



**Universidade de
Aveiro**
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Sara Mendes
Pereira**

**Impacte da queima residencial de biomassa
na qualidade do ar**



**Universidade
de Aveiro
2014**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Sara Mendes
Pereira**

Impacte da queima residencial de biomassa na qualidade do ar

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Myriam Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e do Doutor Jorge Humberto Amorim, Estagiário Pós-Doutoramento do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro por Fundos
FEDER através do Programa
Operacional Fatores de
Competitividade – COMPETE

Apoio financeiro por Fundos
Nacionais através da FCT –
Fundação para a Ciência e a
Tecnologia no âmbito do projeto
CLICURB (EXCL/AAG-
MAA/0383/2012).

O júri

Presidente

Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e
Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogais

Doutora Ana Margarida Lobo Lourenço da Costa
Técnica Superior no Instituto do Ambiente e Desenvolvimento -
IDAD

Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha
Dias Nunes Lopes
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento
da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Aos orientadores desta dissertação, Doutora Myriam Lopes e Doutor Jorge Humberto Amorim, por toda a paciência, disponibilidade e auxílio na consolidação de conhecimentos.

Ao Projeto CLICURB, pelo suporte das despesas ao nível do cluster computacional utilizado para realização deste trabalho.

À Doutora Célia Alves, do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar da Universidade de Aveiro e ao Projeto AIRUSE pela disponibilização dos fatores de emissão usados neste trabalho.

Ao Engenheiro Sylvio Freitas e à Engenheira Isabel Lavrador Ribeiro, pela disponibilidade prestada na transmissão de conhecimentos.

Aos meus pais e irmão, pelo voto de confiança e apoio incondicional.

Ao Damião Fraga, por tudo!

À Daniela Lopes, ao Micael Nascimento e à Ana Cláudia Pedrosa pela amizade e companheirismo demonstrados nesta fase, pelos bons momentos passados à volta de comida e pelos vossos sorrisos.

À minha amiga Ana Filipa Carvalho, pela ajuda, disponibilidade e paciência!

Palavras- chave

Biomassa, combustão residencial, qualidade do ar, PM10, modelação CFD, escoamento atmosférico, dispersão turbulenta

Resumo

A biomassa florestal é atualmente apontada como um recurso alternativo para a obtenção de energia sendo largamente utilizada no setor doméstico, nomeadamente como fonte de energia para aquecimento.

A combustão de biomassa poderá exercer um impacto significativo na qualidade do ar devido à emissão de poluentes atmosféricos, incluindo material particulado, que assume um papel importante devido às consequências que acarreta para o ambiente e saúde humana. Em Portugal, sabe-se que a combustão residencial contribui cerca de 18% para as emissões totais de PM10.

O presente trabalho pretende avaliar o impacto da combustão residencial na qualidade do ar urbano, nomeadamente no que diz respeito às PM10. Para isso, numa primeira fase, foi realizado um inquérito numa área de estudo, no centro da cidade de Aveiro englobando a Avenida 25 de Abril e zona envolvente. Este inquérito permitiu a caracterização do uso de equipamentos de combustão de biomassa pela população. A segunda fase do trabalho consistiu na simulação da dispersão de PM10 utilizando o modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) - VADIS. Com recurso a uma análise microclimática foram identificados dois cenários meteorológicos e, para cada um, foram simulados o cenário de referência de emissão (obtido através do inquérito) e dois cenários de emissão, passíveis de acontecerem no futuro - o primeiro cenário pressupõe uma maior utilização de lareiras na área de estudo; o segundo cenário admite a utilização de fogões a pellets por uma parte da população inquirida.

Os resultados inerentes ao cenário de referência de emissão de PM10, evidenciaram que a queima residencial de biomassa, tem grande impacto na qualidade do ar local, uma vez que se verificou a formação de *hot-spots* com concentrações horárias $\approx 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4 vezes superiores à média diária definida na legislação ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para as mesmas condições meteorológicas considerando um maior uso de lareiras, os resultados evidenciaram que o impacto na qualidade do ar associado é ainda maior, atingindo concentrações nos *hot-spots* de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Relativamente ao cenário de utilização de fogões a pellets como equipamentos de combustão de biomassa, conclui-se ter uma influência muito reduzida nas concentrações de PM10 registadas no local de estudo, tendo, por isso, um impacto mínimo na qualidade do ar local.

Perante os resultados obtidos foi possível concluir que é necessária a implementação de medidas legislativas de carácter preventivo ao impacto demonstrado, nomeadamente no que diz respeito à certificação de equipamentos de combustão residencial de biomassa e incentivo para a utilização de equipamentos de combustão de biomassa mais eficientes.

Keywords

Biomass, residential combustion, air quality, PM10, CFD modeling, atmospheric flow, turbulent dispersion

Abstract

Forest biomass is currently seen as an alternative resource for obtaining energy and it is widely used in the domestic sector, particularly as an energy source for heating.

The biomass combustion can make a significant impact on air quality due to emissions of air pollutants, including particulate matter, which plays an important role due to the consequences that entails for the environment and human health. In Portugal, it is known that residential combustion contributes about 18% to the total emissions of PM10.

This work intends to evaluate the impact of residential combustion in urban air quality, particularly with respect to PM10. For this, initially, a survey was conducted in the study area, in the city of Aveiro, encompassing the Avenue 25 April and the surrounding area. This survey allowed the characterization the use of biomass combustion equipment of the population. The second phase of the study consisted in simulating the dispersion of PM10 using the CFD model (Computational Fluid Dynamics) - VADIS. Using a microclimate analysis two meteorological scenarios were identified and, for each, the baseline emission (obtained through the survey) and two emission scenarios, liable to happen in the future were simulated - 1st emission scenario assumes greater use of fireplaces in the study area; 2nd emission scenario allows the use of pellet stoves for part of the survey population.

The results inherent to PM10 emission baseline, showed residential combustion of biomass, has a significant impact on the local air quality, as has been found the formation of hot spots with concentrations $\approx 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 5 times the yearly average defined in legislation ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). For the same weather conditions considering greater use of fireplaces, the results showed that the impact on the quality of the associated air is even higher, reaching concentrations in hot spots of $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. For the scenario of using Pellet stoves as biomass combustion equipment, it is concluded to have a very small influence on the PM10 recorded at the study site, and therefore a minimal impact on local air quality.

Given the results we conclude that the implementation of legislative measures of a preventive nature to demonstrated the impact is necessary, particularly with regard to the certification of residential combustion equipment for biomass and encouragement for the use of more efficient biomass combustion equipment is required.

Índice

1- INTRODUÇÃO.....	9
1.1- Motivação.....	9
1.2- Objetivos e Metodologia.....	10
1.3- Estrutura da dissertação.....	11
2- COMBUSTÃO DE BIOMASSA.....	13
2.1- Combustão de biomassa residencial.....	15
2.2- Tipos de equipamentos.....	18
2.3- Poluentes atmosféricos emitidos durante a combustão residencial.....	21
2.4- Fatores de emissão.....	24
3- QUALIDADE DO AR	28
3.1- Gestão da qualidade do ar.....	29
3.2- Enquadramento legislativo para Portugal.....	30
3.3- Modelação da qualidade do ar urbano.....	32
3.3.1- Modelação CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	34
3.3.2- Modelação CFD – VADIS.....	35
4- CASO DE ESTUDO: CENTRO URBANO DE AVEIRO.....	38
4.1- Caracterização do local de estudo.....	38
4.2- Cartografia do local (configuração tridimensional de edifícios, árvores e vias).....	39
4.3- Qualidade do ar local (análise dos dados de monitorização).....	41
4.4- Meteorologia.....	43
4.5- Cenários meteorológicos para a simulação numérica.....	46
4.5.1- Análise do episódio de altas concentrações de PM10 nos dias 6 e 7 de Janeiro de 2012.....	47
4.5.2- Análise do episódio de altas concentrações de PM10 nos dias 24 e 25 de Fevereiro de 2012.....	49
4.5.3- Análise do episódio de altas concentrações de PM10 nos dias 14 e 15 de Novembro de 2012.....	51
4.5.4- Análise do episódio de altas concentrações de PM10 nos dias 10 e 11 de Dezembro de 2012.....	53

4.6- Inquérito sobre a tipologia de instalações de aquecimento residencial.....	55
4.7- Cálculo das emissões de partículas.....	59
4.8- Cenários de emissão para a simulação numérica.....	61
5- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
5.1- Resultados das simulações numéricas referentes ao 1º cenário meteorológico.....	65
5.1.1- Com cenário de referência de emissão de partículas.....	65
5.1.2- Com 1º cenário de emissão de partículas.....	71
5.1.3- Com 2º cenário de emissão de partículas.....	73
5.2- Resultados das simulações numéricas referentes ao 2º cenário meteorológico com cenário de referência de emissão de partículas.....	74
6- CONCLUSÃO	78
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
8- ANEXOS.....	85

