



Fundação
Mestre
Casais

Qualidade ambiental urbana

Ruído e poluição atmosférica em cidades

Ensaio para a
Sustentabilidade



UMinho Editora

Lígia Silva



UMinho Editora



Fundação
**Mestre
Casais**

AUTORA

Lígia Silva

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Manuela Martins

COORDENAÇÃO DA COLEÇÃO DE ENSAIOS PARA A SUSTENTABILIDADE

José Gomes Mendes

FOTO CAPA

NoName_13 / Pixabay

DESIGN e PAGINAÇÃO

Tiago Rodrigues

IMPRESSÃO e ACABAMENTOS

Papelmunde

EDIÇÃO UMinho Editora

LOCAL DE EDIÇÃO Braga 2026

DEPÓSITO LEGAL N.º 563800/26

ISBN 978-989-9074-92-7

ISBN DIGITAL 978-989-9074-93-4

DOI <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.228>

Os conteúdos apresentados (textos e imagens) são da exclusiva responsabilidade dos respetivos autores.

© Autores / Universidade do Minho – Esta obra encontra-se sob a Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0.

Qualidade ambiental urbana

Ruído e poluição atmosférica
em cidades

Lígia Silva

A crescente urbanização e a concentração populacional nas cidades tornam cada vez mais evidente a necessidade de compreender, avaliar e gerir os fatores que condicionam a qualidade ambiental urbana. Entre estes, o ruído e a poluição atmosférica destacam-se pela sua persistência, impacto direto na saúde e bem-estar das populações, e pela complexidade que introduzem na governação do território urbano.

O livro *Qualidade Ambiental Urbana: Ruído e Poluição Atmosférica em Cidades* nasce desse desafio – o de traduzir conhecimento científico em instrumentos de análise e apoio à decisão, capazes de orientar políticas públicas e práticas de planeamento mais informadas e eficazes. A obra reúne contributos teóricos e aplicados, articulando conceitos de engenharia, ciências do ambiente e planeamento urbano, numa abordagem integrada e multidisciplinar.

Estruturado em duas partes complementares. O livro inicia-se com uma síntese conceptual e normativa sobre o enquadramento do ruído e da poluição atmosférica, abordando metodologias de medição, modelação e avaliação ambiental. Segue-se uma componente aplicada, sustentada em estudos de caso realizados em cidades portuguesas, que exemplificam a importância da observação territorial e da utilização de ferramentas de apoio à decisão baseadas em sistemas de informação geográfica.

Destaque é dado aos modelos *CityAir* e *CityNoise-Air*, e ao papel das Soluções Baseadas na Natureza (NbS) como mecanismos essenciais de mitigação e regeneração ambiental.

A obra é, simultaneamente, um contributo científico e técnico que, recorrendo a uma linguagem rigorosa, mas acessível, constitui um convite à reflexão sobre o futuro das cidades – mais sustentáveis, mais saudáveis e mais justas.

O trabalho aqui apresentado resultou de um processo coletivo, pelo que dedico estas últimas linhas a reconhecer aqueles que são também, em parte, autores deste livro.

À Ana Cláudia Silva, pela colaboração na área das LEZ (Low Emission Zones) e ao Fernando Fonseca, pela colaboração na área das NbS (Nature Based Solutions).

Um agradecimento muito especial é devido ao Professor José Mendes, que me lançou o desafio de transformar em livro os resultados do trabalho de investigação que tenho vindo a desenvolver em equipa – um incentivo sem o qual esta publicação não teria acontecido.

Parte I – Conceitos e Estratégias	11
1. Introdução	13
2. Ruído ambiental urbano	17
2.1. Conceitos básicos de ruído	19
2.2. Fontes de ruído ambiental	30
2.3. Caracterização e modelação do ruído ambiental urbano	40
3. Poluição atmosférica urbana	47
3.1. Conceitos básicos da poluição atmosférica	49
3.2. Principais poluentes urbanos, fontes e impacto na saúde e ambiente	50
3.3. Caracterização, medição e modelação da poluição atmosférica urbana	60
4. Avaliação da qualidade ambiental urbana	63
4.1. Integração de indicadores ambientais	65
4.2. Interpretação territorial e aplicação prática	65
4.3. Síntese conclusiva	67
5. Planos e medidas de melhoria da qualidade ambiental urbana	69
5.1. Estratégias de mitigação e controlo do ruído	69
5.2. Estratégias de mitigação e controlo da poluição atmosférica	75
5.3. Soluções baseadas na natureza para a mitigação da poluição urbana	83
Referências	95

Parte II – Aplicações	101
6. O <i>CityAir</i> e o <i>CityNoise-Air</i> (Viana do Castelo)	103
6.1. Enquadramento	103
6.2. Objetivos do projeto	103
6.3. Estratégia do projeto	104
6.4. Intervenientes no processo	106
6.5. Principais recursos utilizados	106
6.6. Acompanhamento e principais resultados	106
7. O SMARBRAGA (Braga)	113
7.1. Enquadramento	113
7.2. Objetivos do projeto	113
7.3. Estratégia do projeto	113
7.4. Intervenientes no processo	114
7.5. Principais recursos utilizados	115
7.6. Acompanhamento e principais resultados	115
8. O SMMART da cidade de Vila Real	119
8.1. Enquadramento	119
8.2. Objetivos do projeto	119
8.3. Estratégia do projeto	119
8.4. Intervenientes no processo	120
8.5. Principais recursos utilizados	120
8.6. Acompanhamento e principais resultados	121

9.	BUILD: Braga Urban Innovation Laboratory Demonstrator - Laboratório Vivo para Descarbonização (Braga)	129
9.1.	Enquadramento	129
9.2.	Objetivos do projeto	130
9.3.	Estratégia do projeto	130
9.4.	Intervenientes no processo	133
9.5.	Principais recursos utilizados	133
9.6.	Acompanhamento e principais resultados	134
10.	Rede FMC de monitorização da qualidade do ar – airly.org	145
10.1.	Enquadramento	145
10.2.	Objetivos do projeto	146
10.3.	Descrição dos sensores da rede	146
10.4.	O conceito e o modelo de dados abertos da plataforma <i>Airly</i>	149
10.5.	O índice de qualidade do ar da <i>Airly</i>	152
10.6.	Projeção da qualidade do ar	157
10.7.	Nota final	159
	Referências	160

Parte I

Conceitos e Estratégias

1. Introdução

O crescimento da população mundial tem sido acompanhado do reforço da população que vive em áreas urbanas, realidade que resulta muito frequentemente em pressões sobre os espaços, os ecossistemas, as infraestruturas, os equipamentos e os modos de vida.

As cidades representam hoje o principal palco da vida humana, concentrando a maioria da população mundial e uma parte significativa das atividades económicas, culturais e sociais. Esta concentração, embora fonte de inovação e dinamismo, gera também pressões ambientais significativas que comprometem a qualidade de vida e a sustentabilidade urbana. Entre os múltiplos fatores que influenciam a qualidade ambiental das cidades, o ruído e a poluição atmosférica destacam-se como dois dos mais persistentes e impactantes, afetando de forma direta a saúde, o bem-estar e a percepção de conforto dos cidadãos.

A compreensão integrada destes fenómenos é essencial para o planeamento urbano contemporâneo. O ruído e a poluição atmosférica partilham origens comuns – essencialmente associadas ao tráfego rodoviário, à mobilidade motorizada e a determinadas atividades industriais e de serviços – e coexistem espacialmente, potenciando efeitos cumulativos. No entanto, historicamente têm sido abordados de forma independente, tanto na investigação científica como na gestão urbana. Esta fragmentação metodológica e institucional constitui um obstáculo à formulação de políticas públicas coerentes e à implementação de soluções eficazes.

O presente livro, *Qualidade Ambiental Urbana: Ruído e Poluição Atmosférica em Cidades*, nasce precisamente da necessidade de ultrapassar essa fragmentação, propondo uma abordagem interdisciplinar e integrada. Partindo da articulação entre engenharia, ambiente e planeamento, procura construir uma visão sistémica da qualidade ambiental urbana, sustentada em evidência empírica, em modelos analíticos e em aplicações práticas.

A obra estrutura-se em duas grandes partes complementares. A primeira apresenta o enquadramento conceptual, metodológico e normativo dos dois domínios em análise. São discutidas as principais fontes emissoras, os mecanismos de propagação e dispersão, os métodos de medição e modelação, bem como os impactos na saúde e na sustentabilidade urbana. Integram-se ainda as referências às diretivas europeias e à legislação nacional, evidenciando o papel dos municípios na aplicação de planos e mapas estratégicos de ruído e qualidade do ar. Esta parte assume um carácter essencialmente

formativo, procurando oferecer uma base sólida de conhecimento para técnicos, investigadores e estudantes.

A segunda parte assume um carácter aplicado e exploratório. Com base em vários estudos de caso desenvolvidos em cidades portuguesas – designadamente Viana do Castelo, Braga e Vila Real – são apresentados procedimentos de recolha, tratamento e análise de dados ambientais e espaciais. O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de ferramentas de modelação permitiu construir representações detalhadas da exposição populacional ao ruído e à poluição atmosférica, bem como identificar áreas críticas e padrões territoriais de vulnerabilidade.

Desta investigação resultaram dois modelos inovadores: *CityAir* e *CityNoise-Air*. O primeiro traduz-se num sistema de indicadores de qualidade do ar urbana, enquanto o segundo integra simultaneamente os componentes de ruído e de poluição atmosférica num índice composto de Qualidade Ambiental Urbana (QAU). Estes modelos permitem avaliar de forma integrada os níveis de exposição e a perceção ambiental em meio urbano, contribuindo para uma visão mais completa e objetiva das condições ambientais locais. Para além da sua aplicabilidade científica, representam instrumentos de apoio à decisão que podem ser utilizados por municípios, agências ambientais e entidades de planeamento.

Outro eixo estruturante da obra prende-se com a importância crescente das Soluções Baseadas na Natureza (NbS) na mitigação dos impactos ambientais urbanos. As Estruturas Verdes Urbanas (EVU) – parques, corredores ecológicos, fachadas e coberturas vegetadas – assumem um papel central na regulação microclimática, na redução do ruído e na melhoria da qualidade do ar. A vegetação urbana atua como filtro biológico, retendo partículas em suspensão, absorvendo gases poluentes e atenuando a propagação sonora. Para além dos benefícios ambientais diretos, as EVU contribuem para a coesão social e para o bem-estar psicológico dos habitantes, reforçando a ligação entre cidade e natureza. Assim, a integração das NbS nos instrumentos de planeamento urbano é apresentada como um caminho incontornável para a sustentabilidade e a resiliência das cidades.

A abordagem aqui proposta alia o rigor técnico-científico à aplicabilidade prática. Ao longo do livro, defende-se que a melhoria da qualidade ambiental urbana depende da articulação entre conhecimento científico, planeamento territorial e governação participativa. Cidades mais sustentáveis exigem diagnósticos integrados, políticas coerentes e uma cultura de responsabilidade ambiental.

Este livro é, por isso, simultaneamente um contributo teórico e operativo. Dirige-se a investigadores e estudantes interessados na temática da qualidade ambiental urbana, mas também a técnicos municipais, engenheiros, arquitetos e decisores políticos que enfrentam diariamente o desafio de equilibrar desenvolvimento urbano, mobilidade e qualidade de vida. Pretende ser um instrumento de reflexão e apoio à ação, promovendo uma visão de cidade que valoriza o ambiente como componente estrutural da sua identidade e competitividade.

Em última instância, a obra propõe uma leitura otimista: a de que é possível construir cidades mais saudáveis, silenciosas e limpas – espaços onde o ruído e a poluição atmosférica não sejam vistos apenas como problemas a resolver, mas como oportunidades para repensar o modo como vivemos, nos deslocamos e interagimos com o meio urbano. É nesse equilíbrio entre ciência, técnica e sensibilidade ambiental que reside a verdadeira qualidade das cidades do futuro.

2. Ruído ambiental urbano

Globalmente, tem-se observado um aumento nos níveis de ruído em zonas urbanas devido ao crescimento urbano e ao aumento da procura por mobilidade. Nas cidades, o tráfego rodoviário é a principal fonte de ruído ambiental. No entanto, outras fontes também contribuem para este problema, como o ruído de tráfego ferroviário e aéreo, ruído proveniente de áreas industriais e portuárias, construção e ruído de entretenimento e lazer.

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a seguir à poluição atmosférica, a poluição sonora é a que mais tem impacto na saúde e na vida da população a curto e médio prazo, sendo, no entanto, muitas vezes subestimada e negligenciada. Apesar dos avanços obtidos com a Diretiva Ruído Ambiente (European Environment Agency [EEA], 2020) relativa à avaliação e gestão de ruído ambiente, os dados do relatório de 2020 da Agência Europeia do Ambiente, revelam que os objetivos políticos previstos na Diretiva ainda estão longe de serem alcançados e que o ruído ambiental continua a ser um problema generalizado na Europa, com, pelo menos, uma em cada cinco pessoas expostas a níveis de ruído considerados prejudiciais para a saúde, o que corresponde a mais de 100 milhões de pessoas afetadas (EEA, 2020).

Em Portugal, a maioria das cidades regista valores de ruído acima do limite legal definido pela legislação nacional e europeia em vigor. De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, 20% da população residente em Portugal Continental está exposta a níveis sonoros que induzem a perturbações no sono e 15% da população está exposta a níveis associados a incomodidade moderada.

Os impactos na saúde vão muito além dos problemas auditivos. Estima-se que a exposição prolongada ao ruído ambiental cause, anualmente, na Europa 12 mil mortes prematuras e contribua para 48 mil novos casos de doenças cardiovasculares, tendo, de entre outros, impactes como distúrbios de sono e incomodidade elevada (Figura 1). Como resultado da poluição causada pelo tráfego aéreo, estima-se que, anualmente, 12,5 mil crianças sofram de défice cognitivo, impactando o desenvolvimento escolar das mesmas (European Environment Agency, 2020; Basner et al., 2017). Em termos económicos, a poluição sonora conduz à perda de produtividade dos trabalhadores, sobrecarrega os sistemas de saúde e gera desvalorização imobiliária dos imóveis situados nas zonas mais ruidosas.

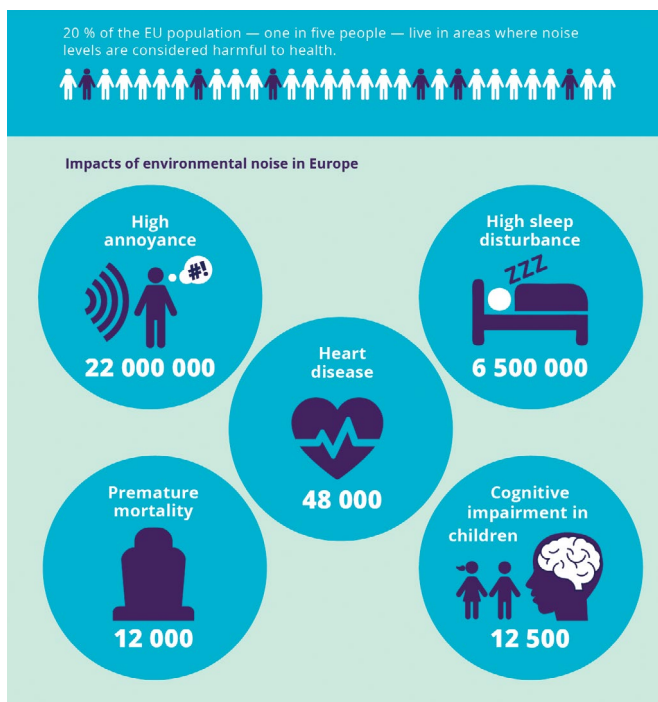


Figura 1 Impactes do Ruído na Saúde (Adaptado de Agência Europeia do Ambiente, 2020).

Em termos ecológicos, o ruído ambiental também gera significativo impacto negativo na fauna. De entre os danos gerados, destacam-se a alteração na taxa reprodutiva de aves e anfíbios, para os quais a comunicação sonora é fundamental; a alteração da vocalização de pássaros, primatas, cetáceos e roedores visando reduzir os efeitos de mascaramento causados pelo ruído ambiental; alteração na capacidade de percepção de predadores e identificação de presas; a diminuição da capacidade de identificar mudanças no ambiente em que vivem, afetando, entre outras coisas, as migrações; e, ainda, a redução e fragmentação do habitat de diversas espécies que evitam áreas com poluição sonora crônica, como os arredores de rodovias e portos, potencializando o risco de extinção das mesmas (Barber et al., 2010; Popper et al., 2020).

A OMS define o ruído ambiental como ruído proveniente de quaisquer fontes, exceto aquele a que trabalhadores estão expostos no seu local de trabalho (ruído ocupacional). Já a Diretiva Ruído Ambiente do Parlamento Europeu (2002/49/CE) com as respetivas atualizações de 2015 e 2020, a

partir daqui denominada apenas Environmental Noise Directive (END), tem uma definição mais específica e considera ruído ambiente todo o tipo de som exterior desagradável ou indesejado produzido por atividades humanas, como as fontes de ruído de tráfego rodoviário, ferroviário, aéreo e atividades industriais. Nesse contexto, tal Diretiva não considera ruído ambiente o ruído proveniente de atividades recreativas, ruído de vizinhança, ruído de parques eólicos, ruído de atividades militares, nem o ruído de fonte ocupacional (EEA, 2020).

2.1. Conceitos básicos de ruído

Som e ruído

O som é o resultado da libertação de energia emitida por uma fonte sonora, a qual se propaga sobre a forma de ondas mecânicas capazes de produzir sensações ao nível do ouvido. Pode-se definir som como qualquer variação da pressão atmosférica que o ouvido humano tem capacidade de detetar, seja no ar, na água ou em qualquer outro meio de propagação.

Quando esse som se torna desagradável ou incomodativo, passa a ser denominado ruído. No entanto, essa definição é bastante subjetiva, pois não depende apenas do tipo de som, mas também das capacidades recetivas do ouvido humano, o qual varia de pessoa para pessoa, em função dos momentos e dos locais. Um exemplo disso é que o som de uma motocicleta a alta velocidade pode ser considerado muito incomodativo para algumas pessoas, e extremamente estimulante para quem está a conduzi-la. É por isso que é tão difícil determinar objetivamente a incomodidade.

Descritores do som

A aptidão do ouvido humano para a captação de ondas sonoras com a mesma energia, mas com distintas frequências, é diferente. A sensibilidade do ouvido humano aumenta para sons com a gama de frequências compreendidas entre 500 Hz e 4000 Hz e a sensibilidade auditiva diminui para frequências acima (ultrassons) e abaixo (infrassons) daqueles valores. Por exemplo, para o ouvido humano a diferença entre um som de 250 Hz e um de 125 Hz é próximo da diferença entre um som de 1000 Hz e um de 500 Hz.

Esta área de sensibilidade corresponde à banda de frequências que é utilizada na conversação humana e, para reproduzi-la, utiliza-se o decibel corrigido, designado por “decibel A” (abreviadamente, dB(A)).

A escala de valores de nível de pressão sonora varia entre 0 dB, que corresponde ao limiar da audição, e 120 dB, que corresponde ao limiar da dor, conforme pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 Escala de valores de nível de pressão sonora (Fonte: © VectorMine Dreamstime.com).

A aritmética do decibel requer atenção, uma vez que não se trata de valores lineares, mas sim de valores logarítmicos. Isso quer dizer que a soma de dois sons com o mesmo nível sonoro traduz-se por um aumento aproximado de 3 dB(A) no correspondente nível de pressão sonora ponderado A. Tal significa por exemplo, que a duplicação do volume de tráfego se traduz por um aumento de mais 3 dB(A) sobre o nível sonoro produzido antes da sua duplicação (exemplo: 70 dB(A) + 70 dB(A) ≈ 73 dB(A)) (Figura 3).

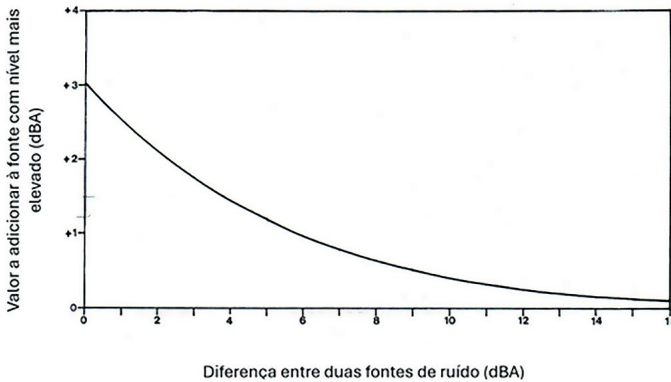


Figura 3 Combinação de fontes sonoras.

Da mesma forma, se duas fontes sonoras emitem simultaneamente ruído cujos correspondentes níveis de pressão sonora ponderado A diferem em 10 dB(A) ou mais, o ruído de menor amplitude é mascarado pelo de maior amplitude. Isto é, o ruído resultante da adição das duas fontes terá um nível de pressão sonora ponderado A aproximadamente igual ao do mais elevado dos dois ruídos (exemplo: 70 dB(A) + 60 dB(A) \approx 70 dB(A)).

Zonamento acústico, indicadores de ruído e critérios de exposição máxima

No que diz respeito à qualidade de vida urbana e ao planeamento das cidades, um importante instrumento integrante do Plano Diretor Municipal é o mapa de zonamento acústico ou mapa de classificação de zonas acústicas.

Em Portugal, desde o ano 2000 passou-se a considerar a dimensão ruído em contexto de planeamento, através do Regime Legal Sobre Poluição Sonora (RLPS). No entanto, com vista à uniformização de métodos de avaliação do ruído ambiente na UE, o RLPS foi revogado em 2007, através do Regulamento Geral de Ruído (RGR), publicado no Decreto-Lei 9/2007, de 17 de janeiro.

Em termos legais, considera-se fonte de ruído toda a ação, atividade permanente ou temporária, equipamento, estrutura ou infraestrutura que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se faça sentir o seu efeito.

O RGR define ainda que são consideradas zonas sensíveis as áreas urbanas que, nos planos municipais de ordenamento do território, sejam vocacionadas para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços

de lazer, existentes ou previstos. Estas zonas podem conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno. Já as zonas mistas são as áreas urbanas cuja ocupação seja afetada a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível.

A classificação de zonas como sensíveis implica a automática proibição de instalação e o exercício de atividades ruidosas de carácter permanente. Já a instalação e o exercício de atividades ruidosas de carácter permanente em zonas mistas, ou nas envolventes das zonas sensíveis ou mistas, ficam condicionados ao respeito pelos limites fixados segundo o critério de exposição máxima e o critério de incomodidade.

Critérios de Exposição Máxima

Este regulamento define três períodos de dia o período diurno (compreendido entre as 7h00 e as 20h00), o período entardecer (compreendido entre as 20h00 e as 23h00 horas) e o período noturno (compreendido entre as 23h00h e as 7h00) (Silva (2007).

A partir dele são definidos os indicadores de ruído ambiente de longo termo que são o L_{dia} (indicador de ruído diurno), $L_{\text{entardecer}}$ (indicador de fim-de-tarde ou período intermédio), o L_{noite} (indicador noturno) e o L_{den} (indicador composto pelos três períodos: dia-entardecer-noite), expressos em dB(A).

O indicador de ruído ambiente composto, L_{den} , corresponde a um nível sonoro contínuo equivalente de 24 horas, ponderado distintamente nos períodos de dia, entardecer e noite e por fatores de agravamento nos períodos de entardecer e noite por forma a traduzir de uma forma mais aproximada o incómodo global associado.

A Tabela 1 apresenta os limites de exposição máxima permitidos pela lei portuguesa para os períodos L_{den} e L_{noite} .

Tabela 1 Limites de exposição máxima (Fonte: DL9/2007).

Classificação de Zona	L_{den}	L_{noite}
Zonas Mistas	65 dB(A)	55 dB(A)
Zonas Sensíveis	55 dB(A)	45 dB(A)
Zonas Sensíveis próxima à grande infraestrutura de transporte	65 dB(A)	55 dB(A)
Zonas Sensíveis com projeto de instalação de grande infraestrutura de transporte aéreo próxima (*)	65 dB(A)	55 dB(A)
Zonas Sensíveis com projeto de instalação de grande infraestrutura de transporte não-aéreo próxima (*)	60 dB(A)	50 dB(A)

(*) Projeto ou exploração existente anterior à entrada em vigor do RGR – DL9/2007.

Propagação

O ruído emitido por uma fonte sonora ou um conjunto de fontes propaga-se, a partir da fonte, sobre a forma de ondas mecânicas concêntricas e de forma aproximadamente esférica. Dependendo do tipo de fonte, estas ondas poderão obter uma forma esférica (fonte pontual), cilíndrica (fonte linear) ou planar (fonte planar).

A propagação de ondas acústicas é, em geral, muito mais complexa que do que estas descrições idealizadas, sendo válidas apenas em casos específicos. No entanto, estas servem para descrever o fenómeno físico e permitem a utilização de técnicas de cálculo normalizadas (Silva, 2012).

São exemplos de fontes pontuais, o ruído emitido por um martelo pneumático ou por um veículo automóvel em funcionamento, parado. As ondas sonoras emitidas por este tipo de fonte têm a forma de esferas concêntricas e são denominadas ondas esféricas (Silva, 2012).

O ruído vai diminuindo de energia com a distância do recetor à fonte emissora sonora. Vários são os fatores que contribuem para esta atenuação da propagação do ruído. Isto é, para a dissipação de energia sonora, a saber, o efeito de divergência que depende do tipo de fonte sonora, a absorção atmosférica, as condições atmosféricas predominantes (por exemplo, direção do vento, variações de temperatura e humidade relativa do ar) e a presença de obstáculos (por exemplo, muros, edifícios, etc.) (Silva, 2012).

Quando se dá a propagação de ondas esféricas, um dado nível de pressão sonora decrescerá em 6 dB(A) cada vez que se dobra a distância entre a

fonte e o recetor. Ilustra-se esta situação na Figura 4. Ressalta-se, no entanto, que se o solo for rígido e refletivo, deverá ser feita uma compensação para as reflexões.

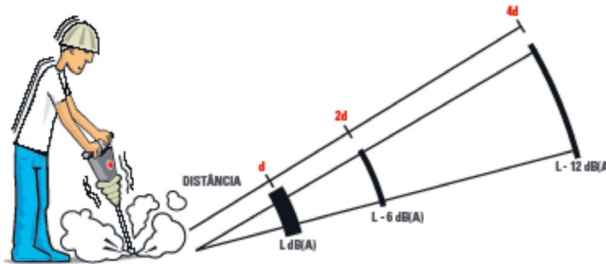


Figura 4 Propagação de uma fonte sonora do tipo pontual (www.apambiente.pt).

São exemplos de fontes lineares, o ruído de uma via de elevado tráfego rodoviário ou o ruído de uma linha férrea.

De uma forma bastante simplificada, o ruído emitido por uma fonte linear pode ser considerado como um conjunto infinito de fontes pontuais ao longo de uma linha ideal de comprimento infinito. O resultado dessa propagação aproxima-se de uma onda cilíndrica pura. Nela, a energia sonora em qualquer direção perpendicular, em relação à frente da onda, é inversamente proporcional ao aumento da circunferência do cilindro. Isto resulta numa redução de 3 dB(A) no nível sonoro relativo por dobro da distância, como é ilustrado na Figura 5 (Silva, 2007).



Figura 5 Propagação de uma fonte sonora do tipo linear (www.apambiente.pt).

São exemplos de fontes planares, o ruído emitido por uma superfície, como por exemplo, as paredes exteriores de uma nave industrial ou a entrada/saída de um túnel rodoviário.

Seguindo o raciocínio anterior, pode-se considerar que uma fonte planar é um conjunto infinito de fontes pontuais distribuídas em duas dimensões, produzindo uma superfície plana. Portanto, a propagação através de uma fonte planar aproxima-se a uma onda plana.

Na prática, as fontes lineares e planares reais não são infinitas. Por esse motivo, a uma grande distância ou para uma fonte de tamanho muito pequeno, as fontes aproximam-se por fim a uma fonte pontual ideal. Isto sugere que para estas fontes existe uma mudança gradual no comportamento em função do tamanho e distância. Se a representa o tamanho da fonte e r a distância à fonte, então quando $r \ll a$ o comportamento aproxima-se do ideal (conhecido como campo próximo). Por outro lado, quando $r \gg a$ o comportamento aproxima-se duma fonte pontual (conhecido com campo distante).

Dissipação/divergência sonora

À medida que aumenta a distância do recetor a uma fonte sonora, o ruído diminui de energia. Esta atenuação não está associada a perdas de energia sonora, mas sim a uma diminuição da densidade de energia por unidade de área da onda provocada pelo aumento da superfície da frente da onda. Este fenómeno é designado por atenuação devido à divergência. Todavia, existem outros fenómenos que podem influenciar significativamente a propagação do som, como os efeitos atmosféricos, que incluem a absorção molecular, a influência da humidade, a influência do vento e a influência da variação da temperatura, e ainda e a presença de obstáculos (como muros, edifícios, etc.) (Silva, 2007).

Absorção molecular

A absorção molecular refere-se à atenuação da intensidade sonora como resultado da passagem através de um meio, neste caso o ar. O mecanismo de absorção molecular é bastante complexo, contudo, o efeito geral pode ser considerado como o produto de três fatores: absorção clássica, relaxação rotacional e relaxação vibracional (Silva, 2007).

Ventos Predominantes

A influência do vento na propagação de ondas sonoras, sobretudo para distâncias à fonte relativamente elevadas, é um dos fatores que influencia a

propagação das ondas sonoras na atmosfera. Os ventos fazem aumentar o som na direção do vento e fazem diminuir o som na direção contrária. Este não é somente o resultado da velocidade do vento, mas também devido à deformação da onda esférica através dos ventos predominantes.

A velocidade do som depende da temperatura ambiente. Quanto maior a temperatura, maior é a velocidade do som. Isto quer dizer que quando a temperatura próxima ao solo é maior do que aquela existente no ar longe do solo, os raios sonoros tendem a formar um arco. Portanto menos energia chegará ao recetor a alguma distância ao nível do solo (para uma dada quantidade de energia sonora a área de distribuição aumenta).

À noite, quando a superfície do solo é mais fria do que o ar acima dele, ocorre o inverso (para uma dada quantidade de energia sonora a área de distribuição é reduzida). É representado na, Figura 6a, o efeito da temperatura na propagação do som emitido por uma fonte pontual. A Figura 6b apresenta a influência da humidade relativa e da temperatura do ar na atenuação do som.

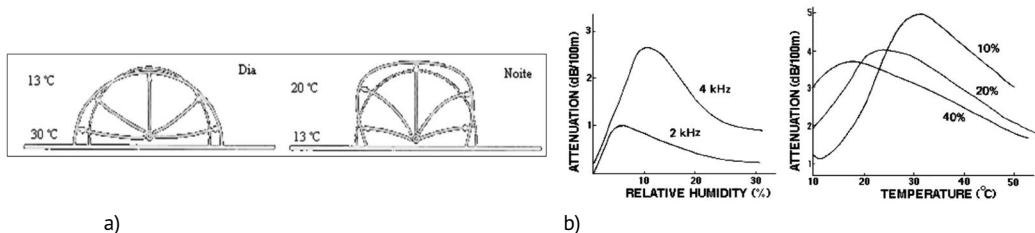


Figura 6 Influência da variação da temperatura e humidade na propagação do som (Adaptado de [5]).

Obstáculos à propagação do som

Quando o som, e em particular o ruído, atinge um obstáculo, uma parte é refletida e a restante é absorvida, dissipando-se sob a forma de calor, sendo eventualmente transmitida através do obstáculo. Quando se interpõe, por exemplo, uma barreira acústica entre a fonte sonora e o recetor, a propagação sonora é fortemente alterada e vários percursos da onda sonora se podem diferenciar, como ilustrado na Figura 7 (Silva, 2007).

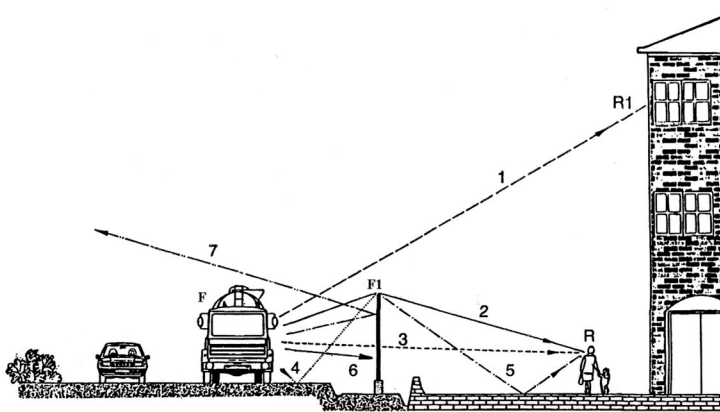


Figura 7 Propagação do ruído emitido de uma estrada na presença de uma barreira acústica (Adaptado de [5]).

Na mesma figura, podem-se ainda visualizar os vários fenómenos ocorridos durante a propagação do ruído na presença de um obstáculo, que neste caso é uma barreira acústica, a saber: a reflexão, a absorção, a transmissão e a difração (Silva, 2007).

Como resultado destes fenómenos ilustrados na Figura 7, podem-se diferenciar as várias trajetórias das ondas sonoras:

1. Onda sonora emitida diretamente da fonte F e que atinge o recetor R1
2. Onda sonora devida ao efeito de difração ocorrida nos bordos da barreira acústica que atinge o recetor R
3. Onda sonora devida ao efeito de transmissão através da barreira acústica que atinge o recetor R
4. Onda sonora refletida no solo proveniente da fonte F
5. Onda sonora refletida no solo, proveniente do efeito de difração ocorrida nos bordos da barreira acústica que atinge o recetor R
6. Onda sonora absorvida pela barreira acústica
7. Onda sonora refletida pela barreira acústica

Os edifícios e muros constituem também obstáculos à propagação do ruído proveniente, por exemplo, do tráfego rodoviário. As Figuras de a 11,

ilustram a propagação horizontal e vertical do ruído emitido por uma estrada em duas situações distintas: na presença de edifícios e em campo aberto (Silva, 2007).



Figura 8 Propagação vertical do ruído emitido por uma estrada (ao centro) ladeada por dois edifícios.

