



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estudo do Impacte de uma Zona de Emissões Reduzidas em Coimbra

Dissertação a apresentar para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Ruben José Silva Gomes

Orientadores

Oxana Tchepel (DEC-FCTUC)

Daniela Dias (DEC-FCTUC)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, tenho de agradecer aos meus pais que graças aos seus esforços e sacrifícios que fizeram, possibilitaram-me esta oportunidade única de adquirir conhecimentos, crescer como pessoa e de me proporcionarem um futuro melhor. Ao meu irmão por todo o carinho e por ser uma fonte de motivação. E um agradecimento a toda a minha família.

Agradeço a todos os meus amigos que e acompanharam ao longo deste percurso académico, pela partilha e por todos os momentos que passamos juntos. Um agradecimento especial ao meu primo João Carlos e ao Carlos Inácio por toda a ajuda e o apoio ao longo destes meses. À Patrícia Prazeres pela sua ajuda, apoio, compreensão e por todas as vezes que me fez acreditar nas minhas capacidades quando mais precisava.

Quero dizer um muito obrigado aos meus orientadores, Professora Dra. Oxana Tchepel e a Dra. Daniela Dias, por todo o tempo despendido, sugestões, esclarecimentos de dúvidas e partilha de conhecimento que foram bastante uteis ao longo destes meses de trabalho.

Ao projeto TRAPHIC “Traffic related air pollution impacts on historic city centres: na integrated approach” (PTDC/EC MURB/3329/2014; POCI-01-0145-FEDER-016729) pela disponibilização de informação necessária para a realização deste trabalho e pela oportunidade de proporcionar estudos nesta área com o objetivo de melhorar a qualidade do ar na cidade de Coimbra.

Por último, mas não menos importante, ao Instituto Geofísico de Coimbra, na pessoa do Dr. Paulo Ribeiro, pela cedência dos dados meteorológicos e pela sua disponibilidade em esclarecer eventuais dúvidas.

RESUMO

Apesar de ter melhorado a qualidade do ar em áreas urbanas nas últimas décadas, os níveis de poluição ainda continuam elevadas, causando impactos negativos na saúde humana. As emissões de poluentes do tráfego rodoviário são umas das principais razões pela degradação da qualidade do ar nas áreas urbanas. Assim, cada vez mais se tem implementado medidas com o objetivo de promover melhorias na qualidade do ar.

O objetivo desta dissertação consistiu na avaliação do impacto na qualidade do ar esperado numa área urbana com a introdução de uma potencial Zona de Emissões. Para este estudo foi necessário recorrer a dois tipos de modelos. Inicialmente recorreu-se a um modelo de emissões, QTraffic, desenvolvido na Universidade de Coimbra, no qual permitiu estimar as emissões do tráfego rodoviário. Por último, utilizou-se um modelo de qualidade do ar, ADMS-Roads, para a caracterização da dispersão de poluentes. A metodologia foi aplicada à área urbana de Coimbra, mais propriamente à zona de proteção e ao património mundial.

Com base nos resultados obtidos foi possível avaliar o impacto na qualidade do ar esperada com a introdução de uma Zona de Emissões Reduzidas. Constatou-se que haveria reduções nas emissões de PM₁₀ (61%), NO_x (42%) e NO₂ (22%), servindo como um bom indicador na melhoria da qualidade do ar. Quanto aos resultados do modelo de qualidade do ar, ficou claro que seria de esperar melhorias na qualidade do ar com reduções máximas nas concentrações médias anuais de PM₁₀ (1,23 µg/m³) e de NO₂ (4,41 µg/m³) mas contudo, seria de esperar um impacto negativo no caso de O₃.

Este trabalho pretende contribuir para um melhor entendimento do impacto potencial na qualidade do ar com a aplicação de uma Zona de Emissões Reduzidas e avaliar qual seria o benefício caso uma medida deste tipo fosse aplicada à área urbana de Coimbra.

Palavras-chave: poluentes, tráfego rodoviário, qualidade do ar, modelos de emissões, modelos de qualidade do ar, zonas de emissões reduzidas, Coimbra.

ABSTRACT

Despite improving air quality in urban areas in recent decades, pollution levels still remain high, causing negative impacts on human health. The road traffic pollutants emissions are one of the main reasons for the degradation of air quality in urban areas. So, increasingly we have implemented measures in order to promote improvements in air quality.

The objective of this work was the impact assessment on air quality expected in an urban area with the introduction of a potential Emission Zone. For this study it was necessary to use two types of models. Initially resorted to an emissions model, QTraffic, developed at the University of Coimbra, which allowed us to estimate emissions from road traffic. Finally, we used a model of quality of air, ADMS-Roads, enabling to characterize the dispersion of pollutants. The methodology was applied to the urban area of Coimbra, more specifically the protection zone and the world heritage.

Based on the results it was possible to assess the impact on the quality of air expected with the introduction of a Reduced Emissions Zone. It was found that there would be reductions in emissions of PM₁₀ (61%), NO_x (42%) and NO₂ (22%), serving as a state in improving air quality. As for the results of the air quality model, it became clear that expected maximum reductions in the annual average concentrations of PM₁₀ (1.23 µg/m³) and NO₂ (4.41 µg/m³) but however, would expect a negative impact in the case of O₃.

This work aims to contribute to a better understanding of the potential impact on air quality with the implementation of a Reduced Emissions Zone and evaluate what would be the benefit if such a measure were applied to the urban area of Coimbra.

Keywords: pollutants, road traffic, air quality, emission models, air quality models, low emission zones, Coimbra.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DA ARTE	4
2.1 Poluição Atmosférica na Europa	4
2.2 Legislação sobre a Qualidade do Ar.....	7
2.3 Transporte Rodoviário como Fonte de Poluição	10
2.3.1 Normas de Emissão	11
2.3.2 Zona de Emissões Reduzidas.....	12
2.3.2.1 Zonas de Emissões Reduzidas na União Europeia.....	13
2.3.2.2 Zona de Emissões Reduzidas em Portugal.....	15
2.4 Modelação de Emissões.....	19
2.5 Modelação da Qualidade do Ar	19
2.5.1 Modelos Gaussianos.....	21
3 Caso de Estudo	23
3.1 Definição e Caraterização da Área de Estudo	23
3.1.1 Dados Demográficos e Mobilidade.....	24
3.2 Qualidade do Ar.....	25
3.3 Definição e Caraterização da Zona de Emissões Reduzida.....	28
4 Aplicação	30
4.1 Modelação de Emissões - QTraffic	31
4.1.1 Descrição Geral do Modelo	31
4.1.2 Aplicação do Modelo	32
4.2 Modelação de Qualidade do ar - ADMS-Roads	36
4.2.1 Descrição Geral do Modelo	36
4.2.2 Aplicação do Modelo	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Emissões	45

5.2	Qualidade do Ar.....	47
5.3	Validação do Modelo de Qualidade do Ar	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	55
6.1	Considerações Finais.....	55
6.2	Trabalhos Futuros	57
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Percentagem (%) da população urbana exposta a concentrações de poluentes acima dos limites regulamentares da UE entre 2000 e 2013 (EEA@, 2016c).....	5
Figura 2.2 - Percentagem (%) da população urbana exposta acima das concentrações de poluentes recomendadas pela OMS entre 2000 e 2013 (EEA@, 2016c).....	5
Figura 2.3 - Impacte da poluição atmosférica sobre a saúde humana (EEA, 2013).....	6
Figura 2.4 - Enquadramento legislativo da avaliação e gestão do ar ambiente na União Europeia e Portugal (Nogueira e Mesquita, 2014 [Imagem editada]).....	9
Figura 2.5 - Quota, por setor, das emissões de PM ₁₀ , PM _{2.5} e NO _x na EU em 2011 (EEA@, 2014a; EEA@, 2014b).....	10
Figura 2.6 - Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa (CM-Lisboa@, 2016).....	16
Figura 2.7 - Conformidade legal de PM ₁₀ na Avenida da Liberdade (APA@, 2016).....	18
Figura 2.8 - Conformidade legal de NO ₂ na Avenida da Liberdade (APA@, 2016).....	18
Figura 2.9 - Esquematização da variação dos perfis de concentração segundo uma distribuição Gaussiana (Stockie, 2011).....	22
Figura 3.1 - Enquadramento da área de estudo da cidade de Coimbra.....	23
Figura 3.2 - Distribuição da população de Coimbra por faixas etárias em 2011 (INE, 2011).....	24
Figura 3.3 - Estrutura rodoviária do de Coimbra (ParqueExpo, 2012).....	25
Figura 3.4 - Localização das estações de monitorização da qualidade de ar de Coimbra....	26
Figura 3.5 - Localização do Património Mundial e Zona de Proteção de Coimbra e a área definida como ZER (UNESCO@, 2016 [Imagem editada]).....	29
Figura 4.1 - Abordagem de modelação (Dias et al., 2016).....	30
Figura 4.2 - Fatores de emissão de NO _x em função da velocidade média para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e norma EURO 3 (Dados obtidos do QTraffic).....	32
Figura 4.3 - Perfil do trânsito rodoviário na Avenida Fernão Magalhães no dia 12 de Junho de 2014 (Pinto, 2014).....	34
Figura 4.4 - Representação da variação do comprimento de Monin-Obukhov com a estabilidade atmosférica (ADMS-Roads, 2013).....	39
Figura 4.5 - Esquematização dos dados mínimos e recomendados pelo ADMS-Roads (ADMS-Roads, 2013).....	40

Figura 4.6 - Localização espacial da estação da AFM e a geometria das vias rodoviárias, e respetiva indicação do domínio de modelação.....	42
Figura 4.7 - Rosa-dos-ventos no ano de 2013 para Coimbra.....	43
Figura 5.1 - Distribuição espacial das emissões diárias para cada via de PM10 e NO _x em Coimbra para o cenário de referência.....	46
Figura 5.2- Variação espacial esperada nas emissões diárias para cada via de PM10 e NO _x na área de estudo com a potencial introdução de uma ZER.....	47
Figura 5.3 - Distribuição espacial das concentrações médias anuais de PM10 e NO ₂ em Coimbra no cenário de referência.....	48
Figura 5.4 - Variação espacial esperada com a introdução da ZER nas concentrações médias anuais de PM10 e NO ₂ em Coimbra.....	49
Figura 5.5 - Variação espacial esperada com a introdução da ZER nas concentrações médias anuais de O ₃ em Coimbra.....	50
Figura 5.6 - Comparação entre as concentrações médias diárias de PM10 obtidas pela modelação para o cenário de referência e dados medidos na estação de monitorização da AFM.....	52
Figura 5.7 - Comparação entre as concentrações médias diárias de NO ₂ obtidas pela modelação para o cenário de referência e dados medidos na estação de monitorização da AFM.....	52

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Limites de emissões [g/km] dos gases de exaustão dos veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e gasolina (EEA, 2016).....	12
Quadro 2.2 - Data de introdução das normas EURO para cada tipo de veículo (Transportpolicy @, 2016).....	12
Quadro 2.3 - Avaliação qualitativa do impacte de vários parâmetros dentro de uma ZER (DEFRA, 2009).....	13
Quadro 2.4 - Panorama geral das Zonas de Emissões Reduzidas na União Europeia (Urban Access Regulations@, 2016; Umweltbundesamt@, 2016; Helsingin kaupunki@, 2016).....	14
Quadro 2.5 - Esquematização das fases de implementação da Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa (CM-Lisboa@, 2016).....	17
Quadro 2.6 - Descrição das escalas dos fenómenos de dispersão(Moussiopoulos et al, 1996)20	
Quadro 3.1 - Características das estações de monitorização da qualidade do ar de Coimbra..26	
Quadro 3.2 - Conformidade legal dos principais poluentes monitorizados pela estação da Avenida Fernão Magalhães e do Instituto Geofísico de Coimbra (APA@, 2016)27	
Quadro 3.3 - Legislação da União Europeia relativa à qualidade do ar para os poluentes PM10, NO ₂ e O ₃ (Diretiva 2008/50/CE; Diretiva 2004/107/CE).....	27
Quadro 4.1 - Distribuição dos veículos por categoria (Pinto, 2014).....	33
Quadro 4.2 - Distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por tipo de combustível (INE, 2013).....	34
Quadro 4.3 - Estimativa da distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por cilindrada [%].....	35
Quadro 4.4 - Distribuição da frota automóvel Portuguesa de veículos ligeiros de passageiros em 2012 por norma EURO com base na idade dos veículos.....	35
Quadro 4.5 - Proporção de NO ₂ /NO _x nas emissões de exaustão dos veículos ligeiros de passageiros para diferentes normas EURO (Grice et al., 2009).....	36
Quadro 4.6 - Condição atmosférica em função do comprimento de Monin-Obukhov e o fluxo de calor sensível da superfície (Middleton e Thomson, 2002).....	38
Quadro 4.7 - Reações químicas assumidas pelo ADMS-Roads (ADMS-Roads, 2013).....	40

Quadro 4.8 - Valores médios mensais da temperatura e radiação solar global, e precipitação total mensal no ano de 2013 registado no Instituto Geofísico de Coimbra.....	44
Quadro 5.1 – Emissões diárias obtidas no QTraffic para diferentes cenários dentro da área considerada Zona de Emissões Reduzidas.....	46
Quadro 5.2 - Indicadores estatísticos de qualidade utilizados na validação da modelação (Thunis et al., 2011; Monteiro et al., 2011).....	53
Quadro 5.3 - Valores dos indicadores estatísticos para os resultados modelados de NO ₂ e PM10.....	54

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AFM - Avenida Fernão Magalhães

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

BaP - Benzeno(a)pireno

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

FE – Fator de Emissão

FPD - Filtro de Partículas Diesel

HC - Hidrocarbonetos

IGC - Instituto Geofísico de Coimbra

INE – Instituto Nacional de Estatísticas

LIP – Limite de Informação à População

NO₂ - Dióxido de Azoto

O₃ – Ozono Troposférico

OMS – Organização Mundial de Saúde

PM - Partículas em Suspensão

PM10 – Partículas em Suspensão com diâmetro inferior a 10 micrómetros

PM2.5 - Partículas em Suspensão com diâmetro inferior a 2.5 micrómetros (Partículas Finas)

RCS - Redutor Catalítico Seletivo

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SO₂ - Dióxido de Enxofre

UE – União Europeia

ZER - Zonas de Emissões Reduzidas

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar na Europa tem vindo a ter algumas melhorias mas ainda apresenta na sua maioria níveis de poluição elevados, e portanto, tem havido um esforço contra a poluição atmosférica através de novas medidas e políticas. Na União Europeia (UE) por causa deste problema ambiental e de saúde pública, levou à criação de diretivas comunitárias sobre a gestão e avaliação da qualidade do ar. É nas áreas urbanas onde se localizam as concentrações mais elevadas de poluentes, pois são zonas atrativas à população devido as suas características socioeconómicas.

A poluição atmosférica provoca danos na saúde humana, desde irritações, doenças respiratórias e cardiovasculares a consequências mais graves como a morte prematura. Alguns poluentes apesar de provocarem danos à saúde pública, as suas concentrações registadas na UE não demonstram motivos de preocupação. Ao contrário de alguns poluentes que são preocupantes, não só pelas suas concentrações elevadas mas também pelos danos que estes causam na saúde humana.

O transporte rodoviário é a principal fonte de poluição nas áreas urbanas, porque emitem poluentes para atmosfera devido à combustão de combustíveis que têm consequências na saúde humana. Alguns poluentes não são diretamente emitidos pelo transporte rodoviário mas são responsáveis pela emissão de poluentes percursores de poluentes na atmosfera.

Por causa da má qualidade do ar e incumprimento das diretivas relativas à qualidade do ar estipuladas pela UE, muitos países começaram a implementar nas suas áreas urbanas sistemas de controlo do tráfego rodoviário com o objetivo de promover a redução das concentrações de poluentes. Um sistema bastante praticado nos países da UE são as Zonas de Emissões Reduzidas (ZER). Este tipo de sistema/medida consiste na limitação, restrição ou dissuasão dos veículos mais poluentes em determinadas áreas. Esta é considerada uma medida bastante eficaz no que diz respeito à melhoria da qualidade do ar. Isto só é possível devido à legislação da UE sobre o transporte rodoviário, pois define limites de emissões para determinados poluentes e por consequência os veículos mais recentes tendem a emitir menos poluentes.

A avaliação da qualidade do ar tem sido feita através de monitorização em pontos fixos. Contudo o uso de ferramentas de modelação de qualidade do ar têm-se revelado importantes na avaliação do impacto na qualidade do ar de medidas de redução da poluição. Estas ferramentas simulam as concentrações de poluentes numa determina área tendo conta vários fatores.

A cidade de Coimbra tem registado em anos anteriores concentrações elevadas de poluição, desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o impacto na qualidade do ar de uma potencial implementação de ZER na área urbana de Coimbra. Para atingir este objetivo foi necessário caracterizar a situação atual na UE em termos de qualidade do ar e quais as medidas estão a ser utilizadas para promover melhorias na qualidade do ar. Teve-se de recorrer a um conjunto de ferramentas de modelação para avaliar o impacto esperado na qualidade do ar. Nomeadamente, um modelo de emissões para estimar as emissões do tráfego rodoviário e um modelo de qualidade do ar para caracterizar a dispersão dos poluentes. Utilizou-se dados das estações de monitorização da cidade de Coimbra, uma para validar os resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar e uma outra para caracterizar as concentrações de fundo da área de estudo. A fim de avaliar o impacto na qualidade do ar de uma potencial ZER, foi feita uma análise à qualidade do ar ao cenário de referência e ao cenário com ZER para quantificar a melhoria esperada com a aplicação desta medida.

Para além deste capítulo introdutório, este trabalho divide-se em outras cinco partes. Portanto, segue-se uma breve descrição dos restantes capítulos presentes neste trabalho.

Capítulo 2, Estado de Arte. Pretendeu-se realizar uma revisão bibliográfica a todos os temas essenciais e necessários à realização deste trabalho. Vários temas são abordados, nomeadamente a poluição e suas consequências na saúde pública, enquadramento da evolução da legislação referente à qualidade do ar, análise ao sector do transporte rodoviário como fonte de poluição e a legislação sobre as suas emissões, e o conceito de ZER e o panorama geral na UE. Por último, é feita uma abordagem aos modelos de emissões e de qualidade do ar.

Capítulo 3, Caso de Estudo. Tem o objetivo de caracterizar a área de estudo, caracterizando a demografia e mobilidade, qualidade do ar com base nos dados históricos das estações de monitorização e mencionar as definições e características da potencial ZER aplicar na área urbana de Coimbra.

Capítulo 4, Aplicação. Neste capítulo é descrito as ferramentas de modelação utilizadas, alguns conceitos teóricos importantes para a sua compreensão e todas as etapas necessárias na

realização deste trabalho. É indicado todos os dados de entrada para cada modelo e todas as considerações assumidas/necessárias.

Capítulo 5, Resultados e Discussão. Inclui a análise e discussão dos resultados obtidos no modelo de emissões e de qualidade do ar, e uma avaliação da validade dos dados obtidos do modelo de qualidade do ar.

Capítulo 6, Considerações Finais e Trabalhos Futuros. São apresentadas as conclusões e algumas considerações relevantes e que devem ser devidamente mencionadas e explicadas. Também é feita a indicação de algumas propostas para trabalhos futuros relacionados com o tema desenvolvido nesta dissertação.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Poluição Atmosférica na Europa

Ao longo das últimas décadas, a Europa tem tentado minimizar a poluição atmosférica através da implementação de novas medidas e políticas. Apesar de algumas melhorias na qualidade do ar em todo o continente, as concentrações dos poluentes atmosféricos continuam demasiado elevadas, afetando tanto a saúde pública como o ambiente (EEA@, 2016a). Uma percentagem significativa da população da UE vive em zonas urbanas (75%), onde a legislação referente à qualidade do ar não tem sido respeitada (EEA@, 2016a; EEA@, 2016b; Eurostat, 2016).

O último relatório sobre a qualidade do ar na Europa (2015) evidencia que uma percentagem considerável da população urbana continua exposta a níveis de poluição elevados. As Partículas em Suspensão (PM), Dióxido de Azoto (NO₂) e o Ozono Troposférico (O₃) são considerados os poluentes mais problemáticos na Europa em termos de danos à saúde humana (EEA, 2015). De salientar que as PM são atualmente regulamentadas em dois tipos, PM_{2.5} (Partículas em Suspensão com diâmetro inferior a 2,5mm) e PM₁₀ (Partículas em Suspensão com diâmetro inferior a 10mm) (Diretiva 2008/50/CE). As PM_{2.5} têm um diâmetro menor em relação às PM₁₀, representando maior perigosidade para a saúde humana devido à facilidade de penetração profunda nos pulmões (Benton-Short e Short, 2013).

Entre 2000 e 2013 a população urbana foi exposta a níveis de poluição acima dos valores de referência/recomendados pela UE (Figura 2.1) e pela Organização Mundial de Saúde (OMS) (Figura 2.2). No Quadro 1 do anexo A-1 encontram-se os valores de referência usados como indicador nas figuras, isto porque alguns poluentes têm mais do que um valor definido, assim, o indicador utiliza o que representa maior perigo para a saúde humana (EEA@, 2016c).

Pela análise das duas figuras, considerando as recomendações de qualidade do ar da OMS, o panorama a considerar é mais grave, isto porque as recomendações sobre a qualidade do ar são mais rigorosos em relação aos valores de referência estabelecidos pela UE (EEA@, 2016c). Não é possível identificar qual o poluente mais crítico por esta análise, isto porque os valores usados como indicadores são diferentes, e além disso alguns valores limite/alvo estipulados pela UE ainda têm uma tolerância associada. Mas independentemente dos valores a considerar (UE ou OMS), no geral houve uma pequena diminuição da população exposta no período em

análise mas é evidente que uma percentagem significativa ainda continua exposta a concentrações elevadas destes poluentes.