Índice de Figuras

Figura 1 – Desvantagens e implicações do uso da biomassa para produção de energia.....	14
Figura 2 – Vantagens do uso da biomassa como combustível.....	14
Figura 3 – Repartição do consumo de energia por setores.....	15
Figura 4 – Evolução do consumo de energia no setor doméstico por tipo de fontes, 1989-2009.....	15
Figura 5 – Combustíveis utilizados em Portugal, no setor doméstico.....	16
Figura 6 – Distribuição do consumo de madeira por tipo de utilização.....	16
Figura 7 – Contribuição dos diferentes setores nas emissões de PM10 e contribuição da madeira no total de emissões de PM10, em Portugal, respetivamente.....	23
Figura 8 – Fatores de emissão de PM2,5 (g/kg) com arranque da combustão a frio por espécie e por equipamento.....	25
Figura 9 – Fatores de emissão de PM2,5 (g/kg) com arranque da combustão a quente por espécie e por equipamento.....	25
Figura 10 – Estrutura de funcionamento do modelo VADIS.....	36
Figura 11 – Malha cartográfica e de campo de ventos.....	37
Figura 12 – Domínio de estudo (linhas amarelas), com a indicação da Escola Secundária José Estevão (círculo azul) e a Estação de Monitorização de Qualidade do Ar (círculo vermelho).....	38
Figura 13 – Representação tridimensional dos edifícios (cinzento), das árvores (verde) e das vias (castanho) no local de estudo.....	40
Figura 14 – Estação de monitorização da qualidade do ar do local de estudo.....	41
Figura 15 – Variação das concentrações médias diárias de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ao longo do ano 2012.....	42
Figura 16 – Variação das concentrações horárias de NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ao longo do ano 2012.....	42
Figura 17 – Rosas de ventos relativa aos anos: A-2006, B-2007, C-2008, D-2009, E-2010 e F-2011.....	44
Figura 18 – Rosas de ventos relativas aos anos G- 2012 e H- 2013.....	45

Figura 19 – Rosa de ventos octo-anual (2006-2013)	45
Figura 20 – Variação das concentrações médias horárias de PM10 e NO _x nos dias 6 e 7 de janeiro de 2012.....	47
Figura 21 – Rosa de ventos relativa ao período das 20h do dia 6 até às 10h dia 7 de janeiro de 2012.....	47
Figura 22 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 6 e 7 de janeiro de 2012	48
Figura 23 – Variação das concentrações médias horárias de PM10 e NO _x nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2012.....	49
Figura 24 – Rosa de ventos relativa ao período 0h até às 6h do dia 24 de fevereiro de 2012 (A) e relativa ao período 20h do dia 24 até às 6h do dia 25 de fevereiro de 2012 (B).....	49
Figura 25 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2012	50
Figura 26 – Variação das concentrações médias horárias de PM10 e NO _x nos dias 14 e 15 de novembro de 2012.....	51
Figura 27 – Rosa de ventos relativa ao período das 20h do dia 14 até 8h do dia 15 de novembro de 2012	51
Figura 28 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 14 e 15 de novembro de 2012.....	52
Figura 29 – Variação das concentrações médias horárias de PM10 e NO _x nos dias 10 e 11 de dezembro de 2012.....	53
Figura 30 – Rosa de ventos relativa ao período das 16h do dia 10 até às 8h do dia 11 de dezembro de 2012	53
Figura 31 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 11 e 12 de dezembro de 2012	54
Figura 32 – Taxa de utilização dos vários tipos de equipamentos	56
Figura 33 – Quantidades de madeira consumida pelos utilizadores de lareira aberta	57
Figura 34 – Tipologia de madeira utilizada pelos utilizadores de lareira aberta.....	57
Figura 35 – Mapeamento das fontes de emissão de combustão doméstica identificadas no inquérito	58

Figura 36 - Estimativa da procura de biomassa como fonte energia nos países da UE27, com base em projeções nacionais de energias renováveis e relatórios sobre eficiência de conversão.....	62
Figura 37 - Variação dos preços da eletricidade para utilizadores domésticos em Portuga	62
Figura 38 - Representação do campo de ventos no programa Surfer, para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s	65
Figura 39 - Representação do escoamento atmosférico na área na Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho) para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s.....	65
Figura 40 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com cenário de referência de emissões de partículas.....	65
Figura 41 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, junto à Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho) para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com cenário de referência de emissão de partículas	65
Figura 42- Variação da direção do vento durante a hora de simulação referente ao 1º cenário meteorológico	65
Figura 43 - Variação da direção do vento durante a hora de simulação referente ao 2º c cenário meteorológico	65
Figura 44 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com o 1º cenário de emissões de partículas.....	65
Figura 45 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com o 2º cenário de emissões de partículas.....	65
Figura 46- Representação do campo de ventos no programa Surfer, para a simulação com ventos de 350° e 2,5 m/s e com cenário de referência de emissões de partículas.....	65
Figura 47 - Representação do escoamento atmosférico na área na Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho), para a simulação com ventos de 350° e 2,5 m/s	65
Figura 48 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 350° e 2,5 m/s e com cenário de referência de emissão de partículas.....	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Sistemas de Combustão Residencial	19
Tabela 2 – Equipamentos para aquecimento do ar ambiente em Portugal	20
Tabela 3 – Descrição dos principais poluentes emitidos durante a combustão doméstica	22
Tabela 4 – Detalhes operacionais do processo de combustão, relativo ao estudo que permitiu o cálculo dos fatores de emissão de PM _{2,5}	25
Tabela 5 – Detalhes operacionais do processo de combustão, relativo ao estudo que permitiu o cálculo dos fatores de emissão para PM ₁₀	26
Tabela 6 – Síntese dos fatores de emissão médios globais para PM ₁₀ (g/kg) e respetivo desvio padrão por espécie e tipo de equipamento	26
Tabela 7 - Valores Limite, Valores Alvo e Limiares de Alerta legislados para os principais poluentes atmosféricos	31
Tabela 8 – Resumo da análise para definição dos cenários meteorológicos a utilizar na simulação numérica.....	55
Tabela 9 – Taxa de utilização semanal e diária da lareira aberta	58
Tabela 10 – Quantidades de madeira consumidas por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do cenário de referência.....	60
Tabela 11 – Fatores de emissão assumidos para o cálculo das emissões de partículas.....	60
Tabela 12 – Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o cenário de referência	60
Tabela 13 - Quantidades de madeira consumidas por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do 1º cenário de emissão	63
Tabela 14- Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o 1º cenário de emissão	63
Tabela 15 - Quantidades de pellets consumidos por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do 2º cenário de emissão	64
Tabela 16 - Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o 2º cenário de emissão	64

Símbolos Químicos

As	Arsénio
C	Carbono
Cd	Cádmio
Cl	Cloro
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Crómio
HCB	Hexacloretobenzeno
Hg	Mercúrio
NH ₃	Amoníaco
Ni	Níquel
NO ₂	Dióxido de azoto
NO _x	Óxidos de azoto
O ₂	Oxigénio
O ₃	Ozono
Pb	Chumbo
POP's	Poluentes Orgânicos Persistentes
Se	Selénio
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO _x	Óxidos de enxofre
Zn	Zinco

Lista de Abreviaturas

COV	Compostos Orgânicos Voláteis
EC	Carbono Elementar
GEE	Gases com Efeitos de Estufa
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos
OC	Carbono Orgânico
PAH	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
PCB	Bifenilos policlorados

PM	Matéria particulada
PM2,5	Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5µm
PM10	Partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm

Siglas utilizadas

AIRUSE	<i>Testing and Development of air quality mitigation measures in Southern Europe</i>
CAFE	<i>Clean Air For Europe</i>
CCDRC	Comissão de Coordenação de Desenvolvimento Regional do Centro
CE	Comissão Europeia
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CEPMEIP	<i>Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance</i>
CLRTAP	Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça de Longo Alcance
EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i>
EPA	<i>Environment Protection Agency of United States</i>
EQA	Estação de monitorização da Qualidade do Ar
EUBIA	<i>European Biomass Industry Association</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
LIA	Limite Inferior de Avaliação
LSA	Limite Superior de Avaliação
RCM	Resolução de Conselho de Ministros
UE	União Europeia
UGR	Unidade de Gestão Regional



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Motivação

O aumento da população mundial tem como consequência uma maior procura de energia, a fim de fazer face às necessidades crescentes da sociedade. Isto leva a um consequente aumento da procura e do consumo de combustíveis fósseis, o que provoca um aumento de emissão dos Gases com Efeito de Estufa (GEE). Com o propósito de combater estes efeitos, surgem formas de energias alternativas renováveis e economicamente viáveis. É neste contexto que a biomassa florestal é apontada como um recurso para a obtenção de energia e, quando utilizada de forma sustentável, pode até prevenir os incêndios florestais. No Programa de Atuação para reduzir a dependência de Portugal face ao petróleo, aprovado pela RCM (Resolução de Conselho de Ministros) nº 171/2004, de 29 de Novembro, foi identificado um conjunto de medidas que visaram reduzir em 20% a intensidade energética e a dependência do petróleo até 2010. Uma das medidas relevantes deste programa foi a criação de incentivos à existência de circuitos fiáveis de recolha e transporte de biomassa, aumentando a fiabilidade, reduzindo o custo da biomassa e promovendo a prevenção de fogos florestais.

A combustão de biomassa é largamente utilizada no setor doméstico, nomeadamente como fonte de energia para aquecimento. Contudo, tem um grande impacto na qualidade do ar interior e exterior devido à emissão de poluentes atmosféricos, incluindo material particulado (PM) cujas dimensões das partículas podem ser inferiores a 10 µm. Estas partículas assumem uma importância fundamental para a poluição atmosférica, no ambiente e na saúde humana (dado que podem penetrar até aos alvéolos pulmonares e causar graves problemas respiratórios) (Alves, *et al*, 2011). Em Portugal, sabe-se que a combustão residencial contribui cerca de 18% para o total emissões de PM10 (Borrego, *et al*, 2010).