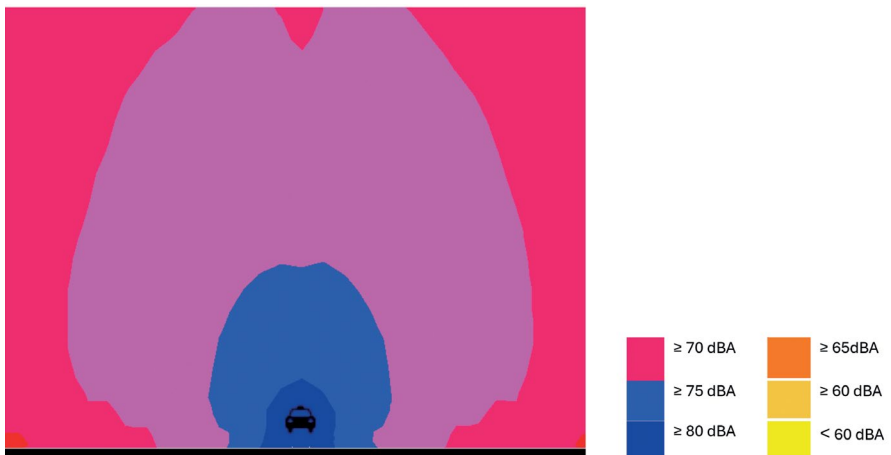


Figura 9 Propagação vertical do ruído emitido por uma estrada (ao centro) em campo aberto.

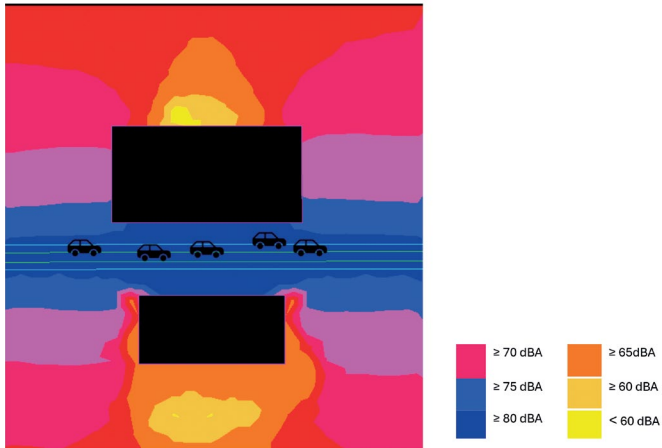


Figura 10 Propagação horizontal do ruído emitido por uma estrada ladeada por dois edifícios.

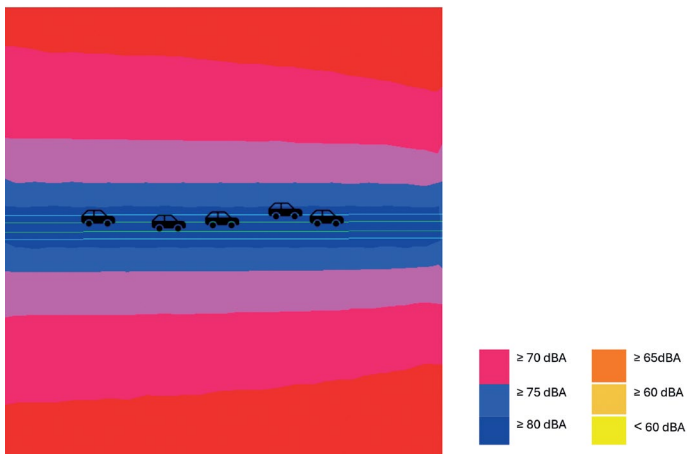


Figura 11 Propagação horizontal do ruído emitido por uma estrada em campo aberto.

Reflexão, difração e absorção

O fenômeno da reflexão consiste na mudança da direção da propagação da energia sonora através do retorno da energia incidente em direção à região de onde foi originada, após entrar em contacto com uma superfície. A reflexão pode ser especular ou difusa (Silva, 2007).

A reflexão especular ocorre quando as ondas encontram superfícies lisas, formando, com a normal, ângulos de incidência iguais aos ângulos de reflexão (lei da reflexão sonora), ou no caso de existir alguma rugosidade, esta tenha comprimento menor do que o comprimento da onda incidente.

A reflexão difusa ou difusão sonora ocorre quando as ondas encontram superfícies rugosas e o som incidente é refletido em várias direções. Esta situação ocorre, porque o comprimento de onda é menor que as dimensões das cavidades da superfície rugosa. Na prática, existe a mistura de ambos os tipos de reflexão resultando numa reflexão mista (Silva, 2007).

A difração sonora ocorre quando há o desvio das ondas sonoras por estas encontrarem um obstáculo ou uma abertura de tamanho igual ao seu comprimento de onda.

Se a largura do obstáculo for menor do que o comprimento de onda, o som continua a propagar-se, "rodeando" o obstáculo e atravessando a abertura, sem sofrer nenhuma variação. Se por outro lado, a largura for maior do que o comprimento de onda, há distorção da onda sonora. No obstáculo, forma-se uma zona de sombra atrás da superfície recetora e parte da energia sonora é refletida e absorvida (Silva, 2007).

O fenômeno da absorção ocorre quando a superfície absorve a energia das ondas sonoras incidentes na superfície transformando-a em calor. A absorção depende das propriedades do material e da frequência sonora.

2.2. Fontes de ruído ambiental

Tráfego Rodoviário

O tráfego rodoviário é a principal fonte de ruído, tanto nas zonas urbanas como nas zonas rurais, dado que a extensão da malha rodoviária existente é muito superior a qualquer outra fonte de ruído. Especificamente em termos urbanos, de acordo com a Agência Europeia de Ambiente, pelo menos 82 milhões de pessoas são afetadas anualmente por elevados níveis de ruído proveniente do tráfego rodoviário ($L_{den} \geq 55$ dB) (EEA, 2020).

Este número tende a manter-se elevado, ou até mesmo aumentar, uma vez ruído, tanto nas zonas urbanas como nas zonas rurais, a procura por mobilidade, o que geralmente se traduz num aumento do tráfego rodoviário.

Não considerando o ruído proveniente de sirenes e buzinas, o ruído de tráfego rodoviário resulta, essencialmente, da combinação do ruído gerado pelo motor e daquele gerado pelo contacto entre os pneus e o pavimento (ruído de rolamento).

O nível de ruído emitido por um veículo depende, em grande medida, da velocidade a que circula, sendo esta também determinante na proporção relativa das diferentes fontes que o compõem. A baixas velocidades, o ruído do motor domina, enquanto, à medida que a velocidade aumenta, o ruído de rolamento passa a ser dominante. A velocidade em que ocorre essa transição denomina-se velocidade de cruzamento (crossover speed).

A velocidade de cruzamento varia conforme o tipo de veículo, sendo mais elevada, quanto mais pesado for o sistema de propulsão. Quer isto dizer que veículos pesados têm uma velocidade de cruzamento mais elevada do que veículos ligeiros. Esta informação é particularmente relevante quando se pensa em medidas de mitigação, uma vez que não faz sentido introduzir um pavimento de baixo ruído numa área onde as velocidades praticadas são baixas, isto é, onde o ruído motor é dominante.

Os veículos elétricos apresentam grandes benefícios face aos veículos movidos a combustão em termos de redução da poluição atmosférica e emissão de gás carbónico. No entanto, quando o assunto é ruído, vários estudos mostram que só há benefícios em zonas onde a velocidade de circulação é baixa ou onde são frequentes os congestionamentos, isto é, o trânsito pára-arranca. Entre os 10-25 km/h o ruído da propulsão é dominante, e os motores elétricos são muito mais silenciosos (e mais leves) que os seus homólogos convencionais. A partir dos 25-30 km/h, o ruído gerado pela interação entre os pneus e o pavimento da via torna-se predominante e este ruído não difere entre os sistemas, tornando a redução de ruído praticamente impercetível (EEA, 2018).

A legislação em vigor exige que sejam produzidos e publicados Mapas Estratégicos de Ruído para as grandes infraestruturas de transporte rodoviárias (GITr), isto é, para rodovias cuja utilização exceda 3 milhões de passagens ao ano e para as rodovias situadas em aglomerações (municípios com mais de 100 mil habitantes e densidade populacional igual ou superior a 2500 habitantes por quilómetro quadrado). As entidades responsáveis pela

elaboração desses mapas são as entidades gestoras das GTr e os municípios (no caso das aglomerações). Os Mapas Estratégicos de Ruído e os seus respetivos relatórios podem ser consultados no site da Agência Portuguesa do Ambiente (www.apambiente.pt).

As estratégias para controlo e mitigação do ruído serão abordadas no Capítulo 6.

Tráfego Ferroviário

O transporte ferroviário é amplamente reconhecido como um dos modos de transporte mais sustentáveis, devido às reduzidas emissões de poluentes atmosféricos e ao baixo consumo energético. No entanto, a poluição sonora causada por este tipo de transporte é uma das mais frequentes queixas da população que reside próximo às linhas férreas (EEA, 2020).

A perspetiva de aumento no número de pessoas e mercadorias transportadas através das ferrovias, bem como da malha ferroviária, em função da necessidade de se reduzir as emissões de carbono, tornam o ruído ferroviário um tema bastante relevante.

Apesar dos avanços recentes em termos de legislação, que levaram à modernização de uma parte da frota de transporte ferroviário de mercadorias, estima-se que, na União Europeia, pelo menos 22 milhões de pessoas ainda sejam afetadas por elevados níveis de ruído provenientes do tráfego ferroviário, o qual se configura como a segunda maior fonte de poluição sonora (EEA, 2020). Importa salientar que, ao contrário do tráfego rodoviário, os limites de ruído aplicáveis às fontes ferroviárias só começaram a ser implementadas no início do século XXI.

Como referido, o tráfego ferroviário é igualmente uma fonte de ruído suscetível de gerar elevados níveis de incomodidade junto da população exposta, seja ao nível das ferrovias urbanas, suburbanas ou interurbanas. O ruído emitido pelo tráfego ferroviário depende da velocidade do comboio e tem origem, em condições normais, a partir de três fontes: (1) predominância do ruído devido à propulsão ou ruído de máquinas (regime I: observa-se quando o comboio se encontra a baixas velocidades, até 100 km/h); (2) predominância do ruído mecânico resultante de interações roda-carril (regime II: observa-se para velocidades intermédias entre 100 e 270 km/h); e (3) predominância do ruído aerodinâmico resultante do fluxo de ar que passa pelo comboio, incluindo o pantógrafo (regime III: para comboios de alta velocidade, acima de 270 km/h, podendo atingir até 350 km/h) (Hanson et al., 2012; Ribeiro, 2009). O ruído ferroviário apresenta especificidades

que o distinguem do ruído rodoviário, sendo nomeadamente de correção particularmente difícil para velocidades elevadas. Note-se que o ruído aerodinâmico, muito em especial o gerado pelos pantógrafos a velocidades elevadas, não pode ser eficazmente prevenido pelas barreiras standard de altura padrão, em alguns casos já existentes no terreno. Comparativamente à rede rodoviária, a experiência na utilização de barreiras acústicas, neste caso, é significativamente inferior, sendo também significativamente menos numerosos os estudos produzidos neste domínio, muito em particular no caso de velocidades elevadas.

Paralelamente, ressurge um pouco por toda a Europa uma renovada aposta no transporte ferroviário em detrimento do rodoviário, por razões que se prendem principalmente com o ambiente, mas também económicas, dado o menor consumo de energia e conseqüente redução do nível de emissões de CO₂, com a sua eficácia, menor ocupação de espaço urbano, e com o menor custo do transporte para mercadorias. Tal é patente a nível europeu na meta preconizada pelo Shift2Rail (parceria entre a UE e a indústria ferroviária no âmbito do programa Horizonte 2020) de dobrar a capacidade dos caminhos de ferro na Europa num futuro próximo (Vos, 2016; Europe's Rail, 2019), ou em Portugal na Estratégia da Rede Ferroviária Nacional (RFN) 2014-2050 (Infraestruturas de Portugal, n.d.).

Em termos de legislação, a Diretiva Ruído Ambiente (2002/49/CE) e respetivas atualizações de 2015 e 2020, não estabelece valores limite, mas exige que os Estados Membros da União Europeia produzam Mapas de Ruído Ambiente para ferrovias cuja utilização exceda 30 000 passagens de comboios ao ano ou que estejam localizadas em aglomerados urbanos com mais de 250 000 habitantes, e adotem planos de ação para mitigar e prevenir o ruído excessivo nas áreas onde for identificada sobre-exposição relevante. Algumas legislações voltadas para a redução do ruído na fonte foram aprovadas mais recentemente, nomeadamente as especificações técnicas de ruído para interoperabilidade relativa ao ruído do material circulante (Regulamento n.º 1304/2014 da Comissão, de 26 de novembro de 2014 e sua subsequente alteração n.º 774/2019), que estabelecem limites de ruído para veículos ferroviários novos, para além dos vagões renovados ou adaptados, e obrigam os operadores a adaptar a maioria dos vagões existentes com travões silenciosos antes do final de 2024 [1].

Muitas vezes considerados mais incomodativos que o próprio ruído das composições em movimento, o ruído de fontes estacionárias proveniente de atividades em pátios de manobras e das estações ferroviárias é considerado ruído de atividade industrial.

Tráfego Aéreo

Apesar do número de pessoas expostas ao ruído proveniente do tráfego aéreo ser muito inferior ao da população afetada pelo ruído do tráfego rodoviário e ferroviário, este tipo de ruído é percebido como significativamente mais incomodativo. Trata-se, aliás, de um dos principais motivos de contestação por parte das comunidades que residem nas imediações dos aeroportos, quer face à sua expansão, quer à sua instalação.

Ao contrário do ruído proveniente de uma rodovia com intenso tráfego rodoviário, o ruído proveniente do tráfego aéreo caracteriza-se pela sua intermitência, alternando períodos de intenso nível sonoro com intervalos de relativa tranquilidade.

Os avanços tecnológicos na aviação nas últimas décadas proporcionaram uma redução de cerca de 30% no ruído gerado pelas aeronaves. No entanto, mundialmente observa-se um aumento no ruído proveniente do tráfego aéreo em função do aumento no número de voos realizados.

A fonte do ruído varia de acordo com o tipo de operação/movimentação. Durante a decolagem, o ruído gerado provém predominantemente dos motores das aeronaves, enquanto na aterragem o ruído aerodinâmico gerado pelas engrenagens dos flaps e do trem de aterragem é mais proeminente que o ruído dos motores (Basner, et al., 2017).

Em conformidade com a “abordagem equilibrada” criada pela Organização da Aviação Civil Internacional, desde 2016, a União Europeia definiu um conjunto de regras relativas à gestão do ruído nos aeroportos com mais de 50 000 movimentos anuais de aeronaves civis. Esta abordagem inclui quatro elementos principais, que visam identificar a forma mais eficaz e economicamente sustentável de mitigar o ruído aeronáutico em cada aeroporto. Esses elementos são (1) reduzir os níveis de ruído na fonte através da utilização de aeronaves tecnologicamente mais modernas e silenciosas; (2) gerir de forma sustentável os terrenos circundantes, assegurando usos do solo compatíveis com a exposição ao ruído; (3) a adoção de procedimentos operacionais otimizados, destinados a reduzir o impacto do ruído a nível do solo; e, se necessário, (4) implementação de restrições operacionais, como a limitação ou proibição de voos noturnos (Parlamento Europeu, 2021).

No caso de escolas e residências na proximidade de aeroportos, é importante que também haja uma mitigação diretamente no recetor, visando garantir que não haja impacto na capacidade de memorização e aprendizagem dos estudantes, nem os efeitos nocivos nem outros efeitos na saúde dos habitantes dos arredores do aeroporto.

Relativamente ao ruído gerado no solo, que incluem a movimentação de aeronaves, testes de motores e movimentação de máquinas e veículos que operam dentro do aeroporto, há algum debate sobre estes serem considerados ruído de tráfego ou ruído industrial. Como a legislação da Diretiva Ruído Ambiente não é específica sobre esse assunto, a decisão cabe ao Estado-Membro ou à autoridade nacional competente. Sendo considerado ruído de fonte industrial, como tem sido habitual nas melhores práticas, o mesmo deverá fazer parte do mapeamento estratégico local (EEA, 2020).

Tráfego Marítimo e em Vias de Navegação Interior

A maioria dos estudos relativos a ruído de tráfego marítimo tem, como foco, o impacto do ruído dos navios que se propaga através da água e afeta a fauna marinha, em particular os mamíferos aquáticos, que dependem dos sons para se comunicar, caçar, orientar-se e definir rotas migratórias.

No entanto, o ruído aéreo proveniente deste tráfego também constitui uma fonte relevante de preocupação. Nas áreas costeiras e ribeirinhas, especialmente em zonas urbanas adjacentes, o ruído gerado pelas embarcações durante o período de navegação ou quando estão atracadas no cais, pode afetar significativamente a qualidade de vida das populações locais (Figura 12).

Tal ocorre porque os motores a diesel necessitam de permanecer em funcionamento para garantir o fornecimento de energia elétrica a bordo, transformando-se assim em fontes simultâneas de poluição sonora e poluição atmosférica. Apesar de ser possível efetuar a ligação das embarcações a uma fonte de eletricidade em terra (*on-shore power supply*), esta solução nem sempre é tecnicamente disponível ou economicamente viável.



Figura 12 Porto de Livorno, Itália, é um exemplo de área portuária próxima de uma zona residencial. Fonte: van Breemen et al., 2008.

No que concerne ao tráfego em vias de navegação interior (como rios, canais e lagos), poucos são os estudos existentes e vários autores consideram que o ruído proveniente dessas atividades é irrelevante por ocorrer em áreas pouco povoadas e com baixo fluxo de embarcações (Hofbauer & Putz, 2020).

No entanto, esta não é a realidade em determinados países como a China, onde as vias de navegação interior superam os 127 mil km e atravessam zonas urbanas, como apresentado na Figura 13. A perspectiva de aumento no número de embarcações e a preocupação com o impacto do ruído na saúde da população, têm propiciado estudos recentes que visam desenvolver um modelo de medição de ruído apropriado para este tipo de tráfego (Dai et al., 2020).

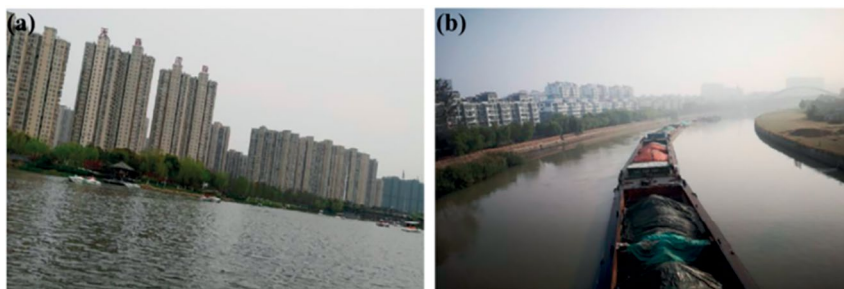


Figura 13 Embarcações leves (a) e de transporte de carga (b) navegação em vias interiores dentro de zonas urbanas. Fonte: [16].

A nível europeu, esta também poderá ser uma realidade não muito distante, pois conforme ressalta Hofbauer (Hofbauer & Putz, 2020), o Acordo Verde Europeu considera a navegação interior como uma das alternativas de transporte ecológico e seguro no combate às alterações climáticas. Presupõe-se que haverá uma maior utilização deste modo de transporte nos próximos anos, sendo por isso necessário comprovar se este tipo de fonte de ruído pode ou não ser negligenciado.

Fontes de ruído industrial e de construção

O ruído industrial abrange todo o ruído em ambiente exterior que seja proveniente de atividades industriais (incluindo estaleiros de construção civil, aterros, mineração e turbinas eólicas), ou proveniente das atividades e movimentações terrestres de equipamentos e veículos realizada em portos, aeroportos, pátios de manobra e estações ferroviárias.

Fazer uma estimativa global deste tipo de ruído é bastante mais complexo do que estimar o ruído proveniente de meios de transporte, dada a variedade e as especificidades de cada atividade industrial. No ruído industrial é comum haver características como intermitência, tonalidade, impulsividade e ruído de baixa frequência, as quais são particularmente incomodativas para a população (Murphy & King, 2014; Silva et al., 2021). Deste modo, conforme previsto na Diretiva Ruído Ambiente (END), sempre que haja fontes de ruído industrial, as mesmas devem ser incluídas nos Mapas Estratégicos de Ruído das cidades, visando identificar e, se necessário, mitigar o impacto do ruído excessivo gerado nas comunidades locais urbanas.

Apesar disso, os Mapas Estratégicos de Ruído podem não ser a melhor abordagem ao problema, dado que, por serem avaliações de longo prazo, existe o risco de mascararem ou não considerarem o impacto gerado por ruído proveniente de atividades sazonais ou de curta duração, como por exemplo os estaleiros de construção civil e as atividades em pátios de manobra.

Na Europa, apesar de ser uma das principais fontes de ruído ambiental, o ruído industrial não é das fontes mais relevantes quando se considera apenas a exposição em áreas urbanas. Anualmente, estima-se que cerca de 800 mil pessoas de zonas urbanas europeias sejam afetadas por ruído industrial acima dos limites definidos pela END ($L_{den} \geq 55$ dB e $L_n \geq 50$ dB), o que corresponde a cerca de 0,2% da população urbana total.

A partir dos dados existentes, observa-se que, de entre a população urbana europeia excessivamente exposta ao ruído industrial, há uma significativa variação, quer da proporção de população exposta, quer do nível de exposição. Há cidades como Jerez de la Frontera, em Espanha, onde 18% da população está exposta a ruído industrial excessivo e outras como Innsbruck, na Áustria, onde, apesar da presença de ruído industrial, o mesmo se encontra dentro dos limites legalmente definidos. De forma similar, observa-se que, se por um lado, Roménia, Letónia, Estónia e Chipre são os países com maior percentagem de população exposta a ruído industrial excessivo, por outro lado, o Reino Unido apresenta uma maior incidência de exposição L_{den} acima dos 70 dB, ou seja, apesar de ser uma percentagem menor de pessoas, o dano gerado nesse grupo tende a ser bastante mais grave (EEA, 2020).

De notar que os valores de ruído de fonte industrial em zona urbana na UE poderão estar subestimados. A END só obriga à realização de mapas estratégicos de ruído em aglomerações urbanas, deixando a cargo de cada país membro da UE, delimitar e definir as suas aglomerações urbanas. Adicionalmente, a forma de avaliar esse ruído varia bastante de país para país.

Enquanto alguns países utilizam dados detalhados, outros simplesmente assumem a partir da licença de operação das indústrias que não há ruído ambiente excessivo, sem, no entanto, o medir.

Outro ponto a ressaltar é que, por questões de ordenamento de território, custo do terreno ou mesmo estratégias logísticas, muitas zonas industriais, portos e aeroportos estão situados nas zonas limítrofes das cidades, ou mesmo nos seus arredores, onde há menos urbanização. Tendo em conta a tendência mundial de crescimento das cidades e sua consequente expansão, é expectável que, num futuro próximo, zonas industriais e zonas não urbanas que atualmente possuem ruído industrial acima do desejado, passem a ter mais residentes e a fazer parte das aglomerações urbanas, ou de conurbações, aumentando assim o número de habitantes expostos a ruído em zonas urbanas.

Fontes de ruído de entretenimento e lazer

Conforme abordado no início deste capítulo, a Diretiva Ruído Ambiente do Parlamento Europeu (2002/49/CE), não considera ser ruído ambiente aquele proveniente de atividades recreativas ou de vizinhança. No entanto, um fenómeno denominado “botellón” (em espanhol, garrafa grande), tem gerado grande incomodidade em residentes das zonas urbanas com elevada vida noturna e tendo-se tornado numa situação de difícil resolução para autarquias de diversas cidades espanholas e de grandes cidades portuguesas, como Porto e Lisboa.

Diferentemente dos estabelecimentos de diversão noturna, onde o ruído produzido está confinado a um local com acústica apropriada para não perturbar o sono da vizinhança, o “botellón” é um evento que ocorre de forma espontânea, onde jovens se juntam para consumir bebidas alcoólicas e ouvir música em vias públicas ao longo da noite e madrugada, sem terem em conta que estas são também zonas com habitações. Frequentemente estas “festas ao ar livre” incluem excesso de bebida, discussões, associadas, por vezes, ao consumo de estupefacientes e vandalismo.

A origem desta tendência está em Espanha, nos anos 80, onde jovens sem dinheiro para entrar em discotecas se reuniam em vias públicas próximas, tornando a rua um espaço de diversão noturna. Este fenómeno chegou a Portugal na última década e veio a intensificar-se com a mudança de hábitos ocorrida durante a pandemia de COVID-19.

A música, muitas vezes reproduzida em colunas de som portáteis de grande potência, aliadas ao facto de a lei portuguesa permitir o consumo e transporte de álcool em vias publicas (mesmo em quantidade) a maiores de 18 anos, dificulta qualquer tipo de inibição por parte das autoridades locais.

Além dos prejuízos à saúde dos moradores, esse tipo de ruído causa também impacto na produtividade laboral e na capacidade de aprendizagem dos estudantes, uma vez que o período de descanso é afetado. Há ainda a considerar impactos económicos nos preços da habitação, já que a zona se torna pouco atrativa para novos residentes.

Em Espanha, na falta de uma lei nacional e visando dificultar a ocorrência dos “botellónes”, pelo menos 10 comunidades autónomas implementaram normas locais que proíbem ou limitam os horários para o consumo e venda de bebidas alcoólicas em ruas, parques e praças, exceto em dias festivos pré-determinados.

Já em Portugal, desde 2015, a cidade do Porto implementou o plano MOVIDA, concebida com o objetivo de equilibrar as necessidades de descanso dos residentes (menos ruído noturno) e a dinâmica turística e cultural associada à vida noturna portuense (Figura 14).



Figura 14 Rua da Galeria Paris, Porto. © André Rolo/Global Imagens

Após um período inicial de ajustamentos, o projeto assumiu a configuração atual, que define três zonas de intervenção nas áreas de maior conflito acústico durante a noite: “zona núcleo”, onde se concentra a atividade noturna e se aplicam medidas de mitigação específicas; “zona protegida”,

com regras intermédias de funcionamento; e “zona de contenção”, onde a presença residencial é mais expressiva e, por isso, as restrições horárias são mais rigorosas. Quanto maior for a concentração de moradores, maior a restrição horária na zona.

Adicionalmente, a cidade do Porto desenvolveu o projeto de certificação “Quality In”, inspirado em diretrizes europeias, mas com flexibilidade para ser adaptado às especificidades de cada território. Este modelo, já implementado em cidades como Bruxelas, Barcelona, Paris e Berlim, visa promover uma cultura de responsabilidade partilha entre estabelecimentos, autoridade e comunidade.

No Porto, é denominado “Safe In Porto” e tem como objetivo reconhecer e valorizar os espaços de diversão noturna comprometidos com a segurança e saúde dos seus frequentadores, bem como com a minimização dos impactos negativos sobre os residentes e vida comunitária (Figura 15).



Figura 15 Estabelecimento comercial com certificação SafeIn. Fonte: <https://www.porto.pt/pt>

No entanto, como a proibição do consumo de bebidas alcoólicas na via pública não é uma competência das autarquias, mas do governo central, os municípios não podem adotar, de forma unilateral, medidas que restrinjam o consumo ou o porte de bebidas alcoólicas nos espaços públicos.

Deste modo, embora iniciativas como o projeto MOVIDA contribuam para uma melhor relação entre os interesses dos estabelecimentos de diversão noturna e bem-estar dos residentes, estas apresentam limitações significativas no que respeita ao controlo do ruído associado ao fenómeno “botelón”, que permanece uma das principais fontes de perturbação sonora nas zonas de maior concentração de lazer noturno.

2.3. Caracterização e modelação do ruído ambiental urbano

O ruído ambiente proveniente do meio urbano, qualquer que seja o local, não é estacionário, apresentando variações no tempo que se revelam no sinal produzido através de quebras e picos. Quando se pretende, por exemplo, caracterizar o ruído produzido pelo tráfego rodoviário, dado o seu ruído ser variável, uma simples medição pontual do seu valor não é suficiente. Será necessário recorrer ao cálculo duma média energética, obtida após um tempo de medição representativo, bem como a indicadores que possam revelar os picos máximos e mínimos ocorridos durante o período de medição.

Na avaliação do ruído ambiente são, em geral, utilizados determinados descritores de ruído que caracterizam o ambiente acústico exterior. São eles (1) os indicadores médios, através do nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}), (2) os indicadores máximo e mínimo através do nível de pressão sonora máxima (L_{max}) e do nível de pressão sonora mínimo (L_{min}) no período de medição e, por fim, (3) os indicadores estatísticos ou níveis percentis através, por exemplo, do nível de pressão sonora que foi excedido durante 5% do tempo de medição (L_5), do nível de pressão sonora que foi excedido durante 50% do tempo de medição (L_{50}) e do nível de pressão sonora que foi excedido durante 95% do tempo de medição (L_{95}). Este último habitualmente utilizado para caracterizar o ruído de fundo (Silva, 2009).

O equipamento utilizado na caracterização do ruído ambiente é o sonómetro (Figuras 16 e 17).



Figura 16 Sonómetro.



Figura 17 Sonómetro fixo no tripé.

Fazem parte do sonómetro vários módulos com funções diversas. O microfone converte a variação da pressão que lhe chega num sinal elétrico. Este sinal é depois amplificado no pré-amplificador, é filtrado pelos filtros de ponderação (filtros A, B ou outros) e segue para o detetor. Este último e importante módulo permite ao sonómetro efetuar a leitura do som mediante o modo de leitura escolhido, podendo o tipo de leitura ser feito em intervalos de tempo diferentes. O Regulamento Geral do Ruído e a norma portuguesa NPISO1996 define o modo “fast” para caracterizar o ruído ambiente (Silva, 2007).

Atualmente, os sonómetros são integradores, isto é, possuem um módulo integrador que permitem determinar o nível de ruído equivalente, ou seja, o valor da energia sonora acumulada durante todo o período de medição, possibilitando, assim, o cálculo dos Leq_t , Leq_{den} e Leq_n medidos no período de medição (Silva, 2007).

Durante uma medição acústica em ambiente exterior, é fundamental ter alguns cuidados básicos como: a utilização de um tripé de suporte do sonómetro para garantir estabilidade durante as medições, bem como a altura (distância do solo) adequada do equipamento; um protetor de vento no microfone para evitar sinais espúrios de baixa frequência devidos ao vento; adequadas condições atmosféricas (ausência de chuva e vento com velocidade inferior a 5m/s); e adequado afastamento de superfícies refletoras e absorventes.

De um ponto de vista técnico, os métodos de previsão de ruído são melhores para determinar de forma contínua no espaço os níveis sonoros numa cidade. Diferentemente dos resultados oriundos de medições, os quais nos dão somente uma informação de um ponto específico sobre uma situação limitada em concreto, isto é, as condições específicas em que aquelas medições são feitas, os modelos de previsão do ruído permitem simular cenários hipotéticos. Por exemplo, o efeito gerado pela mudança no volume de tráfego de uma via, a alteração do tipo de pavimento, ou, ainda, verificar o efeito do ruído em diferentes pontos do terreno, ou seja, avaliar a forma como diferentes recetores são afetados.

Os modelos de previsão recorrem a um conjunto de parâmetros que trazem as diversas variáveis envolvidas no fenómeno acústico, nomeadamente: as características das fontes de ruído, as condições topográficas, a localização dos pontos recetores, as atenuações devidas ao ar e ao solo, a presença de obstáculos entre a fonte e o recetor, entre outros fatores.

Contudo, para garantir precisão e robustez nos resultados, estes modelos devem ser calibrados com base em medições reais, assegurando que as previsões reproduzem com rigor as condições acústicas observadas no terreno.

No âmbito do Regulamento Geral de Ruído, integrado no Plano Diretor Municipal, os municípios portugueses são obrigados a caracterizar o ambiente sonoro do seu território através da elaboração de um Mapa Municipal de Ruído (MMR).

Este mapa resulta do somatório dos contributos das diversas fontes de ruído existentes no município e constitui uma ferramenta essencial de planeamento e gestão territorial.

Estes mapas podem ser facilmente consultados no website da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) ou nas páginas oficiais das câmaras municipais. Um exemplo de excerto de mapa de ruído é apresentado na Figura 18.

Os mapas de ruído são as ferramentas estratégicas mais utilizadas para avaliar a situação acústica dos ambientes urbanos. Permitem visualizar o estado acústico de cada zona do município e a influência das fontes de ruído de tráfego e industrial. A partir destes mapas são elaborados os Mapas de Conflito Acústico, onde é possível identificar os locais onde o ruído está acima dos limites legais (zonas de conflito acústico). A Figura 19 apresenta um excerto dum mapa de conflito acústico.

Quando as zonas sensíveis ou mistas estão em situação de conflito acústico, de acordo com o Regulamento Geral de Ruído, torna-se necessário criar Planos de Redução de Ruído, cuja elaboração é da responsabilidade das Câmaras Municipais.

Para municípios com população superior a 100 mil habitantes e densidade populacional igual ou superior a 2500 habitantes por quilómetro quadrado, é obrigatório ainda a elaboração de Mapas Estratégicos de Ruído (MER). Além das informações contidas nos Mapas Municipais de Ruído, os MER incluem estimativas da população exposta em cada uma das classes de ruído, por cada uma das fontes sonoras.

Da mesma forma, é obrigatório a elaboração de mapas estratégicos de ruído para as Grandes Infraestruturas de Transporte (GIT) rodoviárias, ferroviárias e aéreas que excedam determinado limiar de tráfego. No caso dos MER de GIT, apenas é contabilizado o ruído produzido por essa infraestrutura.

