, o som do rolamento acaba por se sobrepor ao som do motor, por isso é expectável que a redução de ruído proporcionada pelo EV apenas se faça sentir a velocidades de circulação reduzidas (Marbjerg, 2013). A Figura 3.6 apresenta uma comparação entre o ruído emitido por um veículo movido a gasóleo (em que R1 – R5 se refere às diferentes mudanças do automóvel), um EV e um HEV. As medições foram realizadas numa estrada de alcatrão, com o microfone colocado a 7,5 metros do centro da estrada e 1,2 metros acima do solo. Na figura, L_{Amax} refere-se ao nível sonoro máximo registado, em dB(A).

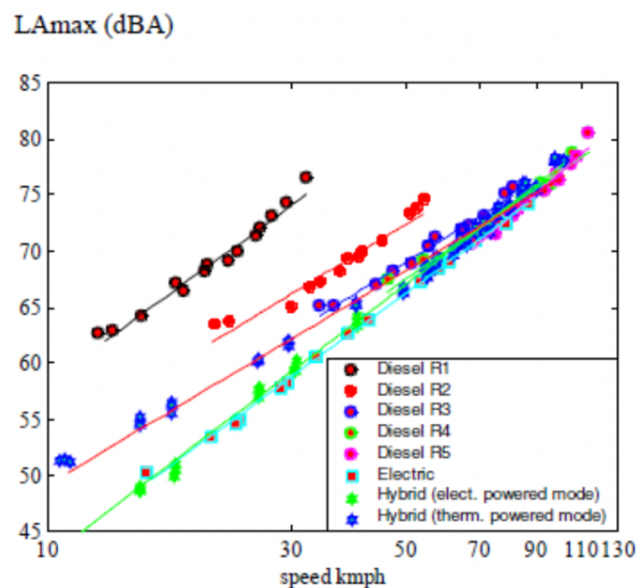


Figura 3.6 - Ruído máximo emitido por um carro a gasóleo, um EV e um HEV. (Fonte: estudo francês de Joël Lelong e Roger Michelet, contido no relatório COMPETT 2013) (Marbjerg, 2013).

Deste estudo é possível concluir que a velocidades de circulação baixas, a diferença no som emitido pelos diferentes tipos de veículos é considerável, sendo o veículo movido a gasóleo bastante mais ruidoso, contudo, acima dos 50 km/h esta diferença é desprezável. O veículo híbrido, quando utilizado em modo elétrico é equiparável ao veículo 100% elétrico. De notar ainda que a mudança utilizada no veículo movido a gasóleo tem uma grande influência no ruído emitido pelo ICEV.

O projeto COMPETT resulta de uma cooperação entre o *The Institute of Transport Economics* (Noruega), a Agência de Energia Austríaca, *University College Buskerud* (Noruega), *Kongsberg Innovation* (Noruega) e a *Danish Road Directorate*. Tem como principal objetivo a promoção do uso de veículos elétricos, em particular de passageiros (Marbjerg, 2013; Stahlfest et al., 2015).

No estudo de (Stahlfest et al., 2015) foram feitos dois tipos de medições:

- CPB: *Controlled Pass By*, no qual foram utilizados dois ICEVs (*Citroën Berlingo* e *VW Golf Variant*) e dois EVs (*Citroën Berlingo* e *Nissan Leaf*). Foram testados três cenários distintos de condução, a diferentes velocidades: velocidade constante, aceleração e travagem com motor.
- CPX: *Close ProXimity of Energy Saver Tyre Types*, utilizando os mesmos veículos do CPB. Neste teste são testados pneus com menor resistência ao rolamento e comparados com pneus comuns.

Das medições de CPB resultaram as seguintes conclusões:

- A velocidade constante e baixa, os EVs são 4-5 dB mais silenciosos do que os ICEVs similares;
- A velocidade constante, a diferença de ruído emitido pelos diferentes veículos deixa de ser significativa a partir dos cerca de 30 km/h;
- Em desaceleração com travagem com motor, a baixa velocidade, os EVs são 2-4 dB mais silenciosos do que os ICEVs similares. A velocidade mais elevada, esta diferença é menor.

Das medições de CPX resultaram as seguintes conclusões:

- Existe uma diferença entre o ruído emitido por um carro que utiliza pneus silenciosos versus um carro que utiliza pneus padrão, sendo a primeira opção mais silenciosa. Contudo, esta diferença varia tendo em conta o tipo de pavimento. As maiores diferenças são registadas em tipos de alcatrão mais denso.

- O uso de pneus com menor resistência ao rolamento tem algum impacto na redução de ruído emitido, contudo, a opção mais indicada será a adoção de pavimentos que criem menor resistência à deslocação.

Um estudo japonês (Jasic, 2009) mediu a diferença de ruído emitido entre um EV e dois ICEVs, chegando à conclusão de que em condições estacionárias, a diferença é de cerca de 20 dB. Quando os veículos se começam a mover a diferença rapidamente cai para os 15 dB e a partir dos 30 km/h a mesma é praticamente nula.

(Pereira, 2014) refere no seu trabalho um estudo no qual se descobriu que em aceleração máxima desde os 8 km/h, a diferença entre o nível de ruído de um EV e de um ICEV é de cerca de 7 dB. A partir dos 40 km/h esta diferença é nula.

A nível de veículos pesados, (Pereira, 2014) refere um estudo que mediu o ruído emitido por um autocarro a combustão e por um autocarro elétrico a circular a 25 km/h, a abrandar e a acelerar novamente até 25 km/h. Os resultados obtidos revelam que o autocarro elétrico foi 12 dB mais silencioso. (Pereira, 2014) indica ainda outro estudo onde se mediu o ruído emitido por veículos pesados elétricos e não elétricos em aceleração e abrandamento. Os resultados demonstram que em aceleração, os veículos pesados elétricos são até 6 dB mais silenciosos a baixa velocidade. A 40 km/h ainda se registou uma diferença de 2,5 dB. Em desaceleração as diferenças encontradas são menores, sendo os veículos pesados elétricos cerca de 3 dB mais silenciosos a baixa velocidade. A cerca de 35 km/h a diferença é desprezável.

(Qian et al., 2020) refere no seu estudo outro parâmetro importante: a qualidade do som. Apesar de os veículos elétricos emitirem menos ruído, o som pode ser considerado irritante em determinadas frequências, fruto das características do ruído eletromagnético, que é exclusivo dos veículos elétricos. Este é um fator que tem mais impacto no interior dos veículos. Esta irritabilidade pode ser descrita pelo nível de pressão sonora (L_p). Este é o indicador mais usado para descrever quantitativamente a onda acústica, por ter uma boa correlação com a perceção humana da audibilidade (António, 2012). L_p é dada pela seguinte equação:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2}, \quad (1)$$

em que p é o valor eficaz da pressão (Pa) e p_{ref} é a pressão de referência (2×10^{-5} Pa).

A Figura 3.7 foi retirada do estudo de (Qian et al., 2020) e mostra a comparação do nível de pressão sonora sentido no interior de um veículo, a várias frequências, para EVs e ICEVs, a velocidade constante.

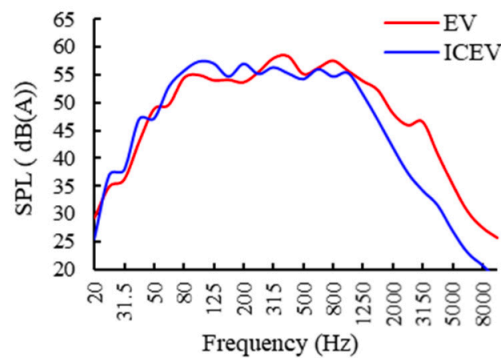


Figura 3.7 - Comparação entre o nível de pressão sonora no interior de um EV vs ICEV. Fonte: (Qian et al., 2020).

Em que SPL (*Sound Pressure Level*) corresponde ao nível de pressão sonora (L_p) em dB(A) e *frequency* é a frequência em Hz.

Da análise do gráfico é possível concluir que a partir dos 200 Hz, o nível de pressão sonora do veículo elétrico é superior ao do veículo a combustão.

Em contexto de malha urbana, (Stahlfest et al., 2015) conduziu um estudo para a cidade de Copenhaga, na Dinamarca, e concluiu que mudar 100% da frota para EVs resultaria numa diferença de -0,6 dB a 30 km/h e cerca de -2,5 dB a cerca de 20 km/h. O mesmo estudo concluiu que acima de 30 km/h, o impacto dos veículos elétricos na mitigação do ruído é negligenciável.

(Campello-Vicente et al., 2017) realizou um estudo em Elche (Espanha) e concluiu que com uma velocidade de circulação de 30 km/h, os níveis de ruído serão 2 dB mais elevados ao lado de uma via de trânsito onde circulem apenas veículos com motores de combustão do que ao lado de uma via onde circulem unicamente veículos elétricos. Este estudo concluiu ainda que esta diferença cresce significativamente à medida que se reduz a velocidade abaixo da velocidade citada acima, enquanto a velocidades acima de 50 km/h, a diferença tende para zero. Outra conclusão é que ao alterar os parâmetros para incluir uma percentagem de 5% de veículos pesados com motores de combustão, à mesma velocidade de 30 km/h a diferença cai de 2 dB para 1,2 dB. (Campello-Vicente et al., 2017) afirma também que a presença de sons de aviso em EVs atenua ainda mais esta diferença (esta questão será aprofundada no capítulo seguinte).

(Muirhead, 2015) obteve resultados semelhantes a (Stahlfest et al., 2015) e concluiu ainda que o impacto será ainda maior em estradas com uma percentagem reduzida de veículos pesados e velocidades de circulação baixas.

(EEA, 2020) refere no seu relatório o estudo da Agência do Ambiente da Alemanha, em que se estimou que substituir 1 milhão de carros convencionais por EVs em 2020 (o que representava cerca de 2% da frota total automóvel do país na altura), resultaria numa redução de apenas 0,1 dB em estradas urbanas a 30 km/h de velocidade.