A modelação numérica é uma ferramenta fundamental para a gestão da qualidade do ar que permite uma estimativa ou prognóstico dos níveis de poluentes na atmosfera, para além da avaliação de cenários de emissão. Esta



estimativa para ser o mais precisa possível, exige uma descrição detalhada dos processos físico-químicos de transporte, dispersão e formação dos poluentes atmosféricos, para além da distribuição e intensidade de todas as fontes poluentes. Neste contexto surgem os modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*), especificamente vocacionados para a aplicação ao escoamento e à dispersão. Neste tipo de modelos a representação numérica do escoamento recorre a equações gerais da dinâmica dos fluidos, que traduzem o movimento da partícula de ar na atmosfera através das equações de conservação de massa, ou da continuidade, da quantidade de movimento ou equações de Navier-Stokes e da energia (Amorim, *et al*, 2004).

Tendo em consideração os factos supracitados, torna-se de particular interesse a realização de um estudo que avalie o impacte da combustão residencial de biomassa na qualidade do ar de uma determinada área urbana, nomeadamente no que diz respeito a material particulado, utilizando para isso a modelação numérica da dispersão deste poluente.

1.2 – Objetivos e Metodologia

Os objetivos do presente trabalho são a elaboração de um estudo detalhado do impacte que a utilização, na queima residencial, de diversos equipamentos e tipos de biomassa tem na qualidade do ar, recorrendo à modelação CFD para simular a dispersão de PM10 num determinado local, sendo para isso necessária a caracterização dos hábitos de uma população, em termos de aquecimento residencial, nomeadamente no que concerne ao uso de equipamentos para combustão de biomassa e identificação dos mesmos, e em relação à tipologia e quantidade de biomassa consumida.

Procedeu-se à definição de um caso de estudo real, na cidade de Aveiro que inclui a Avenida 25 de Abril. A existência de uma escola no local de estudo, torna-o de particular interesse sob o ponto de vista da exposição humana a poluentes atmosféricos; também a existência de uma Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (EQA) assume uma importância fundamental, pois é uma fonte importante de dados sobre a qualidade do ar local.



Todos os parâmetros de entrada necessários para simulação numérica da dispersão atmosférica à escala local são relativos às PM₁₀, sendo o modelo CFD utilizado designado de VADIS. Após a definição e caracterização do local de estudo foram, então, realizadas as seguintes etapas:

- Configuração tridimensional de edifícios, árvores e vias com base em imagens de satélite e ficheiros SIG;
- Uma análise das concentrações de PM₁₀ e NO_x registadas na EQA existente no local de estudo, durante os meses de inverno do ano de 2012;
- Uma análise microclimática para os episódios associados a altas concentrações de PM₁₀, para com isto, obter os cenários meteorológicos, associados a este tipo de ocorrências;
- Realização e análise de um inquérito à população residente na área de estudo para quantificar biomassa, identificar o tipo de biomassa consumida e tipos de equipamentos utilizados na mesma;
- Cálculo das emissões de PM₁₀ através dos dados resultantes da análise do inquérito, sendo que também foram calculadas emissões referentes cenários de emissão, passíveis de se concretizarem no futuro;
- Simulação numérica da dispersão de PM₁₀ no local de estudo, para as diferentes situações meteorológicas e para os cenários de emissão considerados.

1.3- Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos. No presente Capítulo é apresentada a motivação do trabalho, quais os objetivos e metodologia da dissertação.

No Capítulo 2 é abordado o estado da arte ao nível da combustão de biomassa residencial, nomeadamente tipos de equipamentos existentes, poluentes atmosféricos emitidos durante a combustão residencial e fatores de emissão.

No Capítulo 3 é abordado o estado da arte ao nível da qualidade do ar, havendo referência à gestão da qualidade do ar e ao enquadramento legislativo para Portugal e, ainda, o recurso à modelação da qualidade do ar urbano, como instrumento de apoio à gestão da qualidade do ar. Assim, aborda-se o uso de modelos CFD e, em particular, o modelo VADIS, utilizado no estudo.



No Capítulo 4 são descritos o caso de estudo e as etapas que envolvem a simulação numérica da dispersão de PM10: i) configuração tridimensional de edifícios, árvores e vias; ii) análise dos dados da Estação de Monitorização da Qualidade do ar existente na área de estudo; iii) análise dos dados meteorológicos e construção de cenários meteorológicos para a simulação numérica; iv) análise do inquérito realizado à população residente na área de estudo sobre os hábitos relativos ao aquecimento residencial e uso de biomassa; v) estimativa das emissões de partículas, tanto para o cenário de referência como para os cenários de emissão.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados das simulações numéricas da dispersão das PM10, para os diferentes cenários meteorológicos e de emissão considerados.

Por último, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões da dissertação.



CAPÍTULO II

COMBUSTÃO DE BIOMASSA

O Decreto-Lei 127/2013 relativo à estratégia temática sobre a poluição atmosférica, a proteção do solo e a prevenção e reciclagem de resíduos, define biomassa como sendo “produtos que consistem, na totalidade ou em parte, numa matéria vegetal proveniente da agricultura ou da silvicultura que pode ser utilizada como combustível para efeitos de recuperação do seu teor energético”.

A combustão de biomassa tem um grande impacto na qualidade do ar em áreas residenciais devido à emissão de poluentes atmosféricos que degradam a qualidade do ar ambiente e do ar interior e, conseqüentemente, tem impactos negativos na saúde humana. No decorrer da queima, são emitidas quantidades substanciais de gases e partículas poluentes, como o monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), matéria particulada (PM) e gases ácidos (NO_x, SO_x) (Williams, *et al.*, 2012).

Nos países em vias de desenvolvimento cerca de 75-80% da população baseia-se nos resíduos de biomassa como combustível para cozinhar e para aquecimento. Na maioria dos casos, a biomassa de resíduos agrícolas e florestais é usada como combustível, mas em certas regiões do mundo, as exigências do setor da energia doméstica colocaram uma forte pressão sobre os recursos florestais por serem considerados preciosos. Isto, por si só, é um motivo de preocupação ambiental. No entanto, ainda há uma questão a acrescentar que é a da poluição do ar interior, devido ao fumo produzido pela combustão ineficiente de biomassa no interior das habitações (Karve, 2000). A queima residencial de biomassa para aquecimento é recomendada, pois é uma fonte renovável, contudo estudos recentes afirmam que a combustão de madeira pode ser uma importante fonte de poluentes do ar, sendo que o seu efeito pode ser significativo nas áreas urbanas (Borrego, *et al.*, 2010).

Uma vez que a utilização da biomassa atravessa vários setores socioeconómicos, nas Figuras 1 e 2 evidenciam-se as desvantagens e vantagens do uso direto da biomassa como combustível, respetivamente, sendo que as vantagens estão agrupadas segundo três escalas geográficas, local/regional, nacional e internacional.

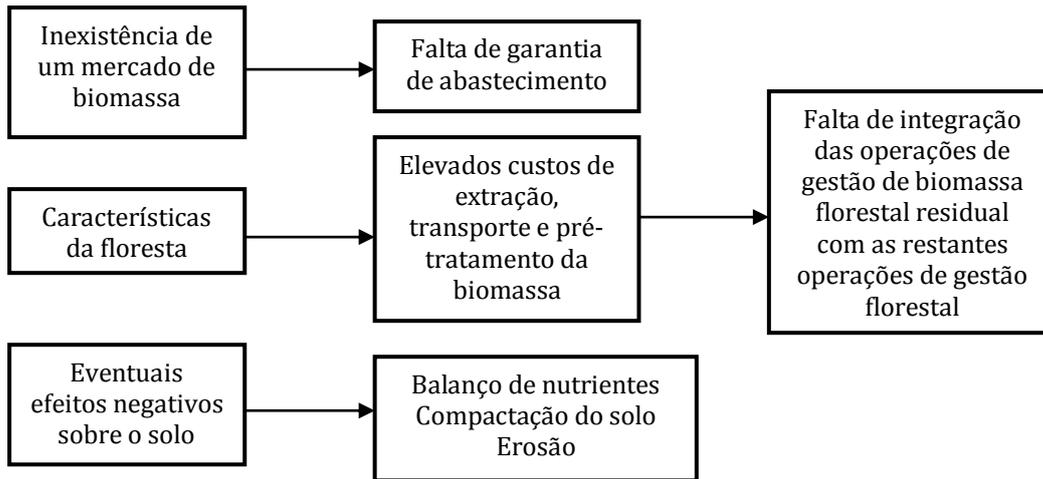


Figura 1 – Desvantagens e implicações do uso da biomassa para produção de energia (Fonte: Atlas da Biomassa Florestal Residual produzida em Portugal Continental, CBE, 2007)