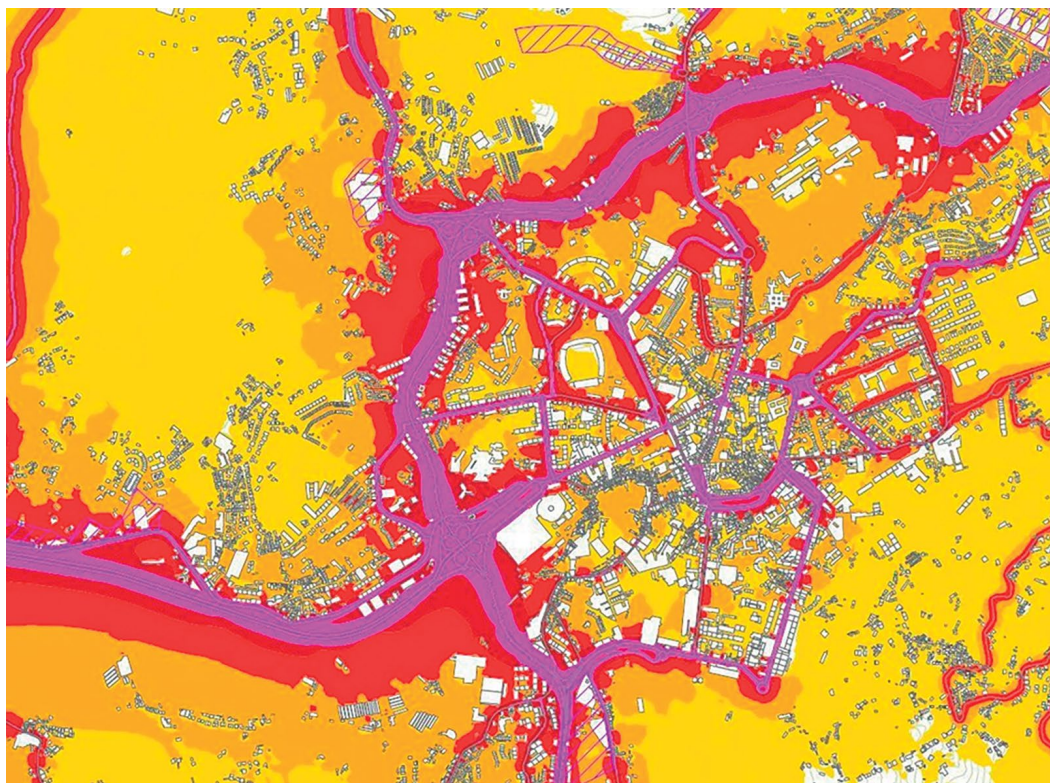


Figura 18 Excerto do Mapa de Ruído diurno (L_{den}) de zona central do município e Guimarães (Publicado em: www.cm-guimaraes.pt. Elaboração própria).

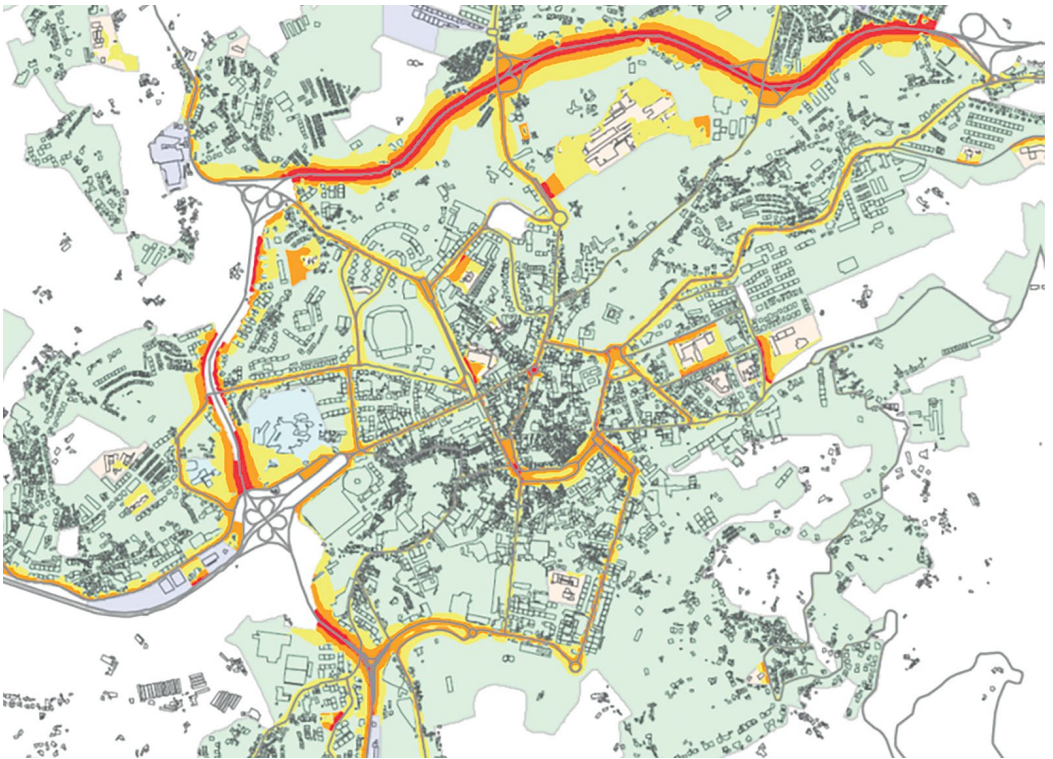


Figura 19 Excerto do Mapa de Conflito Acústico diurno (L_{den}) de zona central do município e Guimarães (Publicado em: www.cm-guimaraes.pt. Elaboração própria).

3. Poluição atmosférica urbana

A poluição atmosférica urbana tornou-se um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida das populações. Constitui um problema que tende a agravar-se devido, sobretudo, ao desenvolvimento desequilibrado dos espaços urbanos e ao aumento significativo da mobilidade, fatores que se refletem num acentuado incremento do tráfego rodoviário e, consequentemente, nas emissões de poluentes para a atmosfera.

Os poluentes atmosféricos são emitidos a partir de fontes existentes e, subsequentemente, transformados, transportados, dispersados na atmosfera atingindo, finalmente, os vários recetores por deposição gravítica húmida (queda de chuva ou neve) ou deposição gravítica seca (através da adsorção de partículas e posterior sedimentação). Em meio urbano, as fontes poluidoras antropogénicas típicas são principalmente o tráfego automóvel e quando existente a atividade industrial.

Os compostos libertados para a atmosfera provenientes da exaustão de gases dos veículos automóveis originam uma variedade de impactos ambientais a diferentes escalas geográficas e temporais. Determinados compostos possuem um efeito imediato e localizado. Por exemplo, uma pluma de fumo negro é instantaneamente desagradável para quem a observa, enquanto a uma escala de tempo longa, repetidas exposições aos fumos de exaustão dos veículos podem causar, por deposição de partículas na superfície dos edifícios, o escurecimento das suas fachadas.

A combustão dos hidrocarbonetos presentes no combustível tem como principal produto da reação o dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Contudo, a combustão nem sempre é totalmente eficiente, isto é, parte do combustível não é queimado ou então é parcialmente queimado. Neste processo, o produto da combustão é mais complexo, podendo ser constituído por hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos (COV), monóxido de carbono (CO) e partículas que contêm carbono e outros contaminantes. Por outro lado, as condições de combustão, altas pressões e temperaturas, originam uma oxidação de parte do azoto presente no ar e no combustível formando-se óxidos de azoto (principalmente na forma de NO e algum NO_2) convencionalmente designados por NO_x (Silva & Mendes, 2012).

Muitos dos poluentes emitidos dos veículos automóveis reagem com os componentes do ar ou entre eles e formam os denominados poluentes secundários.

Devido ao efeito de dispersão ocorrido durante o tempo de reação, a concentração dos poluentes secundários normalmente não atinge valores máximos junto à fonte. O seu impacto pode, no entanto, estender-se a grandes áreas não confinadas ao local das vias (Silva & Mendes, 2012).

A Figura 20 ilustra as interações entre poluentes no ar e o seu potencial impacto no clima, nos ecossistemas e na saúde humana.

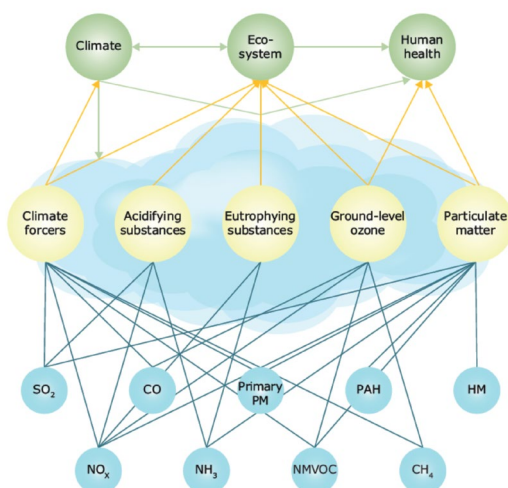


Figura 20 Interação entre poluentes atmosféricos e o seu potencial impacto (Adaptado de EEA, 2022).

A presença de poluentes atmosféricos no ar não se deve, como já referido, exclusivamente às emissões dos veículos automóveis, mas, também, a outras fontes significativas, tais como as atividades industriais, a atividade agrícola e diversas fontes difusas domésticas, entre as quais se destaca a combustão de biomassa lenhosa utilizada para aquecimento doméstico.

Como regra geral, uma redução no número de viagens tem uma influência diretamente proporcional na diminuição das emissões de poluentes. No entanto, essa redução pode também influenciar a velocidade média do tráfego, já que a menor intensidade de circulação tende a melhorar as condições de fluidez e a reduzir os congestionamentos, os quais estão normalmente associados a velocidades muito baixas, precisamente aquelas que geram maiores emissões por unidade de distância percorrida.

A Figura 21 exemplifica esta relação, apresentando o efeito da velocidade média nas emissões por unidade de distância percorrida de um veículo a diesel.

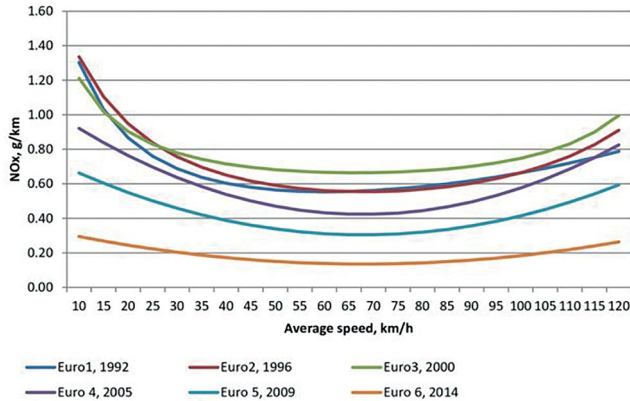


Figura 21 Emissões de NO_x médias vs. velocidade praticada por veículos construídos de acordo com o Euro 1 - Euro 6 (Adaptado de National Atmospheric Emissions Inventory, 2013).

De um modo geral, enquanto o aumento da velocidade média em condições de congestionamento reduz as emissões, no caso de tráfego livre (sem paragens e acelerações frequentes devido a congestionamentos), a redução da velocidade também faz com que as emissões diminuam.

3.1. Conceitos básicos da poluição atmosférica

Aerossóis: partículas sólidas ou líquidas em suspensão num meio gasoso com dimensões inferiores a $100 \mu\text{m}$, mas tamanhos superiores aos das moléculas individualizadas, com uma velocidade de deposição por gravidade negligenciável.

Diâmetro aerodinâmico equivalente: diâmetro de uma partícula esférica que tem um comportamento idêntico sob o ponto de vista geométrico, ótico, elétrico ou aerodinâmico ao da partícula estudada.

PM_{10} : fração do aerossol atmosférico constituído por um conjunto de partículas sólidas ou líquidas com um diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a $10 \mu\text{m}$, frequentemente classificadas como partículas respiráveis ou fração respirável.

$\text{PM}_{2,5}$: fração do aerossol atmosférico constituído por um conjunto de partículas sólidas ou líquidas com um diâmetro aerodinâmico equivalente inferior

a 2,5 μm , frequentemente classificadas como partículas inaláveis ou fração inalável.

PM₁: fração do aerossol atmosférico constituído por um conjunto de partículas sólidas ou líquidas com um diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 1 μm , frequentemente classificadas como aerossóis.

Poluentes atmosféricos: substâncias ou energia que exerçam uma ação nociva suscetível de pôr em risco a saúde humana, de causar danos aos recursos biológicos e aos ecossistemas, de deteriorar os bens materiais e de ameaçar ou prejudicar o valor recreativo ou outras utilizações legítimas do ambiente.

Poluentes atmosféricos antropogénicos: poluentes emitidos para a atmosfera em consequência direta ou indireta de qualquer atividade humana.

Poluentes atmosféricos primários: poluentes emitidos para a atmosfera em consequência direta de qualquer atividade humana ou natural.

Poluentes atmosféricos secundários: poluentes atmosféricos formados na atmosfera consequência de reações entre poluentes primários ou entre poluentes primários e constituintes naturais da atmosfera.

Valor limite da qualidade do ar: concentração máxima no meio recetor para um determinado poluente atmosférico, cujo valor não pode ser excedido durante períodos previamente determinados e nas condições especificadas em diploma legal, com vista à proteção da saúde humana e preservação do ambiente.

Vento calmo: classe de ventos com velocidade inferior a 0,55 m/s.

3.2. Principais poluentes urbanos, fontes e impacto na saúde e ambiente

3.2.1. Óxidos de azoto (NO_x)

Óxidos de Azoto (NO_x) é um termo genérico dado a um grupo de gases altamente reativos, os quais contêm diferentes conteúdos de Oxigénio e Azoto. Muitos dos óxidos de azoto são incolores e inodoros, no entanto, o dióxido de azoto (NO_2) em presença de partículas pode ser visualizado na atmosfera como uma camada de tonalidade vermelho-acastanhada, por vezes, presente sobre áreas urbanas (Silva & Mendes, 2012).

O setor de transporte rodoviário é amplamente responsável pelas emissões de NO_x . Em 2020, o confinamento da população decorrente da COVID-19 resultou em decréscimos significativos nos fluxos de tráfego rodoviário, o que trouxe uma redução das concentrações médias de NO_x nos centros das cidades.

A Figura 22 apresenta a variação da concentração média de dióxido de azoto (NO_2) na cidade do Porto entre 2019 e 2022. Durante o período de confinamento associado à pandemia de COVID-19 (2020–2021), observou-se um acentuado decréscimo nas concentrações médias deste poluente, reflexo da redução significativa do tráfego rodoviário e da diminuição geral da atividade urbana.

Após o levantamento das restrições e a retoma gradual da mobilidade, verificou-se uma recuperação dos valores de NO_2 , acompanhando o aumento dos fluxos de tráfego e o retorno à normalidade das atividades urbanas.

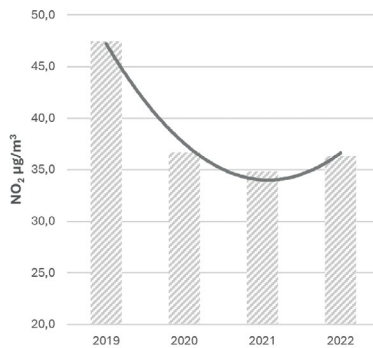
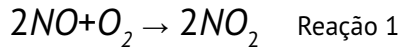


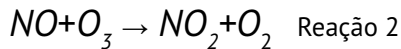
Figura 22 Concentração média de NO_2 na cidade do Porto no período 2019-2022 (Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Associação Porto Digital – CMP).

Emissão dos óxidos de azoto

Os óxidos de azoto são normalmente emitidos para a atmosfera em resultado de processos de combustão a elevada temperatura, tais como os associados à queima de carvão, fuel e combustíveis automóveis. Os gases de exaustão destes processos contêm NO_x , maioritariamente, na forma de NO. Uma vez na atmosfera, o poluente reage com o oxigénio e é lentamente oxidado a NO_2 (Reação 1).



Por outro lado, o ozono e outros oxidantes atmosféricos convertem rapidamente o NO em NO₂ (Reação 2), fazendo com que o tempo médio de vida do NO no ar seja muito curto.



As principais fontes emissoras antropogénicas de NO_x são os motores de veículos automóveis (55%) e os equipamentos elétricos (22%), em paralelo com fontes industriais/comerciais/residenciais.

Impacto na saúde e no ambiente

Devido aos vários compostos e derivados da família dos óxidos de azoto, nomeadamente o dióxido de azoto, ácido nítrico, óxido nítrico, nitratos e óxido nítrico, os NO_x causam uma vasta variedade de impactos na saúde e no ambiente.

O NO_x reage com a amónia, humidade do ar e outros compostos presentes na atmosfera para formar ácido nítrico. O impacto na saúde são nomeadamente efeitos na função respiratória, danos nos tecidos pulmonares e morte prematura. As partículas de menor diâmetro conseguem penetrar no trato inferior do sistema respiratório e podem causar enfisema e bronquite, podendo, ainda, agravar doenças de coração.

O Smog é formado através de um conjunto complexo de reações entre os óxidos de azoto e compostos voláteis em presença da luz solar. As crianças, pessoas com doenças pulmonares tais como asma, e pessoas que trabalham ou praticam exercício no exterior são suscetíveis a efeitos adversos, tais como danos nos tecidos pulmonares, e redução da função respiratória. O Ozono pode ser transportado pelas correntes do vento e causar impacto na saúde em locais muito distantes da fonte.

Os óxidos de azoto e de enxofre podem reagir com outras substâncias no ar e formar ácidos, podendo chegar à superfície da Terra em forma de chuva, nevoeiro ou neve, ou, ainda, através da deposição seca de partículas. Algumas podem ser transportadas pelo vento numa extensão de vários quilómetros. As chuvas ácidas danificam edifícios e monumentos, podendo também baixar o pH das correntes de águas superficiais e solo.

O aumento de compostos de azoto nas águas superficiais, particularmente nas águas estuarinas costeiras, modifica o balanço químico dos macronutrientes

utilizados pelas plantas aquáticas e animais. O aumento de azoto nas águas acelera a eutrofização, conduzindo à criação de condições de carência de oxigénio e, em alguns casos, a condições de anaerobiose.

Na atmosfera, os NO_x reagem rapidamente com os compostos orgânicos e com o ozono para formar uma variedade de produtos tóxicos, alguns dos quais podem causar mutações biológicas. Exemplos destes compostos são o radical nitrato, nitroarenes e nitrosaminas (Silva & Mendes, 2012).

Partículas de nitrato e de dióxido de azoto podem diminuir a penetração dos raios solares, reduzindo a visibilidade em zonas urbanas.

3.2.2. Monóxido de Carbono (CO)

O Monóxido de Carbono é um gás incolor e inodoro, formado na combustão incompleta de combustíveis fósseis devido, normalmente, a condições de carência de Oxigénio.

Emissão do monóxido de carbono

É um poluente emitido para a atmosfera, durante a queima de combustível, sendo o automóvel a fonte mais significativa. É um composto com grande estabilidade e um tempo de residência médio da ordem de 1 a 2 meses. As indústrias transformadoras de processamento de metal e produtos químicos são, também, importantes fontes emissoras de CO. Os níveis mais elevados de CO ocorrem, normalmente, nos meses mais frios, quando as condições de inversão atmosférica são mais frequentes. A poluição atmosférica fica “encurralada”, permanecendo junto ao solo por debaixo de uma camada de ar morno.

Impacte na saúde e no Ambiente

O Monóxido de Carbono pode causar asfixia uma vez que o seu principal efeito é a redução do aporte de Oxigénio aos vários órgãos do corpo (tal como o coração e o cérebro) e tecidos. O CO tem mais afinidade com a hemoglobina do que o O_2 , fazendo com que, na presença deste poluente nos pulmões, conduza à formação de um complexo mais estável a carboxiemoglobina, em vez da oxiemoglobina. Como resultado desta substituição, a hemoglobina, composto responsável pelo transporte do O_2 a todo o organismo, em vez de transportar o O_2 transporta o CO, provocando, em casos de exposições longas a este composto, a morte das células.

Exposições prolongadas a concentrações baixas de CO originam risco elevado para pessoas que sofrem de angina de peito, arteriosclerose e insuficiência cardíaca. Para pessoas com problemas cardíacos, a exposição a este poluente pode provocar dores no tórax e redução de capacidade física.

Exposições repetidas podem contribuir para outros problemas do foro cardiovascular.

Até as pessoas mais saudáveis podem sofrer danos quando expostas a elevadas concentrações de CO. Pessoas que inalam elevados níveis de CO podem desenvolver problemas do foro visual, redução da capacidade de aprendizagem ou de trabalho, diminuição da destreza manual e dificuldade na execução de tarefas complexas. A exposição a níveis extremamente elevados pode causar a morte (Silva, 2012).

O CO contribui para a formação do smog (ozono troposférico), podendo causar sérios problemas respiratórios.

3.2.3. *Partículas PM_{10} e $PM_{2,5}$*

Partículas, ou PM, é o termo utilizado para partículas presentes no ar no estado líquido e sólido, incluindo cinzas, poeira, fumo e pequenas gotículas líquidas.

As partículas em suspensão podem permanecer na atmosfera por períodos de tempo muito distintos, dependendo das suas características físicas. Algumas, devido ao seu maior tamanho ou peso, sedimentam rapidamente por ação da gravidade, permanecendo no ar apenas durante alguns segundos. Outras, pelo contrário, são extremamente finas e leves, podendo permanecer em suspensão durante dias ou mesmo semanas.

As partículas maiores e de coloração mais escura apresentam-se frequentemente sob a forma de fumo ou fuligem visível, enquanto as mais pequenas – conhecidas como partículas finas ($PM_{2,5}$) ou ultrafinas (PM_1) – são invisíveis a olho nu e apenas podem ser observadas através de microscopia eletrónica.

Emissão de partículas

Algumas Partículas são emitidas diretamente para a atmosfera. São consideradas, por isso, de origem primária, sendo as principais fontes o tráfego rodoviário, estaleiros de obras, queima de material lenhoso, entre outros.

Outras partículas não são emitidas diretamente pelas fontes poluidoras, mas formam-se na própria atmosfera através de reações químicas entre diferentes poluentes em presença de radiação solar ou vapor de água.

Esses poluentes, por resultarem de processos de transformação química no ar, são designados por poluentes secundários ou de origem secundária. As reações que lhes dão origem ocorrem, frequentemente, entre compostos libertados pela combustão de combustíveis fósseis – como os provenientes de veículos automóveis, instalações térmicas de produção de energia ou processos industriais – e o vapor de água atmosférico, originando partículas finas que contribuem significativamente para a degradação da qualidade do ar.

O $PM_{2,5}$ é o poluente do ar que causa os problemas de saúde mais significativos e a mortalidade prematura mais acentuada, sendo, portanto crucial reduzir as emissões de $PM_{2,5}$. De acordo com as metas estabelecidas pela Comissão Europeia (CE, 2021) – meta de zero poluição, o objetivo é reduzir as mortes prematuras em 55% até 2030.

A principal fonte de emissões de Partículas finas ($PM_{2,5}$) provém do consumo de energia nos setores residencial, comercial e institucional, sobretudo associado à combustão de biomassa e combustíveis fósseis. Emissões significativas existem igualmente nas indústrias transformadora e extrativa, bem como no transporte rodoviário, quer através dos motores de combustão interna, quer pelo desgaste de pneus e travões de veículos de combustão e elétricos.

Devido à diversidade das suas fontes de emissão, o impacto das medidas de confinamento associadas à COVID-19 nas concentrações de $PM_{2,5}$ revelou-se mais complexo do que no caso dos óxidos de azoto (NO_x). Durante este período, verificou-se uma redução das emissões provenientes do tráfego rodoviário. Contudo, em várias cidades, observou-se um aumento das emissões residenciais, resultante da maior permanência das pessoas em casa e da queima de biomassa lenhosa para aquecimento doméstico.

O sector doméstico contribui com um grande peso de emissões, destacando-se as de $PM_{2,5}$.

O contributo significativo das emissões deste sector é, também, evidenciado por alguns autores internacionais, que referem que, para alguns poluentes, a emissão da queima de lenha para aquecimento doméstico chega a ser superior à queima de combustíveis fósseis no sector dos transportes rodoviários. A título de exemplo, em Portugal, o Alto Trás-os-Montes encabeça

a sub-região com maiores emissões de poluentes atmosféricos devido à utilização de lenha para aquecimento doméstico.

Impacto na saúde e no Ambiente

Ao contrário dos poluentes anteriormente referidos, as partículas atmosféricas são consideradas um poluente que se caracteriza por ser uma mistura de matéria particulada sólida e líquida, com várias formas e tamanhos, em suspensão no ar.

Os tamanhos aerodinâmicos equivalentes ($\leq 10 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$) estão diretamente correlacionados com a fração das partículas totais com granulometria suscetível de penetrar nas vias respiratórias.

As partículas mais finas ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) podem, inclusivamente, atingir os brônquios. Estas partículas estão, em geral, associadas a emissões resultantes de atividades antropogénicas, como as combustões, podendo derivar ainda da reação de poluentes gasosos.

A fração de partículas entre $2,5 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$ resulta normalmente da ação de agentes naturais, como a erosão ou o levantamento de poeiras pela ação do vento. Um dos mecanismos mais eficientes na remoção das partículas consiste na queda de precipitação, sendo esta mais eficaz na eliminação da atmosfera da fração grosseira do que da fina (Silva, 2012).

Vários estudos científicos referem que a exposição a elevadas concentrações de Partículas $\text{PM}_{2,5}$ pode causar sérios problemas de saúde, nomeadamente – Agravamento de asma, aumento de tosse e respiração dolorosa, bronquite crónica, diminuição da função pulmonar e morte prematura.

As Partículas podem ser transportadas a longas distâncias através do vento e depois sedimentam no solo ou nas águas superficiais. Os efeitos principais desta sedimentação são a acidificação das águas superficiais e dos solos, a alteração do equilíbrio de nutrientes nas águas costeiras e bacias, a depleção de nutrientes no solo, a deterioração da vegetação em geral e a alteração da diversidade dos ecossistemas. A ocorrência de deposição de Partículas com acidez elevada em monumentos e/ou esculturas calcárias tem como resultado a sua deterioração (Silva, 2012).

3.2.4. Benzeno (C_6H_6)

Em condições normais de pressão e temperatura, o benzeno é um elemento estável e incolor. Possui características aromáticas, um ponto de ebulição

relativamente baixo (80,1 °C) e uma elevada pressão de vapor, características que lhe conferem a capacidade de rápida evaporação à temperatura ambiente e elevada capacidade inflamável. Quanto à sua solubilidade, é ligeiramente solúvel em água, mas miscível com a maior parte dos solventes orgânicos (Silva, 2009).

Emissão de benzeno

O benzeno é um composto presente no crude, encontrando-se em concentrações superiores a 4 g/litro. As emissões de benzeno surgem durante o processamento de produtos de petróleo, na queima de carvão, durante a produção de tolueno, xileno e outras combinações aromáticas, bem como aquando da utilização destes produtos pelo consumidor (como por exemplo a utilização da gasolina ou petróleo) (Silva, 2007).

O benzeno existe no ar, predominantemente na fase de vapor, dependendo das condições ambientais e também da concentração de hidróxidos presente na atmosfera (como por exemplo os dióxidos de enxofre e de azoto), o seu tempo de residência pode variar entre poucas horas a alguns dias. A sua remoção do ar é essencialmente através da chuva, com a consequente contaminação da superfície terrestre e águas superficiais. Por outro lado, devido principalmente à sua capacidade de volatilização, o tempo de residência na água é de algumas horas, não ocorrendo nenhuma ou quase nenhuma adsorção por parte dos sedimentos (Silva, 2007).

A presença do benzeno na gasolina e a sua larga utilização como solvente a nível industrial resulta na emissão deste composto para o ambiente de forma significativa. Os níveis encontrados no ambiente podem variar de 0,2 µg/m³ em áreas rurais a 349 µg/m³ em zonas industriais com elevados fluxos de tráfego. Durante o abastecimento de combustível a automóveis, foram encontrados níveis acima de 10 µg/m³ (Silva, 2007).

Em espaços fechados residenciais foram encontrados níveis de benzeno da ordem dos 500 µg/m³. O fumo do cigarro também contribui significativamente para os níveis de benzeno em espaços fechados. Neste caso um fumador inala por dia cerca de 1800 µg/dia, enquanto que o não fumador inala cerca de 50 µg/dia.

Impacte na saúde e no ambiente

O benzeno é facilmente absorvido pelos humanos através da inalação, sendo, no entanto, a absorção através da pele baixa. Durante exposições

contínuas de várias horas, ocorre uma taxa de absorção deste composto em humanos de aproximadamente 50%. São conhecidos os efeitos adversos produzidos pelo benzeno no homem, sendo a mais frequente a depressão da medula óssea, o que conduz a anemia. O benzeno é ainda um composto cancerígeno humano.

3.2.5. Dióxido de Carbono (CO_2)

O Dióxido de Carbono (CO_2) é um gás incolor, inodoro e não inflamável e é, como atrás referido, um gás que aumenta o efeito de estufa (GEE). É reciclado pela atmosfera através do processo de fotossíntese, tornando possível o desenvolvimento de seres aeróbios no planeta Terra.

Emissão de dióxido carbono

O CO_2 é emitido para o ar através da expiração humana, da queima de combustíveis fósseis, da desflorestação e da queima de material lenhoso, nomeadamente através dos incêndios e queimadas.

Impacte na saúde e no ambiente

O CO_2 , no ambiente exterior, não é classificado como poluente, dadas as concentrações existentes no ar ambiente exterior não serem tóxicas para o ser humano. Porém, a sua presença constitui um problema global, dado o seu impacto estar fortemente relacionado com o aumento do aquecimento global do planeta e consequentemente com as alterações climáticas.

As alterações climáticas são, nos dias de hoje, consideradas um dos maiores problemas ambientais do planeta Terra, com elevados impactes nos ecossistemas, na saúde humana e nas atividades económicas.

Apesar do conhecimento do sistema climático e suas alterações não ser ainda completo, constata-se a ocorrência duma alteração significativa no último século. Em geral, considera-se esta alteração de origem antropogénica. As emissões de poluentes para a atmosfera estão a causar um aquecimento global do planeta, alterando o clima. Os poluentes responsáveis por este fenómeno são denominados gases de estufa (GEE).

Para além de outros gases responsáveis pelas alterações climáticas, tais como o metano (CH_4), o monóxido de azoto (NO), os hidrofluorcarbonetos (HFC), os perfluorcarbonetos (PFC) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), o dióxido de carbono (CO_2) é o principal gás responsável pelo aumento do aquecimento global.

3.2.6. Ozono (O_3)

O ozono é um poluente atmosférico secundário, formado na troposfera através de reações fotoquímicas que ocorrem na presença de radiação solar. Embora seja essencial na estratosfera, onde forma a camada que protege a Terra da radiação ultravioleta, o ozono ao nível do solo constitui um poluente nocivo, com impactes negativos na saúde humana, na vegetação e nos materiais urbanos.

Emissão do ozono

Os principais precursores do O_3 troposférico são os óxidos de azoto e os compostos orgânicos voláteis que na presença de luz solar desencadeiam um conjunto complexo de reações que conduzem à formação e ao aumento das concentrações deste poluente (Reação 3).



Em ambientes urbanos o Ozono apresenta um ciclo diário típico caracterizado pela ocorrência de concentrações máximas a partir do início da tarde, quando a radiação solar é mais intensa e devido à emissão dos poluentes precursores no início da manhã pelo tráfego automóvel. No final da tarde, o ozono é consumido preferencialmente na oxidação do NO emitido durante a hora de ponta desse período, provocando um decréscimo acentuado dos níveis noturnos.

O ozono presente na troposfera e na estratosfera possui a mesma estrutura química, mas os seus efeitos sobre o ambiente e a saúde variam consoante a sua localização.

O denominado “ozono bom” encontra-se e forma-se na estratosfera, a uma altitude entre os 15 a 50 km de altitude, com a maior concentração a cerca de 25 km acima da superfície terrestre, e constitui o que se convencionou chamar a “Camada de ozono”. Na estratosfera, o ozono é um constituinte natural, desempenhando um papel fundamental para a existência de vida na Terra, pois constitui um filtro aos raios ultravioletas provenientes do Sol, permitindo assim a existência de vida na Terra.

Ao contrário do anterior, o ozono troposférico presente ao nível do solo é considerado poluente. Como acima referido este “Ozono mau” é um poluente formado na atmosfera em resultado de atividade fotoquímica, sendo por essa razão denominado um poluente de verão.

Muitas zonas urbanas possuem níveis elevados deste poluente, mas as áreas rurais também podem ser afetadas, devido ao transporte de poluentes precursores a longas distâncias e à formação secundária do ozono. Pode ocorrer o transporte para a Europa a partir de outras partes do hemisfério norte e da atmosfera superior.

A meteorologia desempenha um papel importante na formação e dispersão da poluição do ar e na variação anual das concentrações, sendo este efeito especialmente significativo para o ozono.

Impacto na saúde e no Ambiente

O Ozono troposférico pode causar danos graves mesmo quando presente em baixas concentrações. Também pode causar efeitos negativos nas plantas e ecossistemas.

O O_3 pode irritar os pulmões e causar inflamação. Outros sintomas incluem tosse, respiração dolorosa e dificuldades da prática de exercício ao ar livre. Exposições repetidas ao O_3 por vários meses podem causar lesões pulmonares permanentes. Mesmo a baixas concentrações de O_3 , este poluente pode causar agravamento de asma, redução da função respiratória e aumento da suscetibilidade a doenças do foro respiratório, tais como a pneumonia e bronquite.

O O_3 troposférico interfere com a capacidade das plantas em armazenar alimento, tornando-as mais suscetíveis a doenças, a insetos e a outros poluentes. O O_3 danifica as folhas das árvores e de outras plantas. O O_3 reduz ainda o rendimento lenhoso das florestas aumentando a vulnerabilidade das plantas às doenças, pestes e intempéries.

3.3. Caracterização, medição e modelação da poluição atmosférica urbana

Os níveis de poluição do ar causada por fontes móveis, fixas e dispersas podem ser avaliados por dois métodos diferentes: medição e previsão. O método de medição é viável apenas quando aplicado a situações existentes; o método de previsão é utilizado com vantagem desde o início do processo de planeamento até ao projeto detalhado final das medidas de redução da poluição do ar.

Os métodos de previsão têm-se mostrado muito úteis e são aplicados em uma ampla variedade de situações de poluição do ar. Por outro lado, os

métodos de previsão permitem criar um conjunto de cenários alternativos, por exemplo: introduzindo diferentes fluxos de tráfego, vários tipos de veículos e a simulação de cada uma destes cenários. Permitem ainda avaliar o impacto da introdução de medidas de redução da poluição do ar numa situação específica. Em contraste, os resultados das medições fornecem informações apenas sobre uma situação muito limitada – as condições específicas de tráfego e meteorológicas quando as medições são realizadas.

Existem disponíveis no mercado numerosos modelos de dispersão para a previsão da poluição atmosférica que constituem um importante instrumento de trabalho na avaliação da qualidade do ar. Estes modelos baseiam-se em algoritmos ou equações que simulam a dispersão dos poluentes no ar e estimam, de uma forma contínua no espaço, a concentração de poluentes existentes na atmosfera. Os modelos de previsão, no entanto, por forma a conferir-lhe robustez, devem ser validados através da avaliação comparativa com medições feitas recorrendo a equipamento de medição.

Os modelos podem ser caracterizados segundo a escala do processo atmosférico envolvido e a escala do fenómeno de dispersão. A dispersão dos poluentes é influenciada pelos processos atmosféricos que são usualmente classificados quanto à escala espacial.