3.5 Sons exteriores de aviso

Apesar da ausência de ruído ser maioritariamente vista como um aspeto positivo, a verdade é que também pode constituir um problema. Veículos a operar em modo 100% elétrico produzem menos ruído do que os veículos a combustão e, por isso, podem ser mais difíceis de detetar por parte dos peões, em especial os invisuais (Pereira, 2014). Um estudo realizado pela *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) concluiu que os HEVs (a operar em modo elétrico) têm o dobro da probabilidade de estarem envolvidos num acidente envolvendo pedestres (NHTSA, 2009), nos seguintes cenários de condução:

- Manobras de ‘marcha-atrás’;
- Ao abrandar/parar ou arranque;

- Entrada e saída de parques de estacionamento;
- Cruzamentos.

Este estudo concluiu ainda que os veículos envolvidos neste tipo de acidentes deslocam-se maioritariamente a velocidades reduzidas, em que a diferença do ruído emitido por HEVs e ICEVs é maior. A percentagem de acidentes envolvendo as manobras descritas acima é de 1,2% para os HEVs e 0,6% para os ICEVs.

De modo a combater este problema, estes veículos são equipados com sons exteriores de aviso (AVAS) (Fleury et al., 2016). Este sistema passou a ser obrigatório em todos os novos HEVs e EVs na Europa em Abril de 2014, data em que o Parlamento Europeu aprovou a legislação para este efeito (*Jornal Oficial Da União Europeia*, 2014). Foi estabelecido um período máximo de cinco anos para cumprir esta legislação.

(Fleury et al., 2016) refere um estudo no qual foi pedido a 27 participantes invisuais que levantassem a mão quando detetassem um veículo em aproximação. O veículo de estudo circulava a 15 km/h e o nível de ruído ambiente era de 49 dB. Os resultados demonstram que a adição de sons exteriores de aviso diminui o tempo de deteção do veículo por parte dos participantes. Os autores do referido estudo também concluíram que a adição de uma campainha que tocava de dois em dois segundos, combinada com um som exterior de aviso que simula o som produzido por um ICEV diminui ainda mais o tempo de deteção do veículo.

(Kim et al., 2012) conduziu um estudo igualmente com participantes invisuais. A estes foi-lhes pedido que detetassem um carro que se deslocava entre os 10 e os 15 km/h. Foram utilizados três veículos: um HEV sem AVAS, um HEV com AVAS e um ICEV. O veículo híbrido sem qualquer som de aviso foi detetado a uma distância média de 27,5 metros, o veículo híbrido equipado com AVAS foi detetado a uma distância média de 38,3 metros, enquanto o veículo com motor de combustão foi detetado a uma distância média de 34,5 metros. A experiência foi conduzida em dois contextos distintos: uma estrada, em que se registava um nível de ruído ambiente de 55,1 dB e um parque de estacionamento no qual se registou um nível de ruído ambiente de 47,8 dB. Não foi detetado nenhum efeito significativo do ruído ambiente nos tempos de deteção.

Contudo, (Fleury et al., 2016) indica no seu trabalho que vários outros autores chegaram a uma conclusão diferente no que diz respeito ao efeito do ruído ambiente no tempo de detecção e dá o exemplo de um estudo que demonstra precisamente este efeito. Neste estudo, com um nível de ruído ambiente igual a 54 dB, um veículo elétrico foi detetado a uma distância de 14 metros, enquanto um veículo a combustão foi detetado a uma distância de 36 metros.

(Yamauchi et al., 2014) concluiu que o som emitido pelo AVAS tem de ser 2-3 dB mais elevado do que o nível de ruído ambiente.

(Fleury et al., 2016) refere ainda um estudo no qual se demonstrou que o impacto do ruído ambiente também depende da sua similaridade com o som do veículo em aproximação. Quanto maior for a semelhança nas suas frequências, mais difícil será a detecção do carro em aproximação. Frequências na gama 20-100 Hz devem ser evitadas por serem as mais comuns em áreas urbanas. Esta experiência demonstrou ainda que um veículo híbrido que emita um som a 100 Hz é mais facilmente detetável que um que emita um som a frequências mais baixas. Os resultados indicam ainda que quanto maior for a frequência do som, mais fácil será a detecção do veículo, mesmo com baixos níveis de ruído.

Está claro que a adição de sons exteriores de aviso é indispensável, por questões de segurança. Mas como é que estes sons influenciam o impacto positivo dos veículos elétricos no combate à poluição sonora?

(Marbjerg, 2013; Pereira, 2014) citam um estudo no qual foram analisados os espectros de frequência de EVs (com e sem sons de alerta) e ICEVs, em duas situações de distintas de circulação: a) velocidade constante de 10 km/h; b) velocidade constante de 20 km/h. Os resultados podem ser consultados na Figura 3.8.

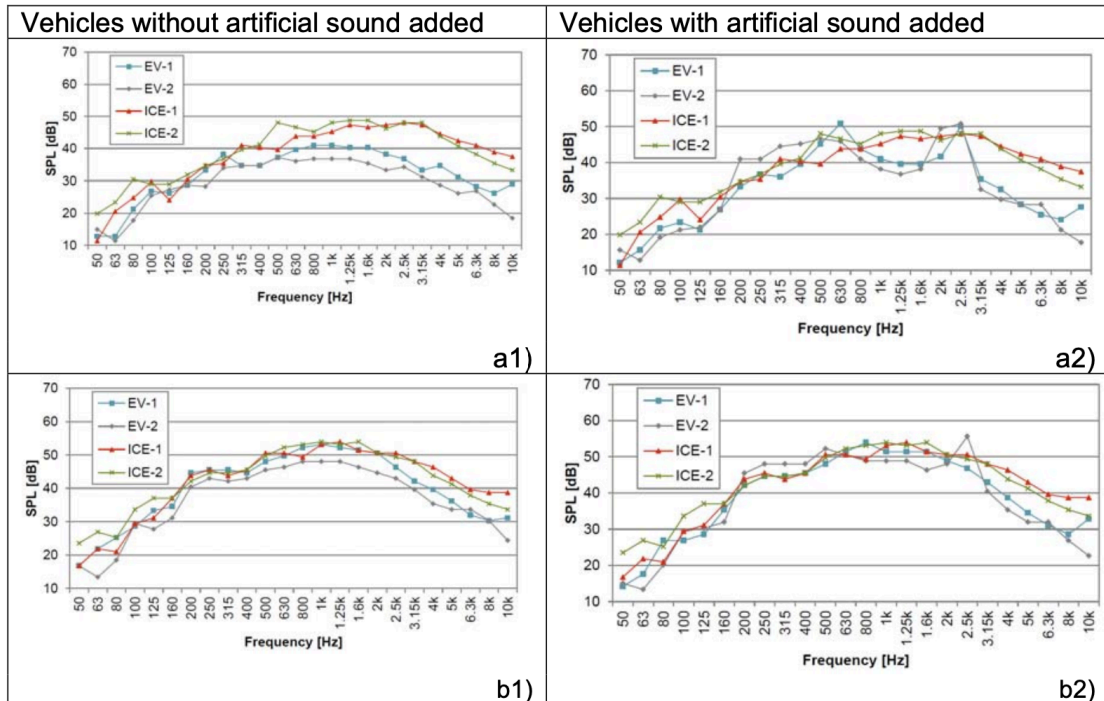


Figura 3.8 - Comparação dos espectros de frequência de EVs e ICEVs conduzidos às velocidades: a) 10 km/h; b) 20 km/h. Fonte: (Pereira, 2014)

Da análise dos gráficos é possível concluir que sem qualquer som artificial adicionado, os espectros diferem mais quando os veículos são conduzidos a 10 km/h do que quando são conduzidos a 20 km/h, especialmente nas frequências médias e altas. A adição de um som artificial a 10 km/h (a2) parece ter mais impacto entre os 2,0 - 2,5 kHz. A 20 km/h, as frequências dos sons artificiais não são observadas com tanta clareza, o que poderá indicar que a esta velocidade, o som proveniente do rolamento é mais elevado do que o som proveniente destes sons. Contudo é ainda possível observar um pico no EV-2 na zona dos 2,5 kHz que será proveniente do som artificial adicionado. O EV-2 é o mais silencioso dos dois EVs a 20 km/h sem qualquer som artificial adicionado.

(Pereira, 2014) indica ainda no seu relatório um estudo no qual se chegou à conclusão de que o nível de pressão sonora total em dB (A) de um veículo elétrico equipado com sons exteriores de aviso é semelhante à de um veículo a combustão mais silencioso.

3.6 Estratégias para mitigar o ruído gerado pelo tráfego rodoviário

A EEA, no seu relatório (EEA, 2020) sobre ruído ambiente na Europa, estabelece alguns planos de ação para mitigar o fenómeno negativo que é a poluição sonora proveniente do tráfego rodoviário. Estes planos incidem sobre a fonte de ruído e sobre o caminho de propagação do mesmo, como pode ser consultado na Figura 3.9.