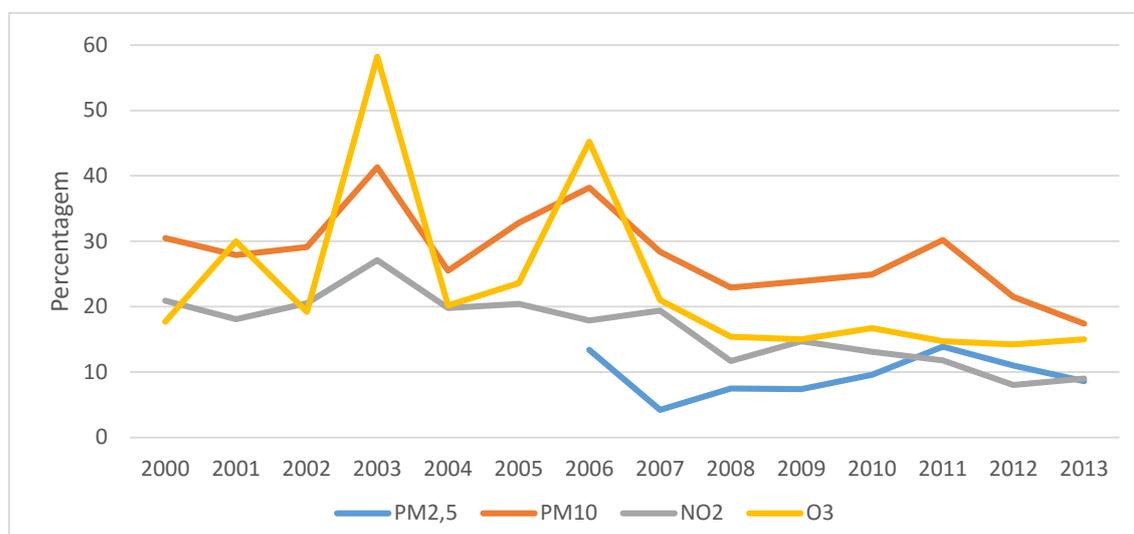


Figura 2.1 Percentagem (%) da população urbana exposta a concentrações de poluentes acima dos limites regulamentares da UE entre 2000 e 2013 (EEA@, 2016c)

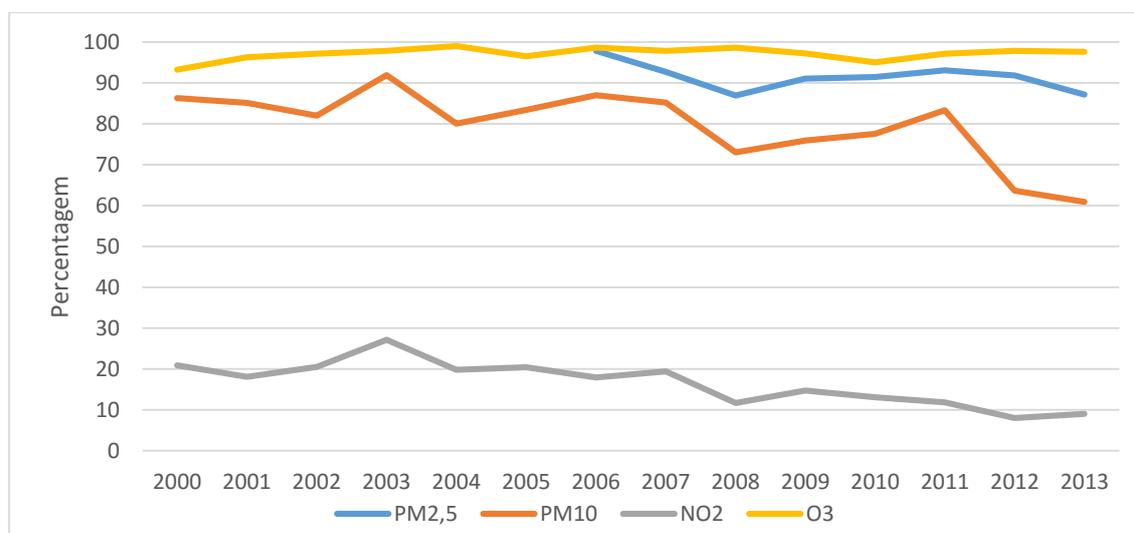


Figura 2.2 - Percentagem (%) da população urbana exposta acima das concentrações de poluentes recomendadas pela OMS entre 2000 e 2013 (EEA@, 2016c)

A poluição do ar, e em particular o material particulado (PM), foi recentemente classificado como um agente cancerígeno pela International Agency for Research on Cancer (IARC, 2013). Os poluentes atmosféricos têm um impacto negativo na saúde humana, como ilustrado na Figura 2.3, afetando particularmente a população mais sensível. Alguns poluentes, apesar de

não terem sido mencionados anteriormente, também provocam danos na saúde e portanto não devem ser desprezados (EEA, 2015).

Um poluente cancerígeno de preocupação crescente na Europa, Benzeno(a)pireno (BaP), encontrado geralmente em partículas finas (PM_{2.5}), é utilizado como marcador do risco cancerígeno dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (EEA, 2015; Diretiva 2004/107/CE). Em 2013 um quarto da população urbana da UE foi exposta a níveis de poluição do BaP acima do valor-alvo definido pela UE. Quanto ao Dióxido de Enxofre (SO₂), a população urbana exposta a concentrações acima do valor-limite diário da UE diminuiu de 2000 a 2013 para 0% (desde 2010), no que diz respeito às recomendações da OMS houve uma diminuição constante desde 2000 de 84% até 2012 de 36%. Poluentes como o monóxido de carbono, benzeno e metais pesados também têm consequências na saúde humana, mas as suas concentrações nos últimos anos têm sido geralmente baixas (EEA, 2015; EEA@, 2016b).

A legislação da UE e as recomendações da OMS sobre a qualidade do ar encontram-se indicadas no Quadro 2 do anexo A-2 e no Quadro 3 do anexo A-3, respetivamente. A legislação da UE é descrita em maior detalhe na próxima secção deste capítulo.

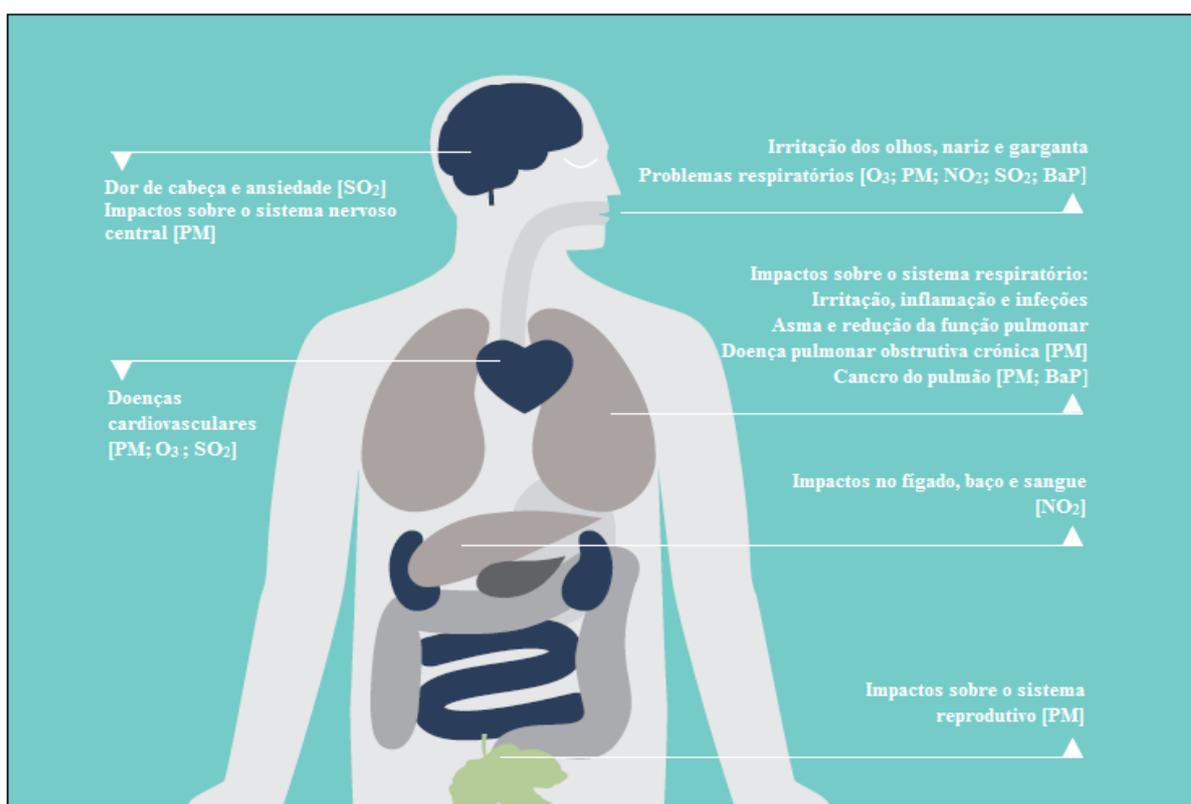


Figura 2.3 - Impacte da poluição atmosférica sobre a saúde humana (EEA, 2013)

Estimativas para 2012, atribuem para os três principais poluentes, PM, NO₂ e O₃, a responsabilidade pela morte prematura de meio milhão de pessoas na UE. Segundo essas estimativas, as PM são o principal responsável pelas mortes prematuras, seguido do NO₂ e por último o O₃. No entanto, nalguns países o O₃ é o segundo principal poluente responsável pelas mortes prematuras ao invés do NO₂ (EEA, 2015).

2.2 Legislação sobre a Qualidade do Ar

A poluição atmosférica tem sido um dos problemas centrais da política da UE desde o final da década de 1970. As políticas sobre a qualidade do ar têm o intuito de desenvolver e implementar instrumentos apropriados à sua melhoria, sendo parte dos seus objetivos, o controlo das emissões de fontes móveis e a promoção e integração de requisitos de proteção ambiental no sector dos transportes e da energia (CE@, 2016).

Após o quinto programa de ação em matéria do ambiente (1992), que recomendava o estabelecimento de objetivos a longo prazo na área da qualidade do ar, surge em 1996 uma diretiva-quadro do Conselho da União Europeia relativa à avaliação e gestão da qualidade do ar ambiente (Diretiva 96/62/CE). Esta diretiva-quadro veio complementar a legislação europeia existente e introduzir normas aos poluentes que ainda não tinham sido objeto de regulamentação (Diretiva 96/62/CE; Nogueira e Mesquita, 2014). A fim de proteger o ambiente e a saúde humana, era necessário evitar, prevenir e reduzir as concentrações dos poluentes atmosféricos nocivos através do estabelecimento de valores-limite e/ou limiares de alerta para os níveis de poluição do ar ambiente. Identificou uma possível necessidade de complementar ou substituir os valores-limite e limiares de alerta por valores-alvo no caso do O₃ (Diretiva 96/62/CE).

Os objetivos gerais da diretiva-quadro consistiam em definir princípios de base de uma estratégia comum destinada a (Diretiva 96/62/CE):

- Definir e estabelecer objetivos para a qualidade do ar ambiente.
- Avaliar a qualidade do ar ambiente com base em métodos e critérios comuns aos estados membros.
- Dispor da informação relativa à qualidade do ar e divulgá-la ao público, designadamente através de limiares de alerta.
- Manter a qualidade do ar ambiente, quando esta é aceitável, e melhorar quando não se encontrava com devida qualidade.

Adicionalmente, com a introdução da Diretiva 96/62/CE, a avaliação da qualidade do ar tornou-se obrigatória em aglomerações com mais de 250 000 habitantes ou zonas onde as concentrações se aproximam dos valores-limite/alvo. No caso de excedência destes valores, os

estados membros devem implementar medidas de forma a alcançar o cumprimento desses mesmos valores. Em situações de excedência dos limiares de alerta os estados membros têm de informar a população e a Comissão. Destaca ainda a importância de combinação de ferramentas de modelação de qualidade do ar com a monitorização na avaliação do cumprimento dos limites legais (Diretiva 96/62/CE). Após a entrada em vigor da diretiva-quadro, no qual definiu um quadro legislativo para um conjunto de 12 poluentes, posteriormente surgiram as diretivas filhas, definindo quais os valores-limite (acrescido de uma margem de tolerância, se aplicável), valores-alvo e limiares de alerta para os respetivos poluentes (Nogueira e Mesquita, 2014).

Para um entendimento da legislação, é necessário a compreensão dos vários tipos de valores e o limiar, deste modo encontra-se em baixo a definição (Diretiva 96/62/CE):

- Valor-limite é um nível fixado com base em conhecimentos científicos com o objetivo de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos sobre a saúde humana e/ou o ambiente, suscetível de ser atingido num determinado prazo, quando atingido, não deve ser excedido.
- Valor-alvo é um nível fixado com o objetivo, a longo prazo, de evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos na saúde humana e/ou o ambiente na sua globalidade, a ser alcançado no decorrer de um determinado prazo.
- Limiar de alerta é o nível acima do qual a exposição de curta duração acarreta riscos para a saúde humana e a partir do qual obriga os estados membros a tomar medidas imediatas.

No total foram criadas quatro diretivas filhas. Na terceira diretiva filha houve estabelecimento de um limiar de alerta e informação, este último tipo de limiar não estava previsto pela diretiva-quadro. A sua definição é idêntica ao limiar de alerta, a diferença reside num valor mais baixo, estabelecido com base nos riscos para a saúde humana da população mais sensível e requer a divulgação imediata de informação (Diretiva 2002/3/CE). Relativamente à quarta diretiva filha, apenas foram estabelecido valores alvo, devido, às substâncias regulamentadas serem consideradas agentes cancerígenos, impossibilitando assim a identificação de limiares abaixo do qual não representa qualquer tipo de risco para a saúde humana (Diretiva 2004/107/CE).

Em 2008, devido à necessidade de clareza e simplificação, surge a Diretiva 2008/50/CE que agrega em apenas um ato legislativo, as disposições legais da Diretiva-quadro 96/62/CE, as três primeiras diretivas filhas e a Decisão do Conselho 97/101/CE, que estabelece um intercâmbio de informação sobre a qualidade do ar nos estados membros. Estabelece ainda para as PM2.5, que ainda não havia sido objeto de regulamentação, um valor-limite e objetivos relacionados com a sua exposição (Nogueira e Mesquita, 2014; Diretiva 2008/50/CE). Totalizando desta forma, uma legislação sobre a qualidade do ar para 13 poluentes atmosféricos. A Decisão do Conselho 97/101/CE foi posteriormente substituída pela Decisão do Conselho 2011/850/CE,

estabelecendo adicionalmente regras para a 4ª Diretiva-Filha e a Diretiva 2008/50/CE (Decisão 2011/850/CE).

Encontra-se esquematizado na Figura 2.4 o enquadramento legislativo da UE a partir da Diretiva-quadro (Diretiva 96/62/CE) até a atualidade e a sua respetiva transposição para a ordem jurídica nacional. O atual Decreto-Lei em vigor na ordem jurídica nacional (DL n.º 102/2010) transpõe a Diretiva 2004/107/CE e a Diretiva 2008/50/CE, revogando toda a legislação em vigor nesta matéria, consolidando desta forma toda a legislação que se encontrava dispersa por vários decretos-leis (Nogueira e Mesquita, 2014). No Quadro 2 no anexo A-2 encontra-se a indicação dos valores limite/alvo e os limiares para todos os poluentes legislados e atualmente em vigor.

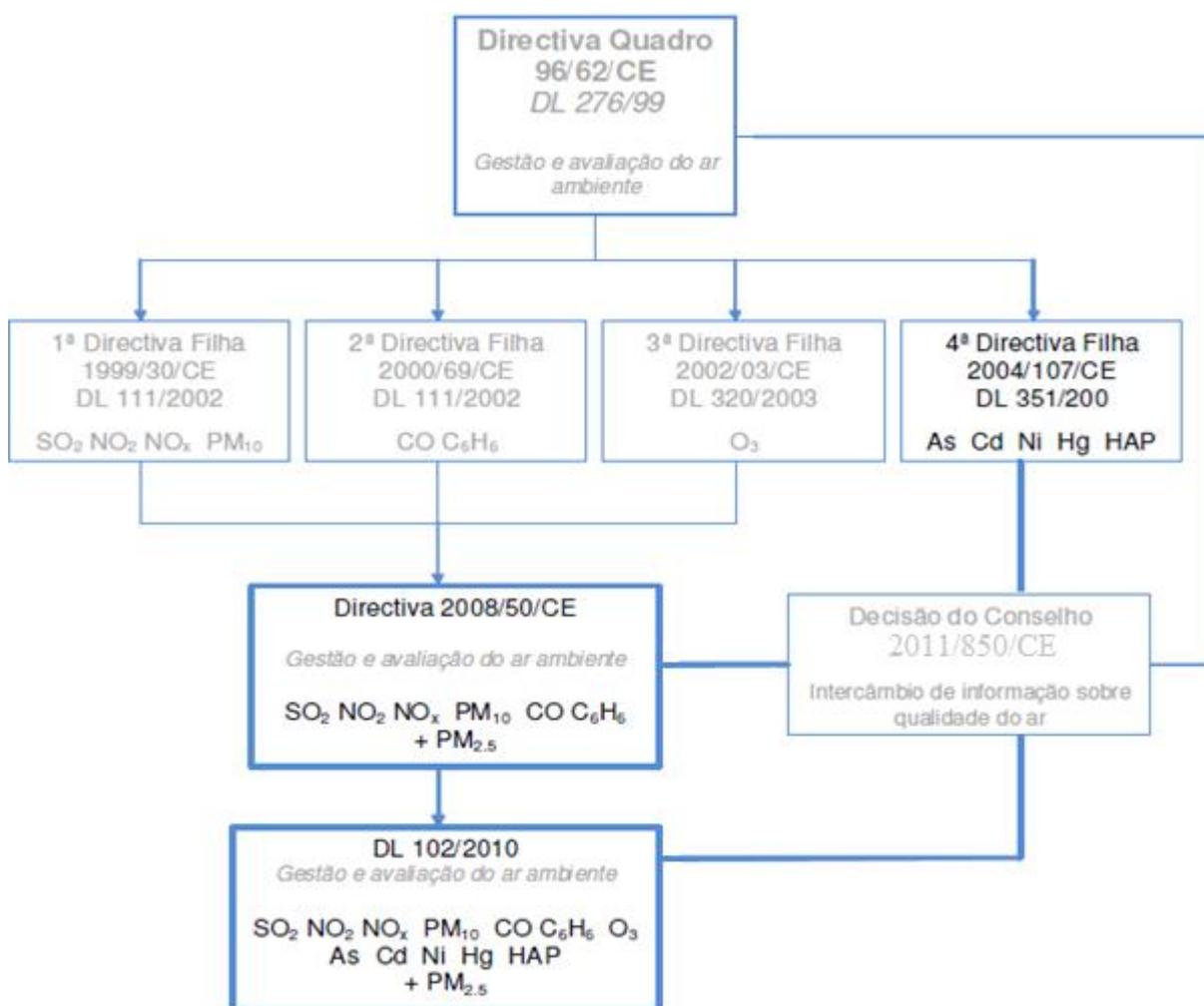


Figura 2.4 - Enquadramento legislativo da avaliação e gestão do ar ambiente na União Europeia e Portugal (Nogueira e Mesquita, 2014 [Imagem editada])

2.3 Transporte Rodoviário como Fonte de Poluição

O transporte rodoviário continua a ser uma das principais fontes emissoras de poluentes para a atmosfera, principalmente quando se refere às emissões de NO_x e PM (EEA, 2016). Observando a Figura 2.5, é possível analisar a contribuição do transporte rodoviário nas emissões totais destes dois poluentes ao nível da UE. Dados de 2011 demonstram que o transporte rodoviário é o grande responsável pela emissão de NO_x, 40,5% (EEA@, 2014a). Enquanto as emissões de PM10 e PM2.5 é responsável por 10,8% e 16,1%, respetivamente (EEA@, 2014b).

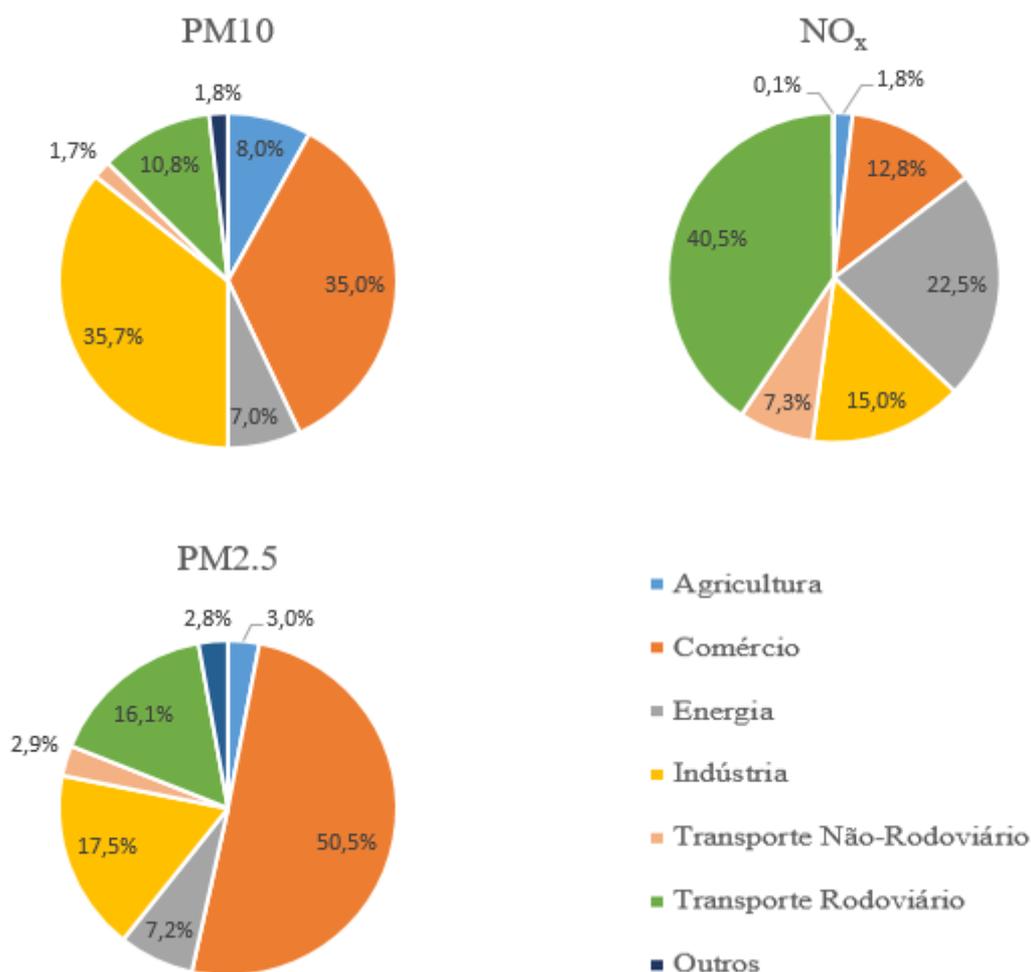


Figura 2.5 - Quota, por setor, das emissões de PM10, PM2.5 e NO_x na EU em 2011 (EEA@, 2014a; EEA@, 2014b)

O transporte rodoviário é a principal fonte de NO₂ e PM nas zonas urbanas na Europa, e, consequentemente é o principal responsável pelas excedências dos valores limites legislados pela UE referentes a estes poluentes (EEA, 2016). Relativamente às PM, o transporte rodoviário contribui para diferentes tamanhos (diâmetro), emitindo PM2.5 pelos gases de exaustão e

PM10-2.5 devido à ressuspensão de poeira (passagem dos veículos), desgaste dos pneus e travões (abrasão mecânica) (Krzyzanowski et al, 2005; EEA, 2016). As emissões de NO_x formam-se devido à combinação do azoto molecular com o oxigénio molecular durante a combustão, sob ação das temperaturas elevadas do motor (EEA, 2016).