A título de exemplo, o *ADMSUrban* é um modelo gaussiano de dispersão da poluição atmosférica, de escala local. Dado os fenómenos de dispersão a uma escala local serem, em larga medida, associados a processos atmosféricos de microescala, segundo a classificação de Orlanski, é um modelo de microescala.

As limitações da utilização de modelos de dispersão para a previsão da qualidade do ar estão relacionadas, principalmente, com a difícil aquisição dos dados de entrada, as incertezas nos resultados e ainda a capacidade limitada de descrever alguns processos do mundo real.

4. Avaliação da qualidade ambiental urbana

A avaliação da qualidade ambiental urbana constitui uma etapa essencial para compreender o modo como as atividades humanas e a configuração territorial influenciam o ambiente e o bem-estar das populações. Esta abordagem permite transformar fenómenos complexos – como o ruído e a poluição atmosférica – em indicadores quantificáveis e espacialmente comparáveis, contribuindo para uma leitura integrada da sustentabilidade ambiental das cidades.

O enquadramento normativo europeu reforça esta necessidade de integração. A Diretiva 2002/49/CE, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, e a Diretiva 2008/50/CE, sobre qualidade do ar ambiente, estabelecem a obrigação dos Estados-Membros de monitorizar, avaliar e divulgar informação ambiental de modo harmonizado. Em Portugal, estas diretivas são transpostas através do Decreto-Lei n.º 9/2007 (Regulamento Geral do Ruído) e do Decreto-Lei n.º 102/2010, que fixam parâmetros, limites e metodologias de avaliação, garantindo uma base comum de referência.

Contudo, apesar de ambas as diretivas preverem a utilização de mapas temáticos e indicadores normalizados, o tratamento dos fatores ambientais continua frequentemente a ser efetuado de forma setorial e independente. A integração entre as diferentes dimensões – sonora, atmosférica, térmica ou hidrológica – é ainda incipiente, limitando a perceção global da qualidade ambiental urbana e a sua relação com a morfologia do espaço construído.

Em Portugal, a avaliação da qualidade do ar pode ser ocasional ou a longo prazo. A avaliação ocasional ou de curto prazo é útil no contexto de sistemas de informação e alerta para a população, trabalhando normalmente em tempo real ou quase real. Os dados são adquiridos através de medições efetuadas numa base média horária ou diária. Quando são considerados os dados de avaliações anuais, analisam-se tendências de longo prazo.

A utilização de um índice de qualidade do ar permite, de uma forma fácil e compreensível à população, o conhecimento do estado da qualidade do ar e adequar comportamentos e ações no sentido da proteção da saúde humana, especialmente dos grupos mais sensíveis da população. Por exemplo, em dias com baixa qualidade do ar, é aconselhável que crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios crónicos evitem realizar atividades ao ar livre.

A Agência Portuguesa do Ambiente disponibiliza informação pública sobre os níveis de poluição com base em medições feitas através de uma rede de monitorização da poluição. As informações sobre os níveis de poluição são apresentadas através de um índice de qualidade do ar denominado “QualAR”. Este índice indica o estado da qualidade do ar a curto prazo e não reflete a situação de longo prazo (anual).

O índice QualAR para um determinado local é expresso como um único valor, levando em consideração as concentrações de cinco principais poluentes atmosféricos. São eles: PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 e SO_2 . Para definição do valor, considera-se apenas o poluente com a maior concentração em relação aos valores-limite anuais portugueses para a proteção da saúde humana, ou seja, o pior resultado. As concentrações dos restantes poluentes são desconsideradas.

Proposto por Silva (2007) e Silva (2015), o modelo *CityAIR* baseia-se na combinação de concentrações de longo prazo, que podem resultar de medições passadas ou, por outro lado, de modelos de simulação matemática que fornecem, neste caso, uma visão prospetiva da qualidade do ar. Quando as concentrações de poluição numa cidade são modeladas numericamente, os valores para cada ponto ou área considerada são comparados a um padrão, neste caso ao limite legal estabelecido pela legislação portuguesa.

O índice *CityAIR* classifica o ar da cidade a partir da avaliação da concentração de 5 poluentes urbanos fortemente relacionados com o tráfego rodoviário. São eles: CO , NO_2 , O_3 , C_6H_6 e PM_{10} . No entanto, pode ser ajustado para mais ou outros poluentes.

Em situações em que as concentrações medidas estão abaixo do limite legal, o *CityAir* permite que seja realizado um trade-off dos valores. Assim, o índice de qualidade do ar é calculado através da combinação das concentrações dos diferentes poluentes. Já para situações em que há pelo menos um poluente cuja concentração viola o limite máximo, é atribuído ao índice a menor qualidade (índice 0). Neste caso particular, o pior poluente condiciona a qualidade do ar na área medida (Silva, 2015).

A classificação do índice *CityAir* varia de “Muito Fraca” a “Muito Boa” e traduz-se numa escala de numérica que varia de 0 a 4.

A classificação final da qualidade do ar é obtida através da combinação linear ponderada dos valores de concentração normalizados dos poluentes. Para tal, utiliza técnicas multicritério para combinar, agregar, ponderar e padronizar dados de concentração de poluentes.

4.1. Integração de indicadores ambientais

A avaliação integrada da qualidade ambiental urbana constitui uma etapa fundamental na compreensão das interações entre os diferentes fatores que influenciam o ambiente urbano e o bem-estar das populações. A leitura isolada dos níveis de ruído e da poluição atmosférica permite identificar zonas problemáticas específicas, mas é através da análise conjunta destes parâmetros que se obtém uma visão mais completa e representativa da qualidade ambiental global.

Neste sentido, a metodologia de avaliação integrada apresentada no Capítulo 6 e operacionalizada através do modelo *CityNoise-Air* – constitui uma ferramenta relevante para o planeamento e gestão urbana, permitindo identificar áreas de conflito ambiental, hierarquizar prioridades de intervenção e apoiar a formulação de políticas de mitigação.

A avaliação integrada baseia-se na normalização e combinação de variáveis de natureza distinta, mas complementares. No caso em estudo, foram considerados indicadores de ruído ambiente (níveis L_{den} e L_n) e de poluição atmosférica (concentrações médias anuais dos principais poluentes atmosféricos urbanos, como por exemplo o NO_2 , $PM_{2,5}$ e PM_{10}), representados em mapas contínuos e numa base geográfica compatível.

Cada variável é classificada em escalas qualitativas equivalentes, traduzindo o grau de exposição em categorias como muito boa, boa, moderada, má e muito má. Esta uniformização permite a sobreposição e ponderação dos indicadores, gerando um índice composto de qualidade ambiental urbana, representado cartograficamente. O resultado é um conjunto de mapas integrados que evidenciam as zonas com níveis mais elevados de pressão ambiental e as áreas onde prevalecem condições de melhor qualidade.

O modelo *CityNoise-Air* distingue-se, assim, por integrar informação proveniente de diferentes fontes e domínios, produzindo uma leitura territorial articulada que reflete o comportamento conjunto das principais componentes da poluição urbana. A metodologia pode ser facilmente replicada noutros contextos, mediante adaptação dos parâmetros de entrada e da resolução espacial das camadas de informação.

4.2. Interpretação territorial e aplicação prática

A leitura dos resultados obtidos evidencia que as zonas mais densamente edificadas e com maior intensidade de tráfego tendem a apresentar

simultaneamente níveis elevados de ruído e de poluentes atmosféricos, constituindo áreas críticas de exposição cumulativa.

Em contrapartida, os espaços abertos, áreas verdes e zonas periféricas menos congestionadas apresentam valores mais reduzidos, desempenhando um papel importante na regulação ambiental e no equilíbrio ecológico da cidade.

Esta análise integrada permite estabelecer correlações espaciais entre o ambiente sonoro e a qualidade do ar, demonstrando que a estrutura urbana – nomeadamente a morfologia dos quarteirões, a largura dos arruamentos e a presença de vegetação – exerce influência direta na propagação do ruído e na dispersão dos poluentes. Assim, a avaliação integrada não é apenas um exercício técnico, mas uma ferramenta de interpretação territorial, que revela a relação entre a forma da cidade e a sua qualidade ambiental.

Do ponto de vista prático, a utilização de modelos como o *CityNoise-Air* apoia a definição de zonas de ação prioritária e a elaboração de planos municipais de mitigação, permitindo orientar políticas locais de mobilidade, de requalificação do espaço público e de ordenamento do território.

O cruzamento de informação entre os níveis de ruído e as concentrações de poluentes pode ainda servir de base à delimitação de Zonas de Proteção Acústica e Zonas de Gestão da Qualidade do Ar, garantindo coerência entre instrumentos setoriais de planeamento.

A avaliação integrada da qualidade ambiental urbana reforça a importância de uma abordagem multidimensional e baseada em evidência. Para além da análise física, esta metodologia introduz uma dimensão social, ao relacionar os níveis de exposição com a densidade populacional, permitindo identificar grupos mais vulneráveis ou áreas de desigualdade ambiental.

No futuro, a incorporação de variáveis adicionais – como o conforto térmico, a presença de espaços verdes, ou os níveis de radiação solar e humidade relativa – poderá ampliar a aplicabilidade do modelo, contribuindo para o desenvolvimento de um índice de qualidade ambiental urbana integrado.

Este tipo de avaliação, quando articulado com instrumentos de planeamento como os Planos Diretores Municipais, os Planos de Ação de Ruído e os Planos de Melhoria da Qualidade do Ar, constitui uma base técnica sólida para decisões mais informadas e sustentáveis. Em última análise, a sua aplicação permite consolidar o papel do planeamento urbano como instrumento de promoção da saúde pública e da sustentabilidade ambiental,

alinhando-se com os princípios do PNPOT 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 11 e 13).

4.3. Síntese conclusiva

A integração dos indicadores de ruído e de poluição atmosférica num modelo comum de leitura espacial proporciona uma compreensão mais aprofundada da qualidade ambiental das cidades.

Ao revelar as zonas onde os impactes ambientais se sobrepõem, este tipo de abordagem oferece aos decisores e técnicos municipais um instrumento de apoio à definição de estratégias de mitigação, ordenamento e regeneração urbana.

O modelo *CityNoise-Air*, demonstra que a avaliação integrada é essencial para uma gestão urbana sustentável, permitindo que a cidade seja entendida como um sistema complexo, onde as dimensões ambiental, social e territorial se interligam de forma dinâmica.

5. Planos e medidas de melhoria da qualidade ambiental urbana

5.1. Estratégias de mitigação e controlo do ruído

As estratégias de redução e controlo do ruído ambiental organizam-se, de forma geral, em três níveis de atuação, aplicados segundo uma hierarquia de prioridade:

1. Atuação na fonte de ruído, procurando reduzir ou eliminar o ruído no momento da sua emissão (por exemplo, através da adoção de pavimentos mais silenciosos ou limitação de velocidades);
2. Atuação na propagação do ruído, intervindo no percurso entre a fonte e o recetor, através de barreiras acústicas, vegetação, alterações de traçado;
3. Proteção dos recetores, que consiste em medidas de isolamento acústico ou reorganização funcional dos espaços, reduzindo a exposição das populações.

Esta hierarquia reflete o princípio da prevenção na origem, privilegiando sempre a eliminação ou redução do ruído na fonte.

Atuação na fonte do ruído

A intervenção direta na fonte de ruído implica o conhecimento das características de emissão dos seus potenciais contribuintes para a produção de ruído. Por exemplo, o ruído rodoviário, num contexto essencialmente urbano, apresenta grande variabilidade de emissão sonora relacionada não somente com o fluxo de veículos, ou as características dos veículos que ali circulam, como também com o meio onde circulam e ainda com a gestão de tráfego efetuada pelo município (Silva, 2012).

Na Tabela 2, são apresentadas as principais estratégias de mitigação do ruído na fonte, por tipo de tráfego:

Tabela 2 Estratégias de mitigação do ruído na fonte.**Tráfego rodoviário:**

- Redefinição do desenho de vias, utilização de rotundas, plataformas elevadas e estreitamento de vias;
- Redução do limite de velocidade e definição de horários para circulação de veículos pesados;
- Utilização de pneus silenciosos em veículos de transportes coletivos;
- Reabilitação de pavimentos e utilização de pavimentos fono-absorventes;
- Promoção da mobilidade ativa como as deslocações a pé ou de bicicleta e a adequação das vias para tais usos;
- Instalação de ciclovias dedicadas ou partilhadas, passeios de largura apropriada, passeadeiras bem-sinalizadas;
- Criação de mais infraestruturas para veículos elétricos nas cidades.

Tráfego ferroviário:

- Modernização ou renovação da frota, com a utilização de calços de travões silenciosos;
- Redução da rugosidade das vias, através de manutenção regular;
- Gestão do tráfego ferroviário, nomeadamente em relação aos horários de circulação. Utilização de pneus silenciosos em veículos de transportes coletivos;

Tráfego aéreo:

- Modernização ou renovação da frota, com a utilização de aeronaves menos ruidosas;
- Restrição de voos noturnos;
- Gestão do espaço aéreo com rearranjo de rotas.

Tráfego marítimo e navegação fluvial:

- Modernização ou renovação da frota de embarcações, com a utilização de propulsores e motores menos ruidosos.

Atuação na propagação do ruído (entre a fonte e o recetor)

Outra forma de se controlar o ruído é atuar na propagação do mesmo, isto é, intervir entre a fonte e o(s) recetor(es), especialmente os mais sensíveis.

Esse tipo de solução envolve métodos mais complexos e passíveis de aplicação a situações já existentes e outros somente possíveis de aplicar em fase de projeto.

De forma resumida, as estratégias de mitigação na propagação do ruído podem ser conseguidas através do aumento da distância entre a fonte e o recetor, através da criação de *zonas buffer* por norma *non aedificandi*. Estas zonas buffer são normalmente definidas em instrumentos de gestão territorial (PDM, PU) e têm como objetivo, nomeadamente, a proteção acústica de recetores sensíveis reduzindo a sua exposição ao ruído.

A utilização de barreiras acústicas para o bloqueio do ruído bem como a introdução de estruturas verdes/vegetação para a diminuição da sensibilidade da exposição ao ruído, constituem medidas de intervenção na fase da propagação.

Importa destacar que as medidas de redução de ruído devem, sempre que possível, ser consideradas de forma integrada com outras soluções de carácter ambiental, de modo a assegurar uma abordagem mais sustentável. Desta forma, a redução do ruído deve ser articulada com medidas que considerem também o impacto visual, a poluição atmosférica e outros efeitos decorrentes da fonte de ruído em particular.

Conceção de novas vias

Planear a localização e o desenho de uma estrada ou linha férrea levando em consideração a atenuação do ruído, isto é, aumentando a distância entre a fonte e o recetor, tem como resultado soluções bastante satisfatórias, não sendo, no entanto, essa a prática habitual. Ainda assim, é possível obter diferentes graus de redução de ruído ao ajustar projetos de novas vias tendo em conta o alinhamento e a posição das mesmas em relação ao terreno envolvente.

As vias que acompanham o relevo do terreno são interessantes do ponto de vista paisagístico. No entanto favorecem a propagação do ruído, exceto nos casos em que o terreno entre a via e os recetores funciona como um obstáculo. Nesse sentido, vias construídas em depressões, em aterro, em viadutos ou com taludes ao longo das mesmas são opções que causam menos impacto em termos de ruído ambiente. Em contrapartida, esse tipo de solução costuma ser condicionada por fatores como custo mais elevado, ocupação do solo e determinadas características intrínsecas ao solo.

Zonas de proteção ou zonas “buffer”

A criação de zonas de proteção é realizada através do condicionamento do uso do solo localizado entre as principais fontes de ruído, como autoestradas, aeroportos ou vias principais, e as áreas sensíveis, como hospitais, escolas e residências.

Na construção de novos edifícios, uma “zona de proteção” pode ser obtida através do planeamento da disposição das divisões internas. Nesse caso, opta-se pela disposição das áreas menos sensíveis ao ruído (galerias de acesso, escadas, cozinhas, WC), viradas para a fachada mais exposta ao ruído, reservando-se as restantes fachadas para os quartos de dormir, salas de estar, etc. A implantação de edifícios paralelos a uma estrada, se por um lado determina a existência de níveis de ruído mais elevados na fachada confinante com a via, por outro permite que a fachada das traseiras e os espaços aí criados permaneçam em ambiente menos ruidoso, proporcionando, por exemplo, uma boa proteção para uma área exterior de lazer.

A utilização de zonas de proteção onde somente a distância atenua os níveis de ruído, muitas vezes não é suficiente para conseguir a redução de ruído desejada. Tal pode ocorrer quer pelo fato dessas zonas não serem suficientemente largas (as dimensões necessárias da zona de proteção dependem do número de faixas, das características do tráfego e das velocidades de circulação praticadas), quer pelo espaço necessário e o custo inerente a este tipo de solução.

Barreiras acústicas

A utilização de barreiras acústicas ao longo de vias de tráfego, que podem ou não ser conjugadas com alguma zona de proteção, torna-se uma opção muitas vezes mais viável que as referidas anteriormente e, por isso, muito adotada para reduzir os níveis de ruído ambiente. Esta solução, pode ser adotada tanto em vias novas, como em vias já existentes, contudo normalmente fora dos aglomerados urbanos.

Uma barreira acústica protege a área contida na sua área de influência, denominada “zona de sombra”.

Em termos de constituição, uma barreira acústica pode ser natural (taludes e/ou cortina de vegetação), artificial (paredes ou muros com características absorventes ou refletivas), ou mista. Estas últimas, também denominadas biobarreiras, são constituídas por uma estrutura rígida no interior, com características absorventes, podendo ter um ou ambos os lados com terra e coberto vegetal.

As Figuras 23-25 ilustram exemplos de barreiras acústicas implementadas em contexto urbano, ilustrando diferentes soluções construtivas aplicadas à mitigação do ruído.



Figura 23 Barreira em betão texturados com nervurado em *betão bois* (SNCF) ($\alpha = 0,4$ a $0,7$).



Figura 24 Barreira em pedra ensacada.

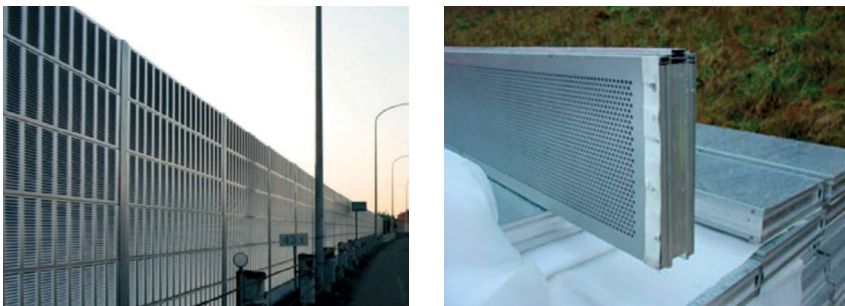


Figura 25 Barreira absorvente em painéis metálicos ranhurados e lâ de vidro (JH - Japan Highway Public Corporation).

Além das barreiras naturais – constituídas por vegetação isolada ou combinada com taludes – e das biobarreiras, que associam elementos vegetais e estruturas acústicas artificiais, a vegetação pode ainda ser utilizada de forma combinada nas zonas de proteção, reforçando o efeito de atenuação sonora e o enquadramento paisagístico.

Quando devidamente dimensionada, uma cortina arbórea com uma espessura de 30 a 50 metros de espessura e constituída por uma densa vegetação pode proporcionar uma redução de ruído entre 3 e 8 dB(A). No entanto, é fundamental, ter em consideração vários fatores como a altura atingida pela(s) espécie(s) vegetal(ais) selecionada(s), o tipo de folhagem (caduca ou perene) e a adequação das espécies escolhidas às condições climáticas e edáficas locais, garantindo simultaneamente eficiência acústica, resiliência ecológica e integração paisagística.

Atuação nos recetores

Quando não é possível ou não é suficiente controlar o ruído na fonte e na propagação, torna-se necessário atuar diretamente nos recetores, através do reforço do isolamento sonoro das aberturas (portas e janelas) e fachadas dos edifícios. No entanto, estas medidas devem ser consideradas como último recurso.

Em Portugal, de acordo com o Regulamento Geral de Ruído, a responsabilidade pela adoção e implementação destas medidas compete à entidade responsável pela atividade produtora do ruído ou ao recetor afetado, conforme aquele que mais recentemente se tenha instalado ou dado início à respetiva atividade, ou seja titular da autorização ou licença mais recente.

As principais medidas de redução de ruído nos recetores são:

- O reforço dos vãos envidraçados exteriores, isto é, a substituição de janelas de vidro simples por janelas de vidro duplo e com boa vedação à entrada de ar;
- O reforço das envolventes opacas dos edifícios;
- A utilização de vegetação nas fachadas (paredes verdes) para reduzir a reflexão sonora.

Outra forma de atuar ao nível dos recetores consiste em promover a educação e sensibilização da população em geral, com o objetivo de aumentar a consciência pública sobre os problemas causados pela exposição ao ruído

excessivo e incentivar comportamentos que contribuam para a sua redução. Esta abordagem passa por informar os cidadãos sobre os atuais níveis de ruído a que estão expostos, bem como as medidas individuais e coletivas que podem ser adotadas para reduzir essa exposição.

De acordo com um estudo recente da Agência Europeia do Ambiente (2020), a maioria das medidas adotadas pelos Estados-membros incide ainda sobre a redução do ruído na fonte, independentemente do tipo de tráfego. Uma exceção ocorre em autoestradas, onde as estratégias mais comuns se centram no controlo da propagação através de barreiras acústicas. Já as ações de associadas ao planeamento do território e o uso do espaço urbano continuam a representar uma parcela reduzida das medidas adotadas.

Importa destacar que frequentemente as medidas utilizadas no combate à poluição atmosférica nas cidades europeias oferecem co-benefícios em termos de redução do ruído ambiente. Sob a perspetiva de custo-benefício, estas abordagens integradas revelam-se particularmente vantajosas, uma vez que permitem atuar simultaneamente sobre duas dimensões críticas da qualidade ambiental urbana. No entanto, nem todas as intervenções são igualmente eficazes para ambos fatores, o que exige uma coordenação eficiente entre os cidadãos, os agentes políticos e os vários atores que trabalham na gestão da poluição sonora e do ar.

5.2. Estratégias de mitigação e controlo da poluição atmosférica

Estratégias e políticas gerais

De uma forma mais ampla, o combate à poluição atmosférica pode ser realizado através de adoção de políticas e regulamentações. A nível europeu, podem-se destacar:

- A adoção pela UE, desde a década de 1980, de políticas rigorosas sobre a qualidade do ar. Com a criação de diretivas que estabelecem padrões de qualidade para 12 poluentes do ar e também definindo métodos comuns para monitorizar, avaliar e informar o público sobre a qualidade do ar ambiente na UE.
- A proposta por parte da Comissão Europeia de uma atualização da Diretiva COM(2022)542 sobre qualidade do ar ambiente e ar mais limpo para a Europa, com um objetivo de aproximar os padrões da EU das recomendações da OMS.

- A criação do Plano de Ação de Poluição Zero que estabelece como meta melhorar a qualidade do ar até 2030, com ênfase no controle de partículas finas (PM_{2,5}).
- A Diretiva (EU) 2016/2284 – Compromissos Nacionais de Redução de Emissões – que estabelece compromissos nacionais de redução de emissões para os Estados-Membros e a UE para cinco poluentes atmosféricos: óxidos de azoto (NO_x), compostos orgânicos voláteis não metano (COVs), dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e material particulado fino (PM_{2,5}).



Estratégias e políticas relacionadas à mobilidade, energia e indústria

As estratégias e políticas para controle e mitigação da poluição do ar em zonas urbanas concentram-se essencialmente em três grandes setores: o o setor da energia, o setor da indústria e o setor dos transportes. Cada um desempenha um papel determinante na geração de emissões e, consequentemente, na definição das políticas ambientais urbanas. Neste livro, será dada maior ênfase às medidas relacionadas com a mobilidade urbana, por se tratar do setor com maior impacto direto na qualidade do ar e na vida das populações urbanas.

Energia

As principais estratégias de mitigação da poluição atmosférica urbana no setor de energia assentam em quatro eixos principais: promoção das energias limpas e renováveis, como a solar, eólica e geotérmica, reduzindo progressivamente a dependência de combustíveis fósseis; Melhoria da eficiência energética em todos os setores urbanos – edifícios, transportes, aquecimento e arrefecimento doméstico, etc. – através de políticas de reabilitação, certificação energética e inovação tecnológica; Incentivos e subsídios à substituição de equipamentos obsoletos e ineficientes por tecnologias mais eficientes e mais limpas, alimentados por fontes de energia renovável.

Estas políticas visam não só reduzir as emissões locais de poluentes atmosféricos (como NO_x, SO₂ e partículas), mas também contribuir para os objetivos de neutralidade carbónica definidos no Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) e no Pacto Ecológico Europeu.

Indústria

As principais estratégias e políticas de controle da poluição atmosférica urbana relacionada com o setor industrial estão centradas na modernização da infraestrutura industrial e na transição tecnológica dos processos produtivos. Muitas unidades industriais localizadas nas proximidades dos centros urbanos operam ainda com equipamentos e processos altamente emissores, exigindo intervenções estruturais e regulamentares.

Entre as principais medidas encontram-se: realocização das zonas industriais afastando-as das áreas residenciais, tendo em conta o crescimento das cidades e a exposição da população; Instalação de equipamentos de controle e filtragem de emissões, especialmente em caldeiras e chaminés industriais; Aplicação de restrições e penalizações mais severas para determinados tipos de emissões atmosféricas; Redução de processos que emitem compostos orgânicos voláteis (VOC); Licenciamento ambiental mais rigorosos de instalações industriais; Fomento da inovação e transformação tecnológica; Suspensão temporária de determinadas atividades industriais especialmente em períodos de baixíssima qualidade do ar.

Transportes

O congestionamento do tráfego automóvel constitui uma das principais preocupações das grandes cidades, uma vez que gera elevados custos económicos, atrasos significativos e aumento do consumo de combustível, com consequências sociais e ambientais adversas.

Entre as políticas e estratégias mais relevantes relacionadas com o setor dos transportes destaca-se a recomendação para o uso reduzido de veículos particulares e a promoção do transporte público e dos modos de deslocação ativos, como a bicicleta e a caminhada.

Neste sentido, o estabelecimento de estratégias multimodais, aliadas a uma eficiente articulação entre diferentes modos de transporte e à fiabilidade dos horários de partida e chegada, constitui um passo fundamental para promover a migração do veículo privado para o transporte coletivo e os modos ativos de deslocação. Com esse fim, as cidades têm vindo a implementar Planos de Mobilidade Urbana Sustentáveis (PMUS).

Ao contrário dos planos de mobilidade tradicionais, focados sobretudo em solucionar pontos críticos de maior congestionamento automóvel, os PMUS baseiam-se em princípios fundamentais de acessibilidade universal,

segurança, intermodalidade, eficiência, qualidade de vida, dinamismo económico, inclusão social e respeito ao ambiente.

A Tabela 3, apresenta as principais diferenças entre planos tradicionais de transporte e os PMUS.

Tabela 3 Principais diferenças entre Planos de Transporte Tradicionais e Planos de Mobilidade Urbana Sustentáveis. (Adaptado de Rupprecht Consult, 2019)

Plano de Transporte Tradicional		Plano de Mobilidade Urbana Sustentável
Foco no tráfego	→	Foco nas pessoas
Objetivos principais: melhoria da capacidade de fluxo das vias e da velocidade do tráfego	→	Objetivos principais: acessibilidade, sustentabilidade e qualidade de vida
Foco em um modal	→	Desenvolvimento integrado de todos os modais
Planeamento Setorial	→	Planeamento consistente com as políticas de áreas relacionadas
Infraestrutura como tema principal	→	Combinação de infraestrutura, mercado, e políticas de ocupação e uso do solo
Cobertura de uma área administrativa	→	Cobertura de uma área urbana funcional baseada nos movimentos pendulares
Domínio de engenheiros de tráfego	→	Equipas multidisciplinares
Planeado por especialistas	→	Planeamento coparticipado com cidadãos e demais stakeholders
Avaliação de impacto limitada	→	Avaliação sistemática dos impactos para facilitar o aprendizado e a melhoria
Planos de curto e médio prazo	→	Planos de curto e médio prazo, alinhados com uma estratégia e visão de longo-prazo

De modo geral, as medidas para o controle da poluição do ar associadas ao setor de transportes e mobilidade, podem ser divididas em quatro categorias: Melhoria de infraestrutura e estrutura de transporte; Medidas de controle em veículos; Melhorias na qualidade dos combustíveis e combustíveis alternativos; Restrições de tráfego.

Melhoria da infraestrutura e estrutura de transporte

De entre as principais medidas relacionadas à melhoria da infraestrutura e estrutura de transporte que têm sido utilizadas para controlar a poluição do ar estão: a melhoria da estrutura viária; o ajuste da estrutura de transporte e construção de um sistema de transporte sustentável; a modificação dos modos de transporte; a expansão do transporte público; a melhoria e promoção do transporte público, por exemplo, através da promoção de transporte público gratuito temporário; a retirada de veículos antigos (motocicletas, autocarros, veículos pesados) em áreas urbanas; a otimização das estratégias de controle de tráfego; a instalação de um número adequado de parquímetros; a elevação das tarifas de estacionamento; a adoção de programas de incentivo para veículos elétricos; e a expansão das demais infraestrutura de trânsito (ferroviário, metro e linhas subterrâneas, transporte aquaviário), conforme as características de cada cidade ou área metropolitana.

Medidas de controle em veículos

Os padrões de emissões Euro são uma das medidas mais importantes que os governos têm vindo a implementar para controlar as emissões de exaustão veicular e assim reduzir a poluição atmosférica nas cidades. Trata-se de uma série de regulamentações europeias que definem e limitam a quantidade de poluentes do ar emitidos por veículos ligeiros, pesados e motocicletas (Comissão Europeia, 2023).

Entre as medidas mais relevantes de controle de emissões veiculares destacam-se: Controle de emissões em veículos novos e usados; Adoção de padrões mais rígidos de emissões veiculares; Instalação de filtros de partículas a diesel (DPF) ou catalisadores de oxidação a diesel (DOC) em todos os pesados e autocarros a diesel; a conversão de pesados de mercadoria para gás GPL e instalação de catalisadores; o uso de catalisadores; Retrofit de veículos em uso; a instalação de dispositivos de controle de emissões; Conversão de veículos ligeiros com carburador (LDGVs) e a adoção de tecnologias mais limpas.

Apesar da eficácia teórica destas medidas, a sua implementação prática enfrenta frequentemente resistência por parte dos utilizadores, o que exige campanhas de sensibilização e incentivos financeiros para garantir a sua aceitação social.

Melhorias na qualidade do combustível e combustíveis alternativos

Outra forma de reduzir a poluição atmosférica nos centros urbanos é a melhoria na qualidade dos combustíveis, por exemplo, através da remoção total da gasolina com chumbo e da utilização do diesel com baixo teor de enxofre. São ainda importantes medidas: a conversão de veículos a diesel para veículos a gás liquefeito de petróleo (GLP), o aumento do uso de combustíveis alternativos (GNC, GNL), o uso de veículos elétricos alimentados por baterias ou células de combustível e o hidrogénio. Por outro lado, a transição dos autocarros a diesel para biocombustível, híbridos, elétrico ou GLP, são importantes medidas a considerar.

Medidas de restrição de tráfego

As medidas de restrição de tráfego automóvel constituem um dos instrumentos mais eficazes para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e melhorar a qualidade do ar nas áreas urbanas densamente povoadas. Estas políticas procuram limitar o acesso de veículos mais poluentes aos centros urbanos e, simultaneamente, promover o uso do transporte público, dos modos suaves e de veículos de baixas emissões.

Entre as principais medidas adotadas destacam-se: Estabelecimento de áreas restritas no centro da cidade (pedonalização); Adoção de áreas de taxaço de congestionamento; Implementação de Zonas de Emissões Reduzidas (LEZ) e de Zonas de Emissões Ultra Reduzidas (ULEZ); Aumento das tarifas de acesso às partes internas da cidade; Construção de desvios na área congestionada; a otimização ambiental do tempo dos sinais de tráfego; Restrição à circulação de pesados; a aplicação do esquema ímpar-par para carros particulares; Criação de faixas prioritárias para veículos de baixa emissão; Utilização de dísticos ambientais (vermelho, amarelo ou verde), de acordo com o padrão de emissão Euro de emissões, como implementados em França, Inglaterra, Alemanha e Holanda.

As áreas de taxaço de congestionamento consistem em zonas delimitadas da cidade onde se aplicam regras especiais para circulação e tarifas diferenciadas. Um exemplo bem sucedido é o da cidade de Oslo, Noruega, onde desde 2017, nas zonas de cobrança de congestionamento, os condutores pagam valores distintos dependendo do tipo de combustível, o padrão EURO do veículo, do tipo de veículo (pesado, ligeiro) e o período do dia (horário de pico ou fora do horário de pico). Estudos locais demonstram que este modelo de cobrança de congestionamento contribui para melhorias significativas na qualidade do ar, em virtude das mudanças de



Figura 26 Exemplos de LEZ em cidades europeias (sentido horário): Glasgow, Londres e Lisboa. (Fonte: www.intelligenttransport.com)

comportamento dos utilizadores, que passam a optar pelo transporte público em vez do veículo particular.

Outra medida de controle que tem sido adotada em cidades europeias é a criação de Zonas de Baixa Emissão (Low Emission Zones – LEZ). Nestas áreas, o acesso é restrito a veículos que cumpram determinados padrões de emissão, geralmente definidos pelas normas Euro. Em muitas cidades, as LEZ estão associadas a zonas de tarifação de congestionamento, centros urbanos históricos ou áreas comerciais de elevada afluência.

As regras aplicadas variam de cidade para cidade: em determinadas cidades, a LEZ restringe a circulação de veículos pesados a diesel, enquanto noutras restringe o acesso a veículos antigos e poluentes, como sucede em determinadas zonas da cidade de Lisboa. Em todos os casos, o objetivo comum é o de reduzir as emissões locais, promover a renovação das frotas e melhorar a qualidade ambiental urbana.

Com o objetivo de analisar a influência das LEZ na qualidade do ar, numerosos estudos científicos têm sido realizados. Num destes estudos, observou-se que a LEZ implementada na cidade de Roma (Cesaroni et al., 2012)

conduziu a reduções das concentrações de NO_2 e PM_{10} em 23% e 10%, respetivamente. No entanto, estas reduções foram principalmente na área de intervenção, não na cidade inteira.