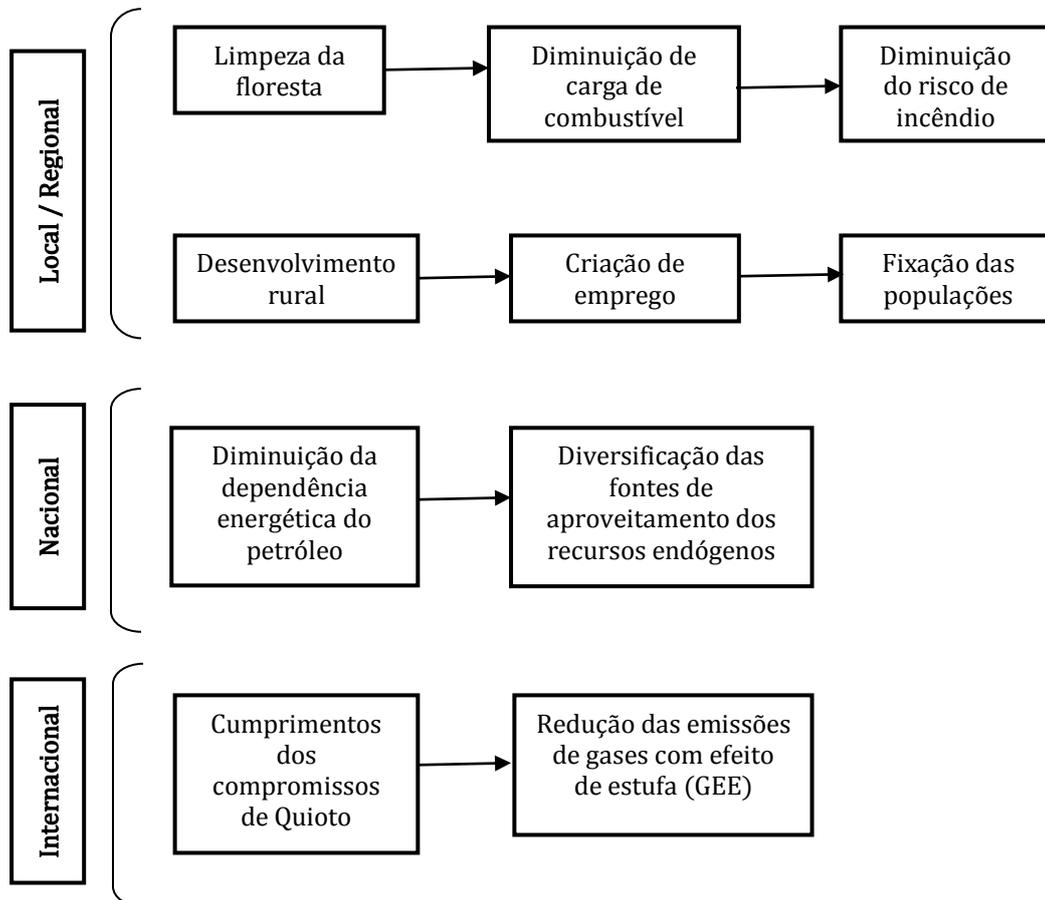


Figura 2 – Vantagens do uso da biomassa como combustível (Fonte: Atlas da Biomassa Florestal Residual produzida em Portugal Continental, CBE, 2007)



2.1 - Combustão Residencial de Biomassa

Em Portugal, tendo por base o Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico de 2010, o setor doméstico é o terceiro maior consumidor de energia depois dos setores dos transportes (37,5%) e da indústria (30,5%), tal como se evidencia na Fig.3.

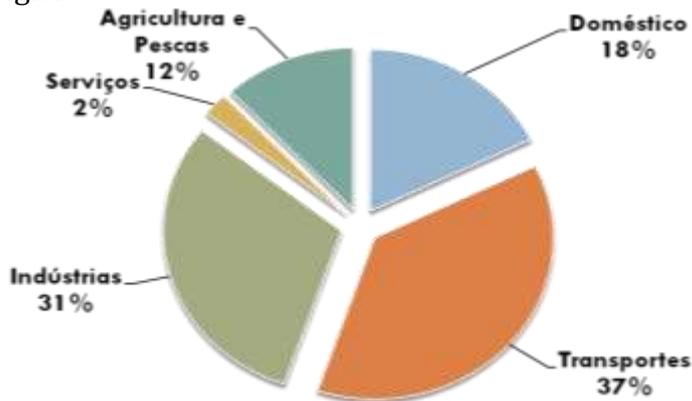


Figura 3 – Repartição do consumo de energia por setores (Fonte: Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico, DGEG, 2011)

Em relação ao tipo de fontes de energia, o setor doméstico tem sofrido alterações significativas, tal como se demonstra na Fig.4. Se até 2002 a lenha representava a fonte de energia mais consumida neste setor, a partir de 2003 a eletricidade passou a dominar, relegando a lenha para segunda fonte mais importante.

Em Portugal, no setor doméstico, a madeira é o combustível mais utilizado. (Borrego, *et al.*, 2010), tal como se apresenta na Fig.5.

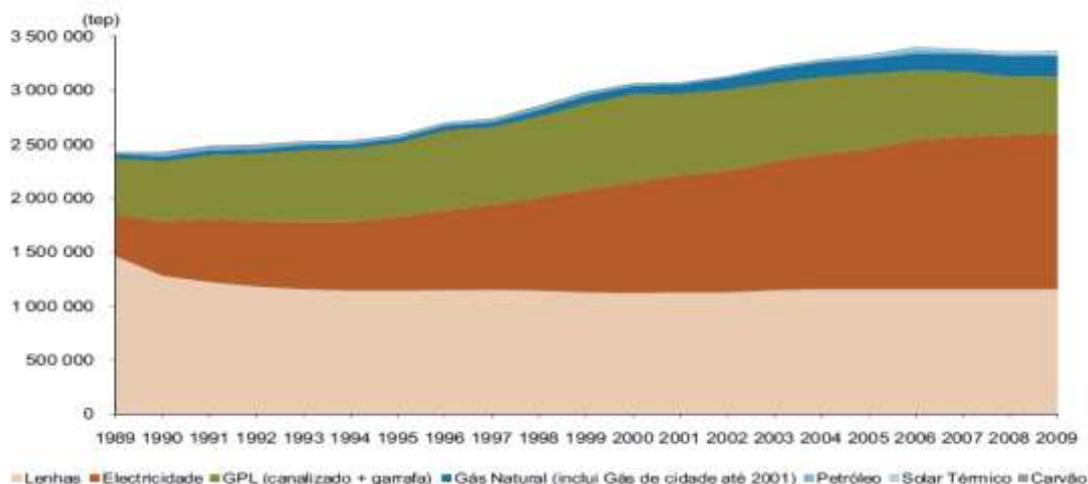


Figura 4 – Evolução do consumo de energia no setor doméstico por tipo de fontes, 1989-2009 (Fonte: Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico, DGEG, 2011)

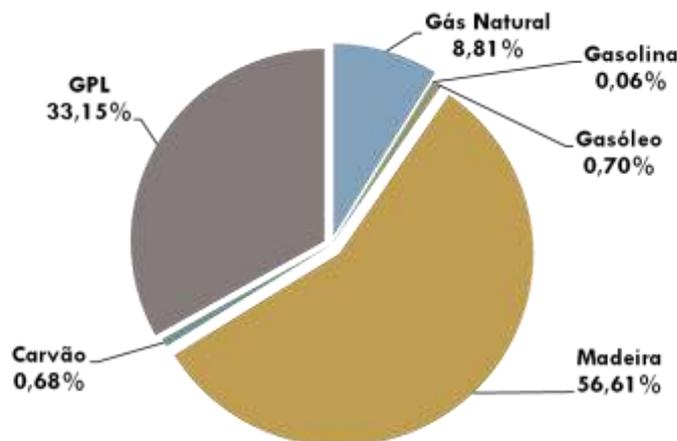


Figura 5 – Combustíveis utilizados em Portugal, no setor doméstico (Fonte: Borrego, *et al.*, 2010)

A Fig.6 evidencia que a madeira é maioritariamente utilizada para aquecimento do ambiente (52%), sendo que a cozinha também tem um peso importante no consumo deste tipo de biomassa (42,1%).

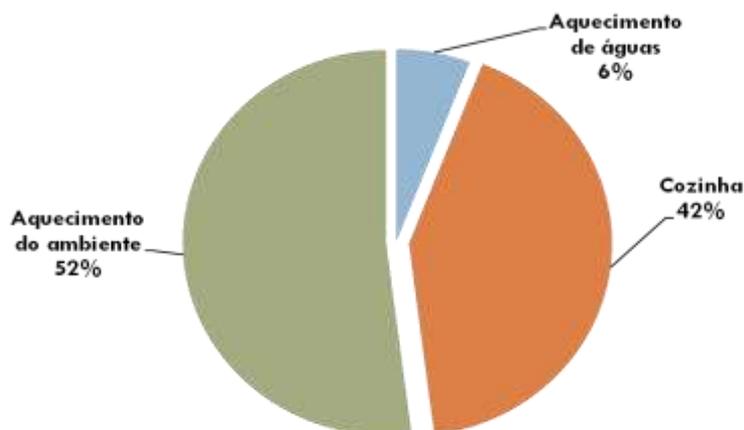


Figura 6 – Distribuição do consumo de madeira por tipo de utilização (Fonte: Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico, DGEG 2011)

De acordo com o Inventário Florestal Português realizado em 2005 as espécies de árvores predominantes no território nacional são o *P. pinaster* (Pinheiro), *E. globulus* (Eucalipto), *Q. suber* (Sobreiro), *A. longifolia* (Acácias), *Q. faginea* (Carvalho Português), *O. Europea* (Oliveira) e *Q. ilex rotundifolia* (Azinheira) (Gonçalves, *et al.*, 2011), o que significa que algumas destas espécies podem vir a ser utilizadas na combustão residencial.



O consumo de pellets no setor doméstico, em Portugal, é extremamente reduzido comparativamente a outros países onde existe um mercado mais desenvolvido deste tipo combustível, como é o caso da Alemanha, Áustria e países Escandinavos (Rabaçal, 2010).