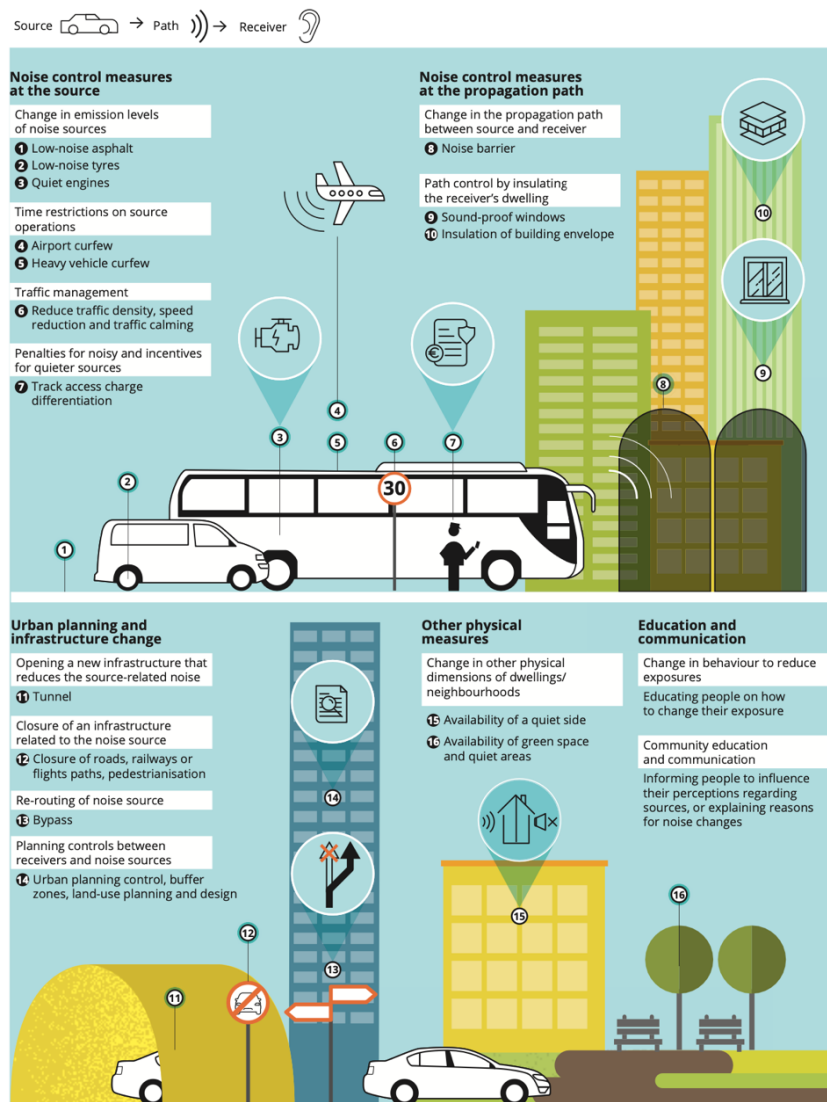


Figura 3.9 - Exemplos de estratégias de controlo e mitigação da exposição ao ruído (Fonte: EEA, 2020).

No que diz respeito a estratégias para controlo de ruído, alguns exemplos de medidas são:

- Adoção de asfalto mais silencioso;
- Adoção de pneus silenciosos;
- Adoção de veículos com motores mais silenciosos (como por exemplo veículos elétricos);
- Redução da densidade de tráfego e da velocidade de circulação;
- Taxar veículos mais ruidosos e atribuir benefícios a veículos mais silenciosos (um exemplo é a criação de *Low Emission Zones* e *Zero Emission Zones*, que serão estudadas em maior detalhe mais à frente).

Em termos de medidas de controlo de ruído no caminho de propagação de ruído, alguns exemplos são:

- Adoção de barreiras sonoras;
- Utilização de janelas à prova de som;
- Melhorar o isolamento acústico dos edifícios.

Ao nível de infraestruturas e planeamento urbano, possíveis medidas passam por:

- Criação de infraestruturas que reduzam a propagação de ruído na fonte, como por exemplo túneis;
- Encerramento de estradas responsáveis pela propagação de elevados níveis de ruído e optar antes pela criação de rotas pedonais;
- Desviar rotas ruidosas;
- Melhorar o planeamento urbano.

Outras medidas físicas:

- Criação de *Quiet Areas*. Segundo o Artigo 3 da END (*Directive 2002/49/EC*, 2002), estas são zonas delimitadas por uma autoridade competente, em que o valor de L_{den} ou qualquer outro indicador sonoro adequado não excede um determinado valor limite, determinado pelo estado-membro. Em contexto urbano, *Quiet Areas* podem incluir parques, áreas envolventes de edifícios, pátios, terrenos não utilizados ou áreas protegidas (EC, 2020).

A EEA refere ainda que se deve investir na educação e partilha de informação, educando as pessoas sobre como podem reduzir a sua exposição à poluição sonora.

Segundo (EEA, 2020), baseado na ronda de mapeamento de 2017, do total de medidas e planos de ação para grandes aglomerados, 51,2% incidiam sobre a fonte de ruído, 16,5% incidiam sobre o caminho de propagação, 15,1% relacionavam-se com a comunicação e informação, 9,9% estavam ligadas ao planeamento urbano e 7,3% incidiam sobre outras medidas físicas.

Da mesma ronda de medições, mas especificamente para grandes estradas, (EEA, 2020) concluiu que do total de medidas e planos de ação, 40,4% incidiam sobre a fonte, 38,5% incidiam sobre o caminho de propagação do som, 13,5% relacionavam-se com o planeamento urbano, 5,8% estavam ligadas à comunicação e educação e 1,9% estavam relacionadas com outras medidas físicas.

3.6.1 Exemplos de medidas de mitigação de ruído em cidades e países europeus

(EEA, 2020) indica ainda no seu relatório alguns exemplos de medidas de mitigação de ruído já aplicadas em certas cidades e países europeus.

Por exemplo, em Berlim, a implementação de ciclovias tem sido uma medida padrão para combater a poluição sonora proveniente do tráfego rodoviário. A cidade, que tem cerca de 500 mil pessoas expostas a níveis de ruído superiores a 50 dB no período noturno (EEA, 2020), implementou um programa que tem como foco a redução do espaço disponível para veículos motorizados, ou seja, a redução das vias de trânsito. Ruas com duas vias de trânsito para cada lado foram reduzidas a uma via de trânsito em cada sentido, abrindo espaço para a construção de ciclovias e passeios para peões. Esta medida teve um forte impacto, pois para além de ter resultado numa diminuição do volume de tráfego, o mesmo também ficou mais concentrado no meio da rua, ficando mais afastado das habitações. Estima-se que o número de pessoas expostas

a elevados níveis de ruído durante o período noturno tenha sido reduzido em 50 mil (EEA, 2020).

Em França, as autoridades irão começar a multar os veículos mais ruidosos, tendo sido proposto um plano que passa pela instalação de radares de ruído nas ruas de Paris (Figura 3.10), ao abrigo de uma lei de mobilidade de 2019 (The Guardian, 2022). Em 2022 foi ativado o primeiro radar, consistindo num microfone colocado num sítio elevado, tipicamente num poste de iluminação, que consegue identificar de onde vem o ruído. Por sua vez, uma câmara ligada ao mesmo sistema irá identificar a matrícula do veículo em questão, possibilitando assim a identificação do mesmo e a emissão de multa, caso seja necessário (The Guardian, 2022).



Figura 3.10 - Radar de ruído instalado em Villeneuve-le-Roi, perto do aeroporto Orly em Paris (Fonte: The Guardian, 2022).

Em Jeonju, na Coreia do Sul, estão a ser tomadas medidas que envolvem a redução da velocidade de circulação do tráfego rodoviário. Uma das estratégias passou pela transformação de uma estrada reta com oito vias de trânsito numa estrada curva com apenas quatro vias (World Economic Forum, 2019). Reduzir a velocidade de circulação resultará numa redução do ruído emitido pelo rolamento.

Ainda segundo (EEA, 2020) surge o exemplo da Suíça, onde as prioridades incluem a mitigação do ruído proveniente da fonte, a promoção de *Quiet Areas*, o melhoramento da monitorização sonora e o aumento da consciencialização pública. Mais concretamente, o país irá apoiar o desenvolvimento de pavimentos mais silenciosos e a promoção de veículos mais silenciosos.

3.6.2 Exemplos de criação e preservação de Quiet Areas em cidades europeias

Em Lisboa, o Plano de Ação de Ruído compreende um conjunto de medidas que pretende proteger a saúde e qualidade de vida dos cidadãos através da redução dos níveis sonoros a que estes são expostos e através da preservação e criação de *Quiet Areas* (EC, 2020). O mapeamento de ruído ambiente, a par de um trabalho de análise e avaliação, permitiu identificar duas situações que necessitam de intervenção: áreas que precisam de remediação pois apresentam valores de ruído acima dos estabelecidos por lei; identificação de potenciais *Quiet Areas* que apresentam valores L_{den} e L_n inferiores a 55 e 45 dB(A) respetivamente, que devem ser mantidas e preservadas (EC, 2020). Este trabalho de mapeamento permitiu a introdução de medidas de redução de ruído e implementar planos de ruído estratégicos para assegurar o controlo contínuo de ruído à medida que a cidade continua a crescer e a desenvolver-se (EC, 2020).

O projeto Hush City constitui uma proposta interessante para o mapeamento de *Quiet Areas*. Este consiste numa aplicação gratuita, lançada em 2017, que permite aos utilizadores identificar e mapear estas áreas com os seus smartphones, criando um mapa de acesso gratuito. Estes mapas podem ser utilizados por outros utilizadores ou até mesmo servir de base para orientar planos e políticas relacionadas com o ruído ambiente (EU-Citizen.Science, 2021). Após consulta da aplicação, constata-se que em Portugal existe uma área mapeada em Castro Marim, quinze na zona metropolitana de Lisboa e duas em Peniche. A aplicação permite não só identificar *Quiet Areas* como também identificar zonas desagradáveis, por exemplo. Esta identificação é feita através de um esquema de cores, em que: verde – área relaxante; amarelo – área agradável; laranja – área tolerável; vermelho – área desagradável. Em Coimbra não se encontra nenhuma área registada na aplicação mencionada.

3.6.3 Low Emission Zone (LEZ) e Zero Emission Zone (ZEZ)

Um exemplo de medida que tem sido uma forte aposta na Europa são as *Low Emission Zones*. Estas são áreas em que a circulação de veículos apenas é permitida para veículos que cumpram certos requisitos de emissões (Panteliadis et al., 2014). Estes requisitos são regulados por padrões de emissão relacionados com o tipo e idade do veículo (Cruz & Montanon, 2016). Apesar de o propósito da implementação das LEZs ser principalmente a redução das emissões de escape, nomeadamente matéria particulada e NO_x (Santos et al., 2019), a redução da emissão

de ruído pode surgir como uma boa consequência. Veículos mais antigos são tipicamente mais ruidosos. Ao se proibir a circulação de alguns destes veículos, é provável que a paisagem sonora do local também vá melhorar. Com o avançar do tempo, estas zonas poderão ser cada vez mais restritas até se atingir a obrigatoriedade de circulação de veículos com zero emissões, o que significará que apenas EVs poderão circular nestas zonas. Quando isto acontecer, a zona em questão passará a designar-se ZEZ (Zero Emission Zone).