O O₃ também representa uma grande preocupação, no entanto é um poluente secundário porque não é emitido diretamente para a atmosfera. O tráfego rodoviário é considerado uma das principais fontes de poluentes percussores de O₃ ao nível do solo, especialmente em zonas urbanas. É formado na atmosfera através da oxidação fotoquímica de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) na presença de NO_x. A sua concentração depende de variáveis meteorológicas, como por a temperatura e a radiação solar (Munir et al, 2012). Geralmente a concentração de O₃ é menor nas zonas urbanas, muito provavelmente porque a concentração de NO é superior nas zonas urbanas, isto porque a oxidação de NO a NO₂ provoca a depleção do O₃ (Munir et al, 2012; EEA, 2015).

Os COV são Hidrocarbonetos (HC) e caracterizam-se por se volatilizarem facilmente à temperatura ambiente. Os HC formam-se devido a combustão incompleta do combustível ou resultam do escapamento de vapores (emissões evaporativas) do sistema de depósito do combustível (EEA, 2016).

2.3.1 Normas de Emissão

Na UE os requisitos para os gases de exaustão nos veículos ligeiros surgiram no início da década de 1970, para veículos pesados seguiram mais tarde, final da década de 1980. Atualmente, as emissões dos gases de exaustão são controladas pelas normas de emissões EURO e regulamentações sobre as emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Lindqvist, 2012; EEA, 2016; ICCT, 2014). Mas apenas as normas EURO serão tratadas neste trabalho

As normas EURO surgiram em 1992 e estabeleceram limites às emissões de exaustão dos poluentes NO_x, HC, CO e PM. Abrange veículos ligeiros, pesados, de duas e três rodas. Foram introduzidas começando na etapa “EURO 1”, seguido de normas cada vez mais rigorosas como demonstrado no exemplo do Quadro 2.1, até “EURO 6” (atualmente em vigor para veículos ligeiros e pesados). As normas não foram aplicadas em simultâneo a todos os tipos de veículos abrangidos pela regulamentação, como demonstrado no Quadro 2.2. O cumprimento deve ser observado em cada veículo rodoviário individualmente e o não-cumprimento proíbe a sua venda. As exigências diferem consoante a classe do veículo e o tipo de combustível (Lindqvist, 2012; EEA, 2016).

Quadro 2.1 - Limites de emissões [g/km] dos gases de exaustão dos veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e gasolina (EEA, 2016)

Norma EURO	CO		NMHC		NOx		HC + NOx		PM	
	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina	Gasóleo	Gasolina
1	2,72	2,72	-	-	-	-	0,97	0,97	0,14	-
2	1	2,2	-	-	-	-	0,7	0,5	0,08	-
3	0,64	2,3	-	-	0,5	0,15	0,56	-	0,05	-
4	0,5	1	-	-	0,25	0,08	0,3	-	0,025	-
5	0,5	1	0,068	-	0,18	0,06	0,23	-	0,005	0,005
6	0,5	1	0,068	-	0,08	0,06	0,17	-	0,005	0,005

Quadro 2.2 - Data de introdução das normas EURO para cada tipo de veículo (Transportpolicy @, 2016)

Tipo de Veículo	1991 <	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	> 2016
Ligeiros de passageiros	Pré-EURO	EURO 1			EURO 2			EURO 3			EURO 4			EURO 5			EURO 6									
Ligeiros Comerciais	Pré-EURO			EURO 1		EURO 2		EURO 3			EURO 4			EURO 5			EURO 6									
Pesados	Pré-EURO	EURO 1			EURO 2			EURO 3			EURO 4			EURO 5			EURO 6									
Motociclos	Pré-EURO						EURO 1		EURO 2		EURO 3															

2.3.2 Zona de Emissões Reduzidas

O transporte rodoviário é o grande responsável pela poluição nas áreas urbanas, por esta razão, começaram a surgir na UE medidas de controlo de poluição através da regulamentação dos veículos rodoviários. Existem varias medidas praticadas com o objetivo de melhorar a qualidade do ar, sendo a ZER a medida mais utilizada (Urban Access Regulations@, 2016).

As ZER têm sido implementadas como uma medida eficaz na melhoria da qualidade do ar em áreas urbanas, com vista a cumprir os valores legislados pela UE relativos à qualidade do ar, com objetivo de promover a redução de poluentes atmosféricos. São áreas onde o acesso dos veículos mais poluentes é limitado, restringido ou dissuadido (exigência do pagamento de uma taxa). Este tipo de medida caracteriza-se por regulamentar os veículos através das normas EURO. (EC@, 2013; Urban Access Regulations@, 2016).

Uma ZER tem o objetivo de ajudar a melhorar a qualidade do ar mas o seu impacte vai para além da melhoria da qualidade do ar (DEFRA, 2009). No Quadro 2.3 encontra-se a descrição qualitativa dos impactes potenciais, dentro de uma ZER.

Quadro 2.3 - Avaliação qualitativa do impacto de vários parâmetros dentro de uma ZER (DEFRA, 2009)

Impacte	Avaliação qualitativa dentro da zona
Emissão de NO ₂ e PM10	Positivo
Emissão de CO ₂	Neutro
Ruído	Positivo
Tempo de viagem	Neutro
Custos de implementação/manutenção	Negativo
Custos do utilizador	Negativo

2.3.2.1 Zonas de Emissões Reduzidas na União Europeia

A implementação de uma ZER pode ser efetuada de diversas formas. A fim de entender quais os parâmetros que podem variar numa ZER, estes vão ser explicados e será feita uma análise ao panorama geral dos países da UE que atualmente aplicam ZERs no seu território.

A aplicação de uma ZER depende de quatro parâmetros principais (Urban Access Regulations@, 2016):

- Tipo de veículo afetado, aplicado a todos os tipos de veículos ou apenas alguns tipos. Há sempre veículos não afetados, por exemplo veículos de emergência.
- Norma de emissão varia de acordo com a norma mínimo de emissão EURO exigida e o tipo de combustível do veículo.
- Horário de funcionamento pode ser de caráter permanente (24h/365 dias) ou temporário.
- Mecanismo de fiscalização, mecanismo escolhido para controlo da zona. Pode ser manual (fiscalização feita por entidades responsáveis), portagens, câmaras ou acordos.

Analisando o panorama na UE, a maioria dos países com mais de uma ZER no seu território têm um quadro nacional, significando que os sistemas são semelhantes no país. Para uma melhor perspetiva de quais os países da UE que atualmente têm implementado ZER no seu território e quais os critérios aplicados encontra-se indicado no Quadro 2.4 dados sobre os parâmetros mais variáveis (tipo de veículo afetado e norma mínima de emissão exigida), o número de ZERs em funcionamento e alguns aspetos pertinentes. (Urban Access Regulations@, 2016).

Quadro 2.4 - Panorama geral das Zonas de Emissões Reduzidas na União Europeia (Urban Access Regulations@, 2016; Umweltbundesamt@, 2016; Helsingin kaupunki@, 2016)

País	Nº	Afetação	Norma Euro	Informação adicional
Alemanha	53	Todos veículos exceto motociclos	<u>Gasolina</u> Euro 1 <u>Gasóleo</u> Euro 4	Algumas ZERs englobam varias cidades. Todas foram implementadas por fases. Apenas uma tem exigência de Euro 3 para gasóleo.
Áustria	7	Veículos pesados	<u>Gasóleo</u> Euro 1 a 3	Uma ZER é aplicada em uma autoestrada (Tirol).
Dinamarca	4	Veículos > 3.5 Ton	<u>Gasóleo</u> Euro 4 ou FPD	Coimas podem chegar até 10 000€ (valor em torno da faixa de preço do FPD)
Finlândia	1	Autocarros e Camiões do lixo	<u>Gasóleo</u> Euro 5	Localiza-se na capital
França	2⁽¹⁾	Todos os veículos na capital	<u>Gasóleo/Gasolina</u> Euro 1 <u>Mont Blanc⁽¹⁾</u> Gasóleo – Euro 3	Aplicada a pesados de mercadorias. ⁽¹⁾ Tem uma ZER em comum com Itália (Túnel Mont Blanc).
Holanda	13	Maioria afeta apenas Veículos > 3.5 Ton	<u>Gasóleo</u> Euro 4 (Veículos > 3.5 Ton)	Algumas ZER recentemente começaram a incluir veículos ligeiros.
Itália	101⁽¹⁾	Todos parâmetros são bastante variáveis entre as varias ZER.		
Portugal	1	Todos veículos expeto motociclos	<u>Gasolina/Gasóleo</u> Zona 1: Euro 3 Zona 2: Euro 2	Localizado na capital. Constituído por duas zonas com restrições diferentes.
Reino Unido	5	Maioria afeta apenas autocarros públicos	Variável entre as ZER	Na capital aplica-se a todos os veículos à exceção dos veículos com menos de 1,205 Ton. Único sistema onde permite entrada de veículos não conformes, desde que paguem uma taxa.
Suécia	8	Veículos pesados	<u>Gasóleo</u> Euro 4	

Quanto ao horário de funcionamento, a maioria são de caráter permanente (24h/365 dias), à exceção de Portugal, França e algumas ZERs em Itália. O mesmo acontece com o mecanismo de fiscalização, realizado maioritariamente de forma manual, havendo alguns casos onde é aplicado mais do que um sistema em funcionamento (ex. manual e câmaras). A maioria também afeta veículos estrangeiros (Urban Access Regulations@, 2016).

As ZERs destinam-se principalmente à redução das emissões de escape das PM, algumas também incluem nos seus objetivos NO_x. As emissões destes dois poluentes são maiores para veículos movidos a gasóleo (Holman et al., 2015). Este facto pode explicar o motivo pelo qual a maioria das ZERs na UE aplicam restrições apenas a veículos movidos a gasóleo ou quando aplicado aos dois combustíveis (gasóleo e gasolina) é mais exigente para os veículos a gasóleo.

Veículos que não cumpram com as normas exigidas podem optar por uma modernização do equipamento (*Retrofit*) para reduzir as emissões. Estas modificações só são aceites em alguns países. Nem sempre a aplicação de eventuais melhorias é possível para que os veículos passem a cumprir as normas exigidas. Assim, a única alternativa reside em comprar um veículo mais novo ou verificar a existência de isenções baseadas no uso ou tipo de veículo. Modificações podem incluir aplicação de um Filtro de Partículas Diesel (FPD), Redutor Catalítico Seletivo (RCS) ou converter o veículo para um combustível alternativo. (Urban Access Regulations@, 2016). O FPD reduz as emissões de PM em mais de 90% e o RCS controla as emissões de NO_x convertendo-o em N₂, CO₂ e água, estas duas tecnologias apenas são aplicadas aos veículos a gasóleo (EEA, 2016).

2.3.2.2 Zona de Emissões Reduzidas em Portugal

A partir de 2001 começou a obrigatoriedade legal de se efetuar a verificação do cumprimento dos valores limite de concentrações dos poluentes regulamentados pela 1ª diretiva filha (Diretiva 1999/30/CE). A excedência dos valores limite acrescidos da margem de tolerância de pelo menos um poluente obriga as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional a elaborar e implementar planos nas zonas onde o incumprimento ocorre, com o intuito de fazer garantir o cumprimento dos valores limite (Nogueira e Mesquita, 2014).

Na região de Lisboa e Vale do Tejo, verificou-se que as concentrações de determinados poluentes excediam os limites legais desde 2001, principalmente no que respeita às PM₁₀ mas também ao NO₂ (Borrego et al., 2013). Dado a obrigatoriedade em cumprir os limites legais, a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo iniciou em 2005 a elaboração do Plano de Melhoria da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo para o período de avaliação entre 2001 e 2004. Visava avaliar e propor um conjunto de medidas a implementar para cumprir os valores limite nas zonas em incumprimento. Uma

medida proposta consistia na implementação de uma ZER na cidade de Lisboa. (Nogueira e Mesquita, 2014; Ferreira et al., 2006).

A observância constante do incumprimento dos limites legais das concentrações dos poluentes em Lisboa, nomeadamente no eixo Avenida da Liberdade/Baixa onde se registava as concentrações mais elevadas, originou a instauração de um processo por parte da Comissão Europeia contra o Estado Português no Tribunal de Justiça Europeu. Desta forma, deu-se início em 2011 à implementação de uma ZER na cidade de Lisboa (CM-Lisboa@, 2016). A implementação foi faseada, abrangendo progressivamente uma área maior da cidade e englobando um maior número de veículos através da norma de emissão exigida. Na totalidade correspondeu a três fases. Atualmente encontra-se na terceira fase e é constituída por duas zonas com exigências ambientais diferentes (CM-Lisboa@, 2016; Deliberação n.º 247/CM/2011).

A zona 1 abrange a Avenida da Liberdade/Baixa e a zona 2, mais abrangente, engloba cerca de 2/3 da cidade de Lisboa. Na Figura 2.6 encontra-se um mapa de Lisboa com indicação das zonas referidas correspondentes à ZER.



Figura 2.6 - Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa (CM-Lisboa@, 2016)

O resumo das fases de implementação encontra-se esquematizado no Quadro 2.5. Da 1ª fase para a 2ª fase houve alterações no horário de funcionamento, acréscimo de uma segunda zona (abrangendo 2/3 da cidade de Lisboa) e aumento da exigência da norma mínima de emissões. Na 3ª fase apenas houve alteração na exigência da norma mínima de emissões das duas zonas. Afeta todos os veículos à exceção de motociclos. As exigências na norma mínima de emissões são as mesmas para veículos a gasóleo e gasolina. Como acontece com as ZERs na Europa, existem veículos não abrangidos pelas restrições (CM-Lisboa@, 2016). Veículos de emergência, de pessoas com mobilidade reduzida, históricos (com certificado), de residentes, a

gás natural e GPL, de polícia, militares e blindados de transporte de valores estão isentos das restrições (Deliberação n.º 642/CM/2014).

Quadro 2.5 - Esquematização das fases de implementação da Zona de Emissões Reduzidas de Lisboa (CM-Lisboa@, 2016)

Fase	Data de implementação	Norma Euro	Horário de funcionamento
1ª Fase	4 de junho de 2011	Zona 1: EURO 1	8h às 20h
2ª Fase	1 de abril de 2012	Zona 1: EURO 2 Zona 2: EURO 1	7h às 21h
3ª Fase	15 de janeiro de 2015	Zona 1: EURO 3 Zona 2: EURO 2	7h às 21h

Atualmente os veículos anteriores a 1996 (EURO 2) e 2000 (EURO 3) podem cumprir os requisitos da ZER desde que tenham uma declaração do fabricante a mencionar a norma EURO ou um documento do automóvel que mencione as emissões. Melhorias também são permitidas (*Retrofit*), dependendo do tipo de combustível. Veículos a gasolina podem ser convertidos a GPL, veículos pesados a gásóleo podem instalar um FPD ou a instalação de equipamentos de redução de emissões em qualquer veículo, desde que seja autorizado pelo Instituto de Mobilidade e Transportes e posteriormente testado para a verificação da redução das emissões de poluentes (Deliberação n.º 170/CM/2012).

A análise dos dados referentes à qualidade do ar registados na Avenida da Liberdade, em Lisboa, a situação considerada mais preocupante, dados estes disponíveis no portal da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) para o período entre 2001 e 2014, permite verificar que a partir da implementação da ZER de Lisboa houve uma redução nas concentrações dos poluentes PM10 e NO₂, havendo alguns limites legais que passaram a ser cumpridos, e que anteriormente não se encontravam.

Para entender o impacte da ZER em Lisboa, encontra-se representado na Figura 2.7 a avaliação da conformidade legal do poluente PM10. A partir de 2012 o valor limite anual de PM10 foi cumprido, sendo de notar que em 2009 o tinha cumprido mas voltou ao incumprimento nos dois anos seguintes. No que respeita ao número de excedências ao valor limite diário das PM10, desde 2011 o número de dias de excedência tem vindo a decrescer, cumprindo em 2014 o limite legal pela primeira vez desde que há registo.

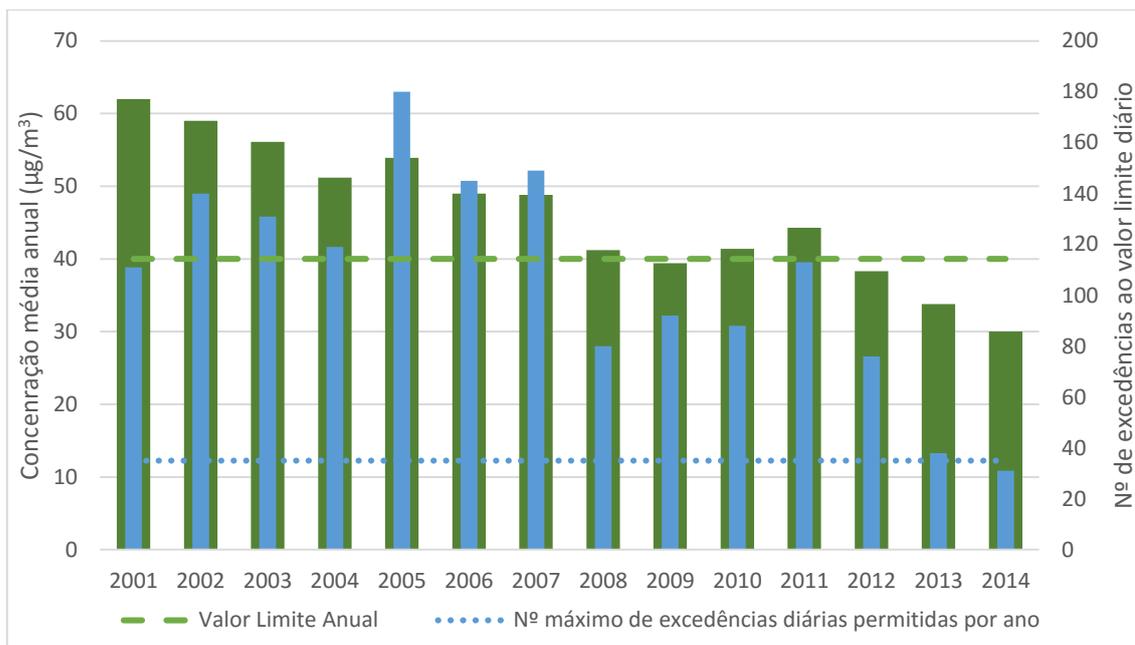


Figura 2.7 - Conformidade legal de PM10 na Avenida da Liberdade (APA@, 2016)

A avaliação da conformidade legal do poluente NO₂ encontra-se representado na Figura 2.8. O valor limite anual de NO₂ não se encontra em cumprimento legal mas tem vindo a diminuir, à exceção de 2013 para 2014 onde teve um ligeiro aumento. Desde a implementação da ZER, verificou-se o cumprimento legal do valor limite horário, nomeadamente no período 2012 a 2013, no entanto em 2014 houve duas excedências ao valor limite horário.

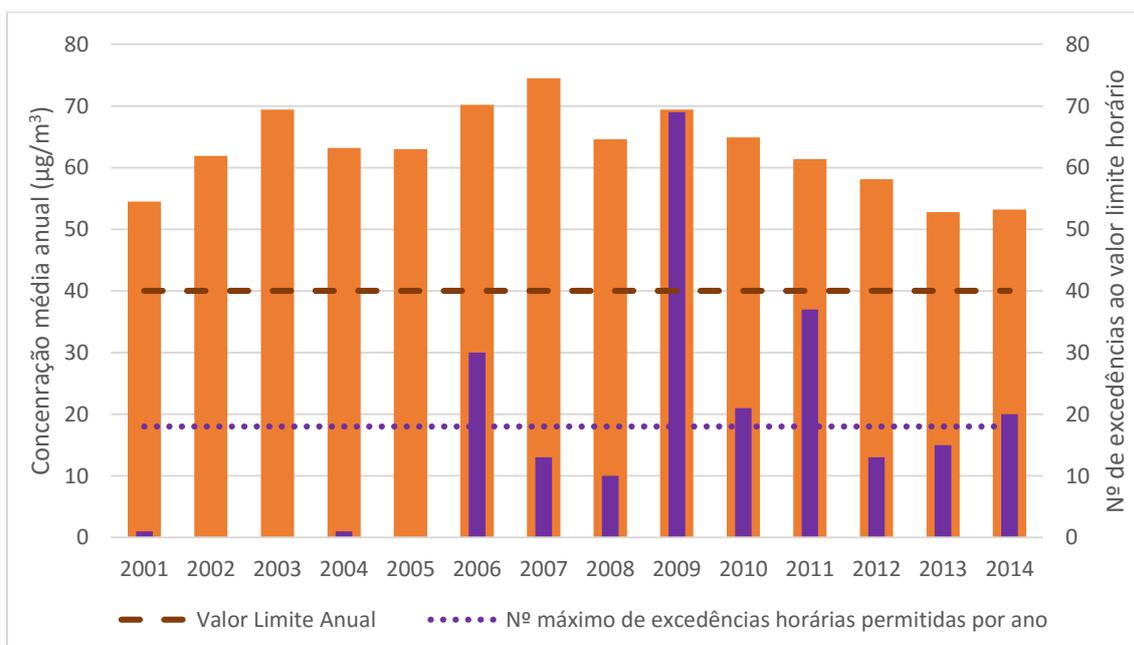


Figura 2.8 - Conformidade legal de NO₂ na Avenida da Liberdade (APA@, 2016)

Após esta análise podemos afirmar que o impacte na qualidade do ar foi positivo, principalmente no que se refere às PM10 que em 2014 cumpriu os seus requisitos legais. O impacte no NO₂ também teve um impacte aparentemente positivo, apesar de não ser óbvio pela análise dos dados.

2.4 Modelação de Emissões

A modelação de emissões consiste em estimar as emissões de fontes de poluição numa determinada área com recurso a modelos, designados por modelos de emissão. Possibilitam obter a quantidade de um poluente emitido por distância (g/km), consumo total de combustível (g/km) ou energia consumida (MJ/km) (Franco et al., 2013). Os modelos de emissões podem ser classificados de diversas formas, combinação da escala geográfica de aplicação, tipo de modelo genérico ou da natureza da abordagem ao cálculo de emissões (Boulter et al., 2007). Podem ser classificados como (Al-Qadi et al, 2008; kutz, 2004; Yue, 2008):

- Modelos macroscópicos: Usam parâmetros médios agregados da rede para estimar as taxas de consumo de combustível e emissão para toda a rede. O tráfego é representado como um todo, ou seja, há agregação de dados. É uma abordagem indicada para sistemas de larga escala.
- Modelos microscópicos: Usam dados de velocidade e aceleração instantânea dos veículos individuais para estimar as taxas de consumo de combustível e emissão (também instantâneas). Portanto, o tráfego é representado de forma discreta, há uma desagregação de dados. Para avaliar a rede na sua totalidade as estimativas são agregadas, mas normalmente esta abordagem é utilizada para avaliar projetos de transporte individual.
- Modelos mesoscópicos: As variáveis de entrada são mais agregadas quando comparado ao modelo microscópico e mais desagregado que o modelo macroscópico. Em termos de escala, é uma abordagem intermédia. Estimam as taxas de consumo de combustível e emissão e a sua variação espacial/temporal para as vias rodoviárias consideradas como fonte em linha.

No âmbito deste trabalho foi necessário a utilização de um modelo de emissões (QTraffic) para a caracterização das emissões do tráfego rodoviário, segundo a classificação mencionada em cima, o modelo usado pode-se classificar como modelo mesoscópico. A descrição detalhada do modelo aplicado encontra-se apresentado no 4.1.