A cidade de Londres, desde 2003, trava uma batalha para melhorar a qualidade do ar da cidade. Diante de uma baixa qualidade do ar e de um forte congestionamento na zona central, Londres inicialmente estabeleceu uma taxa de congestionamento para o acesso ao centro da cidade em dias úteis, no valor de £11.50 por veículo, abrangendo uma zona de cerca de 21 km^2 . Em 2008, avançou com a adoção de uma das maiores LEZ da Europa, através da restrição de circulação de veículos pesados por toda a cidade que ultrapassassem os limites de emissões especificado. Estes limites foram tornando-se gradualmente mais rígidos ao longo dos anos. Com o objetivo de reduzir o número de veículos ligeiros que não respeitam os limites de emissão estabelecidos, em 2019, foi implementada a primeira ULEZ (Ultra Low Emission Zone) na zona central de Londres. Os resultados obtidos neste processo mostram-se promissores, destacando-se a redução de 44% da concentração média de NO_2 no centro da cidade e 20% nos arredores de Londres, além de uma forte renovação da frota, nomeadamente por veículos elétricos (Figura 27). Diante de tais avanços e sabendo-se que todos os habitantes da cidade têm direito a um ar de qualidade, o município decidiu, a partir de 2023, expandir a ULEZ a todas as freguesias de Londres (C40 Cities).

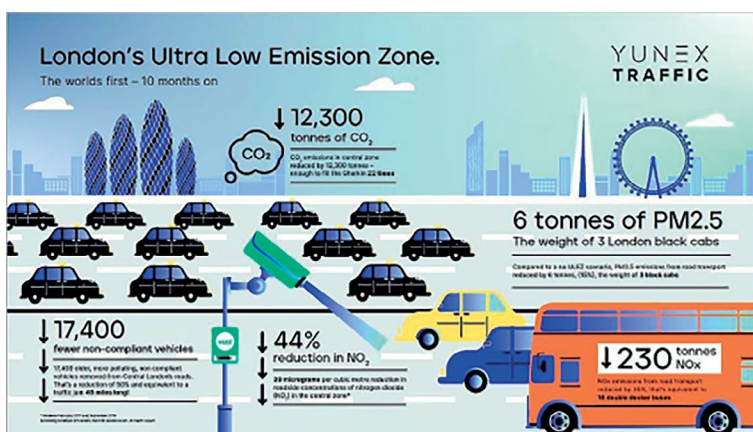


Figura 27 Resultados obtidos após 10 meses da implementação da ULEZ de Londres. (Fonte: <https://www.yunextraffic.com>)

5.3. Soluções baseadas na natureza para a mitigação da poluição urbana

As Soluções Baseadas na Natureza (SBN) constituem medidas integradas de planeamento inspiradas nos processos e dinâmicas da natureza, concebidas para responder aos múltiplos desafios ambientais e sociais que as cidades enfrentam atualmente (Menon & Sharma, 2021). A sua implementação visa proteger, gerir de forma sustentável e renaturalizar os espaços urbanos, contribuindo simultaneamente para a mitigação dos impactos das alterações climáticas e da poluição urbana. Estas soluções têm-se revelado particularmente eficazes na melhoria da qualidade ambiental, da saúde e do bem-estar das populações, bem como na promoção da biodiversidade no meio urbano (Figura 28).



Figura 28 Soluções baseadas na natureza (Programa da ONU para o Meio Ambiente @UNEP_pt).

O conceito de SBN é relativamente recente, tendo emergido da convergência de debates sobre infraestrutura verde urbana, adaptação às alterações climáticas e qualidade ambiental das cidades. Um dos marcos fundamentais na consolidação do conceito foi a sua utilização num relatório do Banco Mundial sobre biodiversidade e alterações climáticas em 2008 (Remme & Haarstad, 2022). Pouco depois, a União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) adotou o termo, destacando o papel dos ecossistemas e da biodiversidade nas estratégias de mitigação e adaptação climática.

Na Europa, as SBN foram gradualmente integradas em políticas e instrumentos estratégicos de grande relevo, como a Estratégia Europeia para a Adaptação às Alterações Climáticas (2013), o Pacto Ecológico Europeu (Green Deal) e a Estratégia Europeia para a Biodiversidade 2030, refletindo o reconhecimento crescente do papel das SBN na transição ecológica e climática (Remme & Haarstad, 2022; IEEP, 2020). Também a nível internacional, organizações como as Nações Unidas, através do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (IPCC), e a Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos (FEMA), têm vindo a promover as SBN como instrumentos eficazes de planeamento urbano sustentável e de gestão resiliente dos riscos naturais (Anderson & Gough, 2022).

Apesar de ainda não existir uma definição universalmente aceite, o uso do conceito de SBN espalhou-se pelos domínios político, técnico e científico. De forma geral, as SBN são entendidas como abordagens que recorrem a processos naturais e funções dos ecossistemas para reduzir riscos decorrentes das atividades humanas e reforçar a resiliência urbana, sobretudo face às alterações climáticas.

No contexto europeu, a Comissão Europeia define as SBN como “soluções inspiradas e sustentadas pela natureza, eficazes em termos de custo, que proporcionam simultaneamente benefícios ambientais, sociais e económicos, e contribuem para o reforço da resiliência” (Menon & Sharma, 2021). Assim, as SBN podem ser vistas como ferramentas adaptáveis e integradas que otimizam a capacidade das cidades para enfrentar desafios ambientais e sociais, através de intervenções ajustadas à sua realidade local. Ao contrário das abordagens tradicionais de engenharia, as SBN geram múltiplos co-benefícios, atuando não só na resolução de problemas existentes, mas também na preparação das cidades para desafios futuros.

De acordo com Molloy et al. (2024), o planeamento urbano pode aplicar as SBN com dois objetivos principais: i) Mitigação, através da utilização de vegetação para reduzir, por exemplo, poluentes atmosféricos ou carbono; e ii) Adaptação, por meio de medidas que promovem a gestão, proteção e aumento da resiliência urbana face a fenómenos climáticos adversos.

O planeamento urbano desempenha, assim, um papel central na operacionalização das SBN, ao gerir os compromissos e conflitos inerentes às suas múltiplas dimensões – espacial, económica e social. Contudo, apesar do reconhecimento crescente das SBN como abordagens eficazes para os desafios da sustentabilidade urbana, a sua implementação prática continua limitada. Entre os principais entraves encontram-se a falta de

conhecimento técnico especializado, a escassa integração entre setores e níveis de governação, a ausência de mecanismos de financiamento adequados e uma cultura de planeamento ainda orientada para soluções convencionais. A isto soma-se a necessidade de maior sensibilização e cooperação entre investigadores, técnicos, decisores e cidadãos, sem a qual a adoção das SBN permanece fragmentada ou residual.

As SBN abrangem um amplo leque de escalas e tipologias de intervenção. À escala macro, incluem medidas como o planeamento de redes ecológicas regionais, a criação de parques urbanos e refúgios ambientais; à escala micro, englobam intervenções como a arborização de ruas ou a instalação de coberturas e fachadas verdes em edifícios, destinadas a mitigar o efeito de ilha de calor (Remme & Haarstad, 2022).

Quanto às tipologias, existe uma grande diversidade de soluções consoante o problema a mitigar ou. Estas podem incluir intervenções de renaturalização de zonas húmidas, bacias hidrográficas interiores ou costeiras, sistemas agroflorestais urbanos e hortas comunitárias, até espaços urbanos multifuncionais onde se destacam as Estruturas Verdes Funcionais (EVF).

As EVF correspondem a elementos vegetados naturais ou semi-naturais integrados na malha urbana que, além do seu valor estético, desempenham funções ambientais essenciais: melhoria da qualidade do ar, redução do ruído, captura de carbono, regulação térmica, gestão das águas pluviais, promoção da biodiversidade e reforço do bem-estar e da saúde da população. Exemplos de EVF incluem parques e jardins urbanos, corredores verdes, jardins de chuva, coberturas verdes e fachadas vegetadas.

Neste contexto, o presente sub-capítulo pretende aprofundar a compreensão e a disseminação das SBN, com enfoque nas Estruturas Verdes Funcionais enquanto componente fundamental do planeamento urbano sustentável. Com base em casos práticos, serão descritos os principais benefícios na melhoria da qualidade do ar, redução do ruído, conforto térmico, perceção social e bem-estar.

5.3.1. As estruturas verdes na mitigação do ruído urbano: Mecanismos, Eficiência e Implicações

A crescente urbanização tem intensificado os níveis de ruído ambiental, afetando negativamente a qualidade de vida nas cidades. O ruído urbano, proveniente sobretudo do tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, representa um problema de saúde pública reconhecido pela Organização Mundial

da Saúde, associando-se a distúrbios do sono, stress, doenças cardiovasculares e redução do bem-estar (Silva, 2015; WHO, 2018). Neste contexto, as estruturas verdes urbanas emergem como soluções sustentáveis e multifuncionais, não apenas pela sua contribuição ecológica e estética, mas também pelo seu potencial na atenuação do ruído. A sua eficácia baseia-se em vários mecanismos físicos e psicoacústicos, que se complementam na redução da percepção e da propagação sonora.

Um dos principais mecanismos envolvidos é a absorção sonora, que ocorre quando as ondas sonoras incidem sobre superfícies porosas, sendo parte da sua energia convertida em calor. No caso das estruturas verdes, os elementos vegetais – folhas, caules e substrato – funcionam como materiais fibrosos e porosos capazes de absorver significativamente a energia sonora (Van Renterghem & Botteldooren, 2009). A eficácia deste mecanismo depende de características como a densidade, espessura e humidade do material vegetal. Substratos húmidos e plantas com elevada área foliar, como heras (*Hedera spp.*), salgueiros (*Salix spp.*) ou fetos, tendem a apresentar maior capacidade de absorção, sobretudo em frequências médias a altas (Fang & Ling, 2003).

Outro processo relevante é a dispersão e difusão sonora, resultante da morfologia irregular das superfícies vegetadas. A presença de folhagem densa, ramos entrelaçados e variação vertical cria uma superfície tridimensional que promove a difração, dispersão e reflexão múltipla das ondas sonoras [35]. Esta fragmentação da propagação direta do som conduz à redução da intensidade sonora percebida, especialmente nas frequências médias, que são típicas do ruído urbano.

Além disso, as estruturas verdes funcionam como barreiras físicas ao som, criando zonas de sombra acústica onde a propagação direta do ruído é interrompida. Tal como as barreiras acústicas convencionais, sebes densas, paredes verdes ou corredores contínuos de vegetação atuam, embora com uma eficiência mais reduzida, como obstáculos que reduzem o nível de pressão sonora nas áreas protegidas (Horoshenkov, 2013). A eficácia deste sombreamento acústico é significativamente menor quando comparada com uma barreira/obstáculo rígido e depende da altura da barreira, espessura, continuidade vegetal e distância entre a fonte sonora, a vegetação e o recetor.

Em ambientes urbanos dominados por superfícies rígidas – como alvenaria, betão ou asfalto –, é comum ocorrer reverberação, um fenómeno em que o som se reflete repetidamente, amplificando-se e prolongando o tempo de ressonância. As estruturas vegetadas contribuem para a redução da reverberação, ao absorverem e dispersarem as ondas refletidas, atenuando o

ambiente sonoro global (Van Renterghem & Botteldooren, 2009). Este efeito é particularmente relevante em ruas estreitas com edifícios altos (canyon streets) e praças muradas, onde a reverberação tende a ser mais pronunciada.

Para além dos mecanismos físicos, as estruturas verdes têm impacto na percepção subjetiva do ruído, através de processos psicoacústicos. A presença de vegetação pode alterar a forma como o som é interpretado, tornando-o menos intrusivo ou mais tolerável (Jeon, 2010). Sons naturais associados às estruturas verdes, como o movimento do vento nas folhas, o som da água ou o canto de aves, podem mascarar o ruído urbano, reduzindo a sensação de incómodo – um fenómeno conhecido como efeito de mascaramento sonoro.

A eficácia global destas intervenções tem sido comprovada em vários estudos. Paredes verdes e sebes densas demonstraram capacidade de reduzir os níveis de ruído entre 5 e 15 dB, dependendo da configuração e da frequência do som (Van Renterghem & Botteldooren, 2009; Fang & Ling, 2003). Barreiras vegetais contínuas, como as Green Living Willow Barriers (Figura 29), mostraram-se ainda mais eficazes, atingindo reduções até 25–35 dB em frequências médias e baixas (Horoshenkov, 2013).



Figura 29 Green Living Willow Barriers. (imagem: etsluk.com)

Assim, as estruturas verdes urbanas constituem uma solução eficaz, ecológica e multifuncional para a mitigação do ruído ambiental, contribuindo simultaneamente para a saúde pública, o conforto urbano e a resiliência das cidades face aos desafios ambientais contemporâneos.

5.3.2. As estruturas verdes funcionais na mitigação da poluição atmosférica urbana

As Estruturas Verdes Funcionais (EVF) constituem um instrumento ecológico e sustentável para melhorar a qualidade do ar urbano, reduzindo a concentração de partículas e gases poluentes através de mecanismos naturais de filtração e absorção (Silva et al., 2025; Martins et al., 2021; Vitaliano et al., 2024).

Mecanismos de mitigação

As plantas reduzem a poluição atmosférica por dois processos principais (Wróblewska & Jeong, 2021):

- Trocas gasosas pelos estomas – pequenas aberturas nas folhas que absorvem gases como NO_2 , SO_2 e O_3 , integrando-os no metabolismo vegetal .
- Deposição de partículas – as folhas, ramos e caules capturam partículas finas (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$) por deposição seca ou húmida, removendo-as do ar circundante .

A eficácia destes processos depende de fatores como:

- morfologia urbana (altura dos edifícios, largura das ruas);
- características da vegetação (espécie, densidade e área foliar);
- condições climáticas locais (vento, humidade, temperatura);
- proximidade às fontes poluentes (tráfego, indústria).

Estudos demonstram que as EVF reduzem significativamente as concentrações de partículas em suspensão no ar. Em Chicago, as árvores acumulam cerca de 212 toneladas de PM_{10} por ano (McPherson et al., 1997). Em Londres, esse valor varia entre 850 e 2 100 toneladas anuais (Kareiva et al., 2013). Em Manchester, a acumulação é de 0,24 toneladas/ano (Speak et al., 2012).

As árvores de copa densa são mais eficientes na captura de partículas, mas vegetação arbustiva e herbácea, quando integrada em coberturas ou fachadas verdes, apresenta desempenhos complementares (Wang et al., 2024).

Relativamente aos poluentes gasosos, as EVF também contribuem para a sua remoção, embora de forma mais limitada. Na Suécia, florestas urbanas reduziram o NO_2 em 7% e o O_3 em 2% (Grundström & Pleijel, 2014). Em estudos conduzidos na China, registaram-se reduções de 14% a 36% em NO_x e de 21%

a 48% em SO_2 . Em Melbourne, a vegetação remove anualmente cerca de 68 kg de NO_2 , 22 kg de SO_2 , 9 kg de CO e 246 kg de O_3 (Jayasooriya et al., 2017).

As coberturas e fachadas verdes também apresentam capacidade mensurável de absorção de gases. As fachadas verdes podem absorver até 5 kg de NO_2 e 13 kg de O_3 por hectare/ano (Aduse-Poku & Edelmann, 2025). As coberturas verdes, dependendo da espécie e tipo de substrato, absorvem cerca de 9 kg/ha/ano de NO_2 e 14 kg/ha/ano de O_3 (Silva et al., 2025; Martins et al., 2021; Vitaliano et al., 2024). As coberturas intensivas mostram maior capacidade de remoção.

As Estruturas Verdes Funcionais são elementos-chave na mitigação da poluição urbana, atuando como biofiltros naturais que reduzem gases nocivos e partículas finas, melhoram a qualidade do ar e promovem ambientes urbanos mais saudáveis.

Embora o seu desempenho varie consoante o tipo, localização e espécies vegetais utilizadas, a integração planeada de vegetação em parques, corredores, coberturas e fachadas verdes constitui uma estratégia eficaz e sustentável para alcançar as metas europeias de poluição zero e reforçar a resiliência ambiental das cidades.

5.3.3. As Estruturas Verdes na Mitigação do Calor Urbano

A exposição ao calor extremo constitui atualmente uma das principais ameaças ambientais à saúde pública. O stress térmico é responsável por grande parte da mortalidade associada a fenómenos meteorológicos, e a sua frequência tem aumentado com o aquecimento global. Entre 2000 e 2019, estima-se que a exposição ao calor tenha provocado cerca de 0,5 milhões de mortes anuais, das quais 36% ocorreram na Europa (WHO, 2018).

As cidades, onde vive mais de metade da população mundial, são particularmente vulneráveis devido à combinação de dois fatores: o aquecimento global e o fenómeno da Ilha de Calor Urbana (ICU) – um aumento das temperaturas médias nos centros urbanos em comparação com as áreas rurais adjacentes. A ICU resulta da elevada concentração de superfícies impermeáveis (asfalto, betão), da escassa ventilação e da acumulação de calor nas estruturas urbanas durante o dia, libertado à noite. Em condições anticiclónicas, as diferenças podem atingir até 10 °C (Lauwaet et al., 2024).

Os efeitos do calor urbano são agravados durante ondas de calor, com impactos desproporcionados sobre grupos vulneráveis como idosos, crianças

e pessoas com doenças crónicas. Recorde-se que a onda de calor de 2003 causou cerca de 70 000 mortes na Europa, e as de 2022 mais de 62 000 (WHO, 2018).

O aquecimento global está diretamente ligado aumento das emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis. Por essa razão, as políticas europeias de mitigação – nomeadamente o Pacto Ecológico Europeu (Green Deal) – estabelecem metas ambiciosas de redução de 55% das emissões até 2030 e de neutralidade carbónica até 2050 . A expansão das áreas verdes urbanas é uma das estratégias fundamentais para atingir esses objetivos, ao reduzir a temperatura e ao promover cidades mais resilientes e habitáveis.

Contributo das Estruturas Verdes Funcionais (EVF)

As Estruturas Verdes Funcionais (EVF) desempenham um papel central na regulação térmica urbana e na mitigação dos efeitos da ilha de calor. A vegetação contribui para o arrefecimento através de três mecanismos principais:

- Evapotranspiração: processo pelo qual as plantas libertam vapor de água, dissipando energia térmica e aumentando a humidade relativa.
- Sombreamento: redução da radiação solar direta e da temperatura superficial dos materiais .
- Alteração da rugosidade urbana: melhoria da ventilação e dos fluxos convectivos locais.

A eficácia das EVF depende da escala, tipo de vegetação e condições climáticas locais.

Parques urbanos de grande dimensão (>10 ha) podem reduzir a temperatura do ar entre 1 °C e 2 °C, com efeito de arrefecimento até 400 m de distância (Feng & Cheng, X, 2021).

Parques de menor dimensão ou “de bolso”, quando estrategicamente distribuídos a menos de 300 m entre si, conseguem replicar este efeito e reduzir a temperatura do ar em cerca de 1,2 °C e a temperatura superficial em até 4 °C (Zhou et al., 2025; Guo et al., 2024)..

A configuração espacial e a conectividade ecológica dos espaços verdes, através de corredores verdes, amplificam o arrefecimento urbano.

As coberturas e fachadas verdes são igualmente eficazes como isolantes térmicos (Figura 30). Reduzem as trocas de calor entre edifícios e ambiente exterior, melhorando o conforto interior e diminuindo o consumo energético em climatização:

- As coberturas verdes podem reduzir a temperatura interior até 15 °C e proporcionar poupanças energéticas anuais de 67% em zonas temperadas e 75% em zonas tropicais (Fotiadi, et al., 2023).
- As fachadas verdes podem reduzir a temperatura superficial entre 8 °C e 16 °C, dependendo da densidade vegetal e das condições locais (Blanco et al., 2019; Pérez et al., 2017).

Para além do arrefecimento direto, as EVF contribuem para a mitigação climática global através do sequestro de carbono. As árvores urbanas são os principais sumidouros, armazenando carbono nos troncos, ramos e raízes. Estudos em várias cidades europeias mostram taxas de sequestro entre 1 e 3,6 t de CO₂/ha/ano (Baró & Baggethun, 2017), valores comparáveis a outras estratégias locais de mitigação energética.



Figura 30 Coberturas e paredes verdes. (imagem: cbsrenovation.nl)

As coberturas e fachadas verdes também participam neste processo, embora em menor escala. Podem sequestrar entre 0,3 e 11 kg CO₂/m²/ano, dependendo do tipo de substrato e vegetação (Shafique et al., 2020), e até 28 kg CO₂/m²/ano em condições ideais (Jozay et al., 2024).

Apesar do contributo significativo, o impacte compensatório direto das EVF face às emissões urbanas é ainda limitado. Contudo, o aumento da vegetação urbana, associado à redução de emissões e à eficiência energética, constitui uma estratégia integrada fundamental para alcançar a neutralidade carbónica e melhorar o conforto térmico e a qualidade de vida nas cidades.

5.3.4. A percepção social sobre as Estruturas Verdes Funcionais

As percepções refletem as crenças e interpretações que as pessoas constroem sobre o seu ambiente quotidiano, influenciando a forma como utilizam e valorizam os espaços urbanos. Aspetos como segurança, conforto térmico, acessibilidade e qualidade ambiental moldam comportamentos e preferências, determinando o grau de apropriação e utilização dos espaços verdes (Fonseca et al., 2024).

Compreender as percepções e motivações da população relativamente à vegetação urbana é essencial para promover a aceitação social das EVF e apoiar políticas de planeamento urbano mais participativas e eficazes.

Fatores que influenciam a percepção

De forma geral, a literatura evidencia uma percepção amplamente positiva sobre as EVF, frequentemente descritas como “oásis” ou “pulmões verdes” das cidades (Silva et al., 2019). No entanto, estas percepções variam segundo dois grandes grupos de fatores: Fatores individuais e tipo EVF.

Fatores individuais: género, idade, rendimento e nível de escolaridade

Mulheres e pessoas idosas tendem a sentir maior insegurança em parques e jardins, sobretudo à noite ou em locais afastados. Por outro lado, as mulheres valorizam mais o carácter estético e o bem-estar emocional, enquanto a população idosa aprecia o contacto com a natureza e a tranquilidade. Grupos com menores rendimentos ou escolaridade são geralmente menos ativos nestes espaços.

Fatores relacionados com as próprias EVF

A qualidade e manutenção são aspetos determinantes para a percepção positiva dos espaços verdes. A acessibilidade e proximidade incentivam o uso frequente e associam-se a melhor bem-estar e saúde percebida. O tamanho também influencia a preferência – parques com mais de 2 hectares tendem a ser os mais visitados.

Percepção de diferentes tipologias de EVF

Embora a maioria dos estudos se concentre em parques e jardins, há também evidência sobre fachadas verdes e coberturas verdes.

Em Sevilha, a instalação de uma fachada verde num hospital gerou reações positivas em 82% dos utentes, com melhoria do bem-estar psicológico (Urrestarazu et al., 2017). Estudos na China e em Chipre mostraram elevada aceitação, sobretudo entre jovens, pela percepção de redução da temperatura e melhoria do ambiente urbano promovidos pela adoção destas estruturas.

Sobre a adoção de coberturas verdes a investigação é mais limitada, mas aponta para percepções favoráveis, associadas a benefícios ambientais e conforto térmico. A falta de informação sobre custos de instalação e manutenção continua, contudo, a limitar a sua aceitação.

Em síntese, a percepção social das EVF é predominantemente positiva, mas fortemente influenciada por fatores culturais, socioeconómicos e pela qualidade da própria infraestrutura. Conhecer estas percepções é essencial para desenhar estratégias de planeamento urbano inclusivas e sustentáveis.

5.3.5. Bem-estar da população associado às Estruturas Verdes Funcionais

O crescimento urbano intensivo tem colocado novos desafios à qualidade de vida nas cidades, tornando as EVF componentes essenciais para a promoção do bem-estar físico, psicológico, mental e social das populações.

Dimensões do bem-estar e contributo das EVF

Bem-estar físico: Os espaços verdes estimulam a atividade física – caminhar, correr ou andar de bicicleta – e estão associados a menor frequência cardíaca e pressão arterial, indicadores de relaxamento e menor stress. Durante a pandemia de Covid-19, o acesso a parques e jardins foi crucial para o bem-estar físico e mental das populações. Estruturas como fachadas verdes também promovem relaxamento, reduzindo a condutância da pele e o batimento cardíaco (Elsadek et al., 2019).

Bem-estar psicológico e mental: A presença de vegetação contribui para melhorar o humor, reduzir o stress e aumentar a autoestima. Estudos em várias cidades europeias demonstram que a interação com espaços verdes reduz sintomas de depressão e ansiedade, sobretudo através do contacto

direto com a natureza e da melhoria da qualidade ambiental. Atividades como jardinagem em paredes verdes também reduzem stress e fomentam socialização e satisfação pessoal (Elsadek et al., 2019).

Bem-estar social: As EVF funcionam como espaços de encontro e convivência, promovendo coesão social, inclusão e equidade no acesso ao espaço público. A utilização regular destes espaços contribui para reduzir o isolamento social e reforçar os laços comunitários.

Bem-estar ambiental: As EVF melhoram a qualidade do ar, o conforto térmico e o ambiente sonoro, aspetos que a população identifica como os principais benefícios das estruturas verdes.

As Estruturas Verdes Funcionais assumem um papel central na promoção do bem-estar multidimensional das populações urbanas. Ao integrar a natureza no tecido construído, estas infraestruturas reduzem o stress, promovem estilos de vida ativos, fortalecem a coesão social e contribuem decisivamente para cidades mais saudáveis, sustentáveis e humanas.

Referências

- Aduse-Poku, M., & Edelmann, H. (2025). Quantifying the potential of façade climbing plants in reducing air pollution: a novel investigation into the absorption capabilities of three climbers for CO₂, NO₂, and O₃ in urban environments. *Urban Ecosystems*, 28(2), e76.
- Anderson, V., & Gough, W. (2022). A typology of nature-based solutions for sustainable development: an analysis of form, function, nomenclature, and associated applications. *Land*, 11(7), e1072.
- Arbid, Y., Richard, C., & Sleiman, M. (2021). Towards an experimental approach for measuring the removal of urban air pollutants by green roofs. *Building and Environment*, 205, e108286.
- Barber, J. R., Crooks, K. R., & Fristrup, K. M. (2010). The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(3), 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.08.002>.
- Baró, F., & Baggethun, E. (2017). Assessing the potential of regulating ecosystem services as nature-based solutions in urban areas. In Kabisch et al. (Eds.), *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: linkages between science, policy and practice* (pp. 15-27). Springer International Publishing.
- Basner, M., Clark, C., Hansell, A., Hileman, J. I., Janssen, S., Shepherd, K., & Sparrow, V. (2017). Aviation Noise Impacts: State of the Science. *Noise & health*, 19(87), 41–50. https://doi.org/10.4103/nah.NAH_104_16.
- Bernardini, M., Fredianelli, L., Fidecaro, F., Gagliardi, P., Nastasi, M., & Licitra, G. (2019). Noise Assessment of Small Vessels for Action Planning in Canal Cities. *Environments*, 6(3), e31. <https://doi.org/10.3390/environments6030031>.
- Blanco, I., Schettini, E., & Vox, G. (2019). Predictive model of surface temperature difference between green façades and uncovered wall in Mediterranean climatic area. *Applied Thermal Engineering*, 163, e114406.
- C40 Cities (s.d.) *Good practice guide: low-emission vehicles*. <https://www.c40.org/pt/case-studies/c40-good-practice-guides-london-charging-zones-to-promote-ulevs/>.
- Cesaroni, G., Boogaard, H., Jonkers, S., Porta, D., Badaloni, C., Cattani, G., Forastiere, F., & Hoek, G. (2012). Health benefits of traffic-related air pollution reduction in different socioeconomic groups: the effect of low-emission zoning in Rome. *Occupational and Environmental Medicine*, 69(2), 133–139. <https://doi.org/10.1136/oem.2010.063750>.
- Comissão Europeia (2021) Zero pollution targets. https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan/zero-pollution-targets_en.
- Comissão Europeia (2023) *Emissions in the automotive sector*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/environmental-protection/emissions-automotive-sector_en.

- Dai, B., Sheng, N., Zhao, W., Mu, F., & He, Y. (2020). Evaluation of urban inland waterway traffic noise using a modified Nord 2000 prediction model. *Environmental Research*, 185, e109437.
- Elsadek, M., Liu, B., & Lian, Z. (2019). Green façades: Their contribution to stress recovery and well-being in high-density cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, e126446.
- Europe's Rail. (2019, September 25). Mission and Objectives. Europe's Rail. <https://rail-research.europa.eu/about-shift2rail/mission-and-objectives/>.
- European Environment Agency [EEA] (2018). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives* - TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report, Luxembourg.
- European Environment Agency [EEA] (2020). *Environmental noise in Europe – 2020*.
- Fang, C. F., & Ling, D. L. (2003). Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 63(4), 187–195.
- Feng, X., & Cheng, X. (2021). Cooling effect of urban green spaces: A case study of 20 parks in Beijing. *Sustainability*, 13(4), e2221.
- Fonseca, F., Papageorgiou, G., Conticelli, E., Jabbari, M., Ribeiro, P. J., Tondelli, S., & Ramos, R. (2024). Evaluating attitudes and preferences towards walking in two European cities. *Future Transportation*, 4(2), 475-490.
- Fotiadi, A., Paravantis, J., Souliotis, M., & Mihalakakou, G. (2023). Sustainable urban environment through green roofs: A literature review with case studies. *Sustainability*, 15(22), e15976.
- Grundström, M., & Pleijel, H. (2014). Limited effect of urban tree vegetation on NO₂ and O₃ concentrations near a traffic route. *Environmental Pollution*, 189, 73-76.
- Guo, H., Liu, Y., & Sun, R. (2024). Spatial configuration of urban green infrastructure and its effects on cooling: A meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 19(1), e015002.
- Hanson, C. E., Jason, P. E., Ross, C., & Towers, D. A. (2012). *High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment*. <https://railroads.dot.gov/elibrary/high-speed-ground-transportation-noise-and-vibration-impact-assessment>.
- Hofbauer, F., & Putz, L. M. (2020). External costs in inland waterway transport: An analysis of external cost categories and calculation methods. *Sustainability*, 12(14), e 5874.
- Horoshenkov, K. V., Hothersall, D. C., & Mercy, S. E. (2013). Acoustic performance of a living willow barrier. *Applied Acoustics*, 74(11), 1236–1245.
- Institute for European Environmental Policy [IEEP] (2020). *Workshop on mobilizing up-scaling of nature-based solutions for climate change throughout 2020 and beyond*, 4-5 February, Brussels.

Infraestruturas de Portugal. (n.d.). *Estratégia Rede Ferroviária Nacional (RFN) 2014-2050*. <https://81-90-53-65.addr.refertelecom.pt/rede/ferroviaria/desenvolvimento-da-rede/estrategia-14-50>.

Irvine, K. N., Devine-Wright, P., Payne, S. R., Fuller, R. A., Painter, B., & Gaston, K. J. (2009). Green space, soundscape and urban sustainability: An interdisciplinary, empirical study. *Local Environment*, 14(2), 155–172.

Jayasooriya, V., N. A., Muthukumaran, S., & Perera, B. (2017). Green infrastructure practices for improvement of urban air quality. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 34-47.

Jeon, J. Y., Lee, P. J., You, J., & Kang, J. (2010). Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(3), 1357–1366.

Jozay, M., Zarei, H., Khorasaninejad, S., & Miri, T. (2024). Maximising CO2 sequestration in the city: the role of green walls in sustainable urban development. *Pollutants*, 4(1), 91-116.

Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T., Daily, G., & Polasky, S. (2013). *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford University Press.

Lauwaet, D., Berckmans, J., Hooyberghs, H., Wouters, H., Driesen, G., Lefebvre, F., De Ridder, K. (2024). High resolution modelling of the urban heat island of 100 European cities. *Urban Climate*, 54, e101850.

Martins, M., Hadba, L., Mendonça, P., & Silva, L. T. (2021). Evaluating the potential of vegetation to capture pollutants in urban environment. In *Asia Conference on Environment and Sustainable Development* (virtual conference), 6-8 November.

McPherson, E., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., & Rowntree, R. (1997). Quantifying urban forest structure, function, and value: The Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ccosystems*, 1(1), 49-61.

Menon, J., & Sharma, R. (2021). Nature-based solutions for co-mitigation of air pollution and urban heat in Indian cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, e705185.

Molloy, A., Collier, M., & Buckley, Y. (2024). Identification and assessment of best practice in nature-based solutions for climate action and ecosystem restoration in Ireland. Climate Change Advisory Council Working Paper. <https://www.climatecouncil.ie/councilpublications/council-workingpaperseries/identification%20and%20assessment%20of%20best%20practice%20in%20nature-based%20solutions%20for%20web.pdf>.

Murphy, E., & King, E. A. (2014). Environmental Noise Pollution: Noise Mapping, Public Health, and Policy, Environ. Noise Pollut. Noise Mapping, Public Heal. Policy, pp. 1–268.

OECD. (1995). *Roadside noise abatement*. Organisation for Economic Co-operation and Development Publications.

Parlamento Europeu (2021). Fichas técnicas sobre a União Europeia - Poluição atmosférica e poluição sonora.

Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424-437.

Popper, A. N., Hawkins, A. D., & Thomsen, F. (2020). Taking the Animals' Perspective Regarding Anthropogenic Underwater Sound. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(9), pp. 787–794.

Remme, D., & Haarstad, H. (2022). From instrumentalization to commoning: A critical review of participation in urban nature-based solutions. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, e917607.

Ribeiro, N. M. P. (2009). Barreiras sonoras em alta velocidade ferroviária. [Dissertação de Mestrado publicada]. Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/bits-tream/10216/60073/1/000136599.pdf>.

Rupprecht Consult (Ed.) (2019). Guidelines for Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan (2nd Edition). https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-09/sump_guidelines_2019_second%20edition.pdf.

Shafique, M., Xue, X., Luo, X. (2020). An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126515.

Silva, L. T. (2007) *Avaliação da Qualidade Ambiental Urbana* [Tese de doutoramento publicada]. Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/7515>.

Silva, L. T. (2009). Gestão Ambiental Urbana [Sebenta da unidade curricular do Mestrado em Gestão Ambiental Urbana, material de apoio às aulas]. Universidade do Minho.

Silva, L. T. (2012). *Qualidade do Ambiente Construído* [Sebenta da unidade curricular do Mestrado em Engenharia Civil, material de apoio às aulas]. Universidade do Minho.

Silva, L. T. (2015) Environmental quality health index for cities. *Habitat International*, 45(P1), 29-35. <http://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.020>

Silva, L. T., & Mendes, J. F. G. (2012). City noise–air: An environmental quality index for cities. *Sustainable Cities and Society*, 4(1), 1–11.