A utilização de madeira prensada em forma de pellets como combustível de aquecimento tem sido alheia à população portuguesa, que está pouco familiarizada com as vantagens de utilização deste combustível recorrendo às tecnologias convencionais: como combustível sólido mais "limpo", possibilita, em caldeiras mais eficientes, emissões reduzidas de dióxido de carbono; tem um preço mais atrativo que outros combustíveis, uma vez que a sua matéria-prima essencial consiste, maioritariamente, de subprodutos (da indústria da madeira e do mobiliário) e desperdícios gerados na exploração florestal. De referir igualmente que, o preço dos pellets para aquecimento não é tão volátil como o preço dos combustíveis fósseis tradicionais sendo que possuem elevado poder calorífico, em comparação com o da madeira em bruto. Contudo, as vendas de equipamentos domésticos para aquecimento que utilizam pellets estão a crescer (Rabaçal, 2010 e Carvalho, 2011).

O mercado de pellets começou a desenvolver-se em 2005, e desde esse ano que empreendedores e investigadores se envolveram ativamente no desenvolvimento deste. Cerca de 90% da produção nacional, ou 90 000 toneladas no ano de 2008, foram exportadas principalmente para países do norte da Europa. Note-se que a distribuição das unidades de produção de pellets concentra-se no litoral do país, em redor dos principais portos (Aveiro, Figueira da Foz, Sines) evidenciando a posição estratégica com vista à exportação (Rabaçal, 2010 e Carvalho, 2011).

No Alentejo, foram desenvolvidos grandes esforços para a implementação de uma unidade de produção de briquetes/pellets a partir do bagaço de azeitona, podas de oliveira e sarmentos de vinha, com uma capacidade inicial de 9000 toneladas/ano de briquetes/pellets (Sobral, 2000).



2.2 - Tipos de Equipamentos

A obtenção de energia a partir da biomassa no setor residencial é conseguida através da utilização de sistemas de combustão distintos na forma, no processo de queima, na eficiência de combustão, na quantidade e qualidade das emissões atmosféricas, entre outros fatores. Apesar dos progressos a que temos assistido a nível do desenvolvimento de sistemas de queima mais limpa, verifica-se ainda uma grande predominância na utilização de lareiras e fogões antigos com reduzida eficiência e com elevadas emissões de poluentes nocivos para a qualidade do ar interior e exterior. Os equipamentos utilizados para combustão são normalmente Lareiras, Estufas/Salamandras, Caldeiras e Fogões (EPA, 2001). Na Tabela 1 evidenciam-se alguns equipamentos de combustão residencial e as suas principais características.

O Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico de 2011 apresentado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2011) identifica 24% dos alojamentos em Portugal Continental com utilização de lareira aberta para aquecimento do ar, 11% lareira fechada e 27,4% com equipamentos a biomassa para cozinhar.

A tabela 2 é referente à distribuição do tipo de equipamentos para aquecimento do ar ambiente utilizados por alojamento, verificando-se que o aquecedor elétrico independente é o mais utilizado. É importante referir que o número de equipamentos se refere apenas aos que foram efetivamente utilizados, e não à totalidade dos equipamentos existentes, mesmo que não tenham sido utilizados no período de referência (Outubro de 2009 a Março de 2010).



Tabela 1 – Sistemas de Combustão Residencial (Fonte: EPA, 2001 e Trozzi, 2009)

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>
Lareira Aberta	Constituída pela câmara de combustão ligada à chaminé, tendo um <i>design</i> muito simples. Possui uma eficiência de 10%. O calor resultante é o irradiado, o restante é perdido pela chaminé. Consome o ar existente e liberta poluentes atmosféricos para o ar interior e exterior (PM, CO, COV's e PAH).
Lareira Parcialmente Fechada	Equipada com uma porta de vidro que reduz a ingestão de ar, apresentando uma ligeira melhoria na eficiência global.
Lareira Fechada	Equipada com uma porta frontal, inclui um sistema de recuperação de calor que permite a transição do calor por convecção natural. Eficiência superior a 50%.
Fogão de Pellets	Exclusivamente sustentado por pellets. É constituída por um sistema eletrónico e um ventilador que fornece ar ao processo de combustão. Apresenta elevada eficiência e reduzidas emissões de PM, CO, COV's e PAH.
Caldeira Doméstica	Sustentada por lenha, pellets ou briquetes. Produz calor para aquecimento do ar ambiente e/ou águas sanitárias através do sistema de aquecimento central.
Fogão Catalítico	Equipado com catalisador introduzido dentro da chaminé depois da câmara de combustão principal. Diminui a temperatura da chama e a oxidação de poluentes como CO e COV's. A eficiência catalítica de redução depende do material, da sua construção, da superfície ativa, das condições de fluxo de gases dentro do conversor.
Fogão Não Catalítico	Não tem catalisador mas apresenta uma câmara de combustão secundária com existência de um sistema de pré-aquecimento de ar que permite uma combustão mais completa dos gases e partículas emitidos.
Fogão Convencional	Equipamento sem combustor catalítico e sem tecnologia de redução de emissões de poluentes atmosféricos. Alguns destes fogões são utilizados para cozinhar, podendo estar equipados com um depósito de água.
Fogão Clássico de Eficiência Energética	Equipado por uma câmara de combustão secundária que permite eficiência entre os 55% até 70%. Reduz as emissões de poluentes atmosféricos.
Fogão de Combustão Avançada	Apresenta várias entradas de ar e ainda um pré-aquecimento do ar combustão através das trocas de calor com os gases da combustão. Permite eficiência até 70% e redução das emissões atmosféricas.
Fogão a Lenha	Constituído por ferro ou aço. Utilizado na preparação de alimentos, aquecimento do ar ambiente e de água (inclui depósito). Apresenta eficiência entre 50% a 70%. Em fogões recentes, o uso de ar secundário permite controlar a combustão.



Tabela 2 – Equipamentos para aquecimento do ar ambiente em Portugal (Fonte: Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico, DGEG, 2011)

TIPO DE EQUIPAMENTO	Nº de Alojamentos	Nº de Equipamentos	Nº de Equipamentos por Alojamento
Lareira Aberta	740264	766581	1
Lareira com recuperador de calor	340498	346204	1
Salamandra	222856	226138	1
Caldeira Aquecimento Central (Circulação Água)	323520	340904	1
Aquecedor Elétrico independente	1884850	2794054	1,5
Aquecedor a GPL independente	218293	237589	0,1
Total	3730281	4711470	-



2.3 - Poluentes Atmosféricos emitidos durante a Combustão Residencial

Durante o processo de combustão residencial são emitidos vários poluentes atmosféricos, conhecidos como uma relevante fonte de poluição, principalmente em zonas residenciais durante os meses de inverno. As emissões resultantes deste processo dependem da composição química do combustível e das condições de combustão, incluindo a disponibilidade de oxigénio, temperatura a que ocorre a combustão e o tempo de permanência dos produtos da combustão no local onde esta ocorre (McDonald, *et al.*, 2000).

As emissões de combustão de biomassa consistem numa ampla gama de compostos gasosos e de partículas. A queima de biomassa é conhecida por ser uma fonte de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), matéria particulada (PM) e óxido nitroso (N_2O). Além disso, é uma fonte considerável de gases quimicamente ativos, tais como o óxido nítrico (NO), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV's) e compostos cancerígenos incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), benzeno, dioxinas, furanos e metais pesados (As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se e Zn) (Gonçalves, 2011) – Tabela 3.

Segundo dados da Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2012), o setor doméstico é responsável pela emissão de CO, PM, PAH, Cádmio (Cd), Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos (NMCOV) e Dioxinas/Furanos. Neste setor, verificam-se também, embora com valores mais baixos, emissões de Óxido de Azoto (NO_x), Óxido de Enxofre (SO_x), Metais pesados como Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb), Hexaclorobenzeno (HCB) e Bifenilos Policlorados (PCB).

Todos os poluentes acima enunciados têm uma importância fundamental para o entendimento da contribuição da poluição atmosférica no ambiente e na saúde humana. No entanto, as partículas que possuem diâmetro médio menor do que $10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) são respiráveis e, ao alcançar os pulmões, causam graves danos à saúde por conter componentes tóxicos ou mutagénicos na sua composição (Borrego, *et al.*, 2010).



Tabela 3 – Descrição dos principais poluentes emitidos durante a combustão doméstica
 (Fonte: Ferreira, 2012)

<i>POLUENTES</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>
Monóxido de Carbono (CO)	Forma-se durante a combustão incompleta do carbono ou de compostos de carbono. É um gás incolor, sem cheiro, não é ácido e é levemente solúvel em água. O CO é fundamental para a formação de CO ₂ em condições de temperatura apropriadas e abundância de O ₂ .
Compostos Orgânicos Voláteis (COV's)	São hidrocarbonetos voláteis. As emissões resultam de baixas temperaturas e combustão com baixo teor de O ₂ . Estes poluentes são facilmente reduzidos através da instalação de equipamentos de queima mais modernos.
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAH)	Formam-se devido à combustão incompleta de biomassa lenhosa, em especial em condições dependentes da temperatura combustão (baixa) e O ₂ . A emissão de PAH na combustão doméstica é superior à associada à emissão de veículos automóveis.
Matéria Particulada (PM)	Constituídos por partículas sólidas ou líquidas, dispersas na atmosfera. O teor de cinzas da madeira e a quantidade de carbono do combustível que não é queimado determina a magnitude das emissões de material particulado, mas na sua origem também pode estar a emissão de gases como o SO ₂ , NO _x , NH ₃ e COV resultantes da combustão incompleta. A composição química ou tamanho das partículas varia com as condições de combustão dos diferentes combustíveis em diferentes equipamentos. Representadas de um modo simples em duas categorias PM ₁₀ (matéria particulada com diâmetro aerodinâmico inferior a 10µm) e PM _{2,5} (matéria particulada com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5µm). Facilmente definidas como as cinzas de carbono, o fumo ou a fuligem. Em áreas residenciais, onde a madeira é o combustível predominante as fontes domésticas são responsáveis por contribuir com cerca de 80% das concentrações de PM no inverno.
Dioxinas e Furanos	Formam-se durante a combustão através da presença de C, Cl, abundância de O ₂ e um catalisador. As emissões podem aumentar através da combustão de madeira tratada ou contaminada e ainda da queima de plásticos.
Óxidos de Azoto (NO_x)	Formam-se através da oxidação de compostos de azoto presentes no combustível e no comburente e de O ₂ presente no comburente, resultando na emissão em forma de NO e posteriormente NO ₂ . Na queima a altas temperaturas há maior formação de NO _x .
Dióxido de Enxofre (SO₂)	Resulta da combustão de compostos de enxofre presentes no combustível.
Metais Pesados	Emitidos no decorrer da queima devido à combustão incompleta, as emissões dependem das características do equipamento e do combustível.
Amónia (NH₃)	Emitida como resultado do processo de combustão incompleta dos combustíveis sólidos que contêm azoto. Ocorre nos casos em que as temperaturas de combustão são muito baixas.