Em Portugal, existem duas LEZs, ambas situadas em Lisboa. A zona 1 é chamada de ABC (abreviatura para Avenida, Baixa e Chiado). A zona 2 engloba o centro histórico de Lisboa e também a zona 1. Numa primeira fase, que começou a 4 de Julho de 2011, apenas veículos com um padrão de emissão EURO 1 ou superior podiam circular, de segunda a sexta-feira entre as 08:00 e as 20:00 horas na zona 1. A 1 de Abril de 2012 arrancou a segunda fase, em que apenas veículos com pelo menos um padrão de emissão EURO 2 podiam circular na referida zona. Também a área foi alargada passando a incluir a zona 2, assim como o período de restrição que passou a ser entre as 07:00 e as 21:00 horas. Na zona 2, veículos pré-EURO foram proibidos de circular no referido horário. A terceira e última fase iniciou-se a 15 de Janeiro de 2015. Na zona 1 o padrão mínimo passou a ser EURO 3, enquanto na zona 2 o mínimo passou a ser EURO 2 (Santos et al., 2019).

Estes padrões de emissões EURO foram introduzidos pela União Europeia em 1992 e servem para regular os valores das emissões de escape dos veículos europeus, nomeadamente as emissões de NO_x , CO , matéria particulada e hidrocarbonetos (Stratstone, 2021). Estes padrões estão diretamente relacionados com a data de registo do veículo, da seguinte forma (Stratstone, 2021):

EURO 1 – 31 de Dezembro de 1992;

EURO 2 – 1 de Janeiro de 1997;

EURO 3 – 1 de Janeiro de 2001;

EURO 4 – 1 de Janeiro de 2006;

EURO 5 – 1 de Janeiro de 2011;

EURO 6 – 1 de Janeiro de 2015.

É expectável que o padrão EURO 7 seja implementado em 2025. Este será o último padrão antes da obrigatoriedade de todos os novos veículos serem elétricos (Stratstone, 2021).

Portugal está ainda muito aquém de outros países europeus no que diz respeito à implementação de LEZs. A Alemanha, por exemplo, contabiliza já 58 LEZs. A nível europeu, registam-se LEZs em 320 cidades. A Itália é o país que apresenta o maior número destas zonas, contabilizando 172. É expectável que em 2025 existam 507 LEZs na Europa (Szoke, 2022).

4 ANÁLISE DE UM CASO DE ESTUDO

Neste capítulo apresenta-se um caso de estudo aplicado a um cenário real, onde se pretende responder à pergunta: como é que a alteração do tipo de veículos num contexto urbano, bem como a implementação de algumas medidas que ajudem a mitigar o ruído proveniente do tráfego rodoviário, pode contribuir para melhorar a qualidade sonora envolvente? Para responder a esta questão foram realizadas um conjunto de simulações usando o software CadnaA.

Primeiramente é apresentada a área de estudo.

4.1 Descrição da área de estudo

Optou-se por estudar o impacto sonoro do trânsito rodoviário na Avenida Emídio Navarro (no troço entre a Ponte de Santa Clara e as docas da cidade), situada na zona da baixa da cidade de Coimbra, com o objetivo de perceber como é que uma mudança na frota automóvel para veículos elétricos, aliada a uma implementação de várias estratégias com o objetivo de reduzir o ruído proveniente do tráfego rodoviário, afetaria a qualidade sonora deste local. Através da consulta de mapas de ruído existentes, é possível concluir que este é um local com níveis de ruído elevado. A avenida é caracterizada por trânsito estacionário ou que circula a baixa velocidade, tendo 3 cruzamentos com semáforos e várias paragens de autocarro. Tem duas faixas de rodagem, uma no sentido sul-norte com duas vias de trânsito e uma no sentido norte-sul com três vias de trânsito (uma das vias é reservada a transportes públicos). Do lado do rio encontra-se o Parque da Cidade Manuel Braga, enquanto o lado contrário é composto por uma área residencial e de comércio. Reduzir o ruído poderá trazer benefícios para as pessoas que residem nas imediações desta avenida, bem como para as pessoas que utilizam o parque para fins lúdicos. Na Figura 4.1 apresenta-se a localização da zona de estudo.

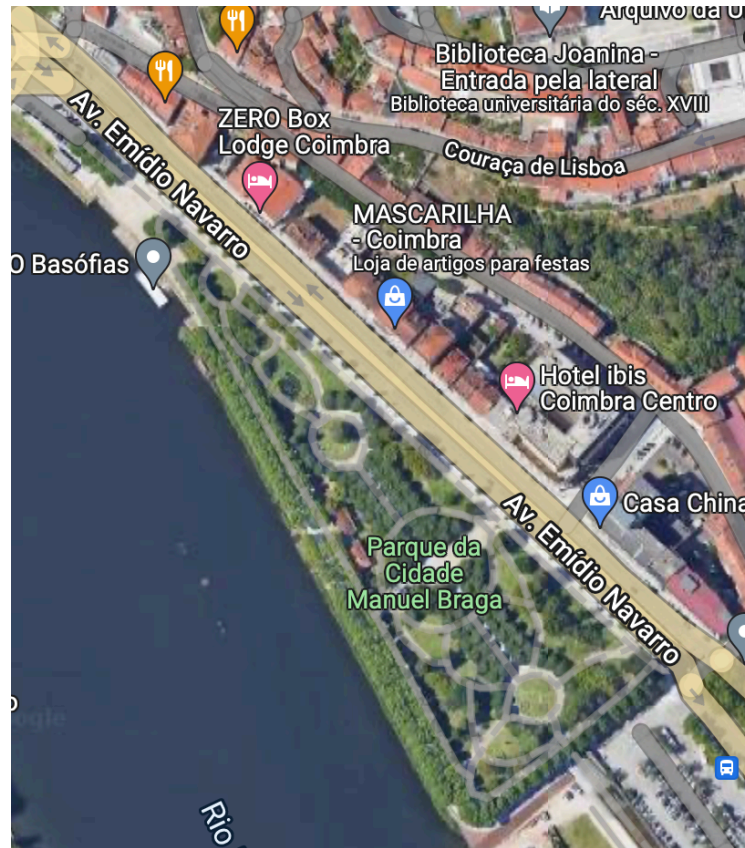


Figura 4.1 - Descrição visual do local de estudo - Avenida Emídio Navarro (Fonte: Google Maps).

Através de uma pesquisa no site da Câmara Municipal de Coimbra, constata-se que o estudo de ruído mais recente reporta ao ano de 2013 (Câmara Municipal de Coimbra, 2013). Ao consultar os mapas de ruído, observa-se que na avenida em estudo, os níveis de L_{den} ultrapassam os 70 dB(A) e os valores de L_n ultrapassam os 60 dB(A), sendo por isso considerados muito elevados. A adoção de estratégias de redução de ruído iria certamente beneficiar a qualidade do ambiente nesta zona.

Na Figura 4.2 é possível consultar o mapa de ruído, para o indicador L_{den} , da área de estudo e respetiva legenda (Câmara Municipal de Coimbra, 2013).

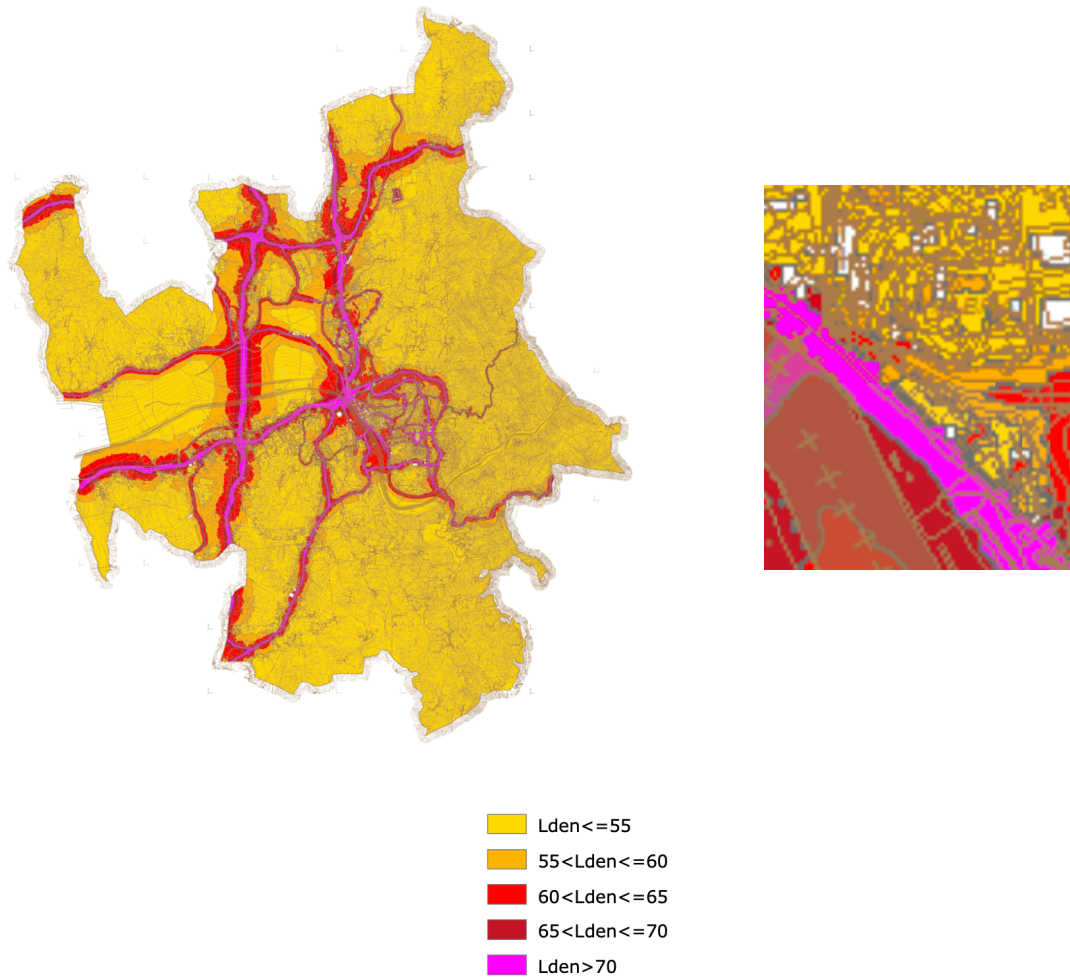


Figura 4.2 - Mapa de ruído da área de estudo e respetiva legenda. (Fonte: Câmara Municipal de Coimbra, 2013)

É possível concluir que a estrada apresenta níveis de ruído superiores a 70 dB(A). As áreas adjacentes apresentam níveis situados entre os 60 e os 70 dB(A).