Silva, L. T., Magalhães, A., Silva, J. F., & Fonseca F. (2021). Impacts of low-frequency noise from industrial sources in residential areas, *Applied Acoustics*, 182, e108203. <https://hdl.handle.net/1822/75413>.

Silva, L., Fonseca, F., Pires, M., & Mendes, B. (2019). SAUS: A tool for preserving urban green areas from air pollution. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46, 126440.

- Silva, L., Lopes, H., Silva, J., Reis, C., & Fonseca, F. (2025). The nexus of nature-based solutions and sustainability in cities: vegetation's impact on particulate matter capture and traffic noise reduction. In *Occupational and Environmental Safety and Health VI: Volume 1: Occupational Risk Assessment, Management and Case Studies* (pp. 411-422). Springer Nature Switzerland.
- Speak, A., Rothwell, J., Lindley, S., & Smith, C. (2012). Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmospheric Environment*, *61*, 283-293.
- Urrestarazu, L., Blasco-Romero, A., & Fernández-Cañero, R. (2017). Media and social impact valuation of a living wall: The case study of the Sagrado Corazon hospital in Seville (Spain). *Urban Forestry & Urban Greening*, *24*, 141-148.
- van Breemen, T., Blikman, A., van Vulpen, N., & Smit, R. (2008). Good Practice Guide on Port Area Noise Mapping and Management, Amsterdam.
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment*, *44*(5), 1081–1087.
- Vitaliano, S., Cascone, S., & D'Urso, P. (2024). Mitigating built environment air pollution by green systems: An in-depth review. *Applied Sciences*, *14*(15), 6487.
- Vos, P. de (2016). Railway noise in Europe - State of the art report.
- Wang, A., Wang, J., Zhang, R., & Cao, S. (2024). Mitigating urban heat and air pollution considering green and transportation infrastructure. *Transportation Research Part A*, *84*, 104079.
- World Health Organization [WHO] (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.
- Wróblewska, K., & Jeong, B. (2021). Effectiveness of plants and green infrastructure utilization in ambient particulate matter removal. *Environmental Sciences Europe*, *33*(1), 110.
- Zhou, S., Yu, Z., Ma, W., Yao, X., Xiong, J., Ma, W., Xiang, S., Yuan, Q., Hao, Y., Xu, D., Wang, B., Zhao, B. (2025). Vertical canopy structure dominates cooling and thermal comfort of urban pocket parks during hot summer days. *Landscape and Urban Planning*, *254*, e105242.

Parte II

Aplicações

6. O CityAir e o CityNoise-Air (Viana do Castelo)

6.1. Enquadramento

A sustentabilidade dos sistemas urbanos de uma cidade assenta na caracterização e avaliação de três pilares fundamentais: económico, social e ambiental. Desta forma, defende-se que o este sistema deve ser economicamente viável, não comprometendo o desenvolvimento económico e a competitividade, ser socialmente justo, promovendo uma sociedade inclusiva e equilibrada e ambientalmente tolerável, garantindo um ambiente limpo e saudável.

Nesse sentido, o município de Viana do Castelo pode ser considerado um caso particular no panorama nacional, uma vez que já em 2007 integrava a Rede Nacional de Cidades Saudáveis, apresentando uma forte preocupação com a avaliação e monitorização da qualidade ambiental do espaço da sua urbe (Torres et al., 2013).

No âmbito da elaboração do Plano de Mobilidade Sustentável para a cidade de Viana do Castelo, destacam-se dois pontos fulcrais: a qualidade de vida e a preocupação com os impactes ambientais sobre a população residente do atual sistema de transportes que serve a cidade, visando atingir elevados padrões de sustentabilidade urbana.

6.2. Objetivos do projeto

O objetivo do projeto *CityAir / CityNoise-Air* era avaliar a qualidade ambiental urbana da cidade de Viana do Castelo em termos de poluição atmosférica e de ruído. Para tal, foi necessário primeiramente obter dados das principais fontes de poluição e avaliar o ruído e a poluição atmosférica separadamente.

Para efeitos da avaliação do impacte do ruído, o objetivo era produzir mapas de ruído para o período composto diurno-entardecer-noturno (L_{den}) e para o período noturno (L_n), a fim de serem confrontados com a população residente, permitindo desta forma avaliar o nível de exposição da mesma e definir zonas de criticidade acústica. Devido às características de sazonalidade da cidade, foram avaliados dois cenários, o de Verão e o de Inverno.

Em termos de caracterização e avaliação dos impactes da poluição atmosférica, pretendeu-se determinar as concentrações espaciais dos principais

poluentes atmosféricos urbanos: Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O₃), Dióxido de Azoto (NO₂), Partículas (PM₁₀), Benzeno (C₆H₆) e Dióxido de Carbono (CO₂), e a partir deles desenvolver um Índice de Qualidade, que permitisse avaliar de forma integrada a qualidade do ar de Viana do Castelo, o cityAIR. Para além disso, também pretendeu-se confrontar os resultados com a população residente e identificar as zonas de criticidade de poluição atmosférica.

Por fim, com vista à avaliação da qualidade do ambiente global da cidade foi desenvolvido um modelo composto: *CityNoise-Air* que agrega a qualidade do ar e a qualidade acústica da cidade e encontra-se ancorado por via da normalização aos limites estabelecidos na lei para a poluição atmosférica e para o ruído.

Este modelo constituiu uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de políticas e planos de ação orientados para a criação de cidades mais sustentáveis, conducentes a espaços urbanos mais limpos e saudáveis.

O modelo de avaliação utilizado neste projeto foi desenvolvido no contexto de uma tese de doutoramento (Silva, 2007; Silva & Mendes, 2012) realizada na Universidade do Minho.

6.3. Estratégia do projeto

Avaliação da Qualidade do Ar: CityAir

A monitorização ambiental é uma das preocupações do município de Viana do Castelo. O controlo das emissões e da concentração dos diferentes poluentes atmosféricos emitidos pelas principais fontes de poluição urbana, nomeadamente a proveniente por motores de combustão e a vigilância da qualidade do ar da cidade permitem avaliar o impacte local e global da mobilidade, da atividade industrial, bem como potenciais efeitos da contaminação sobre a saúde dos cidadãos.

A metodologia seguida na avaliação da qualidade do ar resumiu-se a cinco fases:

1. Medição da concentração de poluentes atmosféricos através de medições de campo e recurso a um software de dispersão de poluentes;
2. Elaboração dos Mapas de Poluentes Atmosféricos (concentração de NO₂, CO, CO₂, O₃, PM₁₀ e C₆H₆);

3. Desenvolvimento e cálculo do índice de qualidade do ar (*CityAIR*);
4. Elaboração da Carta de Qualidade do Ar;
5. Avaliação da população exposta.

Avaliação do Ruído

À semelhança do que acontece com a avaliação da qualidade do ar, a metodologia seguida na avaliação do ruído resumiu-se a quatro fases:

1. Avaliação do ruído através de medições de campo com sonómetro classe 1 e recurso a um software de previsão de ruído;
2. Elaboração dos Mapas de Ruído da cidade;
3. Elaboração da Carta de Criticidade Acústica;
4. Avaliação da população exposta.

Dadas as características de sazonalidade da cidade de Viana do Castelo, na avaliação do ruído e da qualidade do ar foram desenvolvidos dois cenários um representativo do Verão e outro do Inverno.

Avaliação da Qualidade Ambiental Global da cidade: City Noise-Air

Foi desenvolvido um indicador composto: *CityNoise-Air* que permite a avaliação combinada de ruído e poluição do ar dentro de um contexto urbano, e apresenta um estudo de aplicação em uma cidade portuguesa de médio porte. Este indicador agrega a qualidade do ar e a qualidade acústica da cidade e encontra-se ancorado por via da normalização aos limites estabelecidos na lei para a poluição atmosférica e para o ruído.

Combinando, pelo procedimento WLC, a variável L_{den} normalizada, adiante denominada por Índice de Ruído, *CityNoise*, com o índice *CityAir* (variável também normalizada), e assumindo pesos iguais para ambos (contribuição igual do ruído e da poluição atmosférica para a qualidade ambiental global), obtém-se o *CityNoise-Air*, através da equação 1.

$$CityNoise-Air = 0,5 \times CityNoise + 0,5 \times CityAir \quad \text{Equação 1}$$

O valor numérico do índice *CityNoise-Air* varia entra 0 e 1. Uma área possui *CityNoise-Air* igual a zero quando o L_{den} se encontra acima dos limites legais e/ou pelo menos um dos poluentes atmosféricos incluídos no índice *CityAir*

ultrapassa o limite legal. Uma área possui *CityNoise-Air* igual a um quando o *Lden* tem um valor inferior ao limite de *Ln* (para zona, conforme o caso) e também todos os valores de concentração dos poluentes atmosféricos incluídos no *CityAir* são iguais ou inferiores aos valores recomendados pela OMS.

6.4. Intervenientes no processo

As entidades envolvidas neste projeto foram as seguintes:

- Universidade do Minho;
- Câmara Municipal de Viana do Castelo (CMVC);
- Gabinete Cidade Saudável da CMVC;
- Escola Superior de Tecnologia e Gestão do IPVC.

6.5. Principais recursos utilizados

Os recursos diretamente envolvidos na execução deste projeto listam-se abaixo.

- Sonómetro integrador, calibrador dedicado e tripé;
- Estação móvel de medição de poluentes atmosféricos e estação meteorológica;
- Software de previsão de ruído;
- Software de dispersão de poluentes;
- Sistema de Informação Geográfico;
- Autocad;
- Cartografia da cidade.

6.6. Acompanhamento e principais resultados

Dadas as características de sazonalidade da cidade estudada, desenvolveram-se dois cenários, ambos de longo termo - um representativo do Verão e outro do Inverno. Produziram-se, para cada um dos cenários, mapas de ruído e mapas de concentrações dos poluentes atmosféricos, procedendo-se

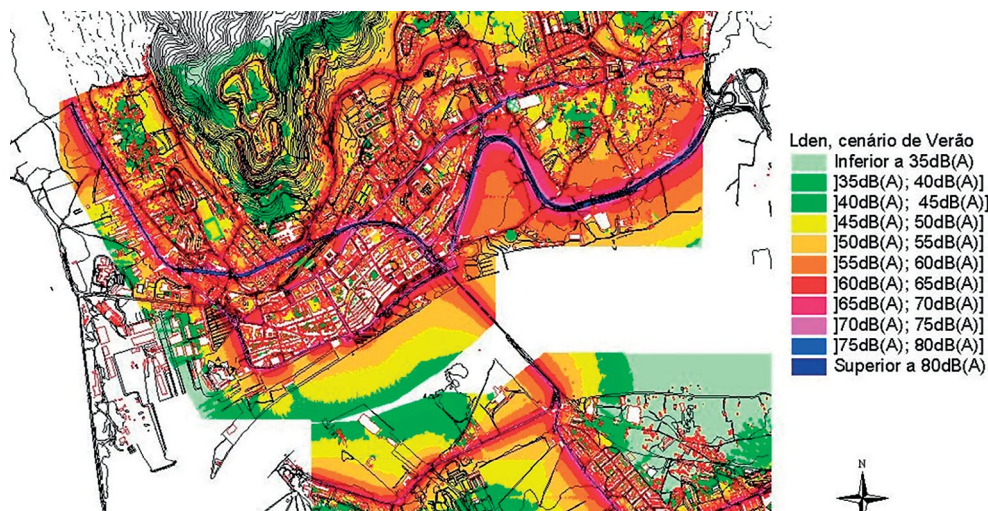


Figura 31 L_{den} , cenário de verão.

subsequentemente ao seu cruzamento com os limites legais e com a população residente. Esta combinação foi a base para a identificação das zonas de criticidade acústica e de criticidade de poluição atmosférica, respetivamente em termos de níveis de ruído e concentrações dos poluentes estudados, e dos índices de exposição da população a esses níveis de poluição (Torres et al., 2013).

Ruído Ambiental

A situação acústica da cidade de Viana do Castelo para os períodos dia-entardecer-noite do cenário de Verão é ilustrada na Figura 31 e é sintetizada através da Tabela 4.

Tabela 4 Síntese da população e território expostos ao ruído acima do limite legal do Regulamento Geral do Ruído (RGR).

Freguesias urbanas	Cenário de Verão				Cenário de Inverno			
	L_{den} dB(A)		L_n dB(A)		L_{den} dB(A)		L_n dB(A)	
	População	Área	População	Área	População	Área	População	Área
Areosa	12,6%	12,4%	15,6%	14,9%	10,2%	10,2%	9,9%	9,9%
Darque	11,7%	5,8%	13,3%	6,5%	10,4%	4,6%	10,5%	4,8%
Meadela	11,8%	24,7%	9,9%	23,5%	7,1%	16,6%	6,9%	15,9%
Monserate	20,1%	19,1%	23,5%	22,2%	18,7%	17,5%	18,5%	17,2%
Stª M.Maior	25,5%	34,1%	29,5%	38,2%	22,6%	31,6%	23,3%	31,6%

A cidade de Viana do Castelo é uma cidade pouco ruidosa. Os dados apurados representados levam-nos a concluir que a freguesia urbana de Monserrate-Santa Maria Maior é a que se apresenta com pior clima acústico, seguindo-se a Meadela e Areosa e por fim Darque.

Relativamente ao centro histórico (zona pedonal), verifica-se que se encontra, de uma forma geral, em conformidade com o RGR, em qualquer dos dois cenários analisados bem como nos períodos composto dia-entardecer-noite e noite.

O modelo de previsão de ruído permitiu quantificar de forma contínua no espaço os níveis de ruído existentes na cidade, possibilitando também o cálculo da população exposta aos níveis de incomodidade acústica. Os dados de ruído e de população, combinados através do índice de criticidade acústica, permitiram identificar zonas críticas que deverão assumir um estatuto de primeira prioridade num plano de mitigação futuro. Os resultados determinados revelam e atestam os fenómenos existentes no espaço urbano, nomeadamente os relacionados com as principais fontes de ruído urbano – o tráfego automóvel.

Poluição Atmosférica: CityAir

Dos poluentes avaliados, somente o NO_2 apresentava valores acima dos limites legais nos cenários de Inverno e Verão. As concentrações de PM_{10} , NO_2 , CO , CO_2 e C_6H_6 encontram-se mais elevadas nas zonas adjacentes às vias de maior tráfego (via que atravessa a cidade e via marginal). Exceção feita ao Ozono, por se tratar de um poluente secundário, as concentrações mais elevadas não se encontram sobre as vias (Torres et al., 2013).

O índice de qualidade do ar, cityAir, classifica a qualidade do ar da cidade e varia consoante as concentrações dos 5 poluentes urbanos principais: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azoto (NO_2), Ozono (O_3), Benzeno (C_6H_6) e Partículas (PM_{10}).

Para cada área, é considerada para além das concentrações dos poluentes, uma variável binária, que assume o valor 1 no caso da respetiva concentração estar abaixo do limite e o valor zero no caso de haver violação de limite.

Este modelo implementa-se através da Equação 2 que combina uma média ponderada (somatório das concentrações ponderadas pelos pesos) com o efeito neutro/absorvente da variável binária de violação ao limite legal (produtório das variáveis binárias):

$$CityAir = \sum_i w_i c_i \times \prod_i v_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

w_i – é o peso relativo do poluente i ;

c_i – concentração normalizada do poluente i ;

v_i – variável binária de violação do limite para o poluente i ;

L_i – Limite legal do poluente i ;

em que:

$v_i = 1$ se $c_i \leq L_i$

$v_i = 0$ se $c_i > L_i$

Aos valores numéricos do índice de qualidade do ar, que variam entre 0.0 e 1.0, são associadas menções qualitativas de qualidade, que variam entre Muito Boa e Muito Fraca, de acordo com a Tabela 5 (Torres et al., 2013).

Tabela 5 Classificação da Qualidade do Ar.

Valor do Índice <i>cityAir</i>	Qualidade do ar
0	Muito Fraca
]0 ; 0,35[Fraca
[0,35 ; 0,65[Média
[0,65 ; 0,85[Boa
[0,85 ; 1,0]	Muito Boa

A Figura 32 ilustra o índice de qualidade do ar, na cidade de Viana do Castelo, para o cenário mais desfavorável – cenário de Verão, calculado de acordo com a Equação 2.

Em termos de qualidade do ar, o cálculo do índice proposto *cityAir* mostra que à exceção de uma área limitada, a qualidade do ar na cidade de Viana do Castelo é Boa ou Muito Boa. Esta situação é ainda mais favorável no

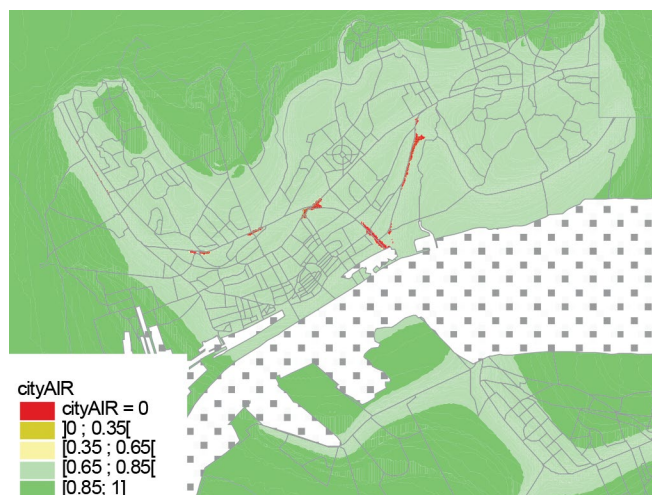


Figura 32 CityAir, cenário de verão.

cenário de Inverno e, em termos espaciais, merece destaque o claro benefício que a pedonalização do centro histórico acarreta.

Pelo contrário, a qualidade de ar Muito Fraca localiza-se pontualmente na Avenida 25 de Abril e na via de acesso poente ao IC1, devendo-se às concentrações de NO_2 que ultrapassam o limite legal originando um índice *cityAir* igual a zero, no Verão.

As concentrações das espécies de poluentes que serviram de base ao cálculo do *cityAir* são médias de longo termo (médias anuais), isto é, são representativas da qualidade média da atmosfera urbana. Dos resultados obtidos concluiu-se existirem 3 zonas que apresentam tendencialmente qualidade de ar mais fraca, propondo-se, por essa razão, a consideração destas zonas com um estatuto de primeira prioridade num plano de mitigação futuro.

Qualidade Ambiental Global da cidade: CityNoise-Air

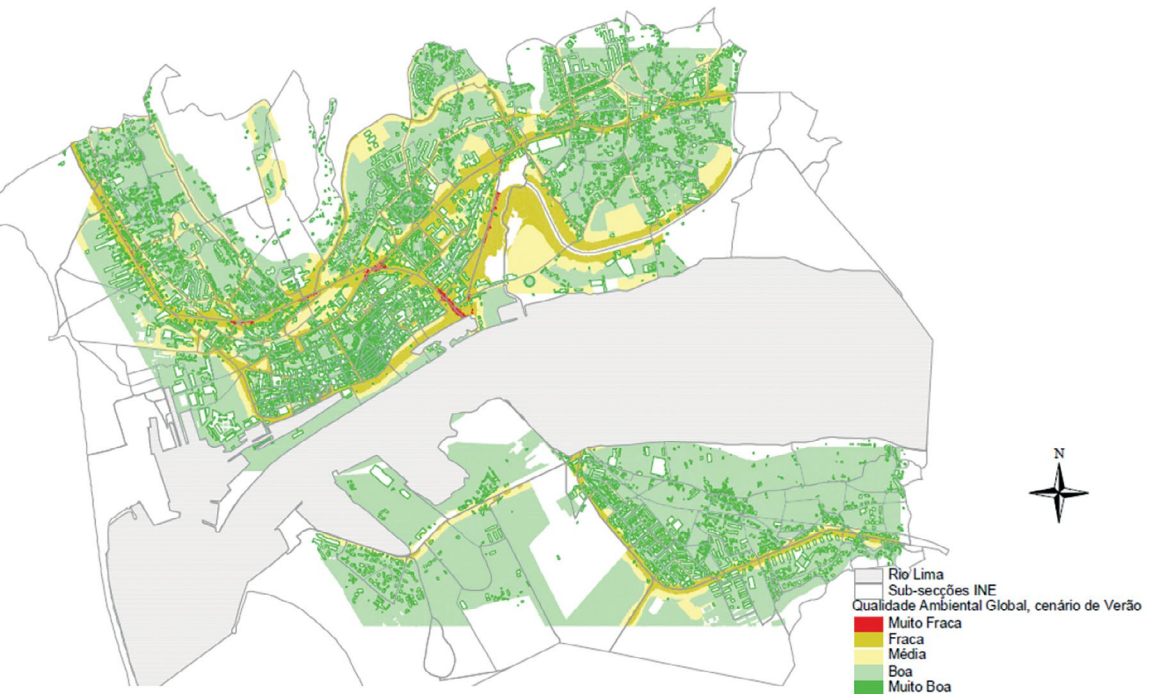
A avaliação da qualidade ambiental global da cidade de Viana do Castelo baseou-se na avaliação combinada da qualidade acústica e qualidade do ar, tendo-se desenvolvido um indicador *CityNoise-Air* resultante da combinação da qualidade do ruído e da qualidade do ar.

O *CityNoise-Air* varia de Muito Bom a Muito Fraco de acordo com o valor do índice previamente calculado através da Equação 1 (Tabela 6).

Tabela 6 Classificação qualitativa do *City Noise-Air*.

CityNoise-Air	Menção qualitativa
[0 ; 0,2[Muito Fraca
[0,2 ; 0,4[Fraca
[0,4 ; 0,6[Média
[0,6 ; 0,8[Boa
[0,8 ; 1]	Muito Boa

Após classificação qualitativa, obtêm-se os mapas da Qualidade Ambiental Global da cidade de Viana do Castelo. A Figura 33 ilustra o cenário mais problemático.

**Figura 33** Qualidade da cidade: *CityNoise-Air*, cenário de verão.

O índice de Qualidade Ambiental Global (*CityNoise-Air*) ilustrado espacialmente através do mapa da Figura 33 agrega a qualidade do ar e a qualidade

acústica da cidade e encontra-se ancorado por via da normalização aos limites estabelecidos na lei para a poluição atmosférica e para o ruído (Silva & Mendes, 2012).

Sob este ponto de vista (*CityNoise-Air*), propõem-se como áreas prioritárias de mitigação e monitorização futura as seguintes: Avenida 25 de Abril, Avenida Gaspar de Castro, acesso poente ao IC1 e EN13 para Norte e Sul.

7. O SMARBRAGA (Braga)

7.1. Enquadramento

O SmarBraga é o sistema de informação ao público e monitorização do ambiente urbano da cidade de Braga. Com este projeto, integrado no “Balcão Digital de Águas e Ambiente” da Agere, desenvolvido no âmbito do BragaDigital e financiado pela UE através do programa POS_Conhecimento, Braga passa a dispor de um serviço inovador de informação ao público, pioneiro em Portugal.

O SmarBraga integra um centro de análise que faz previsões de longo termo e processamento de dados de medições oriundos de duas unidades móveis instrumentadas. A informação ao cidadão é veiculada através desta plataforma web, desenvolvida com recurso às mais avançadas tecnologias (Mendes et al., 2010).

No SmarBraga pode ser encontrada informação sobre a qualidade do ar, o ruído ambiental, a situação meteorológica ou mesmo estatísticas de tráfego.

7.2. Objetivos do projeto

O SmarBraga teve como objetivos gerais informar a população sobre os aspetos centrais do ambiente urbano, nomeadamente: ruído, qualidade do ar e meteorologia, e criar uma infraestrutura de aquisição, armazenamento, processamento e comunicação de dados de ambiente urbano.

A um nível mais detalhado, o projeto pretendia monitorizar o ruído, a qualidade do ar e os parâmetros meteorológicos na cidade, além de gerar cenários de previsão de ruído e poluição atmosférica. O sistema criado pretendeu criar a cartografia digital do ruído e de poluentes atmosféricos, bem como um sistema de sinalização e informação ao público sobre ruído e sobre a qualidade do ar.

7.3. Estratégia do projeto

A Agere - Empresa de águas, efluentes e resíduos de Braga, EM, tem por missão a prestação de serviços na área ambiental. No âmbito do projeto “Balcão Digital de Águas e Ambiente” da Agere, desenvolvido no âmbito do BragaDigital e financiado pela UE através do programa POS_Conhecimento, a Agere tomou a iniciativa de propor o desenvolvimento do SmarBraga, alargando deste modo o seu âmbito de atuação também aos domínios do ruído urbano e da qualidade do ar.

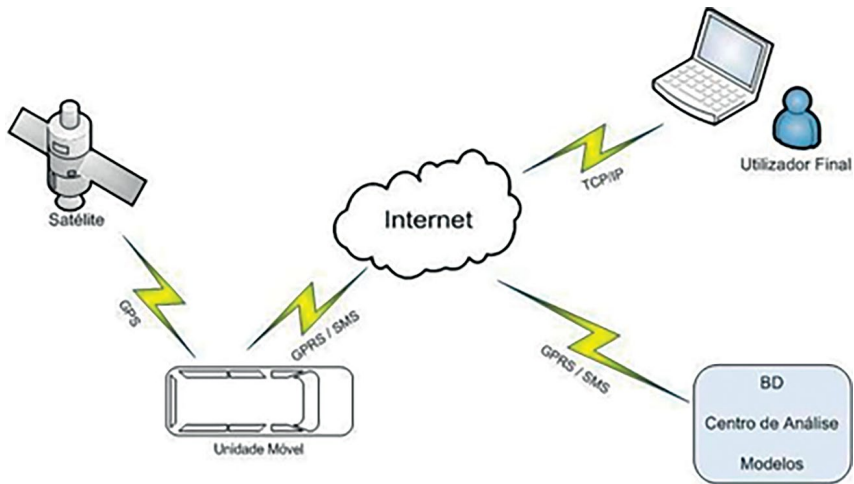


Figura 34 Esquema global de funcionamento.

O projeto mereceu financiamento público, tendo na sequência sido lançado um procedimento de aquisição do serviço de desenvolvimento, que foi adjudicado à Sociedade Innovation Point, S.A.

O trabalho de desenvolvimento decorreu ao longo de 2007 e 2008, com a disponibilização do serviço ao público em geral no final do ano de 2008.

Para o desenvolvimento foram criadas três infraestruturas, a saber (Figura 34):

- uma plataforma web integradora dos serviços de aquisição de dados, análise e informação ao público;
- uma solução tecnológica de aquisição de dados ambientais constituída por duas unidades móveis de recolha de aquisição de dados;
- um centro de análise para o desenvolvimento e disponibilização de cenários de longo prazo.

7.4. Intervenientes no processo

As entidades envolvidas neste projeto foram as seguintes:

- Universidade do Minho;
- AGERE - Empresa de águas, efluentes e resíduos de Braga, EM;

- Câmara Municipal de Braga;
- Innovation Point, S.A.

7.5. Principais recursos utilizados

Os principais recursos materiais utilizados no projeto foram:

- Viaturas adaptadas;
- Recetores GPS;
- Sonómetros digitais;
- Monitor de partículas e outros medidores/sensores;
- Estações meteorológicas (micro);
- Câmaras digitais;
- Computadores portáteis;
- Computadores do Centro Análise;
- Software de simulação do ruído ambiental;
- Software de simulação da poluição atmosférica.

Em termos de recursos humanos, a Innovation Point S.A. foi responsável pelo desenvolvimento e pela operação em fase de testes, tendo para o efeito mobilizado a colaboração de investigadores da Universidade do Minho.

O Projeto foi financiado pela AGERE E.M. e, no âmbito do BragaDigital, co-financiado por fundos da União Europeia através do programa POS_Co-nhecimento.

7.6. Acompanhamento e principais resultados

Como se referiu, foram implementadas três infraestruturas, que se passam a descrever:

Unidades Móveis de Aquisição de Dados

As unidades móveis fazem medições numa posição definida da cidade, a qual pode ser reportada por tecnologia GPS, e transmitem por comunicação

sem fios para a plataforma web. A bordo da viatura estão instalados os módulos de ruído, poluição do ar, meteorológico, multimédia, comunicação e posicionamento, embora nem todos possam ser necessários para uma medição específica (Figura 35).



Figura 35 SmarBraga: Unidade móvel de aquisição de dados em funcionamento. (esq.) e medição de partículas in loco (dir.).

Centro de Análise

O Centro de Análise criado destina-se a desenvolver e disponibilizar através da plataforma web os cenários (mapas) de longo termo do ruído e da poluição atmosférica, para além das estatísticas de tráfego. Para o efeito, a respetiva solução tecnológica inclui:

- software de previsão de ruído com vista à produção de mapas de ruído;
- software de dispersão de poluentes atmosféricos com vista à produção de mapas de contaminantes atmosféricos, de preferência integrado com a solução de ruído;
- dois computadores de elevada performance de processamento.

Por razões de racionalização do esforço associado à manutenção de bases de dados urbanas tridimensionais e dados de tráfego rodoviário, necessários à modelação de ruído e poluição atmosférica, adotou-se o software CadnaA + APL que integra ambas as componentes de simulação (ruído e poluição atmosférica).

Plataforma Web de Informação ao Público

O objetivo da plataforma web é integrar os dados adquiridos em tempo real ou diferido e, também, as simulações de longo termo, processar automaticamente e disponibilizar a informação ao público, através da utilização

duma interface amigável e de tecnologias inovadoras de representação e mapeamento.

Os canais contemplados na plataforma web SmarBraga são os seguintes (Figura 36-38):

- Homepage, com uma síntese da informação atualizada, através de um sistema de classificação e informação ao público por código de cores, de verde a vermelho;
- Estatísticas de Tráfego, para os arruamentos da cidade, as quais resultaram de uma campanha de contagem de tráfego (por categoria de veículos) realizada em 2008 e necessária para o desenvolvimento dos mapas de longo termos de ruído e poluição atmosférica; trata-se de informação relativa a um determinado período temporal, embora a plataforma possa ser desenvolvida para integrar informação on-line de tráfego, se essa opção vier a ser feita;
- Ambiente Medições, onde as medições de parâmetros ambientais e meteorológicos são integradas automaticamente após a sua aquisição em estações fixas ou unidades móveis, através de um sistema de comunicação sem fios;
- Ambiente Longo Termo, onde os mapas ambientais de longo termo, nomeadamente de ruído e poluição atmosférica, são disponibilizados através de motor de representação, com contextualização geográfica de imagem satélite (utilizando tecnologia Google Maps);
- Rede de Monitorização, com identificação das áreas/pontos de medição na cidade e cross-links para informação de medições e qualidade ambiental;
- SmarBraga, com informação sobre o projeto.



Figura 36 SmarBraga: Homepage.

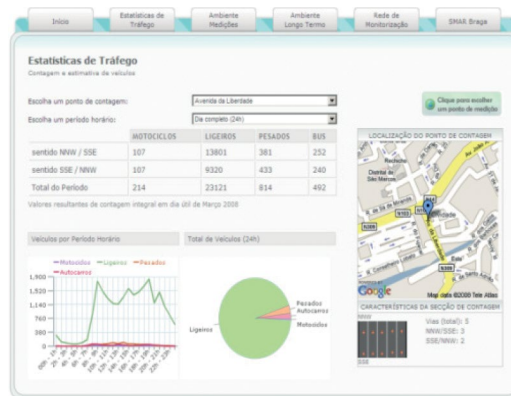


Figura 37 SmarBraga: Estatísticas de tráfego.

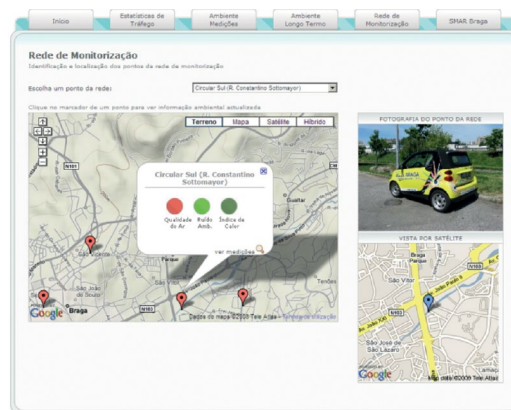


Figura 38 SmarBraga: rede de monitorização.

8. O SMMART (Vila Real)

8.1. Enquadramento

Vila Real é a principal cidade da região portuguesa de Trás-Os-Montes, situada no nordeste de Portugal, apresentando 48% da população a viver no perímetro urbano da cidade. À data do projeto, a cidade de Vila Real não possuía estações de avaliação da qualidade ambiental no seu perímetro urbano, estando a estação mais próxima situada no Parque Nacional da Serra do Alvão, a mais de 15 quilómetros de distância da zona urbana. O desenvolvimento do projeto SMMART (Sistema Municipal de Monitorização do Ar, Ruído e Tráfego da cidade de Vila Real) veio preencher esta lacuna permitindo avaliar os impactos do tráfego local na qualidade ambiental urbana da cidade.

8.2. Objetivos do projeto

O SMMART da cidade de Vila Real teve como principais objetivos sensibilizar a população para os temas essenciais do ambiente urbano – em particular o ruído, a qualidade do ar e o tráfego – e desenvolver uma infraestrutura integrada para a aquisição, armazenamento, tratamento e divulgação de dados ambientais urbanos (Mendes & Silva, 2016).

O projeto visava monitorizar o ruído, a qualidade do ar e o tráfego urbano, bem como produzir cenários de previsão relacionados com o ruído ambiental e a poluição atmosférica. O sistema desenvolvido teve ainda como objetivo gerar cartografia digital dos níveis de ruído e das concentrações dos poluentes atmosféricos, além de implementar um sistema de sinalização e informação pública sobre as condições de ruído, qualidade do ar e tráfego na cidade.

O projeto SMMART Vila Real decorreu entre os anos de 2013 e 2015, e a disponibilização do serviço ao público no ano de 2016.

8.3. Estratégia do projeto

O projeto mereceu financiamento público, tendo na sequência sido lançado um procedimento de aquisição do serviço de desenvolvimento, o qual foi adjudicado à Universidade do Minho através do seu Centro de Investigação CTAC e Laboratório de Qualidade de Território e Ambiente (Silva et al., 2014).

O trabalho de desenvolvimento decorreu no período entre 2013 e 2015, com a disponibilização do serviço ao público em geral no ano de 2016.

O desenvolvimento do SMMART contou com a criação das seguintes infraestruturas: uma unidade móvel instrumentada de monitorização ambiental, um centro de análise e tratamento de dados e uma plataforma web de informação ao público sobre parâmetros de qualidade ambiental urbana.