2.5 Modelação da Qualidade do Ar

Os modelos de qualidade do ar baseiam-se em algoritmos ou equações que simulam a dispersão dos gases poluentes com o intuito de prever as concentrações dos poluentes na atmosfera. Desta

forma, são considerados uma ferramenta importante na regulação e no planeamento da qualidade do ar por todo o mundo (Langner e Klemm, 2011; Denby *et al*, 2011). São, portanto, consideradas ferramentas poderosas na previsão do destino dos poluentes após a sua libertação para a atmosfera (Chang e Hanna, 2004).

Os modelos podem ser classificados segundo a escala dos fenómenos de dispersão. A dispersão dos poluentes é influenciada por processos atmosféricos que são tipicamente classificados quanto à sua escala espacial, como demonstrado no Quadro 2.6. Estes também se podem distinguir relativamente ao tratamento das equações de transporte dos poluentes, como modelos Gaussianos, Lagrangeanos ou Eulerianos (Moussiopoulos *et al*, 1996). Mas apenas o modelo Gaussiano será visto em detalhe, pois é o tratamento equacional do modelo usado neste trabalho.

Quadro 2.6 - Descrição das escalas dos fenómenos de dispersão (Moussiopoulos *et al*, 1996)

Microescala (<1km)	Meso escala (1-1000km)	Macro escala (> 1000km)
<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo do ar complexo, depende fortemente das características da superfície (ex. forma dos edifícios, a sua orientação em relação à direção do vento, etc). - Fenómenos à escala local. 	<ul style="list-style-type: none"> - O fluxo do ar é em função dos efeitos hidrodinâmicos (ex. efeito da rugosidade da superfície) e da heterogeneidade do balanço de energia (devido principalmente à variação espacial das características da área). - Fenómenos à escala local/regional (estudos urbanos). 	<ul style="list-style-type: none"> - O escoamento atmosférico está associado essencialmente à distribuição geográfica dos sistemas de pressão. - Fenómenos À escala global e continental/regional

Apesar de os dados de monitorização de uma estação serem considerados o mais próximo possível da realidade e a modelação apesar de ser vista como mais incerta, o seu uso tem algumas vantagens. Nomeadamente, fornecer uma cobertura espacial completa da qualidade do ar, prever a qualidade do ar devido a mudanças nas emissões ou nas condições meteorológicas e fornecer um melhor conhecimento das fontes, causas e processos que determinam a qualidade do ar. Outras vantagens da utilização da modelação referidas pela diretiva de qualidade do ar é a possibilidade de avaliar zonas onde não é feito acompanhamento, ajuda a escolher a melhor localização para as estações de monitorização e poderá reduzir potencialmente o número de estações de monitorização necessárias, reduzindo custos (Denby, 2010).

No entanto, estes modelos têm as suas limitações, requerem muitos dados de entrada, de emissões e meteorológicos que nem sempre são fiáveis ou facilmente adquiridos, e devido às incertezas nos resultados, os dados obtidos devem ser validados através da análise comparativa com as medições das estações de monitorização para que os dados dos modelos possam ser utilizados na avaliação e gestão da qualidade do ar (Denby, 2010).

2.5.1 Modelos Gaussianos

Os modelos Gaussianos baseiam-se na hipótese de que a dispersão de uma pluma de poluição é feita segundo uma distribuição Gaussiana na horizontal e na vertical. Estes modelos usam cálculos simples e requerem dois parâmetros de dispersão (coeficientes de dispersão) para indicar a variação de concentração de poluentes para além da linha central da pluma (Holmes e Morawska, 2006). A equação para o cálculo da concentração num determinado ponto utilizando a distribuição Gaussiana é dado por (Almeida e Coutinho-Rodrigues, 2003):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) * \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Onde C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] descreve a concentração num ponto no espaço (x, y, z) , σ_y e σ_z [m] são os coeficientes de dispersão que representam o desvio padrão na horizontal e vertical, respetivamente, Q [$\mu\text{g}/\text{s}$] o caudal de emissão e u [m/s] velocidade média do vento. O h [m] é a altura efetiva da fonte de emissão, z [m] a altura do recetor acima da superfície do solo, y [m] a distância do recetor do eixo da linha central e x [m] a distância do recetor da fonte na direção do vento.

A largura da pluma de poluição é determinada pelos coeficientes de dispersão (σ_y e σ_x) que variam com a distância à fonte de emissão, na direção horizontal e vertical (Holmes e Morawska, 2006), como demonstrado na Figura 2.9.

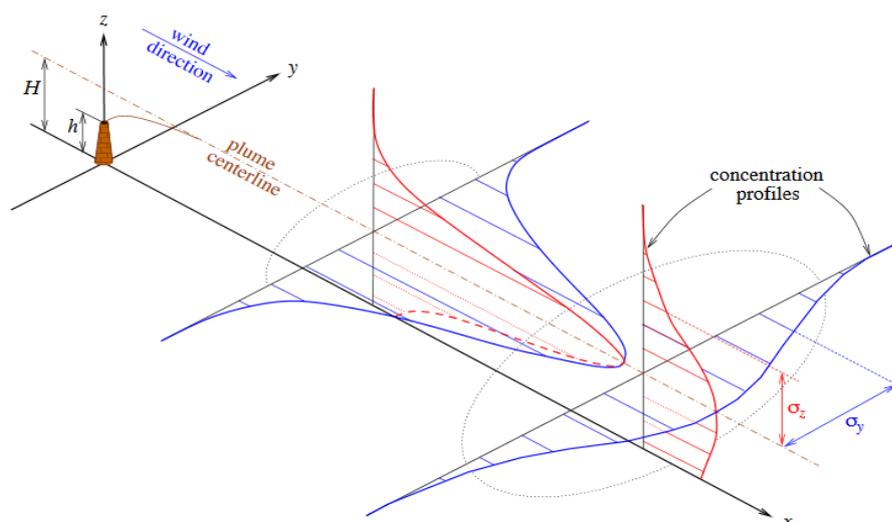


Figura 2.9 - Esquemática da variação dos perfis de concentração segundo uma distribuição Gaussiana (Stockie, 2011)

Este tipo de modelo é habitualmente usado quando se pretende estimar concentrações médias anuais, indo ao encontro de um dos objetivos deste trabalho (Abdel-rahman, 2008). Outro aspeto importante é que este tipo de modelo apesar de ser bastante utilizado no cálculo das concentrações provenientes de chaminés industriais também pode ser aplicado a fontes em linha (ex. tráfego rodoviário) (Denby et al, 2011). Além disso, tem inúmeras vantagens, requer pouco recursos de processamento, permitindo processar dados de um ano completo em apenas alguns minutos por praticamente qualquer computador. No entanto tem as suas limitações de aplicabilidade, isto porque representa bem a realidade se as condições não sofrerem variações significativas durante a hora em que esta sendo modelado, ou seja, as condições devem ser estáveis para a hora que esta sendo modelada (MEMMTT, 2004).

No âmbito deste trabalho foi utilizado o modelo gaussiano ADMS-Roads (ADMS-Roads, 2013). A descrição detalhada do modelo aplicado encontra-se apresentada no capítulo 4.2.

3 Caso de Estudo

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o impacte na qualidade de ar com a potencial implementação de uma ZER na área urbana de Coimbra. Desta forma, este capítulo vai referir alguns aspetos importantes sobre a cidade de Coimbra, incluindo uma caracterização demográfica e à mobilidade, análise à qualidade do ar e de que forma esta é monitorizada e por último a definição e caracterização da ZER.

3.1 Definição e Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo corresponde a uma área de aproximadamente 1780x1900 metros, localizada na zona urbana da cidade de Coimbra, como demonstrado na Figura 3.1. Uma das estações de monitorização da qualidade do ar da cidade de Coimbra também se encontra indicado na figura (quadrado verde).



Figura 3.1 - Enquadramento da área de estudo da cidade de Coimbra

3.1.1 Dados Demográficos e Mobilidade

Coimbra é sede de um município com uma área de 319,41 km² e cerca de 143 396 habitantes segundo o último CENSOS (2011), constituindo a maior aglomeração urbana da Região Centro. É a capital de distrito, subdividido em 17 municípios, principal centro universitário e de serviços da região, e um importante centro de interação com 34 municípios (ParqueExpo, 2012). Analisando a distribuição da população por faixas etárias, através da observação do Figura 3.2, mais de metade da população tem uma idade compreendida entre os 25 a 64 anos, 20% com ou mais de 65 anos, e apenas 12% com idade entre os 0 e 14 anos, indicando uma população com tendência a tornar-se cada vez mais envelhecida. A atividade económica é predominante no sector terciário, correspondendo a 91,46% dos postos de trabalho (INE, 2011).

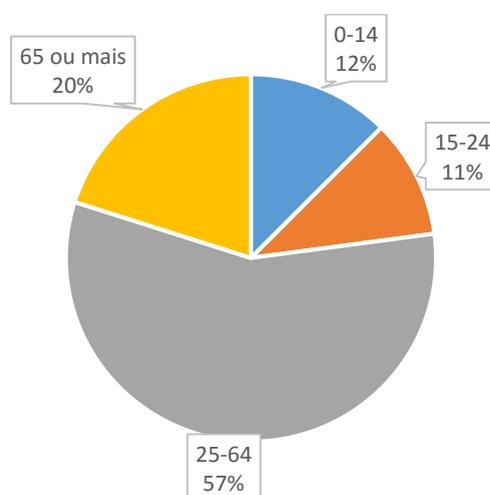


Figura 3.2 - Distribuição da população de Coimbra por faixas etárias em 2011 (INE, 2011)

O concelho de Coimbra encontra-se inserido no eixo principal de transportes e acessibilidade transversal ao território nacional, servido pela Autoestrada n.º 1 e pela linha ferroviária do norte. Estas infraestruturas de transporte permitem uma ligação a norte com os distritos de Aveiro, Porto e Braga e a sul com Leiria, Santarém e Lisboa. Além da acessibilidade norte/sul também tem ligações rodoviárias ao centro interior e litoral, através do Itinerário Principal n.º 3. A rede rodoviária do conselho é caracterizada por uma estrutura radial, assente por outras vias que também pertencem à rede nacional (IC2 Norte/IP3, IC2 Sul, EN341, EN111/EN234-1, EN17), como demonstrado na Figura 3.3. (ParqueExpo, 2012).

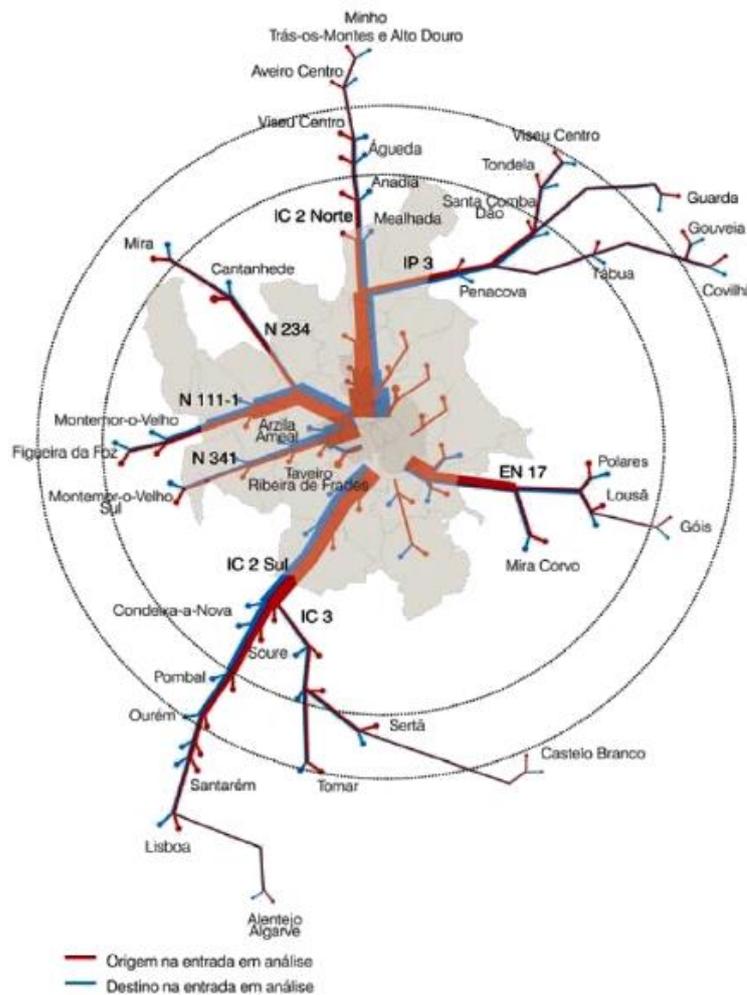


Figura 3.3 - Estrutura rodoviária do de Coimbra (ParqueExpo, 2012)

3.2 Qualidade do Ar

A qualidade do ar da cidade de Coimbra é monitorizada por duas estações de monitorização. Estas estão sobre a responsabilidade da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, onde os dados são disponibilizados no portal da Agência Portuguesa de Ambiente (APA). As duas estações têm características diferentes entre si. A estação situada na Avenida Fernão Magalhães (AFM) é uma estação urbana de tráfego, enquanto que a outra estação, situada perto do Instituto Geofísico de Coimbra (IGC) é uma estação urbana de fundo. A respetiva localização encontram representada na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Localização das estações de monitorização da qualidade de ar de Coimbra

Além do tipo de influência da estação ser diferente, estas não monitorizam os mesmos poluentes, como demonstrado no Quadro 3.1. Salienta-se que a estação do tipo de influência de fundo é bastante útil na modelação da qualidade do ar, pois as concentrações monitorizadas são usadas como *background* nos modelos de qualidade do ar permitindo contabilizar as concentrações de poluentes provenientes do exterior à área de estudo. Enquanto a estação do tipo de influência do tráfego é útil na validação dos dados obtidos pelo modelo de qualidade do ar.

Quadro 3.1 - Características das estações de monitorização da qualidade do ar de Coimbra

Estação	Tipo de Ambiente	Tipo de Influência	Início das medições	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Poluentes monitorizados
AFM	Urbana	Tráfego	08/07/2008	40° 12' 53"; -8° 24' 06"	26	PM10, NO, NO ₂ , NO _x , C6H6 e CO
IGC	Urbana	Fundo	01/01/2003	40° 12' 25"; -8° 24' 39"	145	PM10, NO, NO ₂ , NO _x , SO ₂ e O ₃

Em termos de cumprimento de legislação referente à qualidade do ar, Coimbra registou excedências ao valor limite diário de PM10 e ao Limite de Informação à População (LIP) em alguns anos, como se pode observar no Quadro 3.2 (células a vermelho). Apenas são apresentados os poluentes de maior preocupação para a saúde humana (PM10, NO₂ e O₃). A legislação da UE relativa à qualidade do ar destes três poluentes encontra-se indicado no Quadro 3.3.

Assim, tendo em conta a legislação referente à qualidade do ar para estes três poluentes e os dados de monitorização na estação da AFM e IGC, apresentados no Quadro 3.2. Concluímos que na AFM houve registo de excedência do valor limite diário de PM10 (50 µg/m³) acima dos

35 dias permitidos entre 2009 e 2011. Enquanto no IGC, houve registo em alguns anos da excedência do LIP (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ numa hora). Analisando em maior detalhe os dados monitorizados pela estação da AFM, apesar nos últimos anos não haver registo de incumprimento legislativo, uma vez que já houve no caso das PM10, poderá futuramente voltar haver registo de excedência dos valores limites tanto para PM10 como para NO₂. De salientar que continua haver excedência do valor limite diário de PM10 mas dentro da legalidade. Desta forma, é evidente que futuramente pode ser necessário implementar medidas de redução de emissões na área urbana de Coimbra.

Quadro 3.2 - Conformidade legal dos principais poluentes monitorizados pela estação da Avenida Fernão Magalhães e do Instituto Geofísico de Coimbra (APA@, 2016)

Localização	Avenida Fernão Magalhães				Instituto Geofísico de Coimbra					
	PM10		NO ₂		PM10		NO ₂		O ₃	
Período	Diário	Anual	Horário	Anual	Diário	Anual	Horário	Anual	V. Alvo	LIP
2014	11	24,6	0	29,1	6	18,9	0	14,8	3	0
2013	8	23,6	0	27	1	19,5	0	14,8	13	3
2012	18	26,9	1	26,4	7	19,5	-	-	1	0
2011	40	32,1	2	34,3	12	22,3	0	7,6	0	0
2010	43	33	0	34,4	2	19,5	0	14,6	17	7
2009	46	33,2	1	33,6	2	20	0	15,3	21	4

Quadro 3.3 - Legislação da União Europeia relativa à qualidade do ar para os poluentes PM10, NO₂ e O₃ (Diretiva 2008/50/CE; Diretiva 2004/107/CE)

Poluente	Tipo	Período	Valor
PM ₁₀	Valor Limite	24 Horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais de 35 vezes por ano
	Valor Limite	Ano civil	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	Valor Limite	1 Hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais de 18 vezes por ano
	Valor Limite	Ano civil	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	Limiar de Informação	1 Hora	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Valor Alvo	Máximo diário das médias de períodos de 8 horas num ano civil	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a não exceder mais de 25 dias, em médio, por ano civil, num período de 3 anos

Para ser feita uma análise rigorosa da qualidade do ar, foi estipulado uma taxa mínima de dados válidos recolhidos pelas estações de monitorização, para tal, a proporção de dados válidos recolhidos deve ter uma taxa superior a 75% quando se refere a dados de base horaria ou diária (Diretiva 2008/50/CE). Por esta razão, os dados da estação de monitorização da IGC no ano de 2012 para NO₂ não cumpriram os requisitos de dados validos recolhidos, exigido pela legislação.

3.3 Definição e Caraterização da Zona de Emissões Reduzida

No dia 22 de Junho de 2013, o Comité do Património Mundial aprovou a candidatura “Universidade de Coimbra – Alta e Sofia”, encontrando-se desde então inscrito na Lista de Património Mundial da UNESCO (UNESCO@, 2016). No âmbito deste trabalho, a potencial implementação da ZER teve como base a delimitação da zona de património mundial e a zona de proteção de Coimbra, representadas no mapa da Figura 3.5. Uma vez que o objetivo consiste na melhoria da qualidade do ar na zona de património mundial e de proteção, a delimitação da ZER foi definida para que a circulação de veículos a entrar nestas duas zonas seja sujeita às exigências ambientais.

As caraterísticas da ZER para a área urbana de Coimbra, foram definidas com base no que é praticado na UE. Assim, considerou-se as seguintes caraterísticas:

- Execução 24 horas por dia (permanente);
- Restrições de circulação aplicados apenas a veículos ligeiros de passageiros;
- Não foi considerada nenhuma isenção às restrições de circulação;
- As restrições são aplicadas de igual forma aos veículos a gásóleo e gasolina, apesar de não ser uma prática comum, o objetivo é reduzir as emissões de PM10 e NO₂. Restrições focadas para os veículos a gásóleo têm o objetivo de reduzir as emissões de PM10;
- Definiu-se como norma mínima de emissões EURO 3.

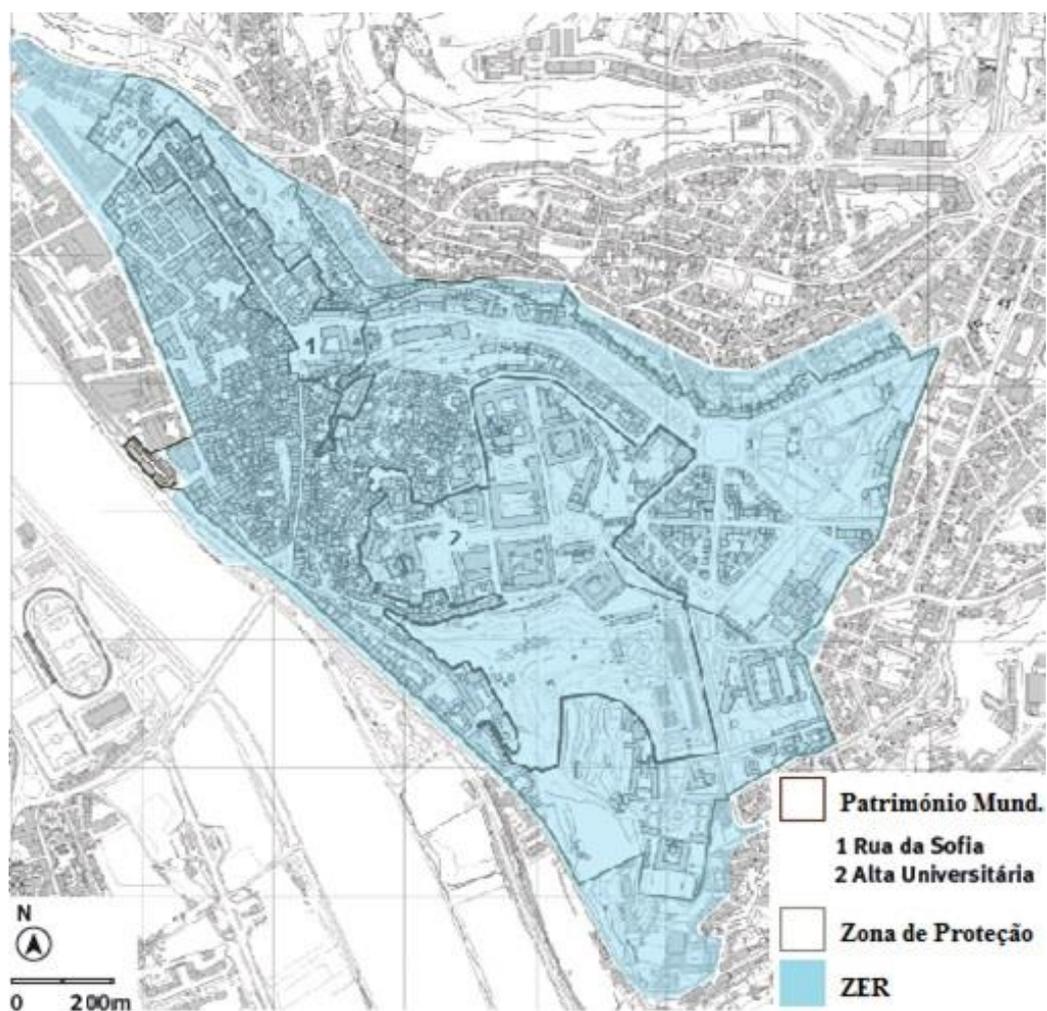


Figura 3.5 - Localização do Património Mundial e Zona de Proteção de Coimbra e a área definida como ZER (UNESCO@, 2016 [Imagem editada])

4 Aplicação

A abordagem considerada neste trabalho para avaliar o impacte na qualidade do ar de uma ZER consistiu na aplicação de duas ferramentas de modelação interligadas entre si. A abordagem realizada neste trabalho encontra-se esquematizada na Figura 4.1. Consistiu na utilização de um modelo de emissões para quantificar as emissões geradas pelo tráfego rodoviário na área de estudo. Para tal, foi necessário caracterizar o volume do tráfego rodoviário na área urbana de Coimbra. Desta forma, recorreu-se a dados simulados por um modelo de transportes (VISUM), no âmbito do projeto METRO-MONDEGO. Por último, foi aplicado, um modelo de qualidade do ar para caracterizar a dispersão dos poluentes atmosféricos em toda a área de estudo.