4.2 Metodologia de cálculo CNOSSOS

O CNOSSOS é o modelo padrão para previsão e mapeamento estratégico de ruído no seio da União Europeia (Kephalopoulos et al., 2012).

No CNOSSOS, a potência sonora de um veículo é calculada tendo por base a velocidade de circulação do veículo (v) e a frequência (f) em bandas de oitava, no intervalo 63 Hz – 8kHz e é modelada pelas expressões (2) e (3) (Kephalopoulos et al., 2012).

$$L_{WR}(f, v) = A_R(f) + B_R(f) \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad (2)$$

$$L_{WP}(f, v) = A_P(f) + B_P(f) \log\left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}}\right), \quad (3)$$

em que L_{WR} é a potência sonora resultante do rolamento, L_{WP} é a potência sonora resultante da propulsão, v é a velocidade de circulação do veículo em km/h, v_{ref} é a velocidade de referência (70 km/h), A_R e B_R são os coeficientes relacionados com o rolamento e A_P e B_P são os coeficientes de ruído associados à propulsão.

A expressão referente ao ruído de rolamento ($L_{WR}(f, v)$) apenas é válida em determinadas condições, sendo elas:

- i) Velocidade de circulação constante;
- ii) Superfícies planas e secas consistindo de uma mistura de DAC (*Dense Asphalt Concrete*) e SMA (*Stone Mastic Asphalt*) com uma idade entre 2 e 7 anos;
- iii) Temperatura do ar de cerca de 20°C;
- iv) Pneus sem serem cardados.

Caso não se verifiquem estas condições, é necessário aplicar uma série de correções. Segundo (Kephalopoulos et al., 2012), a correção para o ruído gerado pelo rolamento é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right), \quad (4)$$

em que $\Delta L_{WR,road,i,m}$ traduz o efeito da superfície da estrada no ruído associado ao rolamento (que causa um desvio face às condições de referência descritas acima) para cada banda de frequência (i) e categoria de veículo (m), $\alpha_{i,m}$ é a correção espectral em dB à velocidade de referência, β_m traduz o efeito da velocidade na redução do rolamento para cada categoria de veículo.

Segundo (APA, 2022), este método pressupõem a existência de cinco categorias de veículos, sendo elas:

Categoria 1: veículos ligeiros;

Categoria 2: Veículos pesados médios;

Categoria 3: Veículos pesados;

Categoria 4: Veículos a motor de duas rodas (4a – ciclomotores; 4b – motocicletas);

Categoria 5: Categoria aberta, a definir em função de necessidades futuras.

Para as categorias 1, 2, 3 e 5, a potência sonora é calculada pela expressão (5) (Ribeiro, n.d.):

$$L_{W,i,m}(f, v) = 10 \log\left(10^{\frac{L_{WR}(f,v)}{10}} + 10^{\frac{L_{WP}(f,v)}{10}}\right) \quad (5)$$

Para a categoria 4, apenas o ruído gerado pela propulsão ($L_{WP}(f, v)$) é considerado (Ribeiro, n.d.).

O CNOSSOS calcula a atenuação do som durante a sua propagação desde a fonte emissora até ao recetor nas seguintes condições (Khan et al., 2021):

- i) Condições atmosféricas homogéneas;
- ii) Condições de propagação com refração descendente.

Condições meteorológicas como temperatura do ar e direção do vento também são tidas em consideração. Os cálculos são executados em bandas de oitava entre 63 Hz e 8 kHz e até um máximo de 2 quilómetros entre a fonte emissora e o recetor. O nível sonoro a longo termo (L_{LT}) é calculado através da soma de níveis sonoros em condições favoráveis (L_f) e em condições desfavoráveis (L_H), tendo em conta a probabilidade de ocorrência de condições favoráveis (Maijala et al., 2016). L_{LT} é dado pela equação (6):

$$L_{LT} = 10 \log \left(p_f 10^{\frac{L_f}{10}} + (1 - p_f) \times 10^{\frac{L_H}{10}} \right), \quad (6)$$

em que p_f é a probabilidade de ocorrência de condições favoráveis. Os valores de p_f são dados em percentagem para os períodos diurno (07:00 – 19:00), entardecer (19:00 – 22:00) e noturno (22:00 – 07:00).

Para tráfego rodoviário, considera-se que a fonte emissora se situa 0,05 metros acima do chão (Pallas et al., 2016).

Para fazer a modelação de ruído, foi utilizado o software CadnaA (*Computer Aided Noise Abatement*).

Relativamente ao tráfego rodoviário, segundo (DataKustik, n.d.) este programa permite comparar diferentes cenários de planeamento, otimizar barreiras de proteção contra o ruído, visualizar diferentes cenários de redução de ruído, fazer a interseção automática dos dados com DTM (*Digital Terrain Models*), entre outros.

O CadnaA é um programa que permite trabalhar com diversos modelos de cálculo e previsão de ruído, sendo um deles o CNOSSOS.

4.3 Dados de entrada

4.3.1 Definição dos parâmetros dos veículos elétricos

No programa CadnaA existem duas formas de introduzir as características dos veículos elétricos no modelo de cálculo de ruído: uma delas é utilizando a categoria de veículos aberta do CNOSSOS (categoria 5) e a outra é modificando os parâmetros de outras categorias de veículos, como por exemplo a categoria 1, que corresponde aos veículos ligeiros, para incluírem as características dos veículos elétricos. Durante a realização deste estudo, o autor não encontrou nenhuma forma de introduzir uma nova categoria de veículos no CadnaA de modo a efetuar a simulação de ruído gerado pelos veículos elétricos, pelo que optou por seguir a segunda abordagem descrita acima.

Segundo a Diretiva 2015/996 da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2015), os valores dos coeficientes de propulsão e rolamento para a categoria de veículos ligeiros a combustão são os indicados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Coeficientes para o ruído de rolamento e propulsão para veículos ligeiros a combustão segundo a Diretiva 2015/996 da Comissão Europeia

Categoria	Coeficiente	Banda de oitava (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	A_R	79,7	85,7	84,5	90,2	97,3	93,9	84,1	74,3
	B_R	30,0	41,5	38,9	25,7	32,5	37,2	39,0	40,0
	A_P	94,5	89,2	88,0	85,9	84,2	86,9	83,3	76,1
	B_P	-1,3	7,2	7,7	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

A Diretiva referida acima não dá qualquer indicação sobre os valores destes coeficientes para veículos elétricos. Assumindo que os pneus utilizados são semelhantes para veículos elétricos e não elétricos, conclui-se que os parâmetros A_R e B_R não irão sofrer qualquer alteração. No que diz respeito aos coeficientes referentes à propulsão, não foi encontrada muita informação. (Pallas et al., 2016) refere que com o teste CPB é difícil distinguir o ruído proveniente da propulsão do ruído de rolamento em veículos a circular em modo 100% elétrico e recomenda que se apliquem as seguintes correções à componente de propulsão:

Quadro 4.2 - Correção a aplicar nos coeficientes referentes à propulsão (A_P) da categoria 1 (Pallas et al., 2016)

Banda de oitava (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000
Termo de correção (dB)	-5,0	-1,7	-4,2	-15,0	-15,0	-15,0	-13,8

4.3.2 Contagem de veículos

O objetivo desta simulação é perceber como se poderia melhorar a qualidade sonora do Parque da Cidade Manuel Braga durante o dia, para que as pessoas possam usufruir deste da melhor maneira possível. Por este motivo, o indicador escolhido para avaliar a situação sonora desta zona foi o L_d e a contagem de veículos foi feita durante o dia.

No dia 12 de Dezembro de 2022 foi realizada uma contagem de veículos na Avenida Emídio Navarro durante o horário de ponta da tarde (17:00 até às 19:00 horas). Durante este período foram realizadas 4 amostragens de 15 minutos cada. Os resultados podem ser consultados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Contagem de veículos na Avenida Emídio Navarro

	Categoria de veículo					
	1	2	3	4.a	4.b	Veículos elétricos
Amostra 1	392	13	0	7	0	6
Amostra 2	404	12	1	2	2	4
Amostra 3	385	9	1	7	1	3
Amostra 4	293	8	0	9	0	8
Σ	1474	42	2	25	3	21
Percentagem de veículos (%)	94,1	2,7	0,1	1,4	0,4	1,3

Incluiu-se uma contagem de veículos elétricos de modo a perceber qual a expressão que estes apresentam atualmente face à frota atual de veículos. Os veículos elétricos contabilizados foram na maioria autocarros de transporte público (categoria 2) e alguns veículos ligeiros (categoria 1).

A contagem foi feita em horário de ponta de modo a considerar o pior cenário possível.

4.4 Resultados

Optou-se por definir um conjunto de cinco recetores distribuídos nas imediações da estrada (um na berma da estrada e outros quatro distribuídos pelo Parque da Cidade Manuel Braga conforme ilustra a Figura 4.3.

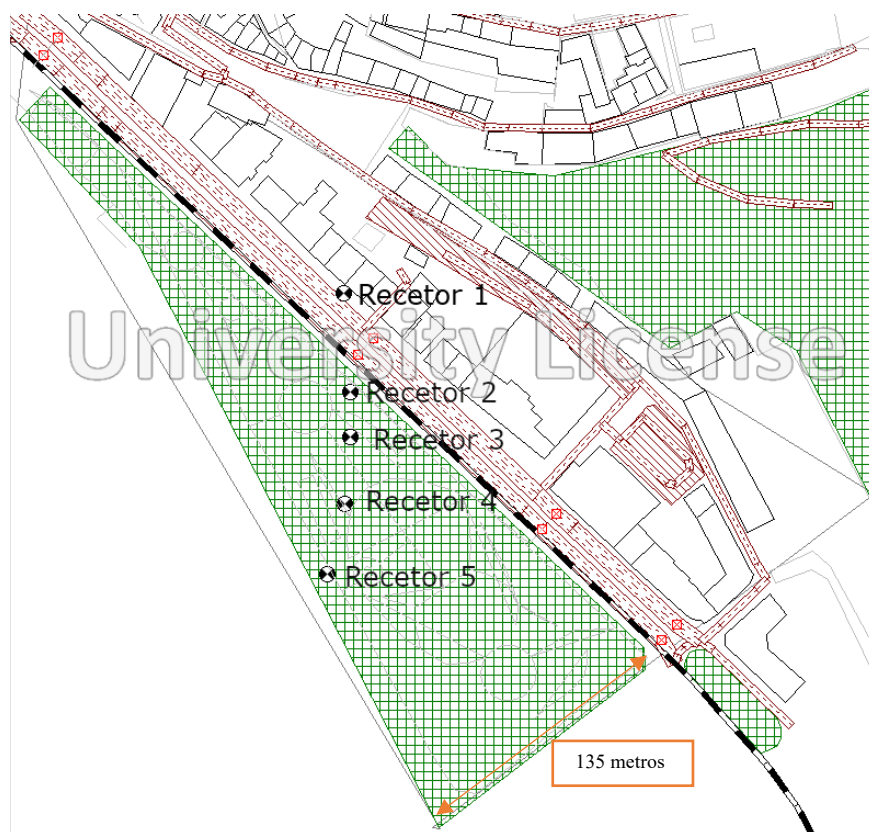


Figura 4.3 - Modelação da área de estudo no CadnaA e identificação dos recetores.