O projeto consiste na utilização de uma unidade móvel de monitorização de parâmetros ambientais, a qual irá percorrer um percurso pré-definido na cidade de Vila Real, realizando medições de ruído, de poluentes atmosféricos, condições meteorológicas e tráfego. Ao fim deste percurso, os dados recolhidos são enviados a um centro de análise e tratamento de dados para validação e posterior disponibilização, para informação ao público, numa plataforma web desenvolvida para o efeito.

8.4. Intervenientes no processo

As entidades envolvidas neste projeto foram as seguintes:

- Câmara Municipal de Vila Real;
- Universidade do Minho (Centros de I&D: CTAC, Laboratório Território e Ambiente);
- MRA Instrumentação.

8.5. Principais recursos utilizados

Os recursos diretamente envolvidos na execução deste projeto são:

- Veículo ligeiro elétrico adaptado
- Recetor GPS
- Sonómetro integrador tipo 1
- Medidor de partículas do ar
- Medidor de CO2 portátil
- Estação meteorológica portátil (micro)

- Router
- Computador portátil
- Sensores de contagem de veículos instalados no percurso
- Computadores do Centro de Análise

Em termos de recursos humanos a equipa da Universidade do Minho foi responsável pela conceção e coordenação do projeto SMMART Vila Real e a empresa MRA Instrumentação que construiu a unidade móvel de monitorização.

O SMMART Vila Real foi financiado pela União Europeia através da plataforma “AEPLUS”, na qual a avaliação do ambiente urbano e a divulgação pública dos níveis de poluição sonora e do ar em ambiente urbano foram consideradas ações prioritárias.

8.6. Acompanhamento e principais resultados

Unidade Móvel de Monitorização Ambiental

A unidade móvel foi desenvolvida para fazer monitorização de parâmetros ambientais em diferentes pontos da cidade, sendo uma alternativa às estações fixas.

Comparativamente às estações fixas, a principal vantagem de uma unidade móvel de monitorização é que esta consegue monitorizar vários de pontos numa determinada região. Também o custo associado à montagem de uma estação fixa com tecnologias convencionais pode ser substancialmente mais elevado quando comparando com uma unidade móvel. Numa estação fixa, o custo dos equipamentos, é elevado estando necessariamente a monitorizar o local onde esta está instalada, sendo ainda necessários mais recursos para manutenção e calibração dos equipamentos.

A operação de estações fixas está ainda limitada a uma necessidade significativa de infraestruturas (caixas de proteção, energia elétrica, etc.) e a monitorização de parâmetros ambientais numa cidade, com uma granulometria aceitável, seria necessário instalar várias estações, tornando o sistema muito mais oneroso.

As estações fixas disponibilizam leituras 24 horas por dia e 365 dias por ano para uma determinada localização. Todavia, as estações fixas podem

deixar de ter uma localização estratégica importante e/ou representativa da qualidade ambiental urbana da envolvente e assim deixar de ser importante e de fazer sentido estar localizada naquele ponto.

Analisando todos as vantagens e desvantagens e principalmente o objetivo do projeto, optou-se pelo desenvolvimento de uma unidade móvel de monitorização ambiental e o alargamento da rede numa fase posterior recorrendo a sensorização fixa.

A escolha do veículo recaiu sobre um veículo totalmente elétrico, com um motor de 55 kW (75 cv) e com uma autonomia de 145 km. Trata-se de um veículo de pequenas dimensões (2,69x1,55x1,54 m), o que constituiu um desafio para a montagem da plataforma de trabalho com os equipamentos de medição e respetivos acessórios no veículo.

Esta unidade móvel encontra-se equipada com um sonómetro integrador do tipo 1, um monitor de partículas, uma estação meteorológica e sensores de contagem de veículos. Foi desenvolvida uma mesa de trabalho extensível localizada na pequena bagageira do veículo (capacidade de 220 litros até à cobertura da mala), na qual assentam os equipamentos e respetivos acessórios. A comunicação dos equipamentos é realizada através de um router, instalado no interior do veículo. Este sistema de comunicação dos equipamentos ao router veio a demonstrar grande eficácia, pois reduziu o número de cabos e outros acessórios ligados ao computador. Os equipamentos estão ligados ao router e, posteriormente o computador comunica com os equipamentos através do router por ligação Wi-Fi (Figura 39).

Caraterísticas, instalação e montagem dos equipamentos na unidade móvel

Na escolha dos equipamentos foram tidos em conta também alguns requisitos técnicos, de maneira a estes poderem ser adaptados ao veículo. Peso, dimensões, capacidade de funcionar em ambiente exterior e autonomia das baterias foram alguns dos requisitos tidos em conta na escolha dos equipamentos.

O monitor de partículas é um equipamento que permite fazer leituras de concentrações, em simultâneo, dos poluentes PM_{10} e $PM_{2,5}$ e TPS, recorrendo a um método fotométrico de classificação e contagem das partículas. O equipamento vem acompanhado com uma mala à prova de água, um dispositivo para recolha de condensados e uma bateria externa para uma maior autonomia. As dimensões, o peso e o facto de ser um equipamento que em funcionamento ser bastante silencioso (para não afetar as leituras



Figura 39 SMMART: Sistema de comunicação instalado no veículo.

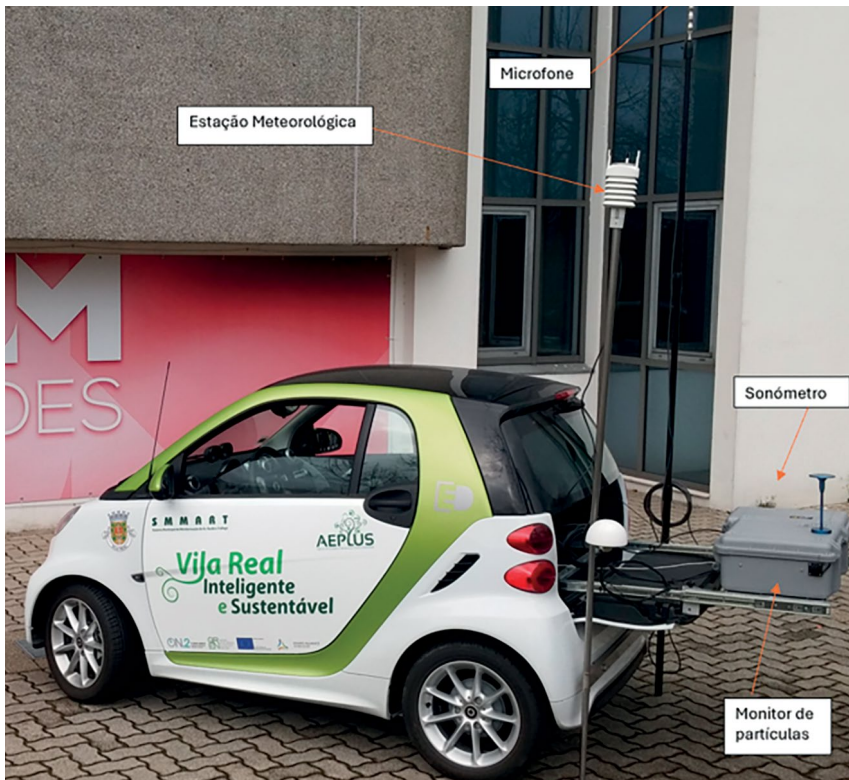


Figura 40 SMMART: Montagem final da unidade móvel.

efetuadas em simultâneo de ruído) foram outras das características consideradas na escolha deste equipamento. A comunicação com o computador é efetuada através da ligação do cabo Ethernet do equipamento ao router.

O sonómetro é um equipamento preparado para a realização de monitorização acústica em ambiente exterior. Para além de medições de ruído, o equipamento consegue incorporar uma estação meteorológica e fazer medições de ruído e de parâmetros meteorológicos em simultâneo. Este equipamento é transportado numa mala à prova de água (com dimensões compatíveis com a plataforma montada no veículo), um microfone com um suporte extensível até os 4 m de altura para medições de ruído no exterior, uma bateria externa para uma maior autonomia, uma antena GPS, uma estação meteorológica e os respetivos suportes para a estação meteorológica, microfone e GPS. A comunicação do sonómetro ao router é feita através de Wi-Fi. A disposição final dos equipamentos montados no veículo é ilustrada na Figura 40.

Procedimento na Recolha de Dados

O processo de recolha de dados exige o cumprimento de procedimentos prédefinidos em protocolo. Tratando-se de uma estação móvel de monitorização, é requisito essencial que realize avaliações nos diferentes pontos que constituem a rede de monitorização da cidade. A definição da rede obedeceu a diversos critérios, nomeadamente:

- Áreas relativamente próximas a vias de tráfego principais da cidade;
- Locais próximos de zonas sensíveis, tais como escolas e hospital;
- Proximidade ao parque da cidade;
- Proximidade ao centro histórico da cidade.

A rede de monitorização, apresentada na Figura 41, é composta por cinco pontos: a Praça da Câmara Municipal, Hospital de Vila Real, Praça Diogo Cão, Praça Nossa Senhora da Conceição e Parque de Estacionamento do Parque do Corgo.

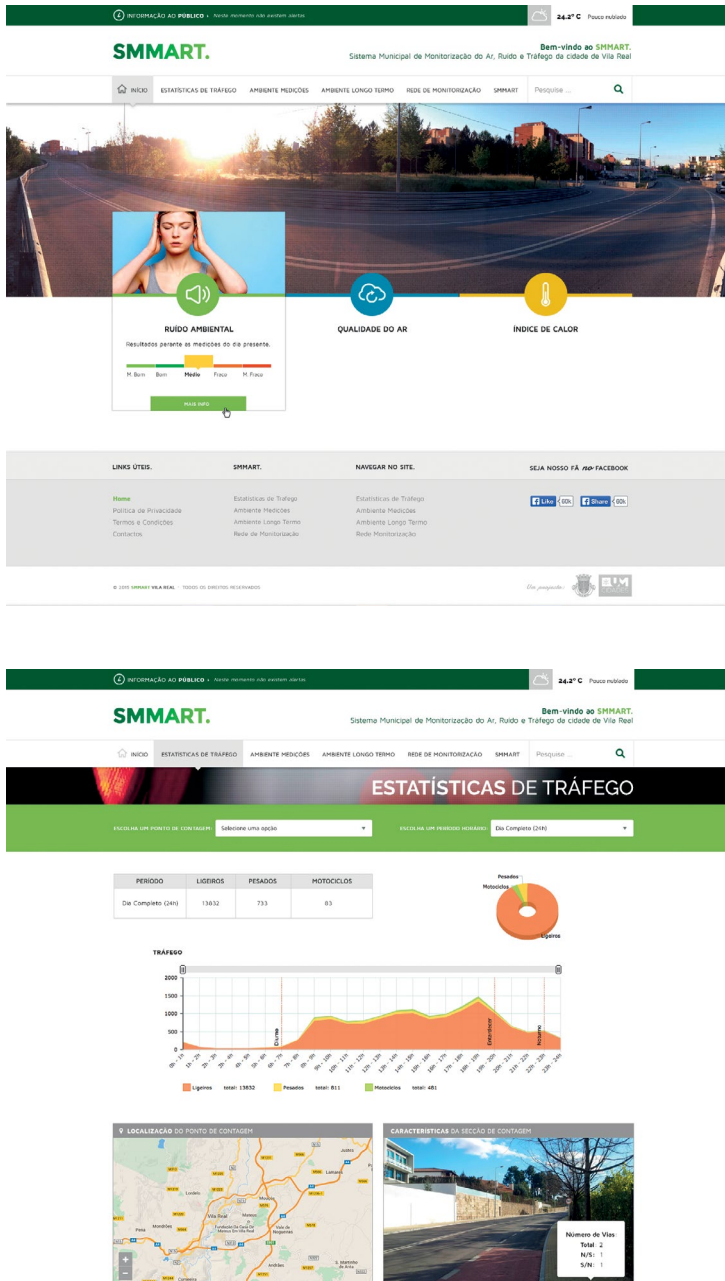


Figura 41 Website da SMMART, Rede de monitorização.

Foi desenvolvido um protocolo de recolha de dados para garantir a qualidade dos dados obtidos e tornar possível, durante um dia de trabalho, recolher leituras dos cinco pontos de monitorização.

No projeto foram desenvolvidas três infraestruturas: uma Unidade Móvel de Monitorização, Centro de Análise e Tratamento de Dados e Plataforma Web de Informação ao Público.

Após a montagem e conexão dos equipamentos instalados na Unidade Móvel de Monitorização é dada a ordem, através do computador, para se iniciar a medição de todos os equipamentos em simultâneo. No fim da medição, os



Figura 42 SMMART: unidade móvel de monitorização em funcionamento.

dados são descarregados para o Centro de Análise e Tratamento de Dados, ficando disponíveis na Plataforma Web de Informação ao Público, após validação e tratamento dos dados executados em sede de Centro de Análise.

Após validação das medições efetuadas, estes ficam disponíveis automaticamente para consulta pública no separador “Ambiente - Medições” da plataforma web. Neste separador é possível consultar os resultados das várias medições efetuadas para os diferentes pontos que constituem a rede de monitorização, individualmente. Entre os diferentes tipos de indicadores que podem ser consultados, em valores médios, estão:

- Indicadores Temporais - Data e hora em que foi efetuada a medição;
- Indicadores de Ruído Ambiental - Lden, L10 e L90 (dB(A));
- Indicadores da Qualidade do Ar - PM10 e PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);
- Indicadores Meteorológicos - Humidade relativa (%), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m/s) e direção predominante do vento (moda dos quadrantes).

Com base nos valores obtidos é atribuída uma classificação relativamente à qualidade do ambiente acústico, do ar e do índice de calor, que varia numa escala entre muito bom (verde) e muito fraco (vermelho), conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 Indicadores de Qualidade Ambiental Urbana.

Qualidade do Ar, Ruído Ambiental e Índice de Calor				
Muito Bom	Bom	Moderado	Fraco	Muito Fraco

Esta classificação é atribuída individualmente para cada um dos indicadores (ruído ambiental, qualidade do ar e índice de calor) através de algoritmos desenvolvidos para o efeito, tendo como referências os valores médios obtidos nas medições.

Na plataforma, outras informações podem ser consultadas. Entre essas informações estão: estatísticas de tráfego, mapas de longo termo de ruído ambiental (L_{den} e L_n) e de poluição atmosférica (PM_{10}) da cidade e finalmente um espaço com informações e alertas ao público. Estes mapas encontram-se georreferenciados e foram introduzidos recorrendo à tecnologia Google Maps.

Por último, na plataforma web foi criado o espaço de Informação e Alertas ao Público. Este espaço foi pensado para informar, em forma de texto, possíveis situações anormais que possam influenciar a qualidade ambiental urbana da cidade. Por exemplo, alerta de níveis de ruído elevados para uma determinada zona, alerta para níveis de concentrações de partículas elevadas que possam prejudicar a saúde a grupos vulneráveis da população, informações sobre obras a decorrer na via pública e acidentes rodoviários, são alguns tipos de informação disponibilizadas neste espaço.

A unidade móvel de monitorização mostrou-se eficiente e capaz de fornecer informações credíveis sobre parâmetros de qualidade ambiental urbana, que traduzem a realidade existente, e a metodologia adotada na recolha de leituras demonstrou ser eficiente. O projeto SMMART mostra-se com capacidade de integrar futuramente uma rede de Smart City, permitindo fornecer dados em tempo real sobre parâmetros de qualidade ambiental urbana. No futuro, o projeto SMMART poderá ainda evoluir para a integração de mecanismos inteligentes e automatizados capazes de tomar decisões diretas sobre as fontes poluentes, como por exemplo, sugerir que se reduza a velocidade, restringir a circulação de veículos pesados numa determinada via, entre outros.

O SMMART é também um instrumento para avaliar a eficiência da implementação de medidas de melhoria da qualidade ambiental urbana, como por exemplo, a introdução de uma Zona 30, a implementação de ciclovias, medidas de gestão e reorganização de tráfego, restrição de circulação de veículos com determinadas características em vias da cidade, entre outras.

9. BUILD (Braga)

9.1. Enquadramento

A descarbonização, apesar de ser uma preocupação a nível global, requer ações locais, especificamente ao nível das cidades. Devido a essa crescente necessidade de adotar medidas que promovam a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), o Município de Braga estabeleceu a mudança na vivência da cidade como um dos seus objetivos estratégicos, apostando na construção de um ambiente mais sustentável, inclusivo e inovador. Neste contexto surgiu o projeto Braga Urban Innovation Laboratory Demonstrator (BUILD) – Laboratório Vivo para a Descarbonização.

No que se refere à sustentabilidade ambiental e à meta de redução das emissões de carbono, os laboratórios vivos urbanos são excelentes plataformas de teste de novas abordagens, da administração central e local, para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, com recolha de dados, numa escala pequena e administrável, que tem por finalidade contribuir para a tomada de decisão mais alargada por parte do governo local (Câmara Municipal de Braga, 2017).

Um laboratório vivo para descarbonização é um espaço urbano delimitado geograficamente – como por exemplo uma praça, uma freguesia ou uma avenida – onde seja possível implementar/demonstrar um conjunto de soluções tecnológicas integradas, e que possuam características físicas, económicas e sociais distintivas que permitam considerar o espaço como um sistema. Devem ter ainda identidade local (social, cultural) que seja perceptível pela comunidade e pelos agentes externos, e espaços públicos de encontro que potenciem a exposição das soluções tecnológicas e a sua vivência pelos atores que de alguma forma interagem com aquele espaço (Silva & Paiva, 2018).

A área escolhida para implementação do projeto BUILD (Figura 43) engloba um dos principais pontos de congestionamento do tráfego automóvel na cidade de Braga. Os diversos constrangimentos observados nesta zona devem-se a uma série de fatores, nomeadamente estar situado no primeiro anel de malha urbana de expansão da cidade, haver forte concentração de estabelecimentos de ensino na zona confinante (4800 alunos), bem como a presença de áreas residenciais, comerciais e de serviços, além da proximidade ao centro da cidade.



Figura 43 BUILD: área delimitada do Laboratório Vivo para Descarbonização e estabelecimentos de ensino na zona envolvente. (Câmara Municipal de Braga, 2017).

9.2. Objetivos do projeto

O projeto BUILD teve como objetivo testar em contexto real, e com a participação dos vários parceiros científicos, tecnologias, serviços e aplicações com baixo impacto ambiental, que promovam a redução das emissões de gases com efeito de estufa e contribuam para a saúde e bem-estar dos cidadãos na cidade de Braga. Concomitantemente, pretendeu-se avaliar e desenvolver soluções para os graves problemas ao nível do tráfego automóvel e do ambiente urbano desta zona da cidade.

Nele pretenderam-se trabalhar quatro áreas temáticas: a mobilidade, a energia, o edificado e a economia circular/ambiente. Devido às características da área escolhida para o projeto, era esperado que a mobilidade fosse a área temática com maior impacto no cumprimento dos objetivos definidos para a descarbonização.

9.3. Estratégia do projeto

O projeto foi desenvolvido através de uma parceria entre a Câmara Municipal de Braga, diversos centros de investigação da Universidade do Minho, INL e empresas municipais e intermunicipais públicas (Transportes Urbanos de Braga – TUB, AGERE - Empresa de Águas, Efluentes e Resíduos de Braga e Braval – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A.).

O projeto pretendia testar, implementar e validar várias intervenções nas áreas temáticas de energia, edificado, mobilidade e economia circular / ambiente, em contexto real, que (Silva & Paiva, 2018):

- Promovessem a participação e a cidadania ativa da população residente e utilizadora da área BUILD com a adoção de comportamentos mais sustentáveis;
- Envolvessem a população residente no desenho, experimentação e avaliação das medidas de utilização do espaço urbano;
- Promovessem a adoção de meios de transporte sustentáveis e a segurança dos utilizadores do espaço, facilitando a mobilidade dentro da área BUILD e arredores, com especial foco na comunidade escolar;
- Promovessem a eficiência energética; e
- Contribuíssem para a redução do impacto ambiental das atividades humanas neste espaço, principalmente através da redução dos GEE emitidos.

Devido à sua complexidade e para uma melhor organização, o projeto foi dividido em 7 work packages, denominados WP 1 a WP7. O primeiro work package (WP1), teve como desígnio a gestão e acompanhamento de todo o trabalho a ser desenvolvido/implementado. O WP2 teve como objetivo instalar e colocar em funcionamento o Laboratório de Inovação Urbana (LIU). Já o WP3 visou o desenvolvimento do SCS (Smart City Server), o qual centra toda a informação e coordenação do funcionamento dos vários sensores instalados. O WP4 teve como objetivo maximizar a comunicação e sensibilização da população. Os WP5 e WP6 tiveram como meta realizar as intervenções nas vias públicas e no edificado da área do Laboratório Vivo do BUILD. E, por fim, o WP7 assegurou a monitorização dos consumos de energia elétrica e água (Silva & Paiva, 2019).

Na Figura 44 é possível ver as áreas temáticas envolvidas em cada work package, bem como as medidas implementadas.

A criação do LIU, enquanto espaço para recolha de toda a informação, equipamento e software informático para o tratamento e divulgação dos dados e ainda espaço para interação com o cidadão, foi assumida como sendo uma estratégia, a médio e longo prazo, de continuidade das ações envolvidas na operação do BUILD.



Figura 44 BUILD: Divisão dos work packages do projeto. Fonte: Adaptado de [6].

9.4. Intervenientes no processo

Como parceiros científicos, o projeto teve os seguintes intervenientes:

- Universidade do Minho (Centros de I&D: CTAC, CECS, CIEC);
- Centro de Computação Gráfica (Instituto CCG/ZGDV);
- International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL).

Já os parceiros estratégicos foram:

- Câmara Municipal de Braga;
- Transportes Urbanos de Braga (TUB);
- Agere – Empresa de Águas, Efluentes e Resíduos de Braga – EM;
- Braval – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos S.A.;

- Fundo Ambiental;
- Escola das Enguardas, Escola Sá de Miranda, Escola Francisco Sanches, Colégio Dom Diogo de Sousa, Colégio Leonardo Da Vinci, Colégio Teresiano e Instituto Britânico;
- Comunidades das freguesias de São Victor e de São Vicente.

9.5. Principais recursos utilizados

Os principais recursos materiais utilizados no projeto foram:

- Autocarros escolares;
- Sensores para contagem de veículos e para monitorização ambiental;
- Lâmpadas LED para iluminação pública;
- Materiais para isolamento térmico de edifícios;
- Materiais para construção do sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP);
- Sistema Omniflow para passadeira inteligente;
- Painéis solares;
- Pilaretes e placas de sinalização;
- Computadores para o centro de análise de dados (Smart City Server) e para o Laboratório de Inovação Urbana.

Em termo de recursos humanos, destaca-se a atuação dos seguintes atores:

O Centro de Computação Gráfica (Instituto CCG/ZGDV) ficou responsável por apoiar a implementação tecnológica e de comunicação do plano, o que envolveu: integrar as plataformas do projeto; desenvolver ferramenta de suporte à decisão (iluminação, rega, notificação para o sistema de controlo de tráfego); desenvolver a comunicação inteligente de informação para displays interiores e exteriores; criar a plataforma de dados abertos; e desenvolver a aplicação móvel do cidadão e o portal web de informação.

O Centro de Investigação em Estudos da Criança (CIEC) da Universidade do Minho ficou responsável pelo desenho e implementação do plano de

sensibilização da comunidade/cidadão: desenvolvimento de atividades junto da população escolar (edição de um livro infanto-juvenil interativo, olimpíadas interescolares da descarbonização, maratona da descarbonização, Braga Fashion – aqui descarbonizamos, durante e após a intervenção); desenho e implementação da estratégia de sustentabilidade da descarbonização com vista a disseminar resultados e catalisar sinergias e desenvolvimento de um modelo de monitorização das ações de sensibilização.

O Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade (CECS) do Instituto de Ciências Sociais, ficou responsável por definir e implementar medidas adaptadas à mudança comportamental assim como a construção de instrumentos de transferência e disseminação de conhecimento.

O Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC) da Escola de Engenharia esteve envolvido em diferentes work packages, atuando desde a gestão do projeto, a validação dos pressupostos que deram origem ao projeto de descarbonização, passando pela criação do modelo de avaliação associado a cada área temática, constituído por vários indicadores e implementação de sistemas de ação e alerta; pela criação e avaliação do funcionamento do Laboratório de Inovação Urbana; pela avaliação da perceção da população sobre as alterações produzidas pelo LIU; implementação de medidas de mobilidade/segurança na via; acompanhamento e avaliação da implementação das soluções passivas e ativas de eficiência energética e hídrica, definição e validação de indicadores para gestão e informação ao público.

O International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL) participou na criação do Laboratório de Inovação Urbana (LIU) e a empresa Transportes Urbanos de Braga (TUB) participou na implementação da atividade School Bus.

Em termos de recursos financeiros, o projeto BUILD teve financiamento do Fundo Ambiental.

9.6. Acompanhamento e principais resultados

As intervenções previstas no BUILD ocorreram no período compreendido entre os anos 2018 e 2022.

Medidas complementares em mobilidade

De forma a contribuir para o objetivo geral do projeto, nomeadamente na área de mobilidade, foram implementadas adaptações ao ordenamento viário,

quer em locais de interface, quer nas proximidades dos estabelecimentos de ensino envolvidos, de forma a melhorar o fluxo do tráfego, garantir maior segurança rodoviária na zona BUILD e incentivar o uso de meios de deslocação mais sustentáveis.



Figura 45 BUILD: medidas complementares em mobilidade.

Dentre as medidas complementares realizadas destacam-se: a conversão de parte da faixa de estacionamento da Rua Conselheiro Bento Miguel em área de paragem dos autocarros, a criação da área “Kiss and Go” (reserva de lugares de paragem de automóveis destinada unicamente à tomada e largada de alunos das escolas, com duração de até 1 minuto), a colocação de pilaretes delimitando vias e inibindo estacionamentos abusivos, a definição de “zonas 30” (medida de acalmia com limitação da velocidade máxima a 30 km/h nas zonas “Kiss and Go”) e a criação de uma via dedicada para BUS (via de circulação exclusiva para autocarros) (Figura 45).

Após a intervenção observou-se uma melhor circulação na zona e uma redução no número de infrações.

School Bus

A intervenção School Bus (Figura 46) teve como objetivo criar um sistema de transporte escolar que permitisse transportar com segurança os alunos das várias escolas públicas e privadas existentes na zona BUILD e também no seu entorno, e dessa forma reduzir o fluxo de automóveis particulares que acedem à esta zona, nomeadamente os encarregados de educação que levam os seus filhos à escola, sem que essa seja a sua freguesia de destino. Além da melhoria da mobilidade, a medida visou a redução do ruído, da poluição atmosférica e das emissões de carbono na zona BUILD (Ribeiro et al., 2020).



Figura 46 BUILD: projeto School Bus.

A operação consistiu na criação de 4 interfaces localizados em pontos estratégicos da cidade, com vista a receberem os alunos e transportados de autocarro até aos estabelecimentos de ensino destino. Os alunos, em cada autocarro são acompanhados por monitores por forma a garantirem a vigilância durante o transporte e a segurança no atravessamento até cada escola/colégio. O acesso aos autocarros é feito através de um passe escolar dos TUB (Transportes Urbanos de Braga) com leitura digital.

O School Bus foi muito bem avaliado pelos alunos que o utilizam e pelos seus encarregados de educação, tendo sido observados outros benefícios para além dos previstos no programa, como o desenvolvimento de competências sociais nos alunos, nomeadamente, uma maior autonomia das crianças, além de uma maior interação e socialização entre elas. Destaca-se também o impacto das atividades desenvolvidas no âmbito da intervenção “Conexão Mais Cidadania e Ações para uma mobilidade mais sustentável”, que se refletem numa maior conscientização sobre mobilidade sustentável, sendo a preocupação com o meio ambiente uma das razões referidas pelas crianças para aderirem ao programa. Os diretores dos estabelecimentos

de ensino destacam ainda outros benefícios percebidos, nomeadamente, a pontualidade na chegada à escola e a boa disposição dos alunos (se comparados àqueles que vem de carro).

No que concerne à descarbonização, observou-se uma redução mensal de 2% nas emissões de CO₂ equivalente, quando a meta prevista era de 3,1%. Apesar das atividades de sensibilização, ainda se observa uma certa resistência dos encarregados de educação em aderir ao modelo proposto. No entanto, a CM Braga tem vindo a pôr em prática algumas das sugestões apresentadas pelos encarregados de educação para melhoria do sistema, como por exemplo, o fim do impedimento de utilização por educandos que não residam no concelho.

Passadeira inteligente

A passadeira inteligente tem como objetivo diminuir substancialmente os riscos de acidentes e atropelamentos nos locais de atravessamento, aumentando o conforto e a segurança do peão, sem que para isso seja necessário gerar maior gasto energético com aumento da iluminação pública no local, como ocorre com passadeiras convencionais. Além disso, quando implementada junto a outras medidas de sustentabilidade e de segurança rodoviária, estimula o deslocamento pedonal em detrimento do uso de veículos ligeiros, promovendo a diminuição de emissões de CO₂. Trata-se, portanto, de uma intervenção com impacto nas áreas de mobilidade e eficiência energética.

O sistema que compõe a passadeira inteligente instalada na zona BUILD é capaz de detetar a aproximação de peões à passadeira, através de imagens em tempo real, e alertar os condutores de três maneiras distintas: (i) através de uma luz superior que aumenta a intensidade em pelo menos duas vezes mais na área da passadeira; (ii) ao ligar um sinal retroiluminado, acionado através de um sensor de movimento, quando este deteta automaticamente a aproximação de um peão; e (iii) ao ligar uma iluminação de elevada resistência no solo, colocada em cada lado e ao longo da passadeira, permitindo avisar os condutores da passagem de um peão na passadeira (Silva & Paiva, 2019). Este sistema funciona 24 horas por dia e, é capaz de controlar os níveis de iluminação consoante ao horário do dia e a presença ou não de peões, reduzindo o consumo energético. Adicionalmente, por estar diretamente conectado a um sistema de microgeração de energia eólica e solar, com armazenamento em baterias, denominado Omniflow, esta solução é autossustentável (Figura 47).

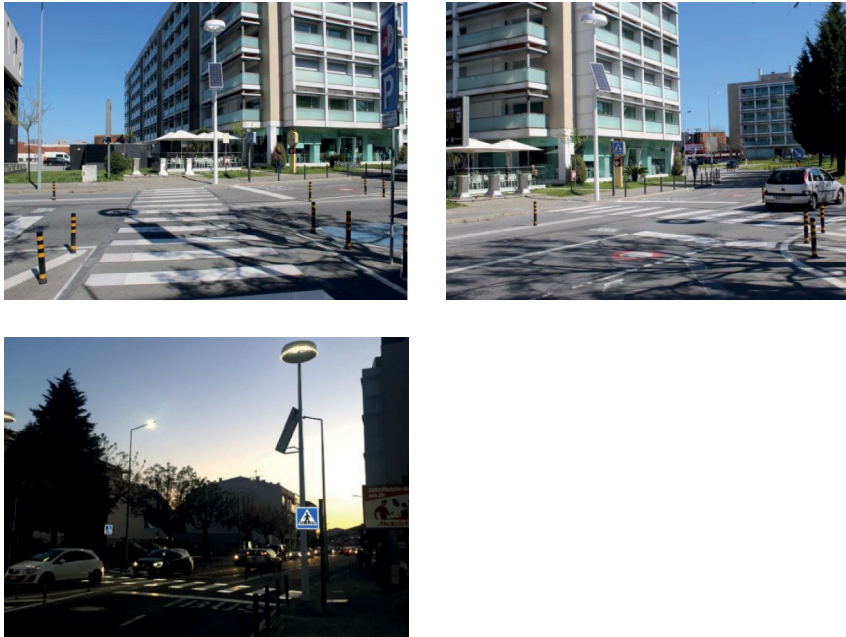


Figura 47 BUILD: Passadeira inteligente com sistema Omniflow.

Iluminação pública inteligente e eficiente

A intervenção “Iluminação pública eficiência e inteligente” visou manter a qualidade da iluminação pública, fundamental para a segurança das pessoas e do trânsito automóvel, e ao mesmo tempo promover a diminuição do consumo energético (Silva & Paiva, 2019).

Desta forma, procedeu-se à troca de luminárias convencionais por iluminação LED, que apresenta menor consumo energético, maior vida útil, robustez e resistência ao choque quando comparada às lâmpadas incandescentes, além de permitirem o direcionamento da totalidade da luz num único sentido, aumentando a eficiência e não libertando calor.

Adicionalmente, instalou-se um sistema inteligente de controle do fluxo luminoso (dimming) de forma que a intensidade da iluminação cresça proporcionalmente à diminuição da luz natural que ocorre com o pôr do sol. Esta solução possui sensores de proximidade que permitem regular o fluxo luminoso de forma dinâmica, reduzindo à intensidade mínima na ausência de movimento de veículos e peões nas proximidades das passadeiras.

Melhoria da eficiência energética em edifícios

O edifício escolhido para ser alvo de intervenção para melhoria da eficiência energética foi a Escola Básica do 1º Ciclo com Jardim de Infância de Enguardas. Trata-se de um edifício construído em 1980 e requalificado em 2007, quando ocorreu a construção do espaço destinado ao Jardim de Infância (Silva & Paiva, 2019; Silva & Almeida, 2019).

A intervenção para melhoria da eficiência energética, implementada no âmbito do projeto BUILD, foi realizada apenas na zona do edifício correspondente à Escola do 1º ciclo, tendo em vista que esta não havia sido objeto de intervenção ao nível de isolamento térmico das fachadas na obra realizada em 2007, enquanto que o projeto do Jardim de infância já contemplava isolamento térmico.

Esta intervenção consistiu em: reforço do isolamento térmico da envolvente e no tratamento das trocas térmicas através da instalação de um sistema ETICS (External Thermal Insulation System), também conhecido como “capoto”, com espessura de 4 cm de isolamento em poliestireno expandido, e acabamento em granito na zona inferior da parede e de 6 cm de isolamento com reboco na zona superior da parede; reforço da cobertura do edifício através da colocação de 6 cm de isolamento térmico no desvão da cobertura; e melhoria das condições de sombreamento dos vãos envidraçados através da instalação de um sistema de sombreamento com palas fixas, instalado na fachada orientada a sudeste (salas de aula), similar ao já existente no edifício do jardim de infância.