Esta abordagem é implementada num sistema de informação baseado em Sistema de Informação Geográfica (SIG) que gera entradas e saídas associadas a cada modelo. Neste capítulo será feita uma descrição do modelo de emissões e de qualidade do ar, os dados de entrada necessários para aplicação destes modelos e os passos intermédios necessários no tratamento dos dados.

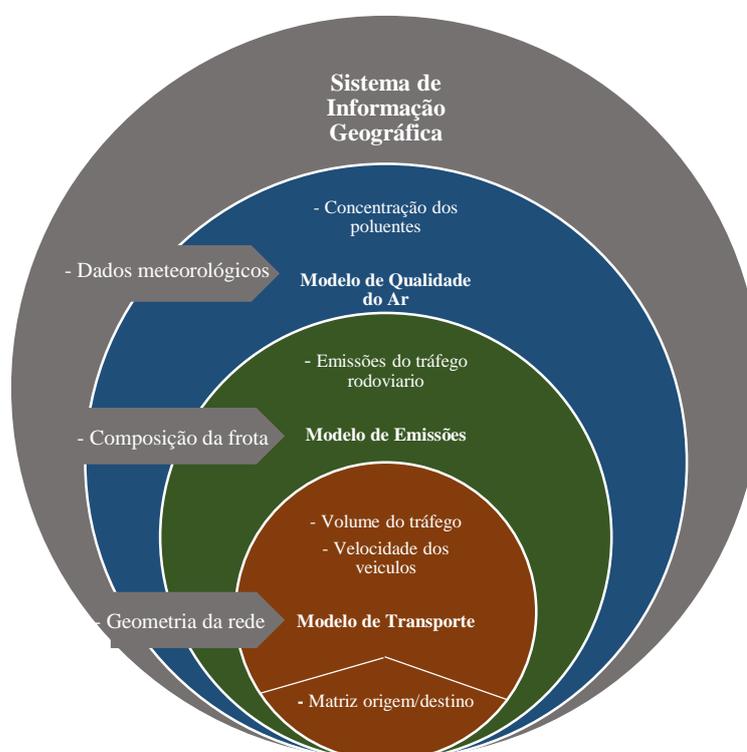


Figura 4.1 - Abordagem de modelação (Dias et al., 2016)

4.1 Modelação de Emissões - QTraffic

O modelo usado neste trabalho para a modelação de emissões foi o QTraffic. Assim, neste capítulo vai ser feita a sua descrição que inclui os motivos da sua escolha e de que forma este modelo quantifica as emissões do tráfego rodoviário. Numa segunda parte, serão indicados todos os dados introduzidos no modelo e o tratamento que teve de se efetuar aos dados de saída, de salientar que este tratamento foi importante para a introdução dos dados no modelo de qualidade do ar mas também para a avaliação do impacte esperado pela potencial implementação de uma ZER na área urbana de Coimbra.

4.1.1 Descrição Geral do Modelo

O QTraffic é um modelo que foi desenvolvido recentemente pela Universidade de Coimbra e é uma extensão do QGIS, um sistema de informação geográfica *open source*, é um *software* gratuito e possibilita a modificação do mesmo. Tem a capacidade de quantificar as emissões de tráfego e o consumo de energia, utilizando uma abordagem de velocidades médias na estimativa dos Fatores de Emissões (FE), sendo que estes foram desenvolvidos com base na metodologia Europeia. A interface é interativa e dinâmica, e possibilita a edição dos dados de entrada dentro do modelo e crescimento de informação (QTraffic@, 2016).

A escolha do modelo de emissões deveu-se ao seu desenvolvimento ter sido feito na Universidade de Coimbra, nomeadamente pelos orientadores desta dissertação, mas essencialmente à sua capacidade de ligação com os dados de saída do modelo de transportes (VISUM) e à possibilidade de estimar as emissões de fontes poluidoras como o transporte rodoviário.

Este modelo estima as emissões para cada via rodoviária, podendo ser classificado como modelo mesoscópico. Estima as emissões através do cálculo do FE, baseando-se no princípio de que o fator de emissão médio para um determinado poluente e tipo de veículo varia de acordo com a velocidade média durante a viagem, permitindo classifica-lo como modelo de velocidade média. Modelos de velocidade média têm a vantagem de serem relativamente fáceis de utilizar e os dados necessários normalmente encontram-se disponíveis para os utilizadores ou facilmente adquiridos (Boulter et al., 2007; Brebbia e Longhurst, 2008). Mas também tem as suas limitações, como por exemplo, viagens com padrões de condução diferentes mas com velocidades médias iguais, portanto, resultam em emissões diferentes mas tendo o mesmo fator de emissão consequentemente considera-se o mesmo nível de emissões (Boulter et al., 2007).

O fator de emissão é geralmente indicado em gramas por veículo-km ($\text{g.veículo}^{-1}.\text{km}^{-1}$), multiplicando pelos veículos totais obtém-se as emissões de uma determinada via. Estes fatores

apesar de serem calculados em função da velocidade média podem ser corrigidos por outros fatores (Boulter et al., 2007; Brebbia e Longhurst, 2008). No caso deste modelo, os FE são derivados para as varias categorias de veículos e corrigidos com alguns parâmetros, tais como as características dos veículos (cilindrada ou peso) e a sua respetiva tecnologia de controlo de emissões (norma EURO) e as características do combustível. Os dados de saída do modelo correspondem às emissões totais de uma via rodoviária (g/km). Na Figura 4.2 encontra-se representado um exemplo da variação do fator de emissão em função da velocidade média.

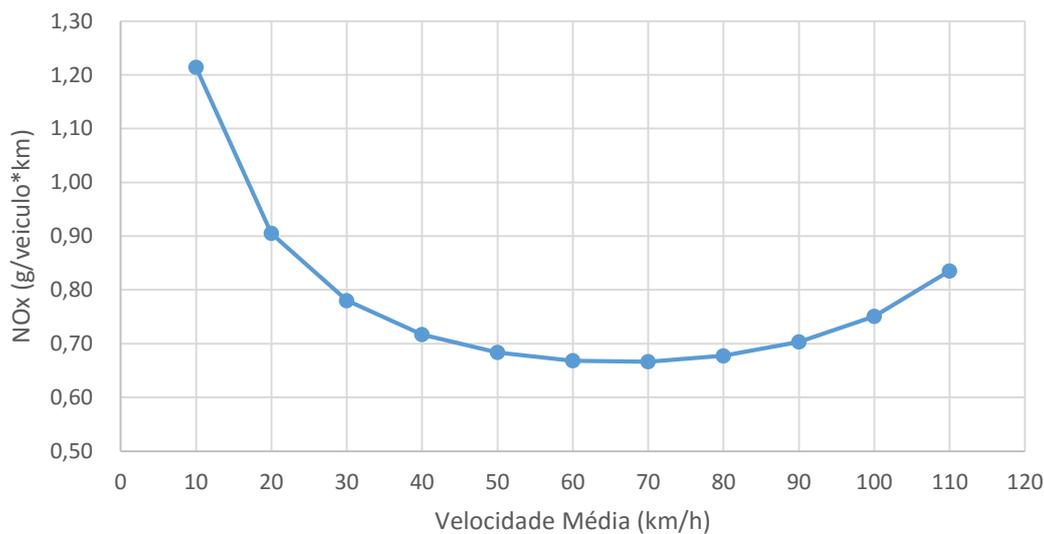


Figura 4.2 - Fatores de emissão de NO_x em função da velocidade média para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo e norma EURO 3 (Dados obtidos do QTraffic)

4.1.2 Aplicação do Modelo

Aplicação deste modelo necessita de dados referentes à caracterização do volume de tráfego rodoviário. Estes dados foram fornecidos pelo projeto METRO-MODENGO e são provenientes do uso de um modelo de transportes (VISIUM). Este tipo de modelo estima a distribuição do tráfego e a velocidade média em cada via através de uma matriz origem/destino e as características da rede. Os dados disponíveis para a área de estudo são referentes ao volume de tráfego diário de veículos ligeiros de passageiros e com base no CENSOS de 2011.

Além dos dados anteriormente referidos, foi necessário introduzir dados relativos à distribuição dos veículos por tipo de combustível, norma EURO e cilindrada para quantificar as emissões na área de estudo. Esta caracterização foi feita ao nível nacional devido à indisponibilidade de dados desagregados para uma análise mais específica da frota rodoviária de Coimbra. Por último é indicado os dados necessários para o tratamento dos dados de saída.

- **Distribuição dos veículos por categoria**

Segundo uma contagem do tráfego rodoviário efetuada na AFM em 2014, os veículos ligeiros de passageiros correspondem a 81,6% do volume rodoviário, como demonstrado no Quadro 4.1 (Pinto, 2014). Esta distribuição não é usada na área de estudo porque isso poderia levar a resultados longe da realidade em algumas vias rodoviárias. No entanto, a maioria do tráfego rodoviário vai ser contabilizado neste estudo mas não na sua totalidade, uma vez que apenas foi considerado o volume de veículos ligeiros de passageiros. Os resultados provenientes do modelo de transporte referem-se a volumes de tráfego diários, o mesmo acontece aos resultados obtidos pelo modelo de emissões. Através dos dados da contagem na AFM, verificou-se um aumento de 3,4% dos volumes fornecidos pelo modelo de transporte, portanto, considerou-se que não seria necessário efetuar correções aos volumes de tráfego rodoviário correspondente aos veículos ligeiros de passageiros.

Quadro 4.1 - Distribuição dos veículos por categoria (Pinto, 2014)

Tipo de Veiculo	Distribuição [%]
Ligeiros de Passageiros	81,60
Comerciais Ligeiros	10,34
Pesados de Passageiros Urbanos	1,85
Pesados de Passageiros Inter-regionais	2,30
Pesados de Mercadoria	0,95
Motociclos	2,96

Os dados de contagem efetuada na AFM possibilitou obter a variação do volume do trânsito ao longo do dia da medição. Na Figura 4.3 encontra-se representado o perfil do trânsito rodoviário ao longo do dia, ou seja, a variação do volume do trânsito ao longo do dia na AFM. Uma breve análise ao perfil conclui-se que o período de maior afluência é entre as 9h e 20h, destacando-se um pico de maior volume de tráfego às 19h. De salientar que este perfil foi usado para caraterizar a variação temporal das emissões ao longo do dia. Apesar de este perfil ter sido obtido para um dia útil e para a AFM, foi usado para toda a área de estudo por ser a única informação a este respeito e por ser importante refletir a variação do volume do tráfego neste tipo de estudo.

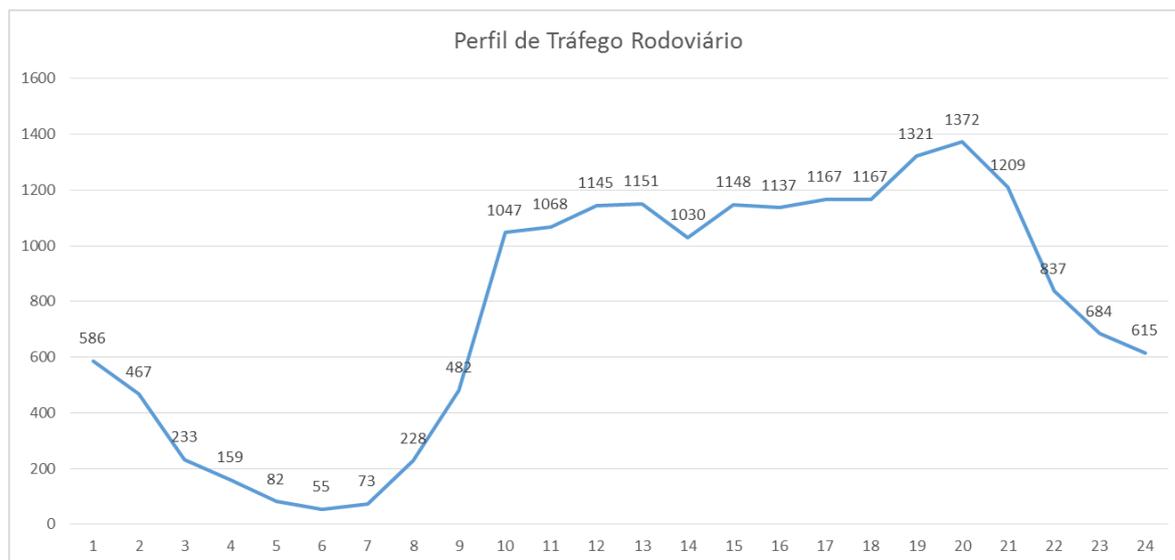


Figura 4.3 - Perfil do trânsito rodoviário na Avenida Fernão Magalhães no dia 12 de Junho de 2014 (Pinto, 2014)

- **Distribuição dos Veículos por Tipo de Combustível e Cilindrada**

Para determinar a caracterização da frota em termos de combustível, recorreu-se aos dados disponíveis no Instituto Nacional de Estatísticas (INE), mais propriamente às Estatísticas dos Transportes e Comunicações do ano 2013. A distribuição dos veículos ligeiros de passageiros pelo tipo de combustível foi estimada segundo número de veículos e o seu respetivo combustível. A distribuição por tipo de combustível encontra-se indicada no Quadro 4.2, combustíveis com pouca contribuição foram desprezados.

Quadro 4.2 - Distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por tipo de combustível (INE, 2013)

Gasóleo	Gasolina	GPL
49,1%	49,9%	1,0%

Quanto à cilindrada, dada a indisponibilidade de dados para os veículos em circulação, teve de se recorrer aos dados disponíveis no INE sobre as estatísticas das vendas de novos veículos ligeiros de passageiros por cilindrada entre 2003 e 2013. A distribuição considerada foi a média de 10 anos e igual para o tipo de combustível e norma EURO, como demonstrado no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Estimativa da distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por cilindrada [%]

Cilindrada	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	10 Anos
CC < 1,41	58,01	50,07	46,28	46,79	43,30	42,43	41,15	41,76	40,13	39,15	37,68	44,88
1,41 < CC < 2,01	35,08	42,70	48,03	46,50	50,00	52,15	52,58	52,29	53,81	54,12	56,23	48,80
CC > 2,01	6,91	7,23	5,68	6,71	6,69	5,42	6,27	5,95	6,06	6,73	6,09	6,32

- **Distribuição dos Veículos por Tipo de Norma EURO**

Quanto à distribuição em termos de normas de emissões EURO, esta foi estimada com base na idade dos veículos e respetiva norma de emissão que depende do ano de construção do veículo.

Os dados referentes à distribuição de idade dos veículos para 2013 era pouca detalhada, desta forma, usou-se os dados de 2012. No Quadro 4 no anexo A-3 encontra-se a distribuição da frota automóvel Portuguesa de veículos ligeiros de passageiros por idade. A idade média da frota nacional dos veículos ligeiros de passageiros em 2012 era de 11,1 anos e 11,5 anos em 2013 (INE, 2012; Auto Informa@, 2016) Portanto, pode-se considerar que a distribuição em termos de norma EURO não teve variações significativas. Considerou-se também que a distribuição pelas várias normas EURO seria igual para todos os combustíveis. A distribuição dos veículos ligeiros de passageiros por norma EURO encontra-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Distribuição da frota automóvel Portuguesa de veículos ligeiros de passageiros em 2012 por norma EURO com base na idade dos veículos

Norma EURO	Distribuição
Pré-EURO	5,8%
EURO 1	12,0%
EURO 2	18,1%
EURO 3	27,0%
EURO 4	23,9%
EURO 5	13,2%

- **Tratamento dos Dados de Saída**

Os dados de saída do modelo de emissões tiveram de sofrer um tratamento antes de serem introduzidos no modelo de qualidade do ar. Este tratamento foi feito em termos de unidades, convertendo as emissões de cada via rodoviária de g/km para g/km/s e na diferenciação das

emissões de NO_x . De salientar que esta diferenciação também foi importante para a avaliação dos resultados do modelo de emissões. Portanto, recorreu-se à bibliografia para a obtenção da proporção de NO_2/NO_x nas emissões de exaustão dos veículos ligeiros de passageiros, como demonstrado no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Proporção de NO_2/NO_x nas emissões de exaustão dos veículos ligeiros de passageiros para diferentes normas EURO (Grice et al., 2009)

Norma EURO	Gasolina	Gasóleo
Pré-EURO	4%	11%
EURO 1	4%	11%
EURO 2	4%	11%
EURO 3	3%	30%
EURO 4	3%	55%
EURO 5	3%	55%

4.2 Modelação de Qualidade do ar - ADMS-Roads

Quanto à modelação da qualidade do ar, neste trabalho recorreu-se ao uso do modelo ADMS-Roads. Para um entendimento claro do funcionamento deste modelo, vai ser abordado alguns conceitos teóricos importantes para entender como o modelo caracteriza a estabilidade atmosférica e uma abordagem à variabilidade dos dados de entrada referente à meteorologia e ao módulo químico que foi fundamental para a realização deste trabalho. Na segunda e última parte, vai ser explicado como este modelo foi aplicado que inclui a indicação de todos os dados de entrada e as etapas necessárias.

4.2.1 Descrição Geral do Modelo

A escolha do modelo ADMS-Roads no âmbito deste trabalho deveu-se às suas principais características, mas essencialmente pela disponibilidade da licença por parte do Departamento de Engenharia Civil para o seu uso. Este modelo foi especificamente desenvolvido para a análise de poluição atmosférica associada ao tráfego rodoviário e/ou instalações industriais em áreas urbanas. Desenvolvido na década de 90 no Reino Unido pelo CERC (*Cambridge Environmental Research Consultants*), serviço nacional de meteorológico do Reino Unido (*UK Met Office*) e a companhia de energia nacional, também teve patrocínio de vários organismos do Reino Unido (Scott, 2003). Apresenta uma série de características que o tornam apelativo para a realização da modelação da qualidade do ar neste trabalho (ADMS-Roads, 2013):

- Versátil, pois permite inúmeras aplicações, desde comparar limites estabelecidos pela UE e as recomendações da OMS, avaliar o impacte ambiental de medidas/políticas (ex. ZER);
- Usa o modelo gaussiano para caracterização da dispersão atmosférica, significa o que a estrutura e a estabilidade da camada limite é caracterizada pela altura da camada limite e o comprimento de Monin-Obukhov, em vez do parâmetro simples de Pasquill-Gifford;
- Em condições meteorológicas convectivas o perfil vertical de concentração é não-gaussiano, melhorando assim a precisão;
- Permite caracterizar a dispersão atmosférica associada a fontes pontuais, linha, área, volume e vias rodoviárias;
- Permite a modelação simultânea de varias fontes emissoras (Máximo de 150 vias);
- Permite integrar sistemas de informação geográfica (ArcGIS);
- Calcula os parâmetros da camada limite a partir de uma variedade de dados de entrada;

Neste modelo a distribuição do perfil de concentrações de uma atmosfera neutra ou estável é estimada pelo modelo Gaussiano (ADMS-Roads, 2013). A fórmula Gaussiana é derivada assumindo condições “*steady-state*”, ou seja, as suas fórmulas não dependem do tempo embora representem uma média de tempo. Portanto, assume que as condições meteorológicas são constantes durante a dispersão da fonte até ao recetor, feita de forma instantânea. As emissões e condições meteorológicas podem variar de hora para hora, mas os cálculos do modelo Gaussiano em cada hora são independentes às de outras horas. Assim, o modelo estima as concentrações para cada hora a partir de uma taxa de emissão e as condições meteorológicas que são consideradas uniformes em todo o domínio da modelação. Estima as concentrações médias de hora a hora (MEMMTT, 2004).

O ADMS-Roads caracteriza a estabilidade atmosférica através da altura da camada limite atmosférica e o comprimento de Monin-Obukhov (L_{MO}) em vez de usar a categoria de estabilidade de Pasquill-Gifford (ADMS-Roads, 2013). Resumidamente, Pasquill-Gifford é uma classificação da estabilidade atmosférica supondo que a estabilidade depende da radiação solar (indicador da turbulência térmica) e a velocidade do vento (indicador da turbulência mecânica), consoante estes dois parâmetros é atribuída uma das sete classes possíveis. Desta forma, pode-se afirmar que o uso de L_{MO} permite uma caracterização da estabilidade atmosférica de uma forma continua e mais exata, sendo uma vantagem.

O L_{MO} exprime a relação entre a turbulência de origem mecânica e térmica, caracterizando o grau de estabilidade da atmosfera. O L_{MO} é a altura acima do solo no qual a turbulência de origem mecânica e térmica se igualam. Ou seja, acima desta altura a turbulência de origem térmica é predominante, enquanto abaixo a turbulência de origem mecânica é predominante (Barratt, 2013). É definido como (Bache e Johnstone, 1992):

$$L_{MO} = \frac{-u_*^3}{\left(\frac{k g F_{\theta_0}}{\rho c_p T_0}\right)}$$

Onde u_* [m/s] é a velocidade de fricção, k é a constante de Von Karman ($k = 0,4$), g [m/s²] é a aceleração gravítica, F_{θ_0} [W/m²] o fluxo de calor sensível da superfície, ρ [kg/m³] e c_p [J/kg.K] corresponde à densidade e calor específico à pressão constante do ar, respetivamente, e T_0 [K] a temperatura absoluta do ar. O L_{MO} depende essencialmente da u_* e do F_{θ_0} (Bache e Johnstone, 1992). A u_* relaciona-se com a velocidade do vento como se pode observar na sua definição:

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

A velocidade do vento (U) [m/s] depende da altura (z) [m], z_0 [m] refere-se à altura da rugosidade da superfície, correspondendo a uma determinada altura até onde a velocidade do vento é considerada nula, refletindo a altura dos obstáculos presentes no solo (Reible, 1998). A u_* assume sempre valores positivos. Assim, o sinal do L_{MO} , no qual permite correlacionar com a condição de estabilidade, apenas está relacionada com o sinal do F_{θ_0} , como demonstrado Quadro 4.6 (Middleton e Thomson, 2002).

Quadro 4.6 - Condição atmosférica em função do comprimento de Monin-Obukhov e o fluxo de calor sensível da superfície (Middleton e Thomson, 2002)

Condição atmosférica	Sinal de L_{MO}	Sinal de F_{θ_0}
Instável	$L_{MO} < 0$	$F_{\theta_0} > 0$
Estável	$L_{MO} > 0$	$F_{\theta_0} < 0$
Neutra	$L_{MO} = \infty$	$F_{\theta_0} = 0$

Quando a temperatura superfície é superior à do ar circundante devido à radiação solar, o fluxo de calor sensível da superfície tem sentido ascendente ($F_{\theta_0} > 0$), criando correntes convectivas (turbulência térmica). Se a superfície estiver mais fria que o ar circundante ($F_{\theta_0} < 0$), situação que ocorre durante a noite, estamos perante uma situação de inversão térmica. Numa atmosfera neutra, a troca de calor entre a superfície e o ar circundante é nula ($F_{\theta_0} = 0$), ocorrendo quando a turbulência é unicamente de origem mecânica, pois provoca a uniformização dos gradientes de temperatura (Bache e Johnstone, 1992).