Considerou-se ainda uma altura média de 1,70 metros para cada recetor. Nos edifícios, definiu-se uma perda por reflexão de 2,0 dB, segundo a classificação de RLS 90/9 para fachadas (DataKustik GmbH, 2008).

Na primeira simulação, fez-se uma caracterização da situação atual. Foram utilizados os valores do Quadro 4.3 e foi considerada uma velocidade média de 50 Km/h para veículos ligeiros e motociclos e 35 Km/h para veículos pesados. Os resultados obtidos para os recetores definidos são os apresentados no Quadro 4.4.

Os recetores 2, 3, 4 e 5 foram distribuídos equitativamente pelo parque de modo a perceber como é que diversas pessoas situadas nas várias zonas do parque serão afetadas pelo ruído e pelas estratégias para mitigar o mesmo. O recetor 1 foi colocado do lado contrário da estrada, pois nesse lado encontra-se uma zona de comércio e de habitações. Apesar do objetivo deste estudo forçar-se na proteção da qualidade sonora do parque, é igualmente interessante perceber como é que esta área é impactada.

Quadro 4.4 - Resultados da primeira simulação, onde se faz a caracterização da situação atual, considerando uma velocidade de circulação de 50 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 35 km/h para veículos pesados.

	Cenário atual – 1ª simulação
	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4
Recetor 2	67,4
Recetor 3	61,2
Recetor 4	56,0
Recetor 5	53,5

Analisando os resultados, é possível concluir que os mesmos são bastante elevados. Mesmo no ponto do parque mais afastado da estrada (Recetor 5), o valor de L_d é elevado.

Na segunda simulação, experimentou-se manter os veículos a combustão e reduzir a velocidade média de circulação, considerando uma velocidade média de 30 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 20 km/h para veículos pesados, obtendo-se os seguintes resultados:

Quadro 4.5 - Resultados da segunda simulação, considerando uma velocidade de circulação de 30 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 20 km/h para veículos pesados, mantendo os veículos a combustão.

	Cenário atual	2ª simulação	Δ [dB (A)]
	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4	71,5	0,9
Recetor 2	67,4	66,7	0,7
Recetor 3	61,2	60,0	1,2
Recetor 4	56,0	54,3	1,7
Recetor 5	53,5	51,5	2,0

É possível constatar que a redução da velocidade de circulação tem algum impacto na perceção de ruído por parte dos recetores, demonstrando que o ruído proveniente do rolamento é um fator importante, conforme já tinha sido discutido anteriormente nesta dissertação.

Na terceira simulação considerou-se a mesma velocidade de circulação utilizada na primeira simulação e substituiu-se a totalidade dos veículos ligeiros a combustão por veículos ligeiros 100% elétricos. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Resultados da terceira simulação, considerando a mesma velocidade de circulação da simulação 1 e trocando os veículos a combustão por veículos elétricos.

	Cenário atual	3ª simulação	Δ [dB (A)]
	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4	70,5	1,9
Recetor 2	67,4	65,2	2,2
Recetor 3	61,2	58,8	2,4
Recetor 4	56,0	52,6	3,4
Recetor 5	53,5	49,7	3,8

Estes resultados demonstram que a alteração da frota de veículos ligeiros a combustão para veículos ligeiros 100% elétricos tem um impacto mais significativo nos resultados face ao cenário atual, superando o impacto que tem uma redução na velocidade de circulação mantendo a frota atual de veículos. Isto acontecerá pois a inclusão de semáforos na simulação faz com que o programa tenha em conta que os veículos se encontram a trabalhar parados durante longos períodos, reduzindo o peso do ruído proveniente do rolamento no resultado final.

Em seguida, na quarta simulação, considerou-se em simultâneo as duas medidas de mitigação de ruído referentes às simulações dois e três, substituindo os veículos ligeiros a combustão por veículos ligeiros elétricos e utilizando uma velocidade média de circulação de 30 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 20 km/h para veículos pesados.

Quadro 4.7 - Resultados da quarta simulação, combinando as medidas das simulações dois e três.

	Cenário atual	4ª simulação	Δ [dB (A)]
	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4	69,2	3,2
Recetor 2	67,4	64,5	2,9
Recetor 3	61,2	58	3,2
Recetor 4	56,0	52,0	4,0
Recetor 5	53,5	49,1	4,4

Como seria expectável, a combinação das duas medidas referidas anteriormente reflete-se em consequências ainda mais positivas para o ruído ambiente, especialmente nas imediações da estrada (face à simulação anterior).

Na simulação seguinte, experimentou-se manter as características de circulação utilizadas na simulação 4 (velocidade média de circulação de 30 km/h para veículos ligeiros e motociclos e 20 km/h para veículos pesados) mas reduzindo o tráfego rodoviário em 50%.

Quadro 4.8 - Resultados da quinta simulação, mantendo os parâmetros da simulação anterior e reduzindo o volume de tráfego em 50%.

	Cenário atual	5ª simulação	Δ [dB (A)]
	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4	66,2	6,2
Recetor 2	67,4	61,5	5,9
Recetor 3	61,2	55,0	6,2
Recetor 4	56,0	49,0	7,0
Recetor 5	53,5	46,1	7,4

Os resultados obtidos são claros. A redução do volume de tráfego, aliada à redução da velocidade de circulação e transição para mobilidade 100% elétrica teria um impacto significativo no nível de ruído da avenida.

Na sexta simulação, foram utilizados os parâmetros da simulação anterior e eliminou-se a presença de veículos pesados (categorias 2 e 3).

Quadro 4.9 - Resultados na sexta simulação, mantendo os parâmetros da simulação anterior e eliminando os veículos pesados.

	Cenário atual	6ª simulação	Δ [dB (A)]
	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]	L_d [dB (A)]
Recetor 1	72,4	62,4	10,0
Recetor 2	67,4	60,0	7,4
Recetor 3	61,2	53,4	7,8
Recetor 4	56,0	47,3	8,7
Recetor 5	53,5	44,6	8,9

Com a eliminação dos veículos pesados, obtiveram-se níveis de ruído ainda mais baixos, como seria expectável. Face à simulação anterior, nota-se uma diferença bastante significativa junto à berma da estrada (recetor 1).

Analisando os resultados obtidos, é possível concluir que a transição de veículos ligeiros a combustão para veículos equivalentes elétricos, aliada a um conjunto de medidas que visam

reduzir a densidade de tráfego e a velocidade de circulação, resulta numa melhoria significativa na qualidade sonora da Avenida Emídio Navarro. Os resultados obtidos são ainda relativamente elevados junto à estrada, contudo, conforme foi indicado nos dados de entrada, a amostragem foi contabilizada no período de ponta da tarde, sendo os resultados referentes, portanto, ao pior cenário possível.

A qualidade sonora do Parque da Cidade Manuel Braga deve ser protegida. Uma das medidas possíveis a implementar é a criação de uma *Quiet Area* neste espaço.

Em seguida é possível consultar os mapas de ruído correspondentes ao cenário atual (Figura 4.4) e à última simulação (Figura 4.5).

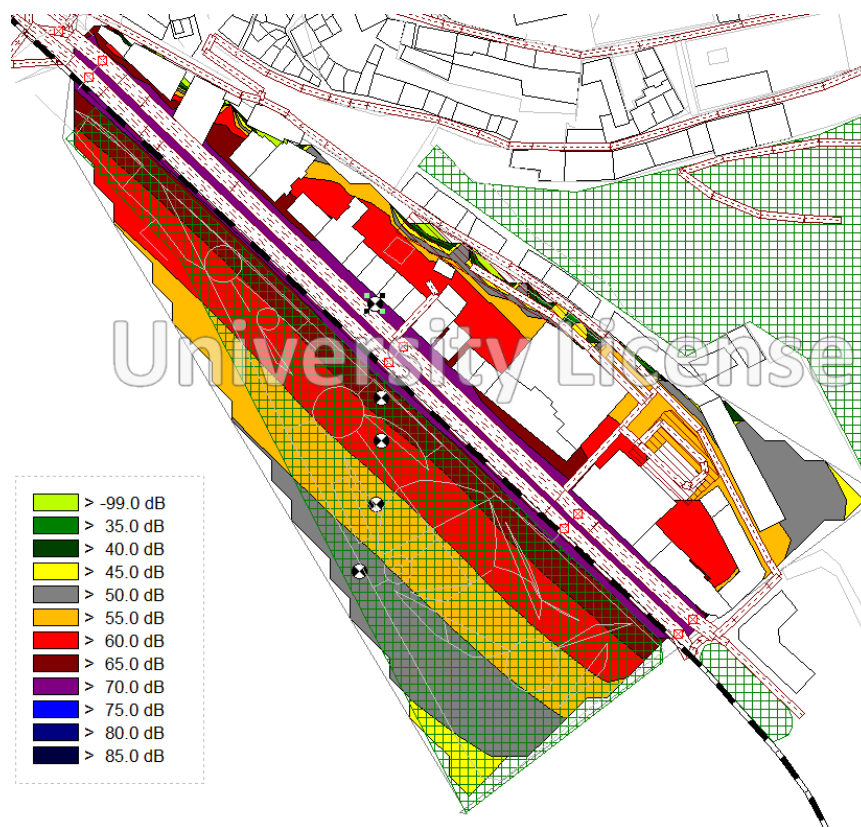


Figura 4.4 - Mapa de ruído da Avenida Emídio Navarro, correspondente à caracterização do cenário atual.