Em Portugal, a combustão residencial contribui em 18% para o total de emissões de PM₁₀. Neste setor, a madeira é o combustível mais comum, contribuindo com 98% das emissões de PM₁₀ (Fig.7).

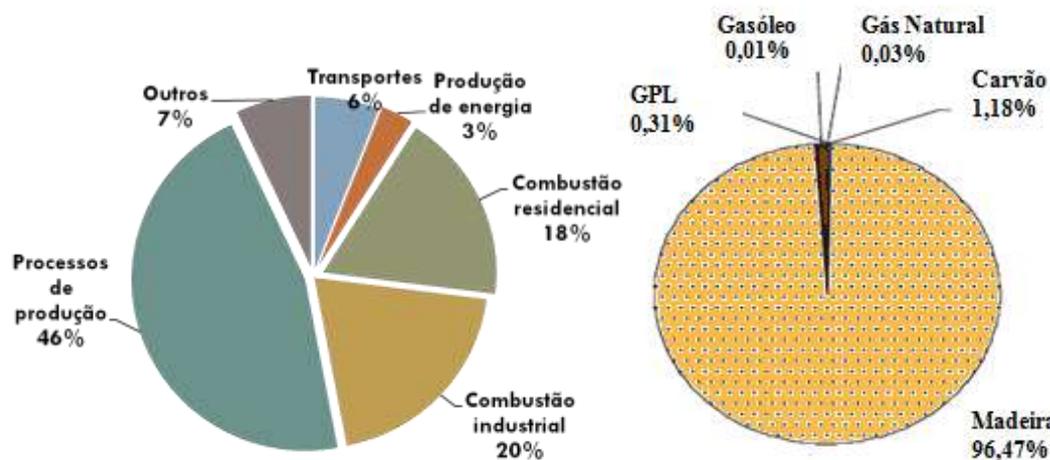


Figura 7 – Contribuição dos diferentes setores nas emissões de PM₁₀ e contribuição da madeira no total de emissões de PM₁₀, em Portugal, respetivamente (Fonte: Borrego, *et al.*, 2010)

Borrego *et al.*, (2010) conclui que altos níveis de PM₁₀ são atingidos em Portugal, particularmente sobre a costa oeste e que isto já levou à necessidade de conceber planos e programas para reduzir os níveis deste poluente no ar ambiente sobre as regiões de Lisboa e Porto. Refere ainda que, a combustão residencial tem um papel importante nas concentrações de PM₁₀, especialmente nos meses de inverno e durante a noite, sendo que estas concentrações diminuem quando se simula a conversão de equipamentos tradicionais para dispositivos certificados e mais eficientes. Portanto, o facto de se tratar de um setor não regulamentado, deve ser visto como uma oportunidade de intervir e regulamentar ou legislar. Sendo que esta opção não irá resolver todos os problemas relativos às concentrações de PM₁₀, mas pode fornecer uma contribuição importante para minimizar o problema, especialmente durante os meses de inverno.



2.4 – Fatores de Emissão

Os fatores de emissão são um instrumento fundamental para se obter uma estimativa das emissões de poluentes atmosféricos, para elaborar inventários nacionais ou regionais de emissões e, conseqüentemente, para a definição de estratégias e políticas de gestão da qualidade do ar. É um parâmetro que relaciona a emissão de uma determinada espécie com a quantidade de combustível queimado. Normalmente é definido como a quantidade de um composto libertado por quantidade de combustível consumido, expresso em unidades de g/kg. Quando se referem a processos de combustão estão geralmente disponíveis para as partículas e para as formas de carbono que podem ser facilmente quantificadas: quer em termos de EC (Carbono Elementar) como OC (Carbono Orgânico) (Gelencsér, 2004).

Existem variados estudos, em diversos países, que permitiram calcular os fatores de emissão para alguns dos poluentes emitidos durante a combustão doméstica, contudo a bibliografia sugere que há uma grande dependência entre as emissões de partículas e a origem da madeira. Por este motivo, a pesquisa bibliográfica para os fatores de emissão foi orientada para as espécies de madeira predominantes em Portugal.

Neste sentido, estudos recentes realizados no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro permitiram calcular fatores de emissão para PM_{2,5} e PM₁₀ (entre outros poluentes), para as espécies de madeira predominantes em Portugal.

O estudo realizado por Fernandes 2009, que permitiu o cálculo dos fatores de emissão para PM_{2,5}, utilizando dois tipos de equipamentos de combustão lareira aberta e lareira fechada (recuperador de calor). Com o intuito de avaliar a influência da temperatura e do processo de ignição do combustível nas características dos fumos de combustão, foram efetuados, para os dois equipamentos, arranques a frio e a quente. Alguns parâmetros operacionais deste estudo são apresentados na Tabela 4. Os resultados são apresentados nas Figuras 8 e 9.



Tabela 4 – Detalhes operacionais do processo de combustão, relativo ao estudo que permitiu o cálculo dos fatores de emissão de PM_{2,5} (Fonte: Adaptado de Fernandes, 2009)

	Início frio			Início quente		
	Temperatura	Duração da queima	Quantidade de madeira	Temperatura	Duração da queima	Quantidade de madeira
Lareira aberta	0°C	60-120 min	1,9 - 2,2 kg	50°C	45-90 min	1,9-2,2 kg
Lareira fechada	0°C			100°C		

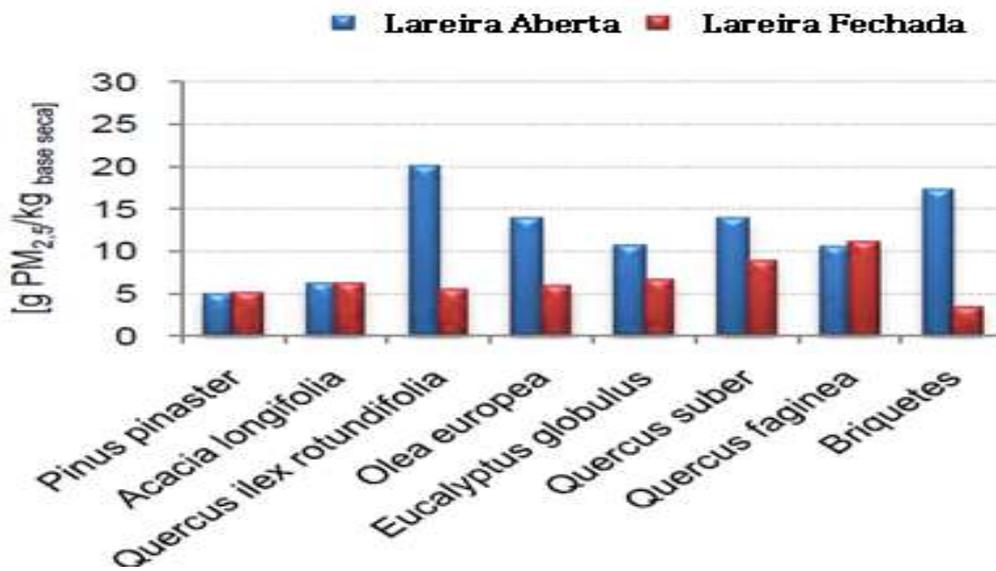


Figura 8 – Fatores de emissão de PM_{2,5} (g/kg) com arranque da combustão a frio por espécie e por equipamento (Fonte: Fernandes, 2009)

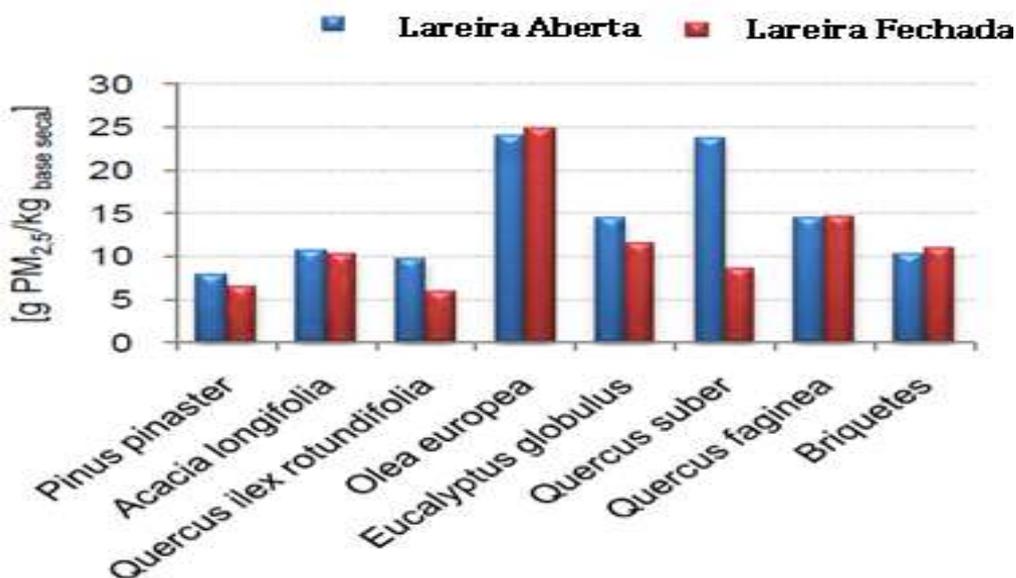


Figura 9 – Fatores de emissão de PM_{2,5} (g/kg) com arranque da combustão a quente por espécie e por equipamento (Fonte: Fernandes, 2009)



Relativamente às PM10, o estudo de Duarte (2011), que permitiu calcular fatores de emissão para este poluente, utilizando os mesmos equipamentos do estudo anteriormente apresentado, lareira aberta e lareira fechada. Neste trabalho experimental só foram utilizadas três espécies de árvores típicas de Portugal: o pinheiro (*Pinus pinaster*), o eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e o sobreiro (*Quercus suber*). Alguns parâmetros operacionais deste estudo são apresentados na Tabela 5 e os resultados na Tabela 6.