A caracterização da camada limite não é feita apenas com o L_{MO} mas também com a altitude da camada limite. De acordo com a hipótese de Monin-Obukhov, quando os vários parâmetros meteorológicos são normalizados por meio de apropriadas combinações de u_* e o F_{θ_0} , são

funções universais de z/L_{MO} (Bache e Johnstone, 1992). Este rácio é usado para a cateterização da camada limite e é referido como parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov (Hewitt e Jackso, 2009). É usado com o objetivo de indicar qual o tipo de turbulência que prevalece em determinadas condições atmosféricas. No ADMS-ROADS o rácio entre L_{MO} e h vai permitir saber qual a condição de estabilidade da atmosfera, como esquematizado na Figura 4.4.

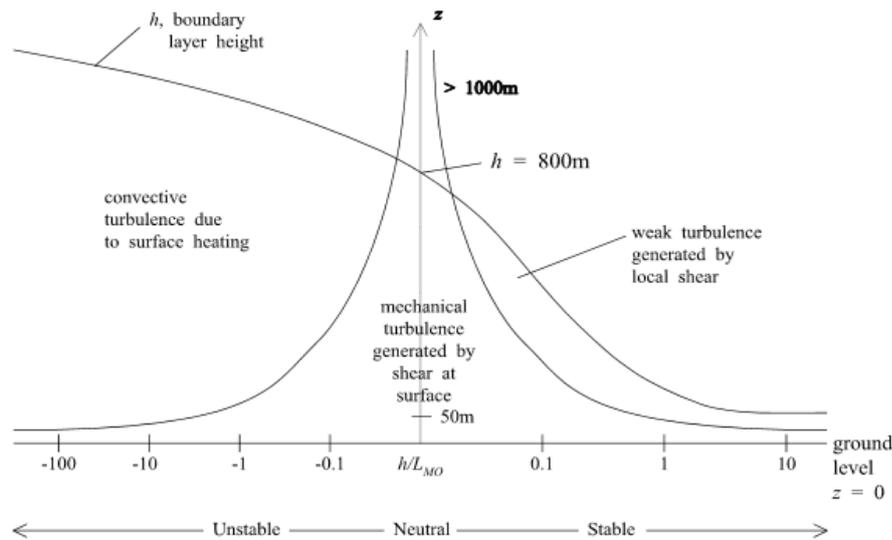


Figura 4.4 - Representação da variação do comprimento de Monin-Obukhov com a estabilidade atmosférica (ADMS-Roads, 2013)

Como referido inicialmente, o modelo aceita uma grande variedade de dados meteorológicos para a modelação da qualidade do ar. No entanto, há dados mínimos e outros que são aconselhados a usar. Para o cálculo de dispersão dos poluentes, os dados mínimos a introduzir são a velocidade do vento e sua direção, e fluxo de calor sensível da superfície ou comprimento de Monin-Obukhov ou dados suficientes para calcular o fluxo de calor sensível da superfície, como demonstrado no esquema da Figura 4.5.

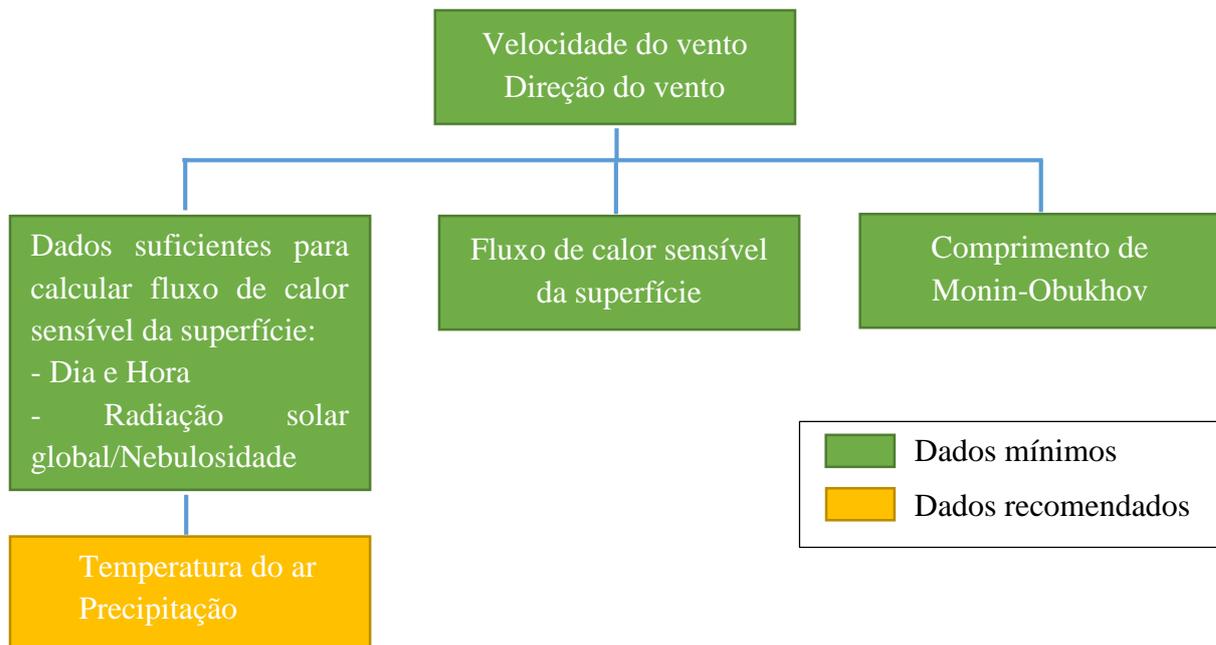


Figura 4.5 - Esquematização dos dados mínimos e recomendados pelo ADMS-Roads (ADMS-Roads, 2013)

Uma característica do modelo bastante importante para a realização deste trabalho foi a possibilidade de aplicar um módulo adicional que simula-se as reações químicas decorrentes na atmosfera. O uso deste módulo químico possibilitou a realização da modelação de qualidade do ar referente ao O_3 , pois tratando-se de um poluente secundário apenas é possível fazer a sua modelação através da aplicação deste módulo. Também foi relevante na modelação das concentrações de NO_2 , isto porque realizar a modelação sem ter em conta as reações químicas decorrentes na atmosfera, não faria sentido para o caso de NO_2 . As reações químicas assumidas pelo modelo encontram-se indicadas no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Reações químicas assumidas pelo ADMS-Roads (ADMS-Roads, 2013)

$ROC + hv \rightarrow RP + ROC$	ROC – Compostos orgânicos reativos RP – Radical SGN – Produtos de azoto gasosos estáveis SNGN - Produtos de azoto não-gasosos estáveis
$RP + NO \rightarrow NO_2$	
$NO_2 + hv \rightarrow NO + O_3$	
$NO + O_3 \rightarrow NO_2$	
$RP + RP \rightarrow RP$	
$RP + NO_2 \rightarrow SGN$	
$RP + NO_2 \rightarrow SNGN$	

4.2.2 Aplicação do Modelo

O modelo de qualidade do ar é complexo, pois requer uma grande variedade de dados de entrada e o auxílio de programas externos. Requer dados sobre as fontes de emissão, dados meteorológicos, medições de qualidade do ar (*background*) e indicação do domínio de modelação. Assim, todos os dados e passos necessários para executar este modelo vão ser seguidamente explicados.

Numa primeira fase e para aplicação do modelo de qualidade do ar foi necessário o uso de um sistema de informação geográfica (ArcGIS). Este sistema foi importante na definição da geometria das vias rodoviárias no domínio de modelação. O ADMS-Roads tem limite no número de fontes a avaliar, de 150 vias rodoviárias, devido a esta limitação foi necessário agregar a informação de algumas vias. O domínio de modelação também foi definido com o auxílio do ArcGIS, correspondendo a uma área de 1778x1898 metros, abrangendo toda a área da ZER. As emissões introduzidas para cada fonte são provenientes do modelo de emissões, havendo apenas a necessidade de converter as unidades de g/km para g/km/s e de diferenciar as emissões de NO_x.

Na Figura 4.6 encontra-se a representação da geometria das vias consideradas para modelação, a localização da estação de monitorização AFM e o domínio de modelação. Foi necessário a definição de um ponto específico no domínio de modelação, correspondente à localização da estação de monitorização da AFM, com a finalidade de obter as concentrações específicas nesse ponto provenientes da modelação, permitindo desta forma validar os resultados obtidos, comparando os valores das concentrações modelados com os medidos pela estação de monitorização.

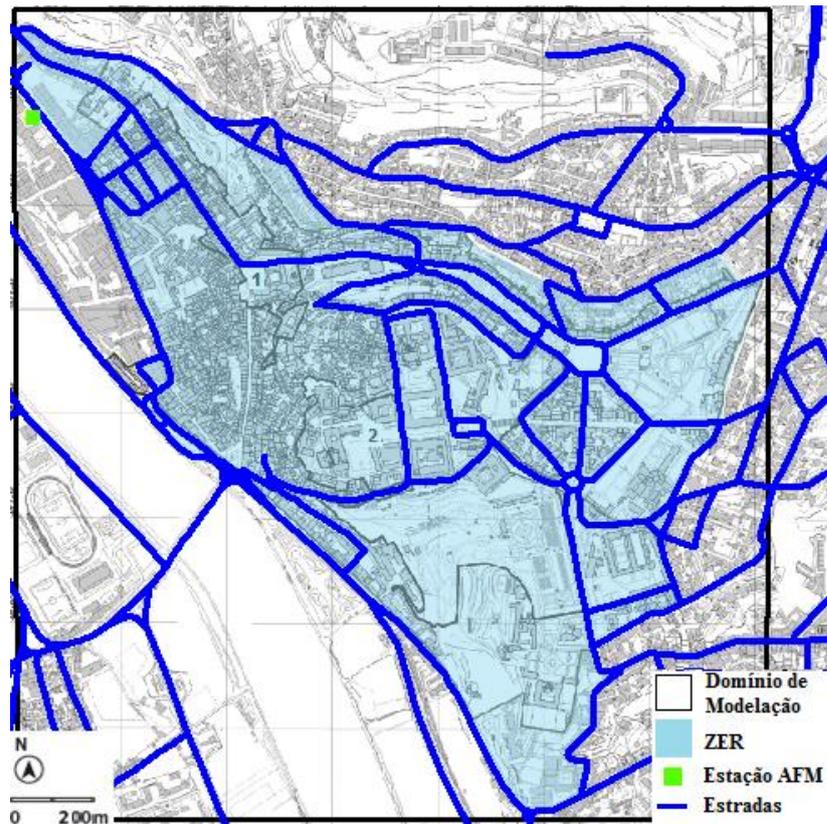


Figura 4.6 - Localização espacial da estação da AFM e a geometria das vias rodoviárias, e respetiva indicação do domínio de modelação

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da estação do IGC. Após a análise dos dados disponibilizados, constatou-se que os dados a introduzir no modelo seriam a velocidade e a direção do vento, dados suficientes para o cálculo do fluxo de calor sensível da superfície (dia, hora e radiação solar global) e havendo a possibilidade de introduzir dados recomendados (temperatura do ar e precipitação), optou-se por introduzir essa informação. Os dados disponibilizados corresponderam ao período de 2009 a 2013 mas apenas o ano 2013 tinha os dados referentes à radiação solar global, condicionando a escolha do ano a estudar.

Além de dados meteorológicos, é importante considerar as contribuições de poluentes provenientes do exterior à zona de modelação. Esta contabilização é feita através das concentrações de *background*, onde são introduzidos dados referentes a uma estação de fundo. Este tipo de estação não se encontra sob influência direta de nenhuma fonte em particular, permitindo conhecer os níveis médios de poluição de fundo (poluição externa à área urbana).

Na Figura 4.7 encontra-se ilustrado a rosa-dos-ventos, o ADMS-Roads tem a opção de visualizar a rosa-dos-ventos quando introduzidos os dados meteorológicos, assim, não foi necessário recorrer a nenhum *software* externo para a criação desta figura. Desta forma,

podemos concluir que para o período em análise os ventos dominantes têm origem principalmente no quadrante Noroeste (NW) seguindo-se o quadrante Su-Sudeste (SSE). Quanto à média anual da velocidade do vento correspondeu a 2,0 m/s.

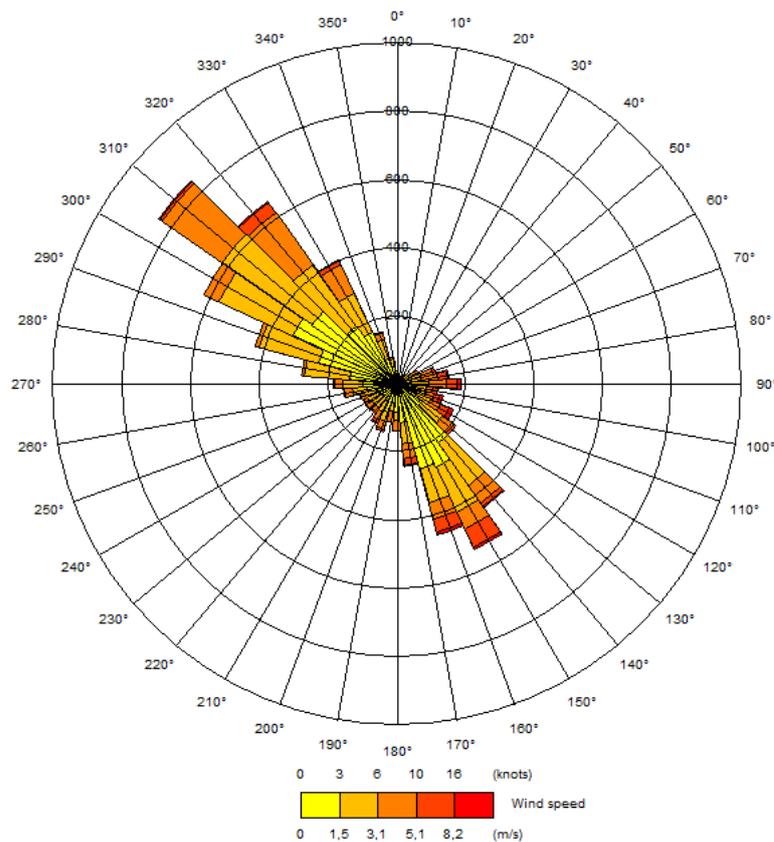


Figura 4.7 - Rosa-dos-ventos no ano de 2013 para Coimbra

No Quadro 4.8 encontra-se indicado os valores médios mensais da temperatura e da radiação solar global e a respetiva precipitação total mensal para o ano de 2013 segundo os dados adquiridos. Analisando o quadro é possível perceber pela temperatura que o mês de julho e agosto são os meses mais quentes e os mais frios, dezembro e fevereiro, sendo a temperatura média anual de 15,6°C. Relativamente à precipitação total, os meses de julho e agosto foram bastante secos, e os meses de maior pluviosidade foram janeiro, dezembro e março. É de destacar o mês de novembro no qual registou-se pouca precipitação, tendo em consideração a época do ano. Quanto à radiação solar global, esta é maior no verão e menor no inverno, fazendo todo o sentido, devido à duração do dia (horas de sol) mas também por causa da nebulosidade.

Quadro 4.8 - Valores médios mensais da temperatura e radiação solar global, e precipitação total mensal no ano de 2013 registado no Instituto Geofísico de Coimbra

Mês	Temperatura [°C]	Precipitação [mm]	Radiação solar global [W/m²]
Janeiro	10,6	195,2	58
Fevereiro	9,4	72,5	122
Março	11,7	171,8	126
Abril	13,7	58,4	226
Mai	15,1	43,5	264
Junho	19,4	54,2	277
Julho	22,8	2,7	299
Agosto	22,6	0,8	274
Setembro	21,5	49,8	203
Outubro	17,6	127,1	122
Novembro	12,2	24,4	100
Dezembro	10,2	174,5	77

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo vão ser apresentados e analisados os resultados obtidos no modelo de emissões e de qualidade do ar mas também algumas questões que tiveram de ser abordadas. Na primeira parte é feita a avaliação do impacto de uma potencial ZER nas emissões com base na variação das emissões dos poluentes na área de estudo. Esta análise é feita às emissões de PM₁₀, NO_x e NO₂. O O₃ tratando-se de um poluente secundário, apenas pode ser avaliado no modelo de qualidade do ar.

Numa segunda parte, é feita uma análise do impacto na qualidade do ar através da observação dos resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar. Esta avaliação é feita pela análise das variações das concentrações médias anuais dos poluentes PM₁₀, NO₂ e O₃ na área de estudo. Também é feita uma análise ao cenário de referência (sem ZER).

Na terceira e última parte, é explicado como foi feita a avaliação da fiabilidade/validade dos resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar. Esta validação é feita através da comparação dos valores modelados com os valores medidos pela estação da AFM. Esta etapa é fundamental para a comprovar que os resultados aqui apresentados têm validade e fiabilidade, mas apenas foi possível para os poluentes PM₁₀ e NO₂.

5.1 Emissões

Os resultados das emissões correspondem aos resultados obtidos pelo modelo de emissões, QTraffic. Através da aplicação deste modelo e analisando o impacto dentro da ZER obteve-se os resultados apresentados no Quadro 5.1. De acordo com os resultados obtidos, a introdução da ZER seria de esperar uma redução de 61,13% e 41,81% nas emissões de PM₁₀ e NO_x, respetivamente. Quantitativamente corresponde a uma redução de 1,09 e 15,95 t/dia, o que se traduz em aproximadamente 397,05 e 5820,71 t/ano para os poluentes PM₁₀ e NO_x, respetivamente.

Em relação às emissões de NO₂ levaria a uma diminuição de 21,60%, que se traduz numa redução de 1,48 t/dia e 538,55 t/ano. Tendo em conta os dados apresentados no Quadro 4.4, dados estes referentes à proporção de NO₂/NO_x nas emissões de exaustão, nos veículos ligeiros de passageiros a gasóleo as normas EURO mais recentes têm uma proporção maior de

NO_2/NO_x . No entanto, este aumento de proporção nos veículos a gásóleo não é suficientemente para levar a um aumento das emissões de NO_2 .

Quadro 5.1 – Emissões diárias obtidas no QTraffic para diferentes cenários dentro da área considerada Zona de Emissões Reduzidas

Poluente	Cenário		Impacte da ZER	
	Sem ZER [t/dia]	Com ZER [t/dia]	Quantitativo [t/dia]	Percentual [%]
PM10	1,78	0,69	-1,09	-61,23
NO _x	38,14	22,20	-15,95	-41,81
NO ₂	6,83	5,36	-1,48	-21,60

A ferramenta SIG (ArcGIS) possibilita a visualização espacial das emissões. A Figura 5.1 ilustra a distribuição espacial das emissões diárias para cada via de PM10 e NO_x para o cenário de referência, analisando esta figura conclui-se que é na zona da rotunda do Papa João Paulo II onde se localizam as vias mais poluentes, não só pelo facto de ser uma zona de grande afluência de veículos mas também devido à velocidade reduzida de circulação.

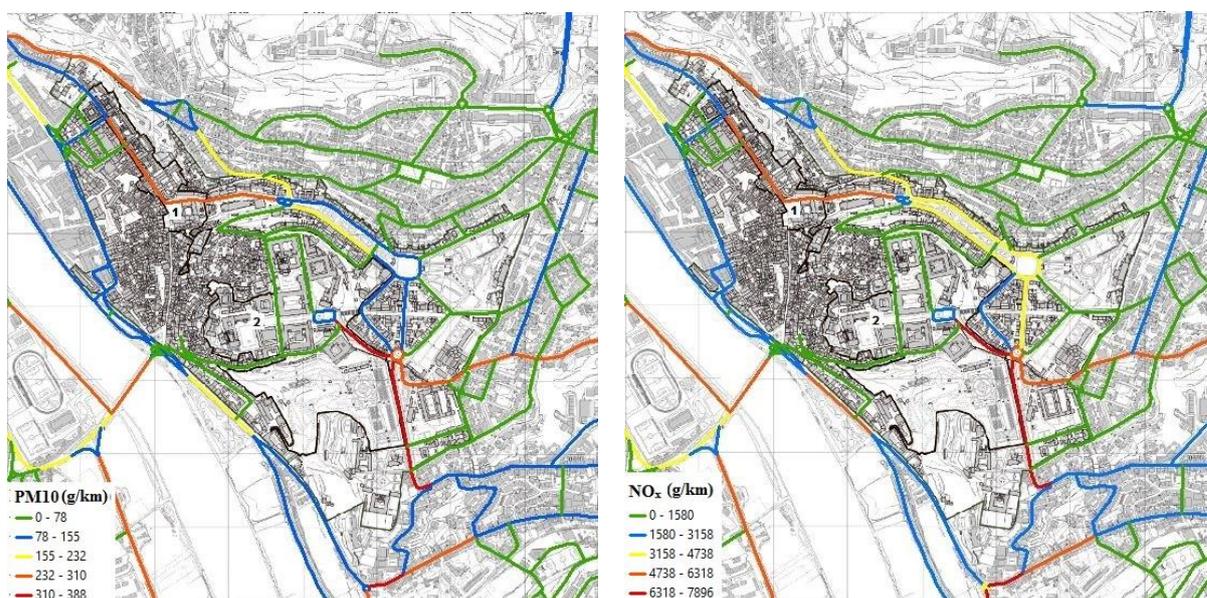


Figura 5.1 - Distribuição espacial das emissões diárias para cada via de PM10 e NO_x em Coimbra para o cenário de referência

Na Figura 5.2 é ilustrado a variação espacial esperada nas emissões diárias de PM10 e NO_x na área de estudo com a introdução da ZER. Analisando a Figura 5.1 e 5.2 podemos concluir que as vias com as maiores emissões no cenário de referência, com a introdução da ZER são as vias

onde se esperam as maiores reduções de emissões. Esta analogia permite afirmar que a introdução da ZER teria as maiores reduções de emissões nas vias mais poluentes dentro da ZER.

Ainda na análise da Figura 5.2, algumas vias fora da ZER serão afetadas devido às exigências impostas pela ZER e consequentemente levam a um aumento das emissões, isto por causa dos veículos provenientes do exterior da ZER mais poluentes (não cumprem as exigências) passarem a realizar viagens maiores pela parte externa da ZER. Pode-se observar pelos resultados apresentados que uma pequena parte das vias diminuem as emissões devido à alteração do volume do tráfego. No entanto a área de estudo deveria ser maior para uma avaliação rigorosa ao impacte na parte de fora da ZER, mas devido às limitações do ADMS-Roads isso não foi possível. Desta forma, o foco deste estudo vai para a avaliação do impacte dentro da ZER. O volume de tráfego dentro da ZER diminuí, pois os veículos que não cumprem as exigências não podem circular. Portanto, a diminuição das emissões deve-se à diminuição do volume de tráfego mais poluente.