De acordo com estudos e projetos já realizados, a melhoria da qualidade térmica do edifício reduz a necessidade de aquecimento no inverno e arrefecimento no verão, o que permite uma poupança energética e, conseqüentemente, uma redução na emissão de CO₂. Além disso, este tipo de intervenção contribui para reduzir a probabilidade de ocorrência de problemas associados ao aparecimento de condensações e, conseqüentemente, desenvolvimento de bolores e degradação do edifício, para a melhoria da qualidade do ambiente interior (conforto térmico, acústico, lumínico e qualidade do ar interior), proporcionando melhoria na produtividade, capacidade de aprendizagem, saúde, bem-estar e conforto dos utilizadores do edifício (Figura 48).



Figura 48 BUILD: Edifício do 1.º Ciclo da Escola das Enguardas após revestimento térmico e sombreamento.

Melhoria da eficiência hídrica em edifícios

No que compete à melhoria de eficiência hídrica, a intervenção realizada foi a implementação de um Sistema de Aproveitamento de Águas Pluviais (SAAP) no edifício da Escola Básica do 1º Ciclo com Jardim de Infância de Enguardas. A água captada neste sistema teve como destino aparelhos sanitários (20 sanitas e 4 urinóis dos wc's), e teve como objetivo reduzir o consumo de água potável do edifício e, dessa forma, diminuir as emissões de CO₂ associadas à captação, tratamento e distribuição de águas para abastecimento público.

Um SAAP compreende uma superfície de captação (coberturas, em geral), um sistema de transporte (caleiras, tubos de queda), uma etapa de filtra-

ção (para remover folhas, poeira e outros resíduos que possam acumular na superfície de captação) e um reservatório para armazenamento da água, que deve ser corretamente dimensionado consoante as características pluviométricas da região onde se localiza o edifício.

No edifício da Escola Básica das Enguardas, a superfície de captação de água da chuva localiza-se na cobertura e possui 511 m². Depois de captada, a água é drenada até um reservatório com capacidade de armazenamento de 52 m³, instalado no subsolo, aproveitando a proteção geotérmica. Antes de ser encaminhada para o reservatório, a água é previamente filtrada para impedir a entrada de resíduos.

Em períodos de baixa precipitação, a água é suprida pelo sistema de abastecimento municipal existente. Desta forma, foi necessário a instalação de um sistema de gestão que controla a entrada de água da rede pública no reservatório, garantindo que haja um nível mínimo de água disponível, sem, no entanto, que as águas de origem pluvial entrem em contato com as pro-



Figura 49 BUILD: implementação do SAAP na Escola das Enguardas.

venientes da rede de abastecimento, como exige a legislação (Figura 49).

Programa Conexão Mais cidadania e ações para uma mobilidade sustentável

O conjunto de intervenções realizadas no plano de comunicação envolveu o Programa Conexão Mais Cidadania, as Ações para uma Mobilidade Sustentável, as quais têm como objetivo tornar a descarbonização uma realidade construída com e pelas pessoas, através da educação. Estas intervenções interrelacionam-se de maneira transversal com as demais intervenções realizadas no BUILD, uma vez que visam sensibilizar a população sobre a importância da descarbonização nas diferentes áreas temáticas envolvidas e, posteriormente, capacitá-la, visando torná-la agente transformador da qualidade ambiental, da regeneração urbana e da sustentabilidade do território. Em última análise, procurando fomentar uma cidadania ativa (Silva & PAiva, 2019; Viana & Teixeira, 2020).

O público-alvo destas intervenções foi a comunidade escolar (estudantes, encarregados de educação e dirigentes), os residentes, comerciantes e cidadãos em geral que frequentam a área BUILD. As entidades relacionadas com o projeto (Juntas de Freguesia, Polícia Municipal, Transportes Urbanos de Braga e Câmara Municipal de Braga). As atividades realizadas foram desenvolvidas de acordo com cada um desses públicos (Figura 50).

No âmbito do programa conexão mais cidadania foram promovidos concursos de desenhos para os alunos mais pequenos e as olimpíadas pela descarbonização, cujo objetivo é promover boas práticas ecológicas e clarificar o que é a descarbonização.

Com o objetivo de promover e informar/sensibilizar a população para adotar práticas de mobilidade sustentável, foi realizado um conjunto de atividades, principalmente voltadas à comunidade escolar dos Colégios Dom Diogo de Sousa e Leonardo da Vinci, dada a proximidade desses dois estabelecimentos de ensino aos locais onde as medidas de descarbonização no setor de mobilidade foram implementadas e que, portanto, poderiam ser mais facilmente percebidas. De entre as atividades realizadas estão workshops de ideias e jogos com a temática de mobilidade sustentável voltados aos estudantes e focus-group desenvolvidos com encarregados de educação. No que toca à comunidade, foram realizadas sessões públicas e uma intervenção utilizando urbanismo tático, na qual os participantes ajudaram a construir e instalar mobiliário urbano num espaço público da zona BUILD, o qual recorreu a material reciclado.



Figura 50 BUILD: Atividades desenvolvidas no âmbito do Conexão mais cidadania e ações para uma mobilidade sustentável.

10. Rede FMC de monitorização da qualidade do ar – airly.org

10.1 Enquadramento

A Fundação Mestre Casais constitui-se como uma entidade de referência no panorama nacional no que respeita à promoção de práticas sustentáveis e à disseminação de conhecimento técnico-científico no domínio da sustentabilidade. Criada com o propósito de contribuir para a construção de um futuro mais resiliente, inclusivo e ambientalmente responsável, a Fundação assume um papel ativo na capacitação de cidadãos, empresas e instituições, incentivando a transição para modelos de desenvolvimento mais equilibrados e eficientes.

O objeto estatutário da Fundação Mestre Casais centra-se na promoção de uma cultura de sustentabilidade, abrangendo múltiplas dimensões, entre as quais se destacam a descarbonização, a eficiência na utilização de recursos, a circularidade dos materiais e a preservação da qualidade ambiental. A Fundação procura, assim, potenciar o conhecimento científico e tecnológico sobre estas temáticas, dinamizando projetos, ações de sensibilização e iniciativas de investigação aplicada que visam criar impacto positivo nos territórios e nas comunidades.

Entre as várias linhas de atuação, a Fundação Mestre Casais tem investido no desenvolvimento de soluções que permitam monitorizar, avaliar e melhorar a qualidade do ar em ambiente urbano, reconhecendo a importância crescente deste tema para a saúde pública e para o bem-estar das populações. Este compromisso materializa-se, por exemplo, na instalação de redes de sensores de monitorização ambiental e na disponibilização aberta e gratuita dos dados recolhidos, fomentando uma ciência mais acessível, transparente e orientada para a ação.

Ao longo da sua trajetória, a Fundação tem vindo a afirmar-se como um agente facilitador de parcerias entre o meio académico, o tecido empresarial e os decisores públicos, contribuindo de forma efetiva para o desenvolvimento sustentável e para a integração das preocupações ambientais na gestão das cidades e das organizações.

Neste contexto, o presente capítulo dá particular destaque a uma das iniciativas promovidas pela Fundação Mestre Casais, desenvolvida nos anos de 2021 e 2022: a instalação de uma rede de sensores de qualidade do ar, cuja abrangência geográfica e carácter inovador ilustram exemplarmente

a missão da Fundação de aproximar a ciência da sociedade e de promover um maior conhecimento sobre a qualidade ambiental no espaço urbano.

10.2 Objetivos do projeto

Os objetivos definidos para o projeto da rede nacional FMC de sensores de monitorização da qualidade do ar foram os seguintes:

- Instalar uma rede nacional, com algum equilíbrio territorial entre norte e sul, litoral e interior e regiões autónomas, constituída por 10 sensores localizados nas seguintes cidades: Braga, Bragança, Porto, Viseu, Coimbra, Lisboa, Évora, Faro, Ponta Delgada e Funchal.
- Ligar esta rede de sensores à plataforma Airly, acessível a partir do website airly.org ou da respetiva aplicação móvel.
- Permitir que os dados sejam acedidos livremente e sem custos, em tempo real, aderindo, portanto, ao paradigma de dados abertos praticado pela plataforma Airly.
- Permitir aos cidadãos, através dos dados dos sensores relativos aos principais poluentes, aceder a um índice da qualidade do ar e às respetivas projeções de curto prazo para as localizações dos sensores.
- Contribuir para o incremento da literacia ambiental e da sustentabilidade, alcançando uma população alargada.

10.3. Descrição dos sensores da rede

Os onze sensores que constituem a rede correspondem ao modelo Arly PM+GAS Sensor e foram montados nas sedes distritais e regionais da Ordem dos Engenheiros e na sede do Conselho Económico e Social (Lisboa), ao abrigo de Protocolos de Cooperação celebrados com essas entidades.

O Airly PM+GAS Sensor (Figura 51) constitui uma solução integrada para a monitorização da qualidade do ar, combinando medições de partículas, gases, temperatura, pressão e humidade. De utilização simples e manutenção mínima, destaca-se pela conectividade eficiente, robustez estrutural e adaptabilidade a diferentes contextos de instalação, sendo particularmente indicado para redes urbanas de monitorização, projetos de cidadania ambiental e estudos académicos e institucionais.



Airly PM+GAS Sensor



Sensor instalado em Braga

Figura 51 O sensor Airly PM+GAS.

Parâmetros Medidos

O sensor permite a monitorização contínua dos seguintes parâmetros ambientais:

- Partículas em suspensão (PM1, PM2.5, PM10): intervalo de medição de 0 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ com resolução de $\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Temperatura ambiente: intervalo de -40°C a $+80^\circ\text{C}$ com resolução de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.
- Humidade relativa: intervalo de 0% a 100% com resolução de $\pm 1\%$.
- Pressão atmosférica: intervalo de 700 a 1200 hPa com resolução de ± 1 Pa.
- Gases atmosféricos (NO_2 , O_3 , SO_2 , CO, NO):
 - NO_2 , O_3 , SO_2 , NO: 0 a 5000 ppb com resolução de ± 1 ppb.
 - CO: 0 a 20 000 ppb com resolução de ± 1 ppb.

Frequência e Processamento de Dados

- Intervalo de amostragem: 1 a 2 segundos.
- Intervalo de envio de dados: 5 minutos.
- Intervalo médio (gases): 15 minutos (média de três amostras de 5 minutos).

Estrutura e Dimensões

- Material: aço inoxidável, garantindo resistência e durabilidade em condições exteriores adversas.
- Dimensões: 74 × 112 × 83,5 mm.
- Peso: 490 g.
- Condições operacionais: temperatura entre -40°C e +80°C; humidade entre 0% e 100%.

Instalação e Alimentação

- Altura recomendada de instalação: entre 1,5 m e 8 m acima do solo.
- Fonte de alimentação:
 - USB externo (5V @ 2A), com cabo de 2,9 m.
 - Alternativa: alimentação solar disponível.
 - Consumo médio: 1,2 W (máximo: 2 W), correspondendo a um consumo anual de cerca de 10,5 kWh.
- Requisitos de rede: cobertura GSM mínima de -90 dBm.

Acessibilidade dos Dados

Os dados recolhidos pelo sensor estão acessíveis através de:

- Portal web (map.airly.org).
- Aplicação móvel (iOS, Android e Huawei).
- Widget embutível.
- API Airly.
- Plataforma de Dados Airly (ADP).

Protocolos de Comunicação

A transmissão de dados é assegurada por comunicação GSM, sendo adequada para ambientes urbanos e rurais, desde que a cobertura mínima esteja garantida.

Certificação e Garantia de Qualidade

O sensor está alinhado com esquemas de certificação de monitorização de agências ambientais, assegurando a fiabilidade e comparabilidade das medições.

10.4. O Conceito e o Modelo de Dados Abertos da Plataforma Airly

A Airly distingue-se no panorama internacional como uma plataforma inovadora de monitorização da qualidade do ar, orientada pelos princípios de acessibilidade, transparência e democratização da informação ambiental. Com a missão declarada de tornar visíveis os fenómenos invisíveis da poluição atmosférica, a Airly desenvolve soluções tecnológicas avançadas que permitem medir, visualizar e partilhar dados em tempo real, capacitando cidadãos, autoridades públicas e organizações privadas a adotarem decisões informadas e sustentáveis.

O funcionamento da plataforma apoia-se na instalação de sensores de elevada sensibilidade em áreas urbanas e periurbanas, aptos a detetar, com elevada precisão e em intervalos regulares, os principais poluentes presentes no ar, tais como partículas em suspensão (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_{10}), dióxido de azoto (NO_2), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), entre outros gases de impacto relevante para a saúde pública. Equipamentos como o modelo Airly PM+GAS recolhem estes dados de forma contínua, permitindo ampliar significativamente a cobertura geográfica e temporal dos sistemas de monitorização ambiental.

Atualmente, a rede Airly possui uma presença ampla e consolidada a nível mundial:

- Implantação em cerca de 50 países.
- Cerca de 40 000 pontos ativos de medição distribuídos globalmente.
- Uma aplicação móvel com aproximadamente 2 milhões de downloads.

Estes indicadores demonstram a solidez e o alcance global da Airly, tornando-a uma referência no domínio da vigilância ambiental e da disseminação de dados, com impacto transversal em múltiplos contextos sociais e territoriais.

Um dos pilares distintivos da Airly é a adoção do princípio dos dados abertos (open data). Através deste modelo, as medições recolhidas são tornadas acessíveis ao público em geral, em tempo real, por via digital, sem barreiras de acesso. Qualquer cidadão, investigador, entidade pública ou privada pode aceder aos níveis de poluição atmosférica em tempo real, visualizar mapas interativos e acompanhar a evolução dos indicadores ambientais através da aplicação Airly, disponível em várias plataformas digitais.

Este modelo serve múltiplos objetivos estratégicos:

- **Transparência ambiental:** Garante que a informação crítica sobre qualidade do ar não fica circunscrita a instituições técnicas ou autoridades, mas é aberta e inclusiva, chegando à sociedade civil.
- **Sensibilização e educação ambiental:** Favorece o aumento da literacia ambiental, sensibilizando a população para os riscos da poluição atmosférica e estimulando práticas quotidianas mais sustentáveis.
- **Empoderamento comunitário:** Permite que os cidadãos acompanhem em detalhe a qualidade do ar nas suas áreas de residência, trabalho ou lazer, podendo ajustar comportamentos como deslocações, atividades ao ar livre ou ventilação de interiores, com base em informação atualizada.
- **Apoio à decisão pública e privada:** Oferece a decisores políticos, planeadores urbanos e empresas uma ferramenta robusta de monitorização e avaliação, que apoia a conceção de políticas públicas e estratégias de mitigação.

Os dados fornecidos pela Airly são disponibilizados de forma clara e intuitiva, através de mapas georreferenciados, tabelas de consulta rápida e gráficos temporais que permitem analisar variações horárias, diárias e sazonais. A plataforma inclui ainda um índice de qualidade do ar (Air Quality Index – AQI), expresso por códigos de cor e escalas descritivas, que facilitam a compreensão dos níveis de poluição por parte do utilizador comum.

Além das medições em tempo real, a Airly permite aceder a dados históricos e previsões, viabilizando análises comparativas e estudos de longo prazo, essenciais para a avaliação de políticas ambientais e investigações académicas.

As Figuras 52 a 54 são exemplos de visualizações a partir da plataforma e da aplicação Airly, de dados recolhidos pela rede de monitorização da Fundação Mestre Casais.

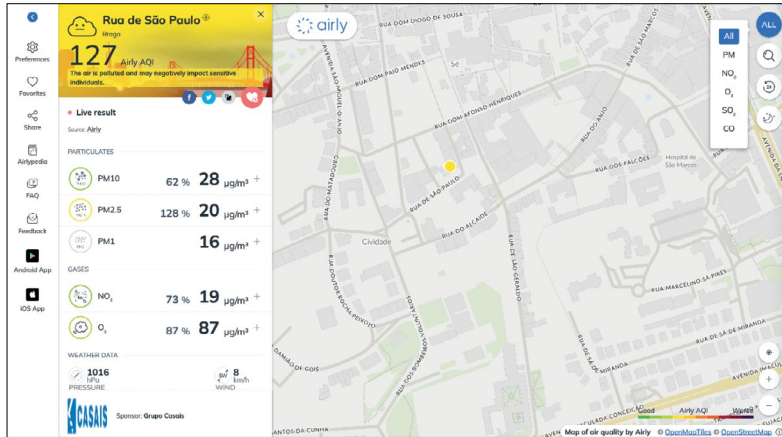


Figura 52 Visualização em airly.org de leituras em tempo real.

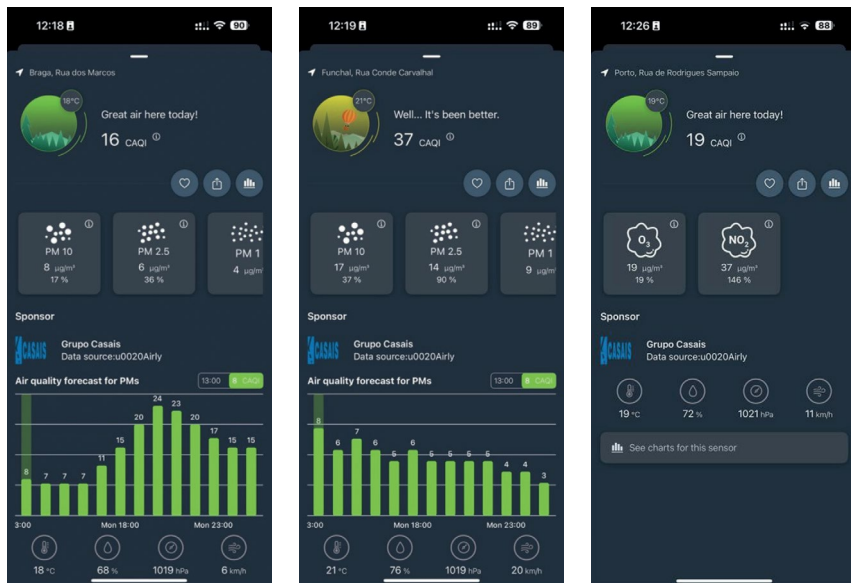


Figura 53 Visualização na aplicação móvel de leituras em tempo real.



Figura 54 Visualização na aplicação móvel de histórico de leituras.

10.5. O Índice de Qualidade do Ar da Airly

A plataforma Airly utiliza como referência o CAQI – Common Air Quality Index (Índice Comum de Qualidade do Ar) para a representação da qualidade do ar em tempo real. Este índice foi desenvolvido no âmbito de projetos europeus para proporcionar uma ferramenta harmonizada de comunicação sobre a qualidade do ar nas cidades.

O CAQI é um índice composto que resulta da análise das concentrações de vários poluentes atmosféricos chave, com especial destaque para:

- Material Particulado (PM_{2,5} e PM₁₀)
- Dióxido de Azoto (NO₂)
- Ozono (O₃)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Enxofre (SO₂) (em alguns casos)

Cada poluente tem uma contribuição individual para o índice, mas o valor final do CAQI corresponde, por definição, ao valor mais elevado entre os índices individuais dos poluentes monitorizados no local e no momento considerados.

Este princípio garante que o índice reflète o pior nível de qualidade do ar presente, de forma conservadora, assegurando que os riscos potenciais não sejam subestimados.

O CAQI apresenta-se numa escala de 0 a 100+, categorizada por faixas qualitativas de fácil interpretação, geralmente associadas a cores específicas, que vão desde a qualidade do ar considerada excelente até níveis muito prejudiciais para a saúde (tabela 8).

Tabela 8 Indicadores de Qualidade Ambiental Urbana.

CAQI	Qualidade do Ar	Cor Associada
0-25	Muito Bom	Azul
25-50	Bom	Verde
50-75	Moderado	Amarelo
75-100	Fraco	Laranja
>100	Muito Fraco	Vermelho

Em alguns sistemas, a escala pode incluir níveis adicionais, como “Perigoso”, para situações de poluição extrema, mas o modelo base da Airly segue normalmente esta estrutura de cinco categorias.

O cálculo matemático do CAQI baseia-se na comparação das concentrações instantâneas medidas de cada poluente com valores de referência definidos por normas europeias ou recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS).

Para cada poluente, aplica-se uma fórmula de interpolação linear entre limites definidos, sendo que o valor individual do poluente é convertido numa pontuação parcial no índice. A fórmula básica pode ser expressa genericamente da seguinte forma (Equação 3).

Equação 3

$$CAQI_{\text{poluente}} = \frac{C_{\text{medido}} - C_{\text{mínimo}}}{C_{\text{máximo}} - C_{\text{mínimo}}} \times (CAQI_{\text{máximo}} - CAQI_{\text{mínimo}}) + CAQI_{\text{mínimo}}$$

Onde:

- C_{medido} = concentração medida no local
- $C_{\text{mínimo}}$ e $C_{\text{máximo}}$ = concentrações de referência para os limites inferior e superior da categoria
- $CAQI_{\text{máximo}}$ e $CAQI_{\text{mínimo}}$ = limites da categoria correspondente no índice

O valor final do CAQI corresponde ao valor mais elevado entre os índices parciais de todos os poluentes monitorizados no momento.

Na plataforma Airly, o CAQI é atualizado em tempo real e apresentado ao utilizador de forma visualmente intuitiva, através de:

- Códigos cromáticos universais, facilitando a perceção imediata da qualidade do ar.
- Ícones e mensagens simples, que indicam se a qualidade do ar é adequada para atividades ao ar livre ou se existem riscos para grupos vulneráveis.
- Mapas georreferenciados e gráficos temporais, permitindo observar flutuações locais e tendências ao longo do tempo.

Exemplos Práticos de Leitura e Classificação no CAQI

(obtidos da informação disponibilizada no website airly.org)

Exemplo 1: Dia com Boa Qualidade do Ar

Local: Zona residencial com pouco tráfego automóvel

Hora: 08h00

Leituras:

- $PM_{2,5}$: $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{10} : $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- NO_2 : $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- O_3 : $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Classificação CAQI:

- $PM_{2,5}$ → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- PM_{10} → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- NO_2 → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- O_3 → Categoria “Muito Bom” (0-25)

CAQI Final:

O valor mais elevado entre os índices individuais situa-se na categoria “Muito Bom”, com um valor de CAQI de 20.

Interpretação: A qualidade do ar é excelente. Não existem restrições para atividades ao ar livre e não se preveem impactos na saúde, mesmo em grupos vulneráveis.

Exemplo 2: Picos de Poluição no Trânsito

Local: Eixo rodoviário urbano com tráfego intenso

Hora: 18h00 (hora de ponta)

Leituras:

- $PM_{2,5}$: 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{10} : 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- NO_2 : 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- O_3 : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Classificação CAQI:

- $PM_{2,5}$ → Categoria “Bom” (25-50)
- PM_{10} → Categoria “Bom” (25-50)
- NO_2 → Categoria “Moderado” (50-75)
- O_3 → Categoria “Muito Bom” (0-25)

CAQ Final:

O valor mais elevado corresponde ao NO_2 , o que posiciona o índice global na categoria “Moderado”, com um valor de CAQI de 65.

Interpretação: A qualidade do ar é aceitável, mas recomenda-se precaução para pessoas com problemas respiratórios, especialmente se pretendem realizar esforços físicos prolongados ao ar livre.

Exemplo 3: Episódio Crítico de Poluição

Local: Centro urbano em dia de forte inversão térmica

Hora: 09h00

Leituras:

- $PM_{2,5}$: 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{10} : 132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- NO_2 : 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- O_3 : 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Classificação CAQI:

- $PM_{2,5}$ → Categoria “Muito Fraco” (>100)
- PM_{10} → Categoria “Muito Fraco” (>100)
- NO_2 → Categoria “Fraco” (75-100)
- O_3 → Categoria “Muito Bom” (0-25)

CAQI Final:

O valor mais elevado corresponde às partículas PM_{10} e $PM_{2,5}$, situando o índice global na categoria “Muito Fraco”, com um valor de CAQI de 110.

Interpretação: A qualidade do ar é muito má. Recomenda-se a limitação das atividades ao ar livre, especialmente para crianças, idosos e indivíduos com doenças cardiovasculares ou respiratórias. A exposição prolongada pode ter efeitos adversos para a saúde mesmo em pessoas saudáveis.

Exemplo 4: Concentração de Ozono em Dia Quente

Local: Periferia urbana com pouca poluição de tráfego

Hora: 15h00

Leituras:

- $PM_{2,5}$: 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{10} : 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- NO_2 : $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- O_3 : $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Classificação CAQI:

- $\text{PM}_{2,5}$ → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- $\text{PM}_{10,0}$ → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- NO_2 → Categoria “Muito Bom” (0-25)
- O_3 → Categoria “Fraco” (75-100)

CAQI Final:

O valor mais elevado corresponde ao ozono, o que posiciona o índice global na categoria “Fraco”, com um valor de CAQI de 80.

Interpretação: Em dias quentes e com elevada radiação solar, o ozono pode atingir níveis prejudiciais. É recomendada precaução para pessoas vulneráveis durante períodos de elevada exposição, especialmente à tarde.

10.6. Projeção da Qualidade do Ar

A plataforma Airly realiza também projeções da qualidade do ar para períodos curtos. O objetivo de gestão ambiental pretende salvaguardar a saúde pública e promover a adoção de comportamentos preventivos por parte dos cidadãos, em períodos de fraca qualidade do ar.

A projeção da evolução do indicador de qualidade do ar CAQI (Common Air Quality Index) é realizada pela Airly com base em combinação de dados em tempo real, modelos matemáticos de dispersão atmosférica, previsões meteorológicas e séries históricas de poluição, resultando em cenários probabilísticos para um determinado local.

São três os pilares metodológicos da projeção da qualidade do ar:

- Dados em tempo real, obtidos a partir das leituras da concentração de espécies poluentes dos sensores ligados à plataforma.
- Modelos físico-químicos atmosféricos, como o CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) ou o WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model with Chemistry), que simulam o transporte,

a reação química e a deposição dos poluentes na atmosfera, considerando variáveis como a direção e a velocidade do vento, a temperatura, a humidade, a pressão atmosférica, a radiação solar e a precipitação.

- Históricos Locais e Machine Learning, nomeadamente modelos estatísticos e algoritmos de aprendizagem automática (machine learning) que analisam padrões históricos de poluição em cada local específico.

O processo de previsão propriamente dito pode ser sintetizado numa sequência de seis fases: (1) Calibração dos Dados Locais; (2) Integração de Dados Meteorológicos; (3) Modelação de Dispersão; (4) Ajuste com Algoritmos Preditivos (5) Cálculo do CAQI Projetado; (6) Visualização e Comunicação.

Um aspecto crítico é o período de previsão, que é mais fiável num horizonte de curto prazo (até 24-48 horas), dado que a incerteza associada à evolução meteorológica e às emissões locais aumenta significativamente em projeções de médio e longo prazo. Há aspetos que afetam a qualidade das previsões, nomeadamente a densidade da rede de sensores, a qualidade dos dados meteorológicos locais e a capacidade adaptativa dos algoritmos utilizados.

No quadro da gestão ambiental, as projeções devem ser usadas pelas autoridades e pela população, principalmente em situações como:

- Alertar grupos vulneráveis (crianças, idosos, pessoas com doenças respiratórias) para eventuais picos de poluição iminentes.
- Planear atividades urbanas (trabalhos ao ar livre, eventos desportivos) com base nas condições ambientais previstas.
- Apoiar a gestão municipal na implementação de medidas de mitigação temporária, como restrições de tráfego ou recomendações para o uso de transportes públicos em dias críticos.

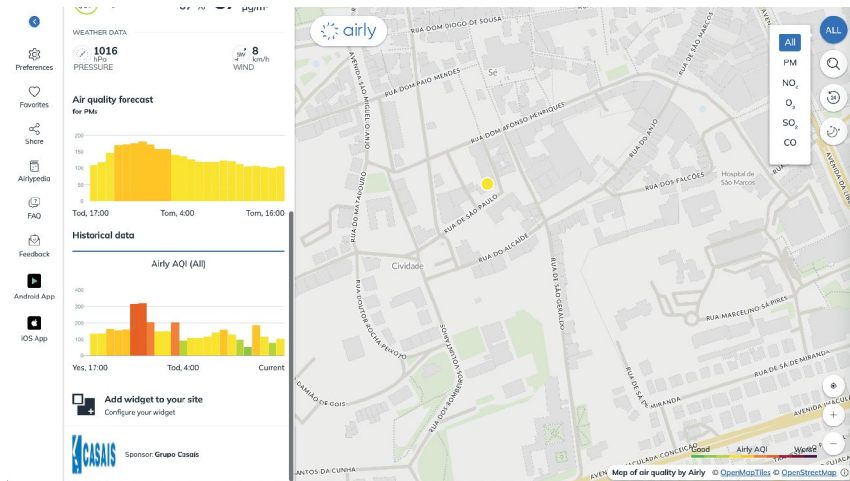


Figura 54 Screen Airly de projeção do indicador da qualidade do ar.

10.7. Nota final

A criação desta rede representa um contributo significativo para a ciência cidadã, disponibilizando informação ambiental acessível e transparente a toda a população. A cobertura nacional garante que cidadãos de diferentes regiões possam consultar as condições da qualidade do ar local e adaptar os seus comportamentos quotidianos de forma informada.

Adicionalmente, este projeto da Fundação Mestre Casais contribui para:

- O reforço da literacia ambiental e da sustentabilidade.
- O apoio a estudos científicos sobre qualidade do ar em diferentes contextos urbanos.
- A criação de dados históricos fiáveis, fundamentais para a avaliação de políticas públicas de mobilidade, planeamento urbano e mitigação da poluição.

A colaboração entre a Fundação Mestre Casais e a Ordem dos Engenheiros revela-se, assim, um exemplo virtuoso de como a conjugação de esforços entre instituições do setor privado e associações profissionais pode gerar impacto social relevante e promover uma cultura de sustentabilidade baseada no conhecimento e na transparência.

Referências

Câmara Municipal de Braga (2017). *Plano de Implementação do Braga Urban Innovation Laboratory Demonstrator (BUILD)*, Braga, Portugal.

Mendes, B., & Silva, L. T. (2016). *Integração de um Sistema de Monitorização Ambiental Urbano numa Smart City, in EuroRegio 2016*.

Mendes, J. F. G., Ribeiro, P., & Silva, L. T. (2010). Sistema de informação e monitorização do ar e ruído - SmarBraga, in *Projecto Mobilidade Sustentável* [Volume II - Manual de Boas práticas para uma mobilidade sustentável, pp. 235 – 240]. Agência Portuguesa do Ambiente.

Ribeiro, R., Araújo, E., & Silva, M. (2020). *Relatório WP2 – Braga Urban Innovation Laboratory demonstrator: SchoolBus* (Documento interno do projeto BUILD). Universidade do Minho. Trabalho realizado para a Câmara Municipal de Braga.

Silva, L. T. (2007). *Avaliação da Qualidade Ambiental Urbana* [Tese de doutoramento publicada]. Universidade do Minho. <https://hdl.handle.net/1822/7515>.

Silva, L. T., & Mendes, J. F. G. (2012). City Noise-Air: an environmental quality index for cities. *Sustainable Cities and Society*, 4 (1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.001>.

Silva, L. T., & Paiva, F. (2018). *Relatório WP2 – Braga Urban Innovation Laboratory demonstrator: Diagnóstico dos pressupostos estabelecidos na situação de referência* (Documento interno do projeto BUILD). Universidade do Minho. Trabalho realizado para a Câmara Municipal de Braga.

Silva, L. T., & Paiva, F. (2019). *Assessoria técnica no âmbito da avaliação dos impactos decorrentes das ações implementadas na área de intervenção - Relatório WP2 - Braga Urban Innovation Laboratory Demonstrator*, Braga, Portugal.

Silva, S., & Almeida, M. (2019). *Relatório WP2 – Braga Urban Innovation Laboratory demonstrator: Avaliação do Desempenho Termo-energético da Escola Básica do 1º Ciclo com Jardim de Infância de Enguardas* (Documento interno do projeto BUILD). Universidade do Minho. Trabalho realizado para a Câmara Municipal de Braga.

Torres, M., Silva, L. T., Mendes, J. F. G., Santos L. (2013). Health and well-being in urban areas: policy to practice. *Revista de Saúde Pública*, 31 (1), 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.rpsp.2013.04.001>.

Viana, I., & Teixeira, C. (2020). *Relatório WP4 – Braga Urban Innovation Laboratory demonstrator: Conexão + Cidadania* (Documento interno do projeto BUILD). Universidade do Minho. Trabalho realizado para a Câmara Municipal de Braga.

Qualidade ambiental urbana

Ruído e poluição atmosférica em cidades

A obra “Qualidade Ambiental Urbana: Ruído e Poluição Atmosférica em Cidades” constitui uma reflexão aprofundada sobre a interação entre o ambiente construído, o ruído e a poluição atmosférica – fatores determinantes na qualidade de vida e na sustentabilidade das cidades contemporâneas.

Partindo de uma perspetiva interdisciplinar que cruza a engenharia urbana, as ciências ambientais e o planeamento urbano, o livro propõe uma leitura integrada destes dois domínios, frequentemente analisados de forma isolada, evidenciando como a sua compreensão articulada permite definir estratégias mais eficazes de gestão e políticas públicas baseadas em conhecimento científico.

A Parte I apresenta o enquadramento conceptual e normativo dos temas, abordando as principais fontes, métodos de medição e modelação, bem como os impactos na saúde e no ambiente urbano. São também discutidas as diretivas europeias e os instrumentos de planeamento aplicáveis em Portugal, sublinhando o papel das autoridades locais na implementação de planos de ação e mapas estratégicos.

A Parte II centra-se na aplicação prática das metodologias através de estudos de caso em Viana do Castelo, Braga e Vila Real, onde se destacam os modelos CityAir e CityNoise-Air, que integram indicadores de ruído e qualidade do ar num índice composto de Qualidade Ambiental Urbana.

A obra valoriza ainda as Soluções Baseadas na Natureza (NbS), com destaque para as Estruturas Verdes Urbanas – corredores verdes, parques, coberturas e fachadas vegetadas – pela sua capacidade de filtrar poluentes, mitigar o ruído e reduzir o efeito de ilha de calor. O livro constitui, assim, um contributo relevante para profissionais e investigadores comprometidos com a construção de cidades mais sustentáveis, resilientes e saudáveis.

Na Coleção de *Ensaios para a Sustentabilidade* da Fundação Mestre Casais, os temas a tratar e os autores são selecionados de forma a representarem as dimensões ambiental, climática, social, humana e económica da sustentabilidade, no respeito pelos valores do conhecimento, da independência, da transparência, do humanismo e do diálogo, consagrados nos Estatutos da Fundação.



Fundação
Mestre
Casais



UMinho Editora



Universidade do Minho

ISBN 978-989-9074-92-7



9 789899 074927 >