Tabela 5 – Detalhes operacionais do processo de combustão, relativo ao estudo que permitiu o cálculo dos fatores de emissão para PM10 (Fonte: Adaptado de Duarte, 2011)

	Temperatura (máximas)	Duração da queima	Quantidade de madeira
Lareira aberta	Pinheiro – 400°C	45-60 min	1,8 ± 0,2 kg
	Eucalipto – 600°C		
	Sobreiro – 700°C		
Lareira fechada	Pinheiro – 600°C	45-60 min	1,8 ± 0,2 kg
	Eucalipto – 600°C		
	Sobreiro – 703°C		

Tabela 6 – Síntese dos fatores de emissão médios globais para PM10 (g/kg) e respetivo desvio padrão por espécie e tipo de equipamento (Fonte: Duarte, 2011)

		Pinheiro	Eucalipto	Sobreiro
Lareira Fechada (g/Kg)	PM	4,42±1,89	7,75±3,30	6,96±2,12
	OC	1,93±0,78	4,05±2,08	3,68±1,38
	EC	1,54±0,56	0,58±0,23	0,53±0,06
Lareira Aberta (g/Kg)	PM	20,01±9,28	23,17±2,72	17,47±1,58
	OC	12,49±5,96	13,30±1,56	10,57±1,09
	EC	1,55±0,74	0,43±0,08	0,72±0,11



Ainda na Universidade de Aveiro, no Departamento de Ambiente e Ordenamento, em 2014, no âmbito do Projeto AIRUSE - *Testing and Development of air quality mitigation measures in Southern Europe* - foram também calculados fatores de emissão médios de PM10 para as espécies arbóreas predominantes em Portugal (já acima indicadas) em quatro tipos de equipamentos: lareira aberta, lareira fechada (recuperador de calor), lareira fechada certificada (utilizada em países como a Alemanha, Áustria e países Escandinavos) e fogão a pellets.

Os valores dos fatores de emissão calculados durante este projeto, assim como alguns detalhes operacionais, não poderão ser revelados, uma vez que ainda não foram publicados. Contudo, serão utilizados para o cálculo das emissões de partículas por serem os dados mais recentes e, tal como os fatores de emissão para PM2,5 acima indicados, são relativos às espécies arbóreas existentes em Portugal e equipamentos com muita representatividade no país.



CAPÍTULO III

QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar é o termo que se usa, normalmente, para traduzir o grau de poluição no ar que respiramos. A poluição do ar é provocada por uma mistura de substâncias químicas, lançadas no ar ou resultantes de reações químicas, que alteram o que seria a constituição natural da atmosfera (78% azoto, 21% oxigénio e, aproximadamente, 1% de ozono, hidrogénio, dióxido de carbono, vapor de água e gases raros). Estas substâncias poluentes podem ter maior ou menor impacte na qualidade do ar, consoante a sua composição química, concentração na massa de ar em causa e condições meteorológicas. As fontes emissoras dos poluentes atmosféricos são numerosas e variáveis, podendo ser antropogénicas ou naturais. As fontes antropogénicas são as que resultam das atividades humanas, como a atividade industrial ou o tráfego automóvel, enquanto as fontes naturais englobam fenómenos da Natureza tais como emissões provenientes de erupções vulcânicas ou fogos florestais de origem natural (APA, apambiente.pt, 2013).

O crescimento económico registado nas últimas décadas e o consequente aumento do consumo energético e do tráfego automóvel, são os principais responsáveis pela degradação da qualidade do ar, tornando a poluição atmosférica uma questão de saúde pública.

O aumento dos níveis de emissões de poluentes atmosféricos num determinado local pode provocar efeitos noutra região distante, contribuindo também para efeitos de macroescala como a depleção da camada de ozono ou as alterações climáticas. Portanto, a avaliação e monitorização da qualidade do ar ao nível local é de extrema importância para uma melhor gestão e mitigação dos seus impactes no ambiente e na saúde humana.

A qualidade do ar pode ser avaliada através da monitorização contínua com recurso a estações fixas, de campanhas efetuadas com estações móveis, da utilização de modelos com base nas emissões dos diferentes poluentes e nas condições meteorológicas, ou ainda com recurso a outras metodologias que proporcionem a informação necessária a uma adequada gestão.

Os efeitos dos diferentes poluentes atmosféricos na saúde traduzem-se no aparecimento ou agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares,



particularmente em populações sensíveis como as crianças, idosos e indivíduos com problemas respiratórios (APA, apambiente.pt, 2013).

3.1- Gestão da Qualidade do Ar

No quadro da União Europeia (UE), bloco económico e político ao qual Portugal pertence como Estado-Membro, tem vindo a ser desenvolvido um forte programa de combate à poluição atmosférica. As políticas que têm vindo a ser desenvolvidas visam reduzir a exposição à poluição atmosférica e produção legislativa em matéria da qualidade do ar, nomeadamente, a fixação de valores limite de emissão para os diferentes poluentes, a criação de estruturas de controlo de poluição em áreas especiais e apoios na implementação de tecnologias menos poluentes.

Neste sentido, a UE criou o Sexto Programa de Ação em Matéria do Ambiente (“Ambiente 2010: O Nosso Futuro, a Nossa Escolha”) que define as prioridades em relação ao desenvolvimento sustentável, através de estratégias que inspirem os Estados-Membros a utilizar de forma racional os recursos naturais e a proteger os ecossistemas do planeta e a saúde humana. Os quatro domínios desenvolvidos neste Programa são as alterações climáticas, a natureza e biodiversidade, o ambiente e a saúde e a gestão sustentável dos recursos naturais e dos resíduos.

No seguimento da Convenção sobre Poluição Atmosférica Transfronteiriça de Longo Alcance (CLRTAP) de 1979, foi iniciado em 2000 um plano destinado a fornecer informações sobre matéria particulada (PM₁₀ e PM_{2,5})- *Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance* (CEPMEIP). O CEPMEIP tem como principal objetivo apoiar os especialistas na elaboração de Inventários de Emissões de partículas de cada país e para o *European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP). Este último, é um programa que inicialmente estava focado em avaliar o transporte transfronteiriço de acidificação e eutrofização. Mais tarde, amplificou-se para fazer uma abordagem sobre a formação do ozono troposférico, e recentemente, dos poluentes orgânicos persistentes (POP's), metais pesados e material particulado. Como resultados o EMEP fornece relatórios frequentes sobre emissões, concentrações e deposições dos poluentes atmosféricos, assim como, as suas concentrações e relevância dos fluxos transfronteiriços.



Em sequência, no âmbito do Programa CAFE - “*Clean Air for Europe*” (2000-2020), foram efetuados estudos relativos à necessidade, âmbito e custo-eficácia de ações futuras para melhorar a qualidade do ar na Europa, em consequência da implementação de toda a legislação sobre qualidade do ar existente (Ministério do Ambiente, portugal.gov.pt, 2013). Assim, o Programa CAFE tem como principal objetivo a adoção pela Comissão Europeia da Estratégia Temática sobre Poluição Atmosférica de três medidas fundamentais: documento relativo à Estratégia propriamente dita, a revisão das Diretivas relativas à qualidade do ar e um estudo do impacte da Estratégia e da revisão das Diretivas relativas à qualidade do ar.

3.2- Enquadramento Legislativo para Portugal

No âmbito do Programa CAFE que, como anteriormente foi referido, visa a revisão das Diretivas relativas à qualidade do ar, a Diretiva-Quadro 96/62/CE foi revista e transposta pela nova Diretiva-Quadro 2008/50/CE de 21 de Maio de 2008. A diretiva-Quadro anteriormente existente continha quatro diretivas filhas e transpostas por vários Decretos-Lei, que foram revogados pelo DL 102/2012 de 23 de Setembro, atualmente em vigor.