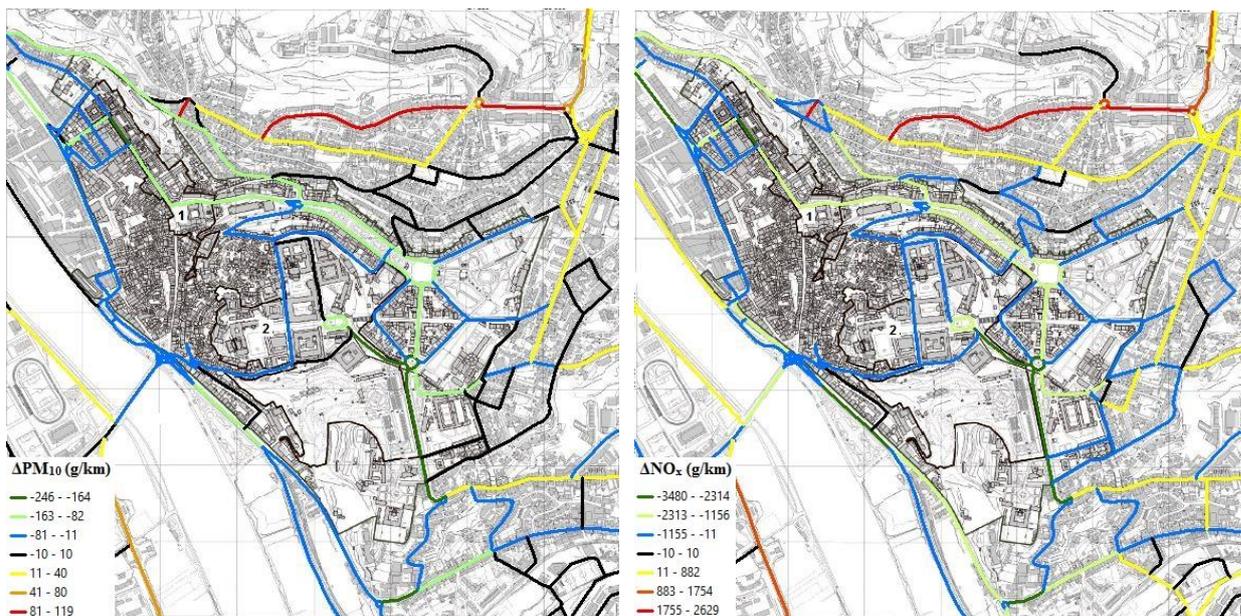


Figura 5.2 - Variação espacial esperada nas emissões diárias para cada via de PM10 e NO_x na área de estudo com a potencial introdução de uma ZER

5.2 Qualidade do Ar

Os resultados da qualidade do ar correspondem aos resultados obtidos pelo modelo ADMS-Roads. Para a análise dos resultados, como nos resultados das emissões, recorreu-se a uma ferramenta SIG para a análise espacial dos resultados. Na Figura 5.3 encontra-se ilustrado a

distribuição espacial das concentrações médias anuais de PM10 e NO₂ para o cenário de referência.

Pode observar-se pela análise da Figura 5.3 que as concentrações médias anuais para PM10 não aumentam significativamente quando comparado a concentração média anual mínima (valor do *background*) e máxima (devido à influência do tráfego rodoviário), ao contrário de NO₂ onde é visível a diferença. Este facto pode ocorrer devido ao modelo de emissões apenas estimar as emissões de exaustão correspondente à fração PM2.5 e não a totalidade de PM10. Outra razão é por causa de não se contabilizar todo o tipo de veículos neste estudo uma vez que apenas contabilizou-se os veículos ligeiros de passageiros. De salientar que os veículos pesados são maioritariamente a gasóleo, significa que uma parte considerável das emissões de PM2.5 não são tidas em consideração na área de estudo.

Conclui-se também que a estação de monitorização urbana de tráfego de Coimbra (Estação da AFM) não se localiza na zona onde as concentrações dos poluentes PM10 e NO₂ são mais elevadas. Segundo os resultados do modelo de qualidade do ar e a área de modelação, a zona mais crítica em termos de qualidade do ar localiza-se na rotunda do Papa João Paulo II.

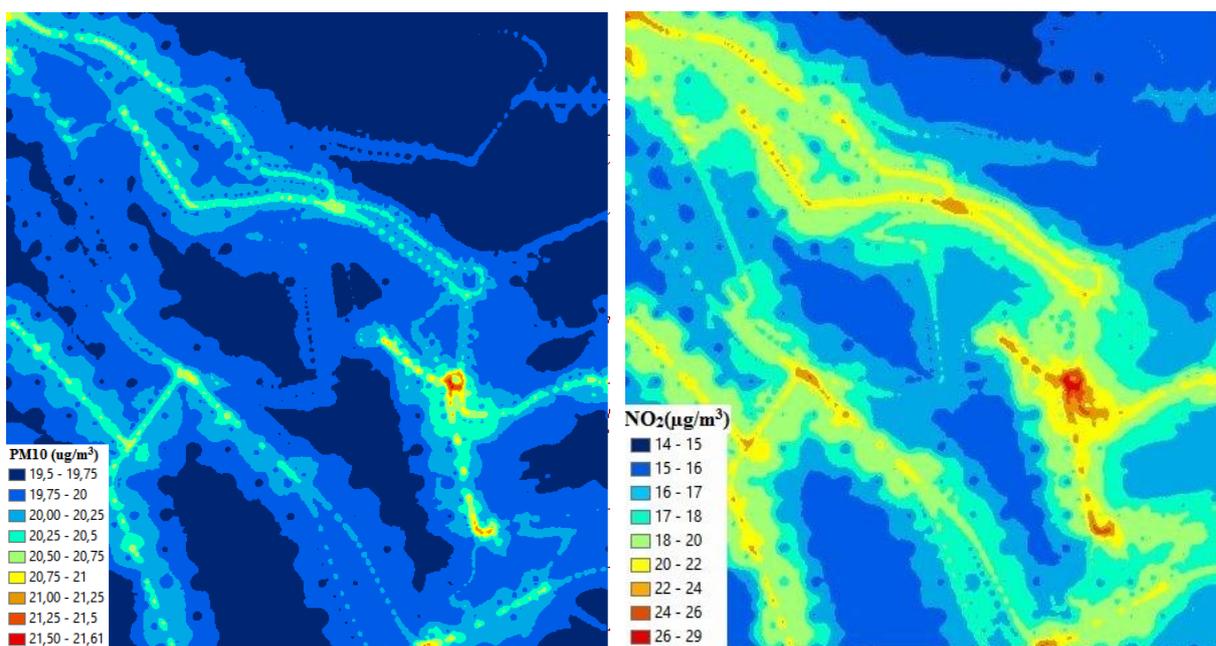


Figura 5.3 - Distribuição espacial das concentrações médias anuais de PM10 e NO₂ em Coimbra no cenário de referência

Os resultados do modelo de qualidade do ar demonstram que à semelhança dos resultados do modelo de emissões, há impactes positivos dentro da ZER para os poluentes PM10 e NO₂. A variação espacial das concentrações de PM10 e NO₂ esperada com a introdução de uma ZER é

ilustrada na Figura 5.4. Assim, para as características da ZER assumidas, estima-se que ocorra uma redução na concentração média anual das PM10 no máximo de $1,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e para as concentrações de NO_2 de $4,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando as reduções máximas nas concentrações dos dois poluentes, é nas concentrações de NO_2 que se espera uma maior redução.

Analisando a Figura 5.3 e a Figura 5.4, as maiores reduções nas concentrações médias anuais dentro da ZER tendem a ocorrer nas zonas onde as concentrações seriam mais elevadas no cenário de referência segundo os resultados do modelo, à semelhança das conclusões retiradas na análise dos resultados do modelo de emissões.

Avaliando o impacte na qualidade do ar fora da ZER há aumento em determinadas zonas da concentração média anual dos dois poluentes, isto devido ao aumento do volume de veículos em algumas vias. Com a introdução da ZER prevê-se que ocorra um aumento na concentração média anual das PM10 no máximo de $0,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e para as concentrações de NO_2 de $4,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Quando comparamos o maior aumento e a maior redução nas concentrações médias anuais, percebemos que em relação às PM10 a redução máxima na área de estudo é maior em relação ao aumento máximo, cerca do dobro. Enquanto nas concentrações de NO_2 isso não se observa, a redução máxima é praticamente igual ao aumento máximo, no entanto a redução é ligeiramente maior. Mas como mencionado anteriormente, para uma avaliação rigorosa do impacte na qualidade do ar fora da ZER teria ser feita numa área mais abrangente.

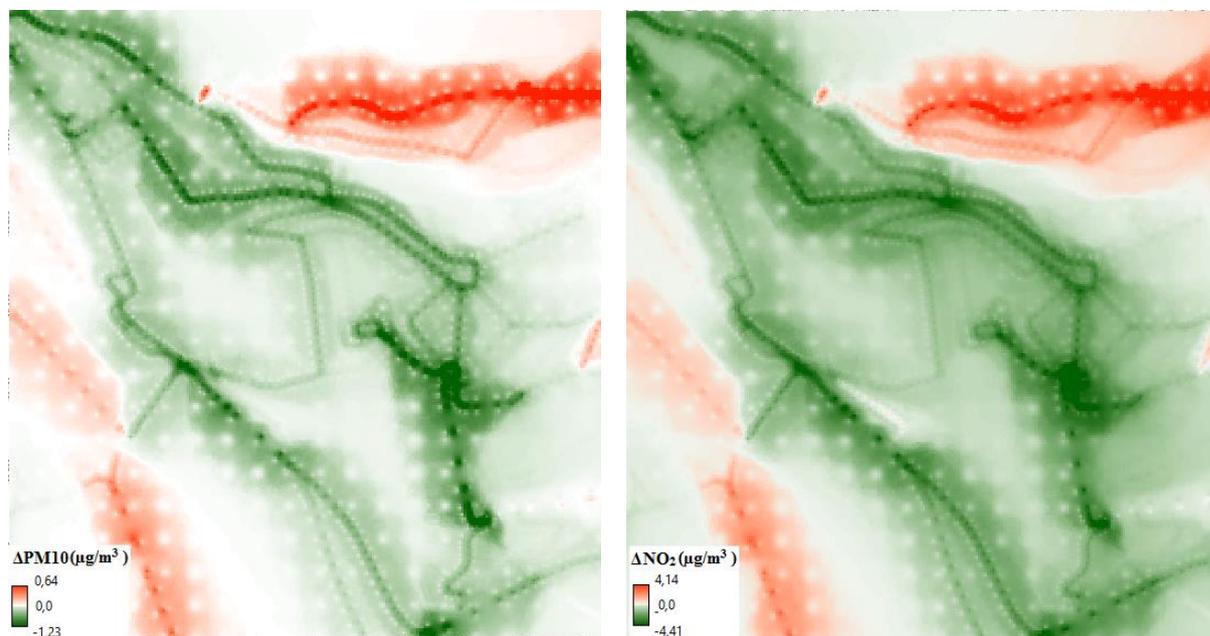


Figura 5.4 - Variação espacial esperada com a introdução da ZER nas concentrações médias anuais de PM10 e NO_2 em Coimbra

Os resultados do modelo de qualidade do ar referente ao O_3 , não foi possível validar, pois na estação da AFM este poluente não é monitorizado, no entanto os resultados obtidos seguem um padrão esperado como será demonstrado. Em áreas urbanas o O_3 tende a ter uma concentração menor quando comparado com as zonas externas às áreas urbanas, por causa da diferente concentração de percursores de O_3 , como é indicado pelas referências bibliográficas (Munir et al, 2012). Por este motivo, faz sentido que não seja monitorizado na estação localizada na AFM.

Na Figura 5.5 encontra-se ilustrado a variação espacial de O_3 esperada com a introdução da ZER. Na análise desta figura, o impacte na qualidade do ar para o O_3 é diferente em relação ao impacte dos outros poluentes avaliados. Com a introdução de uma ZER a concentração média anual de O_3 dentro da ZER espera-se que aumente no máximo $2,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fazendo todo o sentido uma vez que a concentração de NO vai diminuir. Assim, o aumento da concentração média anual de O_3 com a introdução de uma ZER era previsível. De salientar que a forma mais correta de avaliar o O_3 seria através da análise de concentrações máximas horárias ou concentrações máximas diárias das médias octo-horárias, isto porque o O_3 não tem nenhum valor limite/alvo para um período de um ano.

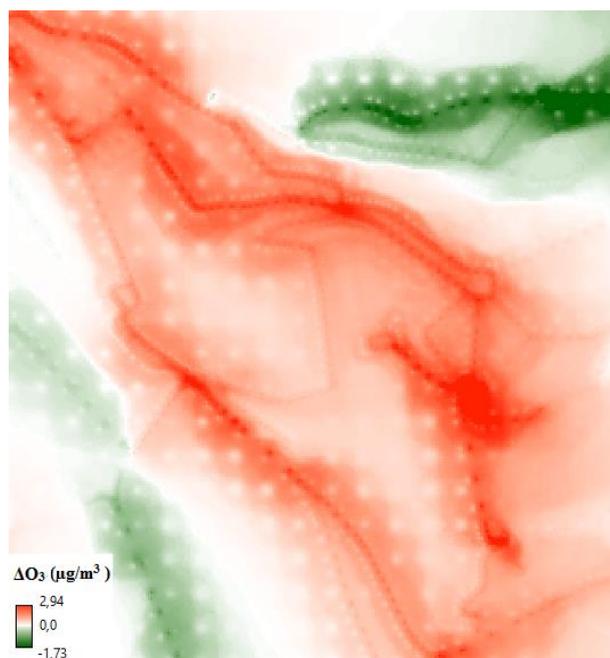


Figura 5.5 - Variação espacial esperada com a introdução da ZER nas concentrações médias anuais de O_3 em Coimbra

5.3 Validação do Modelo de Qualidade do Ar

Para a validação dos resultados obtidos com o modelo de qualidade do ar, recorreu-se aos dados medidos pela estação urbana de tráfego da AFM. Sendo que para a modelação das concentrações utilizou-se os dados da estação de monitorização do IGC como dados de *background*. É importante salientar que os dados de monitorização destas duas estações para o ano de 2013 cumpriram a taxa mínima de dados validos.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 demonstram os resultados obtidos no modelo de qualidade de ar comparativamente às concentrações medidas pela estação de monitorização da AFM para o poluente PM10 e NO₂, respetivamente. De salientar que para PM10 os valores correspondem às médias diárias e para NO₂ a concentração máxima horaria registada em cada dia. Analisando a Figura 5.6, podemos observar que as concentrações obtidas pelo modelo de qualidade do ar no geral encontra-se abaixo dos valores monitorizados e que há alguma concordância e correlação entre as duas séries temporais analisadas. Em relação ao cumprimento legislativo do valor limite de concentração média diária para PM10, na estação de monitorização é registado 8 excedências ao valor permitido (50 µg/m³) enquanto que os valores modelados apenas 4 excedências. Em relação à Figura 5.7, correspondente ao NO₂, as conclusões retiradas são semelhantes da PM10 em relação entre aos valores modelados e monitorizados. Quanto ao cumprimento legislativo, não há registo da excedência do valor limite horário (200 µg/m³), tanto para os valores modelados como para os monitorizados.

A destacar que os valores modelados têm em conta o *background* e por essa razão, pode haver alguma discordância dos valores não necessariamente por causa da contribuição relacionada com o tráfego local estimada pelo modelo de qualidade do ar mas por causa dos dados referentes ao *background*.

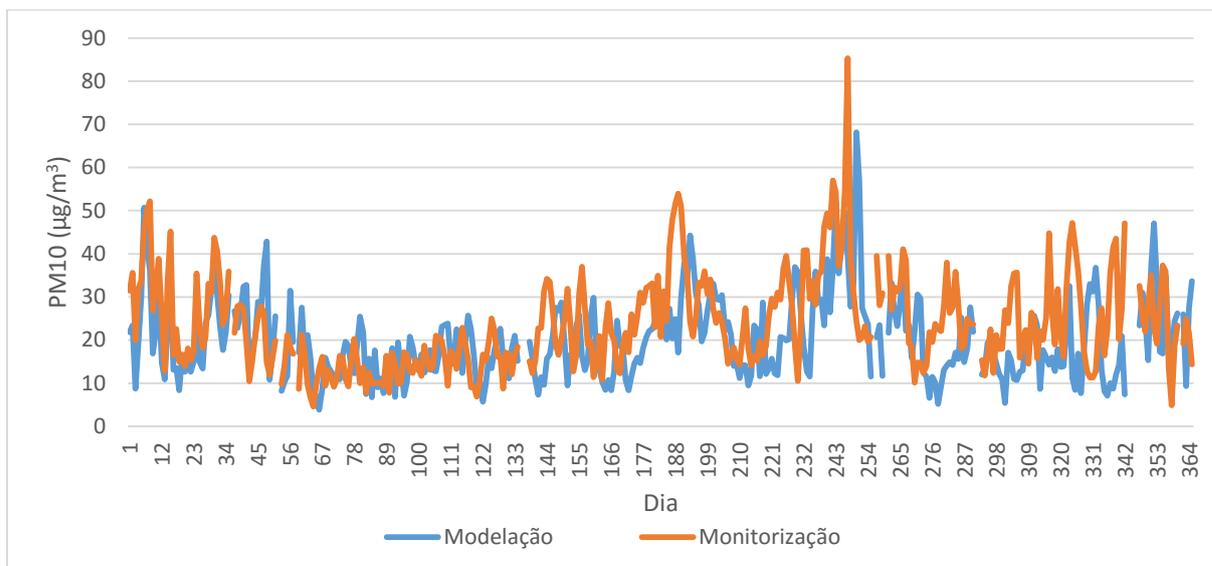


Figura 5.6 - Comparação entre as concentrações médias diárias de PM10 obtidas pela modelação para o cenário de referência e dados medidos na estação de monitorização da AFM.

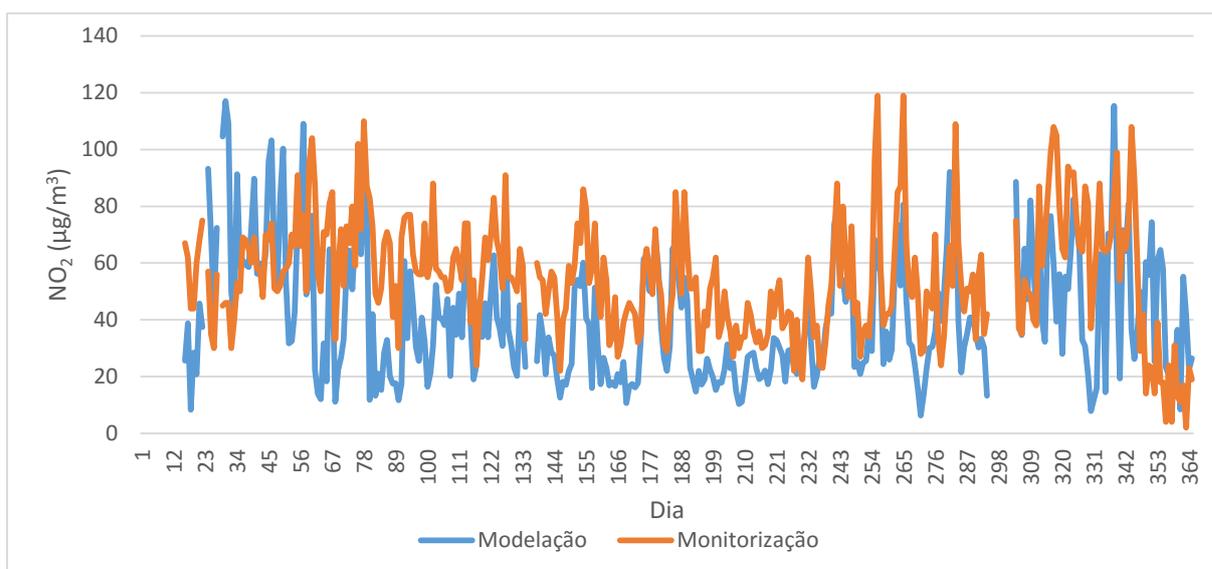


Figura 5.7 - Comparação entre as concentrações médias diárias de NO₂ obtidas pela modelação para o cenário de referência e dados medidos na estação de monitorização da AFM.

Numa análise estatística é possível estimar quantitativamente a qualidade dos resultados da modelação, comparando os resultados da modelação e os dados medidos pela estação da AFM. Assim, encontra-se no Quadro 5.2 os indicadores estatísticos e as suas respectivas fórmulas de cálculo, utilizadas na análise da qualidade dos resultados de modelação obtidos.

O coeficiente de correlação de *Pearson* (*R*) mede o grau de correlação entre duas variáveis quantitativas, por outras palavras, indica a relação linear entre dois conjuntos de dados, neste

caso entre os valores modelados e os dados medidos pela estação da AFM. O erro percentual médio (MFE) é um indicador sobre os erros obtidos entre os resultados medidos e os obtidos pelo modelo (Thunis et al., 2011). O índice de concordância (IOA) avalia a capacidade do modelo em prever as variações sobre a média dados medidos pela estação, ou seja, permite avaliar a diferença entre os valores medidos pela estação e os modelados. O erro sistemático médio (BIAS) é indicativo do desvio existente entre os valores medidos e os modelados em termos sistemático. Com base neste indicador é possível saber se o modelo tem tendência em subestimar (valor negativo) ou sobrestimar (valor positivo) os valores (concentrações) obtidos pelo modelo (Thunis et al., 2011; Monteiro et al., 2011).

Quadro 5.2 - Indicadores estatísticos de qualidade utilizados na validação da modelação (Thunis et al., 2011; Monteiro et al., 2011)

Indicador Estatístico	Fórmula	Variáveis
Coefficiente de Correlação (r)	$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}) \cdot (O_i - \bar{O})}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \right] \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right]}$	M_i , O_i – Valores de concentração modelados e medidos, respetivamente;
Índice de Concordância (IOA)	$IOA = 1 - \frac{N \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2}{N}}}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	\bar{M} , \bar{O} – Média dos valores de concentração modelados e medidos, respetivamente;
Erro Percentual Médio (MFE)	$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ M_i - O_i }{[(M_i + O_i)/2]}$	
Erro Sistemático Médio (BIAS) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$	N – Número de valores do intervalo.

O Quadro 5.3 apresenta os resultados obtidos nos varios indicadores, assim como, o intervalo de valores esperados e os valores ideais para cada indicadores estatísticos de qualidade dos resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar para os poluentes NO_2 e PM_{10} . Pela análise do Quadro 5.3, pode-se concluir que os valores de todos os indicadores calculados encontram-se com valores aceitáveis. O coeficiente de correlação de *Pearson*, no caso de PM_{10} apresenta uma boa aproximação do valor ideal, enquanto NO_2 o seu valor encontra-se um pouco mais afastado do ideal mas continua a ter um valor positivo, indicando uma correlação positiva, a menor correlação pode estar relacionada com as reações químicas assumidas pelo modelo. Em relação ao índice de concordância para os dois poluentes validados, o modelo apresenta um bom comportamento, uma vez que os valores calculados são superiores a 0,5 (Monteiro et al., 2011). O erro sistemático médio, em ambos os casos é negativo, significa que os valores obtidos

pelo modelo subestimam as concentrações, reflete a diferença entre os valores modelados e os medidos, assim como o erro percentual médio.