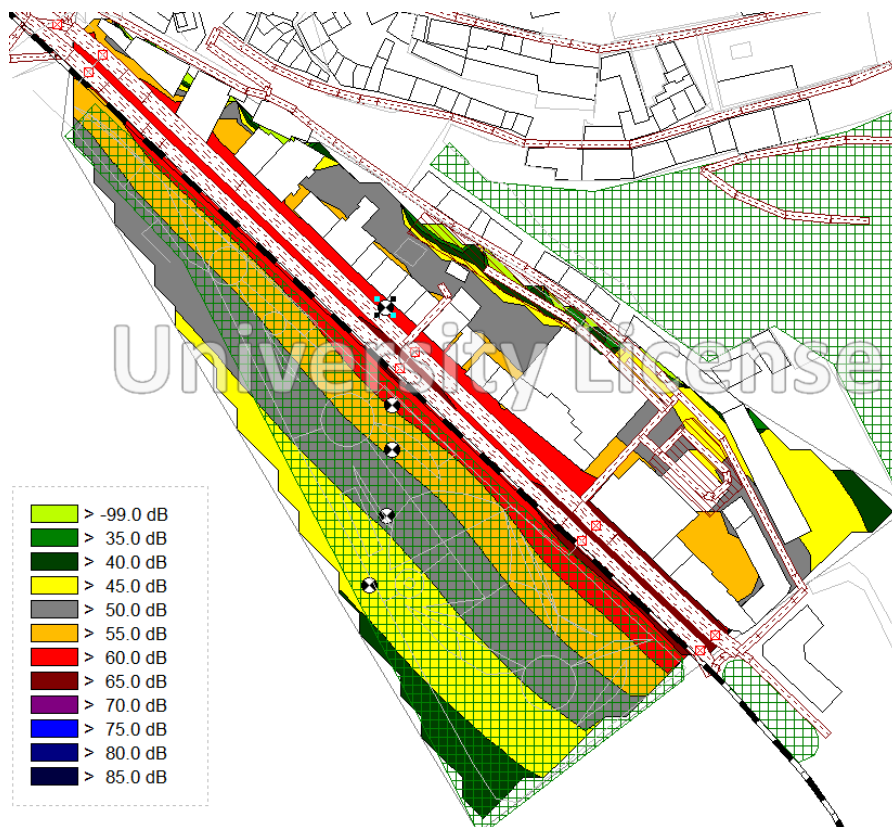


Figura 4.5 - Mapa de ruído da Avenida Emídio Navarro, correspondente à última simulação.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Nos últimos anos, registou-se um crescimento enorme na aquisição de veículos elétricos e a tendência é para que este crescimento se continue a acentuar. Nos primeiros quatro meses de 2022, foram vendidos cerca de 2 milhões de EVs, o que corresponde a um crescimento de 75% face ao mesmo período do ano anterior. Em 2021, os veículos elétricos foram responsáveis por 17% do total de vendas de veículos na Europa, sendo que os países que mais se destacaram foram a Noruega e Islândia onde esta percentagem foi de 86% e 72%, respetivamente (IEA, 2022). No que diz respeito a veículos pesados, o crescimento em 2021 face a 2020 foi de 40% para autocarros elétricos e 50% para camiões elétricos (IEA, 2022).

Na Europa, a *European Noise Directive (Directive 2002/49/EC, 2002)* é a principal ferramenta legislativa para regular as emissões de ruído, obrigando à produção de mapas de ruído para as principais estradas em zonas urbanas e não urbanas e ainda à determinação do número de pessoas expostas a níveis de ruído considerados elevados. O ruído proveniente do tráfego rodoviário excede largamente o ruído proveniente de outras fontes de emissão, estimando-se que na Europa, cerca de 82 milhões de pessoas estejam expostas a níveis de ruído iguais ou superiores a 55 dB (L_{den}) proveniente da referida fonte, em zonas urbanas (EEA, 2020). Em zonas não urbanas, o número de habitantes expostos a estes níveis estima-se em 31 milhões (EEA, 2020). No período noturno, o número de habitantes expostos a níveis de ruído elevados é de cerca de 57 milhões e 21 milhões para zonas urbanas e não urbanas, respetivamente (EEA, 2020).

Os vários estudos de outros autores que foram consultados no âmbito da realização desta dissertação apontam para que de facto, a transição de veículos com motores de combustão, mais ruidosos, para veículos com motorização elétrica, mais silenciosos, possam ter um impacto positivo na paisagem sonora ao nosso redor, embora a dimensão deste impacto varie de estudo para estudo. Com o aumento da velocidade de circulação, a tendência é para que o ruído proveniente do rolamento se sobreponha ao ruído proveniente do motor, com alguns estudos a sugerirem que isto se verifica perto dos 50 km/h (Marbjerg, 2013) enquanto outros estudos preveem que isto se verifique a velocidades bastante inferiores, na ordem dos 30 km/h (Jasic, 2009; Stahlfest et al., 2015). No âmbito do Projeto COMPETT, aferiu-se que a velocidade

constante e baixa, os veículos elétricos são entre 4 e 5 dB mais silenciosos quando comparados com veículos a combustão semelhantes (Stahlfest et al., 2015). Em desaceleração com travagem com motor, esta diferença situa-se entre os 2 e os 4 dB (Stahlfest et al., 2015). Quando o veículo se encontra parado e em funcionamento é quando se regista maior diferença, podendo esta chegar a cerca de 20 dB (Jasic, 2009). No que diz respeito a veículos pesados, os estudos sugerem que a baixa velocidade as diferenças são significativas, podendo chegar a cerca de 6 dB em aceleração e cerca de 3 dB em desaceleração (Pereira, 2014). Vários estudos referem ainda que em malha urbana, a mudança para veículos elétricos teria de ser feita na totalidade ou perto disso e em simultâneo com medidas de acalmia de tráfego, de modo a que se verifiquem efeitos positivos significativos (Campello-Vicente et al., 2017; Muirhead, 2015). Outro aspeto importante, é que esta transição deve ser acompanhada da adoção de pneus e pavimentos com características mais silenciosas (Stahlfest et al., 2015).

Apesar dos benefícios associados à falta de ruído, a verdade é que esta pode apresentar alguns riscos em contexto de condução. Vários estudos indicam que veículos a circular em modo elétrico têm maior probabilidade de se verem envolvidos em acidentes de viação, em cenários de condução como entrada e saída de parques de estacionamento e ao abrandar/ iniciar a marcha, por exemplo (Pereira, 2014). Este perigo resulta da diminuição do tempo de deteção de automóveis menos ruidosos. Por este motivo, estes veículos são equipados com sons exteriores de aviso (AVAS). Estes sons devem ser suficientemente audíveis de modo a aumentar o tempo de deteção destes automóveis e ao mesmo tempo criar o menor incómodo possível.

Analisando os resultados do caso de estudo apresentado, é possível concluir que a paisagem sonora do Parque da Cidade Manuel Braga, situado na proximidade da Avenida Emídio Navarro, em Coimbra, iria beneficiar de uma transição para mobilidade elétrica. Esta avenida conta com vários semáforos e paragens de autocarro, promovendo cenários de condução estacionários e de baixa velocidade, onde as diferenças entre o ruído emitido por ICEVs e EVs é mais significativa. Os resultados obtidos demonstram ainda que esta transição deve ser acompanhada por outras medidas, como por exemplo a redução da densidade de tráfego e redução da velocidade de circulação de modo a que na zona do parque seja possível uma melhoria significativa do ambiente sonoro. A criação de uma *Quiet Area* no parque poderá contribuir para a proteção da qualidade sonora do mesmo.

5.2 Trabalhos futuros

Na simulação realizada no âmbito desta dissertação foram feitas várias simplificações. Por exemplo, não foi considerado o tipo de pavimento da avenida em questão e outros fatores relevantes que poderiam ter impacto nos resultados obtidos. A mesma tem um caráter meramente comparativo, permitindo analisar e comparar o impacto das várias medidas descritas no capítulo anterior. Outro fator limitante é o facto de não existirem coeficientes de ruído legislados para as várias classes de veículos a operar em modo 100% elétrico, havendo necessidade de se recorrer a aproximações sugeridas por estudos de outros autores (apenas foram encontradas correções para a categoria de veículos ligeiros). Seria interessante no futuro repetir este estudo com maior grau de detalhe, com coeficientes e parâmetros característicos da área em estudo bem definidos. Outras medidas diferentes das sugeridas neste trabalho poderiam também ser equacionadas e analisadas (como por exemplo a adoção de pavimento e pneus com características mais silenciosas). Seria ainda interessante complementar este estudo com um estudo de micromobilidade para a zona da baixa de Coimbra. O derradeiro objetivo passa por diminuir o volume de tráfego rodoviário na zona, sendo que para isso é necessário oferecer alternativas às pessoas que sejam convenientes e apelativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angeline, S., & Rajkumar, N. (2020). Evolution of electric vehicle and its future scope. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3930–3936. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.266>
- António, J. (2012). *Acústica Ambiental*. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- APA. (2021a). *Ar e Ruído | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído>
- APA. (2021b). *Ruído ambiente | Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/ruído-ambiente>
- APA. (2022). *DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RUÍDO MÉTODOS CNOSSOS-EU*.
- Braun, M. E., Walsh, S. J., Horner, J. L., & Chuter, R. (2013). Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test: Literature review. In *Applied Acoustics* (Vol. 74, Issue 11, pp. 1241–1265). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.005>
- Câmara Municipal de Coimbra. (2013). *Mapa_Ruído_Lden*.
- Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59–64. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2016.09.018>
- Cao, Z., Zhang, X., Chua, K., Yu, H., & Zhao, J. (2021). E-scooter sharing to serve short-distance transit trips: A Singapore case. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 147, 177–196. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.03.004>
- Comissão Europeia. (2015). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU): to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC*. OPEU.