Quadro 5.3 - Valores dos indicadores estatísticos para os resultados modelados de NO₂ e PM10

Indicador Estatístico	Intervalo de valores esperado	Valor Ideal	NO₂	PM10
Coefficiente de Correlação (R)	[-1, 1]	1	0,46	0,76
Índice de Concordância (IOA)	-	1	0,65	0,85
Erro Percentual Médio (MFE)	[0%, 200%]	0%	70,20%	48,49%
Erro Sistemático Médio (BIAS) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	-	0	-9,03	-3,72

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações Finais

O trabalho realizado e aqui apresentado teve como principal objetivo avaliar o impacto de uma potencial ZER em Coimbra no qual abrange-se toda a zona de proteção e de património mundial da UNESCO. Neste trabalho também foi feita uma avaliação à qualidade do ar em Coimbra. O estudo foi efetuado para o ano de 2013, comparativamente com os trabalhos anteriores realizados nesta área, esta dissertação tinha a pretensão de destacar-se ao realizar um estudo para Coimbra num ano inteiro.

Para a realização deste estudo foi fundamental adquirir conhecimentos bibliográficos, adquirindo conhecimento sobre a problemática da qualidade do ar na Europa, com foco na UE. O conhecimento adquirido sobre as praticas feitas pela UE referente às ZER, os poluentes problemáticos e a importância do tráfego rodoviário como fonte de poluição, revelou-se essencial na definição das características da ZER.

Os modelos de qualidade do ar tem sido uma ferramenta importantíssima na realização de estudos de previsão das concentrações de poluentes e na avaliação do impacto de determinadas medidas/políticas na qualidade do ar. Apesar de não ser o único tipo de modelo necessário para a realização de estudos, este talvez seja o modelo mais importante devido à sua capacidade de avaliar impactes na qualidade do ar com a alteração de emissões. Isto é possível nestes tipos de modelos, através do conhecimento das características da área de estudo, tais como as condições meteorológicas, as fontes de poluição existentes. Sendo reconhecida como uma ferramenta importante na previsão e avaliação da qualidade do ar, inclusive pelas diretivas de qualidade do ar.

A área de estudo é fortemente influenciada pelo tráfego rodoviário, por esta razão foi necessário utilizar dados de saída de um modelo de transportes (VISIUM). O modelo de emissões (QTraffic) aplicado a este trabalho permitiu estimar as emissões do tráfego rodoviário para posteriormente aplicar-se no modelo de qualidade do ar (ADMS-Roads).

Os resultados do modelo de emissões apresentados permitiram retirar algumas conclusões, inclusive quais as vias que mais contribuem para a poluição e qual o impacto seria de esperar com a introdução da ZER nas emissões. Analisando o impacto, as maiores reduções nas

emissões ocorrem nas vias com maior taxa de emissão (g/km), estas são as vias que tendem a beneficiar mais com a introdução de uma ZER e é de esperar que correspondam às zonas com as maiores reduções nas concentrações dos poluentes, como veio a ser confirmado com os resultados do modelo de qualidade do ar.

Os resultados do modelo de qualidade do ar foram apresentados em termos de concentrações médias anuais e variação na concentração média anual para os poluentes PM10 e NO₂ e variação na concentração média anual para O₃. Para a análise dos resultados dos modelos de qualidade do ar foi fundamental efetuar a validação dos resultados, com os indicadores estimados concluiu-se que os resultados deste modelo são credíveis e fiáveis, permitindo ter segurança nas deduções e conclusões feitas. No entanto, não foi possível validar os resultados referentes ao poluente O₃ mas os seus resultados são plausíveis e vão ao encontro do que seria de esperar segundo as referências bibliográficas.

Pela análise espacial dos resultados do modelo de qualidade do ar é possível concluir que as maiores reduções nas concentrações médias anuais de PM10 (1,23 µg/m³) e NO₂ (4,41 µg/m³) localizam-se na rotunda do Papa João Paulo II, zona onde as concentrações destes dois poluentes era mais elevada no cenário de referência. Ainda concluiu-se que em termos de valores absolutos o impacte seria superior para NO₂. Através da análise espacial dos resultados também pode ser concluído que a localização da estação de monitorização da qualidade do ar na AFM pode não se situar na zona onde as concentrações de poluentes são mais elevadas e desta forma pode ser uma zona que não cumpra os limites legais impostos pela UE. Em relação ao O₃, os resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar permitiu concluir que a introdução de uma ZER levaria ao aumento da concentração média anual no máximo em 2,94 µg/m³ dentro da ZER.

Quanto ao impacte na qualidade do ar fora da ZER, este seria negativo, o aumento da concentração média anual máxima esperada para PM10 seria de 0,64 µg/m³ e de 4,13 µg/m³ para NO₂. Mas quando comparamos o maior aumento e a maior redução nas concentrações médias anuais na área de estudo, as reduções são maiores, principalmente quando refere-se às PM10. Quanto ao O₃, seria de esperar uma diminuição na concentração média anual. Mas como já referido varias vezes, a avaliação do impacte fora da ZER só seria rigorosa se a área de estudo fosse maior, porque há algumas vias que sofreram alteração no volume de tráfego (aumento) e não foi possível avaliar devido às limitações do modelo de qualidade do ar.

Pela análise dos resultados do modelo de qualidade do ar, podemos constatar que a introdução de uma ZER na área urbana de Coimbra levaria a melhorias na qualidade do ar para os poluentes PM10 e NO₂, destacando pela positiva o impacte nas concentrações médias anuais de NO₂ no qual se podem considerar significativas. Quanto ao impacte na qualidade do ar referente ao O₃, seria de esperar um aumento. No entanto, não é preocupante uma vez que as concentrações de O₃ em áreas urbanas tendem a ser relativamente baixas. Assim, concluímos que a introdução

de uma ZER na área urbana de Coimbra seria uma mais-valia na melhoria da qualidade do ar e de um outro ponto de vista, poderia contribuir para a conservação do património mundial.

É importante averiguar que seria de esperar nos resultados algumas diferenças do modelo de emissões e de qualidade do ar, caso algumas considerações importantes tomadas fossem outras. O facto de se ter contabilizado os veículos ligeiros de passageiros foi consequência da disponibilidade de dados de saída por parte do modelo de transportes. Em relação à redução do volume de tráfego com a introdução da ZER há algumas questões que devem ser referidas e abordadas. Os dados do modelo de transportes são referentes ao ano de 2011, enquanto nos restantes modelos foram usados dados de 2012 (modelo de emissões) e 2013 (modelo de qualidade do ar), sendo que o estudo foi feito para 2013. O modelo de transportes assim como o modelo de emissões tem em conta a distribuição da frota automóvel em termos de normas EURO. Uma vez que a distribuição da frota automóvel é diferente para estes anos, é importante avaliar qual a diferença seria de esperar nos resultados obtidos. Assim, a redução no volume de tráfego seria ligeiramente menor, pois a quantidade de veículos pertencentes à norma Pré-EURO a EURO2 no ano de 2011 era um pouco maior em relação a 2013.

Ainda na análise da redução do volume de tráfego, pelas questões acima referidas, seria de esperar uma redução no volume de tráfego ligeiramente menor, pois a diferença na idade média da frota automóvel dos veículos ligeiros de passageiros de 2011 para 2013 é de apenas 0,9 anos. O mesmo acontece com a distribuição da frota automóvel considerada, no qual se usou os dados de 2012, a diferença entre 2012 e 2013 em termos da idade média é pequena (0,4 anos). Estas considerações tomadas teriam interferência nos resultados obtidos mas pouco significativo, além disso, foi consequência da disponibilidade dos dados e não por outras razões. Desta forma, o impacte dentro da ZER seria um pouco menor tanto em termos de emissões (g/km) assim como nas concentrações ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

6.2 Trabalhos Futuros

Durante a realização deste trabalho levantaram-se algumas questões pertinentes. No sentido de dar continuidade a este trabalho, alguns dos trabalhos que se podem realizar futuramente são:

- Realizar o mesmo estudo mas para uma área mais abrangente de forma a avaliar com maior rigor o impacte de uma potencial ZER, fora dela;
- Avaliar o impacte na qualidade do ar com outras medidas que regulamentem o tráfego rodoviário, como por exemplo portagens urbanas;
- Realizar uma caracterização de toda a rede da área urbana de Coimbra que inclua todos os tipos de veículos rodoviários para futuros trabalhos/projetos;
- Avaliar o impacte esperado no O_3 usando critérios de avaliação adequados;

- Averiguar se efetivamente a rotunda do Papa João Paulo II é a zona mais crítica em termos de qualidade do ar e o quão grave essa situação poderá representar para a saúde pública caso se venha a confirmar;
- Melhorar o QTraffic de forma a este contabilizar as emissões de PM na gama PM10-2.5. Seria necessário realizar um estudo em Coimbra para determinar qual a contribuição nas PM10 relativamente às emissões provenientes da ressuspensão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Rahman, A. (2008). “On the atmospheric dispersion and gaussian plume model”. 2nd International conference on waste management, water pollution, air pollution, indoor climate (WWAI'08).

ADMS-Roads. (2013). “ADMS-Roads Air Quality Management System”. User Guide – Version 3.2. Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.

Almeida, J. e Coutinho-Rodrigues, J. (2003). “Um Modelo Gaussiano Incorporado em SIG para Estudo de Impactos Ambientais – Aplicação a um Caso de Zona de Coimbra”. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra.

Al-Qadi, L. I., Sayed, T., Alnuaimi, N., Masad, E. (2008). “Efficient Transportation and Pavement Systems: Characterization, Mechanisms, Simulation, and Modeling”. CRC Press/Balkema. Grã-Bretanha.

APA@. (2016). <http://qualar.apambiente.pt>. “Base de Dados Online sobre a Qualidade do Ar”. (Acedido em Abril 2016).

Auto Informa@ (2016). <http://www.autoinforma.pt/estatisticas/estatisticas.html?MIT=36458>. (Acedido em Maio 2016).

Bache, H. D. e Johnstone, R. D. (1992). “Microclimate and spray dispersion”. Ellis Horwood. Grã-Bretanha.

Barratt, R. (2013). “Atmospheric Dispersion Modelling: An Introduction to Practical Applications”. Earthscan.

Benton-Short, L. e Short, J. (2013). “Cities and Nature”. 2º Edição, Routledge. Inglaterra.

Borrego, C., Miranda, A., Arroja, L., Fidélis, T., Castro, E., Gomes, A. (2013). “10ª CNA-XII CNEA”. Universidade de Aveiro.

Boulter, P., McCae, P., Barlow, T. (2007). “A review of instantaneous emission models for road vehicles”. Transport Research Laboratory.

Brebbia, C. e Longhurst, J. (2008). “Air Pollution XVI”. WIT Press. Grã-Bretanha.

CE@. (2016). <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/>. “Air Quality”. (Acedido em Julho de 2016).

Chang, J. e Hanna, S. (2004). “Air quality model performance evaluation”. *Meteorology and Atmospheric Physics*: 87, 167-196.

CM-Lisboa@. (2016). <http://www.cm-lisboa.pt/viver/mobilidade/zonas-emissoes-reduzidas>. “Zonas de Emissões Reduzidas”. (Acedido em Abril 2016).

Decisão do Conselho 2011/850/CE de 12 de Dezembro de 2011. *Jornal Oficial* n° L 335/86 de 17/12/2011, p. 86-106. Comissão Europeia.

DEFRA. (2009). “Local Air Quality Management”. Department for Environment, Food and Rural Affairs.

Deliberação n.º 170/CM/2012. Câmara Municipal de Lisboa.

Deliberação n.º 247/CM/2011. Câmara Municipal de Lisboa.

Deliberação n.º 642/CM/2014. 3º Suplemento ao Boletim Municipal n.º 1081/2014, 6 de novembro 2014. Câmara Municipal de Lisboa.

Denby, B. (2010). “Guidance on the use of models for the European Air Quality Directive”. Forum for Air Quality Modelling in Europe.

Denby, B. (2011). “Guide on modelling Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive”. European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation.

Dias, D., Tchepel, O., Antunes, A. (2016). “Integrated Modelling Approach for the Evaluation of Low Emission Zones”. *Journal of Environmental Management* 177: 253-263.

Diretiva 1999/30/CE de 22 de Abril de 1999. *Jornal Oficial* n° L 163/41 de 29/06/1999, p. 41-60. Conselho da União Europeia.

Diretiva 2002/3/CE de 12 de Fevereiro de 2002. Jornal Oficial nº L 067 de 09/03/2002, p. 0014 – 0030. Parlamento Europeu e do Conselho.

Diretiva 2004/107/CE de 15 de Dezembro de 2004. Jornal Oficial nº L 23/3 de 26/01/2005, p. 3-16. Parlamento Europeu e do Conselho.

Diretiva 2008/50/CE de 21 de Maio de 2008. Jornal Oficial nº L 152/1 de 11/06/2008, p. 1-44. Parlamento Europeu e do Conselho.

Diretiva 96/62/CE do Conselho de 27 de Setembro de 1996. Jornal Oficial nº L 296 de 21/11/1996, p. 0055 – 0063. Conselho da União Europeia.

EC@. (2013). <http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/lez-zone-air-quality/>. “LEZ zone to enhance air quality in Europe”. European Commission. (Acedido em Abril 2016).

EEA. (2013). “Air quality in Europe – 2013 report”. EEA report. No 9/2013. European Environment Agency.

EEA. (2015). “Air quality in Europe – 2015 report”. EEA report. No 5/2015. European Environment Agency.

EEA. (2016). “Explaining road transport emissions”. European Environment Agency.

EEA@. (2014a). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-nitrogen-oxides-nox-emissions-1/assessment.2010-08-19.0140149032-3>. “Nitrogen oxides (NOx) emissions”. European Environment Agency. (Acedido em Maio 2016).

EEA@. (2014b). http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/sector-split-of-emissions-of-4#tab-chart_1. “Sector share for emissions of primary PM2.5 and PM10 particulate matter”. European Environment Agency. (Acedido em Maio 2016).

EEA@. (2016a). <http://www.eea.europa.eu/themes/air/intro>. “Air pollution”. European Environment Agency. (Acedido em Abril 2016).

EEA@. (2016b). <http://www.eea.europa.eu/themes/urban/intro#parent-fieldname-title>. “Urban environment”. European Environment Agency. (Acedido em Abril 2016).

EEA@. (2016c). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exceedance-of-air-quality-limit-3/assessment-1>. “Exceedance of air quality limit values in urban areas”. European Environment Agency. (Acedido em Abril 2016).

Eurostat. (2015). “Just over 40% of the EU population lives in cities”. Eurostat.

Ferreira, F., Nogueira, L., Almeida, C., Tente, H., Martins, A., Neto, J., Pereira, N., Gomes, P., Mesquita, S., Ferreira, V., Maciel, H., Torres, P. (2006). “Planos e Programas para melhoria da qualidade do ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo”. DCEA – FCT/UNL; CCDR-LTV.

Franco, V., Kousoulidou, M., Muntean, M., Ntziachristos, L., Hausberger, S., Dilara, P. (2013). “Road vehicle emission factors development: A review”. *Atmospheric Environment* 70: 84-97.

QTraffic@. (2016). <https://github.com/QTrafficmodel/QTraffic>. (Acedido em Julho de 2016).

Grice, S., Stedman, Kent, A., Hobson, M., Norris, J., Abbott, J., Cooke, S. (2009). “Recent trends and projections of primary NO₂ emissions in Europe”. *Atmospheric Environment* 43: 2154-2167.

Helsingin kaupunki@. (2016). <http://www.hel.fi/www/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/liikenteen-ymparistovaikutukset/tieliikenne/vyohyke>. (Acedido em Junho de 2016).

Hewitt, N. C. e Jackson, V. A. (2009). “Atmospheric science for environmental scientists”. 1^o edição, Wiley-Blackwell. Malásia.

Holman, C., Harrison, R., Querol, X. (2015). “Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities”. *Atmospheric Environment* 111:161-169.

Holmes, N. e Morawska, L. (2006). “A Review of Dispersion Modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available”. *Atmospheric Environment* 40: 5902-5928.

IARC. (2013). “Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths”. Press release N^o 221. International Agency for Research on Cancer.

ICCT. (2014). “EU CO₂ emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles”. International Council on Clean Transportation.

INE. (2011). “CENSOS 2011 – Resultados Definitivos Centro”. Instituto Nacional de Estatísticas.

INE. (2012). “Estatísticas dos Transportes e Comunicação 2012”. Instituto Nacional de Estatísticas.

- INE. (2013). “Estatísticas dos Transportes e Comunicação 2013”. Instituto Nacional de Estatísticas.
- Krzyzanowski, M., Kuna-Dibbert, B., Schneider, J. (2005). “Health effects of transport-related air pollution”. World Health Organization. Dinamarca.
- Kutz, M. (2004). “Handbook Of Transportation Engineering”. Mcgraw-Hill Inc. Nova Iorque.
- Langner, C. e Klemm, O. (2011). “A comparison of model performance between AERMOD and AUSTAL2000”. Journal of the air and waste management. 61:6, 640-646.
- Lindqvist, K. (2012). “Emission standards for light and heavy road vehicles”. AirClim Factsheet.
- MEMMTT. (2004). “Good Practice Guide for Atmospheric Dispersion Modelling”. Ministry for the Environment Manatū Mō Te Taiao. Wellington, New Zealand.
- Middleton, D. e Thomson, F. (2002). “Uncertainties in met pre-processing for dispersion models”. Met Office.
- Monteiro, A., Carvalho, A., Coelho, D., Dias, D., Sá, E., Borrego, C Miranda, A. (2011). “Plano de qualidade do ar da Região Norte – NO2”. Instituto do Ambiente e Desenvolvimento.
- Moussiopoulos, N., Berge, E., Bohler, T., Leew, F., Gronskei, K., Mylona, S., Tombrou, M. (1996). “Ambient Air Quality Pollutant Dispersion and Transport Models”. European Topic Centre on Air Quality. European Environment Agency.
- Munir, S., Chen, H., Ropkins, K. (2012). “Modelling the impact of road traffic on ground level ozone concentration using a quantile regression approach”. Atmospheric Environment, 60: 283-291.
- Nogueira, L. e Mesquita, S. (2014). “Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo no período 2001-2013”. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDRLVT).
- ParqueExpo. (2012). “Coimbra Rio – Área de Reabilitação Urbana”. Volume B – Estudos de Caracterização. Parque Expo.

Pinto, T. (2014). “Modelação de Poluentes Atmosféricos em Área Urbana do Conselho de Coimbra”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil.

Reible, D. D. (1998). “Fundamentals of environmental engineering”. Lewis Publishers. Estados Unidos da América.

Scott, M. E. (2003). “Modelling radioactivity in the environment”. 1º edição, Elsevier. Holanda.

Stockie, J. (2011). “The mathematics of atmospheric dispersion modelling”. SIAM Review 53:349-372.

Thunis, P., Georgieva, E., Galmarini, S. (2011). “A procedure for air quality models benchmarking”. Joint Research Centre, Ispra.

Transportpolicy@. (2016). http://transportpolicy.net/index.php?title=Category:European_Union. (Acedido em Maio de 2016).

Umweltbundesamt@. (2016). <http://gis.uba.de/website/umweltzonen/umweltzonen.php>. (Acedido em Junho de 2016).

UNESCO@. (2016). <http://whc.unesco.org/en/list/1387/>. “University of Coimbra – Alta and Sofia “. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (Acedido em Maio 2016).

Urban Access Regulations@. (2016). <http://pt.urbanaccessregulations.eu/>. Urban Access Regulations. (Acedido em Abril 2016).

WHO. (2006). “WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide”. World Health Organization.

Yue, H. (2008). “Mesoscopic fuel consumption and emission modelling”. Thesis in Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

ANEXOS

Quadro 1 – Valores de referência usados como indicador (EEA@, 2016b)

Valores de Referência da UE	
PM2.5	Concentração anual acima de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	Concentração diária acima de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por mais de 35 dias por ano
NO ₂	Concentração anual acima de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	Concentração máxima diária das médias octo-horárias acima de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por mais de 25 dias por ano
Recomendações de Qualidade do Ar da OMS	
PM2.5	Concentração anual acima de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	Concentração anual acima de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	Concentração anual acima de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	Concentração máxima diária das médias octo-horárias acima de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por pelo menos um dia por ano

Quadro 2 – Legislação da União Europeia relativa à qualidade do ar (Diretiva 2008/50/CE;
Diretiva 2004/107/CE)

Poluente	Tipo	Período	Valor
SO₂	Valor Limite	1 Hora	350 µg/m ³ , a não exceder mais de 24 vezes por ano
	Valor Limite	24 Horas	125 µg/m ³ , a não exceder mais de 3 vezes por ano
	Limiar de Alerta	3 Horas consecutivas	500 µg/m ³
NO₂	Valor Limite	1 Hora	200 µg/m ³ , a não exceder mais de 18 vezes por ano
	Valor Limite	Ano civil	40 µg/m ³
	Limiar de Alerta	3 Horas consecutivas	400 µg/m ³
CO	Valor Limite	Máximo diário das médias de períodos de 8 horas num ano civil	10 mg/m ³
PM₁₀	Valor Limite	24 Horas	50 µg/m ³ , a não exceder mais de 35 vezes por ano
	Valor Limite	Ano civil	40 µg/m ³
PM_{2.5}	Valor Limite	Ano civil	25 µg/m ³
O₃	Limiar de Alerta	1 Hora	240 µg/m ³
	Limiar de Informação	1 Hora	180 µg/m ³
	Valor Alvo	Máximo diário das médias de períodos de 8 horas num ano civil	120 µg/m ³ , a não exceder mais de 25 dias, em médio, por ano civil, num período de 3 anos
Benzeno	Valor Alvo	Ano civil	5 µg/m ³
Chumbo	Valor Alvo	Ano civil	0,5 µg/m ³
Arsénio	Valor Alvo	Ano civil	6 ng/m ³
Cádmio	Valor Alvo	Ano civil	5 ng/m ³
Níquel	Valor Alvo	Ano civil	20 ng/m ³
Benzo(a)pireno	Valor Alvo	Ano civil	1 ng/m ³

Quadro 3 – Recomendações de qualidade do ar da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006)

Poluente	Período	Valor
SO₂	24 Horas	20 µg/m ³
	10 Minutos	500 µg/m ³
NO₂	Ano civil	40 µg/m ³
	1 Hora	200 µg/m ³
PM₁₀	Ano civil	20 µg/m ³
	24 Horas	50 µg/m ³
PM_{2.5}	Ano civil	10 µg/m ³
	24 Horas	25 µg/m ³
O₃	8 Horas	100 µg/m ³

Quadro 4 – Distribuição da frota automóvel Portuguesa de veículos ligeiros de passageiros em 2012 por idade (Auto Informa@ 2016)

Idade	Distribuição
Até 1 ano	2,5%
De 1 a 2 anos	3,9%
De 2 a 3 anos	5,5%
De 3 a 4 anos	4,1%
De 4 a 5 anos	5,7%
De 5 a 10 anos	25,9%
De 10 a 15 anos	27,7%
De 15 a 20 anos	17,6%
Mais de 20 anos	7,2%
Idade média (anos)	11,1