- Cruz, C., & Montenon, A. (2016). Implementation and Impacts of Low Emission Zones on Freight Activities in Europe: Local Schemes Versus National Schemes. *Transportation Research Procedia*, 12, 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.010>
- DataKustik. (n.d.). *The easy-to-use software solution for the calculation and assessment, prediction and presentation of noise exposure and impact of air pollutant. State-of-the-art noise prediction software*. Retrieved October 25, 2022, from www.projektil.com
- DataKustik GmbH. (2008). *State-of-the-art noise prediction software Reference Manual Release 3.8*.
- Despacho n.º 2535/2021. (2021). *Ambiente e Ação Climática.D.R. II Série. 45 (05-03-2021) 193-197*. <https://files.dre.pt/2s/2021/03/045000000/0019300197.pdf>
- Despacho n.º3419-B/2022. (2022). *Ambiente e Ação Climática. D.R. II Série. 57 (22-03-2022) 475*. <https://www.fundoambiental.pt/ficheiros/ven-2022-despacho-n-3419-b20221.aspx>
- Directive 2002/49/EC*. (2002).
- DUNLOP. (n.d.). *Saiba mais sobre etiquetas de pneus da UE*. Retrieved December 26, 2022, from https://www.dunlop.eu/pt_pt/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html
- EC. (2020). *Cities at a Glance*. https://webgate.ec.europa.eu/greencitytool/resources/docs/best_practices/GPFS_QuietAreas_A01.pdf
- EEA. (2016). *Environmental noise*. <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/environment-and-health/environmental-noise>
- EEA. (2020). *Environmental noise in Europe - 2020*.
- Ekonomista. (2021). *Mobilidade partilhada: uma realidade do transporte atual*. <https://www.e-konomista.pt/mobilidade-partilhada/>

- EU-Citizen.Science. (2021). *EU-Citizen.Science :: Hush City*. <https://eu-citizen.science/project/315>
- European Commission. (2017). *Electrification of the Transport System Studies: and reports*.
- Fang, K. (2022). Micromobility injury events: Motor vehicle crashes and other transportation systems factors. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100574>
- Fleury, S., Jamet, É., Roussarie, V., Bosc, L., & Chamard, J. C. (2016). Effect of additional warning sounds on pedestrians' detection of electric vehicles: An ecological approach. *Accident Analysis and Prevention*, 97, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.09.002>
- Gabinete do Ministro do Ambiente e da Ação Climática. (2022). (2022, Janeiro 26). *Apoiada a aquisição de mais 193 autocarros elétricos fora das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto [Nota de Imprensa]*. <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBQAAAB%2bLCAAAAAAABAAzNDIzNAQAq8gktwUAAAA%3d>
- Haworth, N. L., & Schramm, A. (2019). Illegal and risky riding of electric scooters in Brisbane. In *Medical Journal of Australia* (Vol. 211, Issue 9, pp. 412–413). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.5694/mja2.50275>
- Hong, D., Jang, S., & Lee, C. (2022). Investigation of shared micromobility preference for last-mile travel on shared parking lots in city center. *Travel Behaviour and Society*, 30, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.09.002>
- IEA. (n.d.). *Policy database – Data & Statistics - IEA*. Retrieved February 27, 2023, from <https://www.iea.org/policies>
- IEA. (2022). *Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future*. www.iea.org/t&c/
- Jasic. (2009). *A Study on Approach Warning Systems for hybrid vehicle in motor mode*.

Jornal Oficial da União Europeia. (2014).

Kephalopoulos, Stylianos., Paviotti, Marco., Anfosso-Lédée, Fabienne., & Institute for Health and Consumer Protection. (2012). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU) : to be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC.* OPEU.

Khan, J., Ketznel, M., Jensen, S. S., Gulliver, J., Thysell, E., & Hertel, O. (2021). Comparison of Road Traffic Noise prediction models: CNOSSOS-EU, Nord2000 and TRANEX. *Environmental Pollution*, 270. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.116240>

Khliissa, R., Vivier, S., Friedrich, G., el Kadri Benkara, K., & Assaad, B. (2016). Thermal modeling of an asymmetrical totally enclosed permanent magnet integrated starter generator. *Mathematics and Computers in Simulation*, 130, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.06.015>

Kim, D. S., Emerson, R. W., Naghshineh, K., Pliskow, J., & Myers, K. (2012). *Impact of adding artificially generated alert sound to hybrid electric vehicles on their detectability by pedestrians who are blind.* 49(3), 381–394. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2011.03.0041>

Lavrador, A. (2022). *Parlamento Europeu aprovou proposta que proíbe motores de combustão em 2035 – Observador.* <https://observador.pt/2022/05/14/parlamento-europeu-aprovou-proposta-que-proibe-motores-de-combustao-em-2035/>

Lee, U., Jeon, S., & Lee, I. (2022). Design for shared autonomous vehicle (SAV) system employing electrified vehicles: Comparison of battery electric vehicles (BEVs) and fuel cell electric vehicles (FCEVs). *Cleaner Engineering and Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100505>

Ligen, Y., Vrubel, H., & Girault, H. (2020). Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(18), 10639–10647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.035>

- Magueta, D., Madaleno, M., Ferreira Dias, M., & Meireles, M. (2018). New cars and emissions: Effects of policies, macroeconomic impacts and cities characteristics in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 181, 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.243>
- Maijala, P., Kokkonen, J., & Kontkanen, O. (2016). *CNOSSOS-EU Sensitivity to Meteorological and to Some Road Initial Value Changes (invited paper) CNOSSOS-EU Sensitivity to Meteorological and to Some Road Initial Value Changes*. <https://www.researchgate.net/publication/307907638>
- Marbjerg, G. (2013). *Noise from electric vehicles - A literature survey*.
- Matos, J., Fradique, J., Tavares, L., Guedes, M., & Leite, M. (2020). *Guia prático para medições de ruído ambiente-no contexto do Regulamento Geral do Ruído tendo em conta a NP ISO 1996 Julho 2020*.
- Meng, S., & Brown, A. (2021). Docked vs. dockless equity: Comparing three micromobility service geographies. *Journal of Transport Geography*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103185>
- Muirhead, M. (2015). *CEDR Transnational Road Research Programme Call 2012: Noise: Integrating strategic noise management into the operation and maintenance of national road networks DISTANCE Future potential traffic scenarios Developing Innovative Solutions for Traffic Noise Control in Europe*.
- Neves, S., Marques, A., & Fuinhas, J. (2019). Technological progress and other factors behind the adoption of electric vehicles: Empirical evidence for EU countries. *Research in Transportation Economics*, 74, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.12.001>
- NHTSA. (2009). *Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles Technical Report*. www.nhtsa.dot.gov
- Ribeiro, J. (n.d.). *Assessment of the CNOSSOS-EU model for road traffic noise prediction*.

- Pallas, M. A., Berengier, M., Chatagon, R., Czuka, M., & Conter, M. (2016). *Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU*.
- Panteliadis, P., Strak, M., Hoek, G., Weijers, E., van der Zee, S., & Dijkema, M. (2014). Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring. *Atmospheric Environment*, 86, 113–119. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2013.12.035>
- Parlamento Europeu. (2022). *Proibição da venda de carros a gasolina e gasóleo a partir de 2035 | Atualidade | Parlamento Europeu*. <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20221019STO44572/p-roibicao-da-venda-de-carros-a-gasolina-e-gasoleo-a-partir-de-2035>
- Pereira, A. (2014). *Sound metrics to evaluate noise from electric vehicles and hybrid vehicles. COST Action TU1105: Short Term Scientific Mission - Scientific Report*.
- Pollet, B. G., Kocha, S. S., & Staffell, I. (2019). Current status of automotive fuel cells for sustainable transport. In *Current Opinion in Electrochemistry* (Vol. 16, pp. 90–95). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.021>
- Qian, K., Hou, Z., & Sun, D. (2020). Sound quality estimation of electric vehicles based on GA-BP artificial neural networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16). <https://doi.org/10.3390/app10165567>
- Razão Automóvel. (2019). *Arranque a Frio. O mais baixo coeficiente aerodinâmico atual é de um carro chinês*. <https://www.razaoautomovel.com/2019/12/arranque-a-frio-gac-eno-146>
- Reck, D. J., Haitao, H., Guidon, S., & Axhausen, K. W. (2021). Explaining shared micromobility usage, competition and mode choice by modelling empirical data from Zurich, Switzerland. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102947>

- Santos, F. M., Gómez-Losada, Á., & Pires, J. C. M. (2019). Impact of the implementation of Lisbon low emission zone on air quality. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.061>
- Stahlfest, R., Skov, H., & Iversen, L. (2015). *Noise from electric vehicles - Measurements*. Stratstone. (2021). *What are the Euro Emissions Standards?* <https://www.stratstone.com/blog/european-car-emissions-standards/>
- Szoke, E. (2022). *Low emission zones in Europe nearly doubled in the past years - CEENERGYNEWS*. <https://ceenergynews.com/energy-me/low-emission-zones-in-europe-nearly-doubled-in-the-past-years/>
- The Guardian. (2022). *'Noise radar' in Paris will catch raucous cars and motorbikes | Paris | The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2022/feb/15/noise-radar-in-paris-will-catch-raucous-cars-and-motorbikes>
- U.S. Department of Energy. (n.d.). *Alternative Fuels Data Center: How Do Hybrid Electric Cars Work?* Retrieved February 6, 2023, from <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
- WELECTRIC. (2020). *Trotinetes elétricas da Bolt chegam a Lisboa*. <https://welectric.pt/2020/07/20/trotinetes-eletricas-da-bolt-chegam-a-lisboa/>
- WHO. (2011). *Burden of Disease from Environmental Noise Burden of disease from environmental noise Quantification of healthy life years lost in Europe*. www.euro.who.int
- World Economic Forum. (2019). *As urban development booms, others seek peace and quiet | World Economic Forum*. https://www.weforum.org/agenda/2019/10/cities-aim-reduce-noise-pollution/?utm_source=Facebook%20Videos&utm_medium=Facebook%20Videos&utm_campaign=Facebook%20Video%20Blogs
- Yamauchi, K., Sano, T., Hasegawa, ; Shin, Tamura, F., & Takeda, Y. (2014). *Detectability and hearing impression of additional warning sounds for electric or hybrid vehicles*.