A nova Diretiva-Quadro 2008/50/CE tem como principais objetivos:

- 1- Definir e fixar objetivos relativos à qualidade do ar ambiente destinadas a evitar, prevenir ou reduzir os efeitos nocivos para a saúde humana e para o ambiente na sua globalidade;
- 2- Avaliar, com base em métodos e critérios comuns, a qualidade do ar ambiente nos Estados-Membros;
- 3- Obter informações sobre a qualidade do ar ambiente a fim de contribuir para a luta contra a poluição atmosférica e os efeitos nocivos e acompanhar as tendências a longo prazo bem como as melhorias obtidas através de medidas nacionais e comunitárias;
- 4- Garantir que as informações sobre a qualidade do ar ambiente sejam postas à disposição do público;
- 5- Manter a qualidade do ar ambiente, quando é boa, e melhorá-la nos outros casos;



6- Promover uma maior cooperação entre os Estados-Membros para reduzir a poluição atmosférica.

Na seguinte tabela são apresentados os valores-limite e alvo e os limiares de alerta legislados para os principais poluentes atmosféricos.

Tabela 7 - Valores Limite, Valores Alvo e Limiares de Alerta legislados para os principais poluentes atmosféricos (Fonte: DL 102/2010)

<i>Poluentes</i>	<i>Valores Limite</i>	<i>Valores Alvo</i>	<i>Limiares de Alerta</i>
SO₂ (horário)	350 µg/m ³ , a não exceder mais de 24 vezes por ano civil	120 µg/m ³	500 µg/m ³
SO₂ (diário)	125 µg/m ³ , a não exceder mais de 3 vezes por ano civil		
NO₂ (horário)	200 µg/m ³ , a não exceder mais de 18 vezes por ano civil	120 µg/m ³	400 µg/m ³
CO (octo-horário)	10 µg/m ³		
PM10 (diário)	50 µg/m ³ , a não exceder mais de 35 vezes por ano civil		
PM10 (anual)	40 µg/m ³		
PM2,5 (ano civil)	25 µg/m ³	25 µg/m ³	
O₃ (octo-horário)	120 µg/m ³ , a não exceder mais de 25 vezes por ano civil	120 µg /m ³	140 µg /m ³



3.3 – Modelação da Qualidade do Ar Urbano

Durante as últimas décadas, o estudo do escoamento e da dispersão de poluentes nas áreas urbanas tem tido uma importância crescente, principalmente devido ao aumento dos níveis das concentrações dos poluentes e devido aos seus efeitos na saúde humana. O impacte da poluição atmosférica em ambientes urbanos tornou-se uma importante questão de investigação, conduzindo a numerosos estudos de modelação que consideram a influência dos edifícios e estruturas urbanas nos padrões de dispersão ou acumulação de poluentes (Vardoulakis, *et al*, 2002).

Os fenómenos de dispersão de poluentes atmosféricos são decisivamente influenciados pelos diferentes processos que ocorrem na atmosfera, que por sua vez são classificados em relação à sua escala espacial:

- Macroescala (>1000 km) – O escoamento atmosférico está associado, principalmente, a fenómenos sinóticos, ou seja, à distribuição geográfica dos sistemas de pressão. Os fenómenos de dispersão global, regional e a maior parte dos fenómenos continentais estão relacionados a processos atmosféricos de macroescala (Moussiopoulos, *et al*, 1996).
- Mesoescala (Entre 1 e 1000 km) – A associação entre reações químicas e fenómenos de transporte conduz à formação de poluentes secundários, como o ozono troposférico. Os poluentes secundários têm origem nos poluentes primários emitidos à superfície e, assim como na microescala, estes episódios de poluição atmosférica estão associados a problemas de saúde humana e de degradação do meio (Vallero, 2008).
- Microescala (<1 km) – O fluxo atmosférico é muito complexo e depende do detalhe das características da superfície (forma dos edifícios e a sua orientação em relação à direção do vento). Embora sejam determinados, principalmente, pelas leis fundamentais da mecânica dos fluidos, os efeitos térmicos podem contribuir para a geração desses fluxos, sendo que determinados parâmetros, tais como o efeito da rugosidade, têm de ser bem descritos num modelo de simulação adequado (Moussiopoulos, *et al*, 1996).



Os modelos que descrevem a dispersão e transportes dos poluentes atmosféricos são:

- **Modelos Gaussianos** – Baseiam-se na suposição de que a concentração da pluma atmosférica tem distribuições gaussianas independentes, tanto na horizontal como na vertical. São modelos que têm por base um conjunto de equações que descrevem o campo tridimensional de concentração gerado, geralmente, por uma fonte pontual. Este tipo de modelos, normalmente, não são diretamente aplicados à dispersão em pequena escala, uma vez que o tratamento que fazem de edifícios e outros obstáculos é feito através da parametrização da rugosidade superficial (Vardoulakis, *et al.*, 2002).

No entanto, o modelo URBAIR que foi desenvolvido a partir do POLARIS (um modelo Gaussiano anteriormente desenvolvido pelo Grupo de Emissões Modelação e Alterações Climáticas (GEMAC) da Universidade de Aveiro) é significativamente diferente dos modelos tradicionais de dispersão de Gauss, porque os seus parâmetros de dispersão têm uma variação contínua com a estabilidade atmosférica, com base em parâmetros de dimensionamento da camada fronteira, como o Comprimento Monin-Obukhov, em vez de confiar na classificação estabilidade Pasquill-Guifford. Este modelo usa um pré-processador que calcula os parâmetros meteorológicos necessários para o modelo de dispersão, como características da turbulência atmosférica, alturas de mistura, velocidade de fricção, comprimento Monin-Obukhov e fluxo de calor da superfície (Borrego, *et al.*, 1997 e Borrego, *et al.*, 2003).

Também o modelo AERMOD, recomendado pela EPA (*Environment Protection Agency of United States*), é um modelo de pluma em estado estacionário que incorpora a dispersão do ar com base na estrutura turbulenta da camada limite planetária, e ainda conceitos de escala, incluindo o tratamento de superfície simples e complexas (EPA- epa.gov, 2014).

- **Modelos Eulerianos** – O transporte dos poluentes é, convencionalmente, simulado numericamente através da equação de difusão atmosférica, isto é, a equação da conservação de massa. São utilizados, geralmente, para previsões meteorológicas, sendo que os modelos eulerianos mais avançados



incluem submodelos bem desenvolvidos para a descrição da turbulência (Moussiopoulos, *et al.*, 1996).

- **Modelos Lagrangeanos** – Modelos que descrevem os elementos de fluido que seguem o escoamento instantâneo, dividindo o escoamento em elementos de fluido mais simples. Usam um determinado número de partículas fictícias para simular a dinâmica de um parâmetro físico selecionado (Moussiopoulos, *et al.*, 1996).

3.3.1 – Modelação CFD

A modelação CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é um termo geral usado para descrever a análise de sistemas que envolvem escoamentos de fluidos, fenómenos de transporte e de fenómenos de transferência de calor, através de métodos numéricos (Vardoulakis, *et al.*, 2002).

Os modelos CFD são os únicos que permitem uma estimativa detalhada da distribuição espacial e temporal dos poluentes atmosféricos em áreas urbanas complexas, contribuindo para a identificação de zonas urbanas sensíveis em termos de qualidade do ar e com potenciais efeitos nocivos para a saúde humana (Costa, 2008).

Os modelos CFD são eulerianos e, normalmente, incluem esquemas avançados de tratamento da turbulência, tornando-os adequados para simular a dispersão de poluentes em pequena escala. Os códigos dos modelos CFD são estruturados em torno de algoritmos numéricos que caracterizam o fluxo do fluido. De modo a proporcionar o uso mais fácil para o utilizador, os modelos CFD comerciais contêm três elementos principais (Vardoulakis, *et al.*, 2002): i) pré-processador, que serve para os parâmetros de entrada, para gerar o domínio computacional, para selecionar os fenómenos físicos e químicos a utilizar e para definir as propriedades do fluido; ii) o solver, que utilizando aproximações numéricas, resolve as equações algébricas; iii) o pós processador, que mostra a grelha com a geometria do domínio, vetores (indicam, por exemplo a direção do vento) e contornos (indicam, por exemplo a concentração dos poluentes).



A simulação numérica é uma aproximação de um fenómeno real da qual podem resultar diversos erros (erros de arredondamento, erros de aproximação), os quais devem ser avaliados e controlados de forma a produzir informação confiável.

Os modelos CFD podem ser classificados em três categorias distintas quanto ao sistema de fecho de turbulência: Aproximação de médias de Reynolds para as equações de Navier-Stokes (RANS); Simulação dos grandes turbilhões (LES) e Simulação Numérica Direta (DNS). Na abordagem RANS os sistemas de fecho de turbulência são introduzidos para modelar todos os movimentos turbulentos. Na abordagem LES são utilizados sistemas de sub-malhas para simular a energia de transporte dos pequenos turbilhões. Enquanto na abordagem DNS os sistemas de fecho de turbulência não são um requisito (Rodrigues, 2009).

3.3.2 - Modelo CFD VADIS

O VADIS é um modelo CFD, desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (Borrego, *et al.*, 2003). O desempenho do VADIS foi avaliado com medições em túnel de vento e em aplicações de casos reais, demonstrando uma boa capacidade no cálculo do fluxo e dispersão de poluentes em torno de obstáculos sob condições de vento variáveis (Amorim, *et al.*, 2013).

O VADIS foi desenvolvido como uma ferramenta para avaliar a dispersão dos poluentes na atmosfera e foi preparado para lidar com condições de dispersão desfavoráveis, como a estabilidade térmica e baixas velocidades do vento. Estas condições específicas podem levar à acumulação dos poluentes em áreas urbanas originados pelo tráfego e atividades industriais, que a curto e/ou médio prazo levam a riscos para o ambiente e para a saúde humana (Borrego, *et al.*, 2003).

O modelo é um sistema integrado composto por dois módulos, um de camada limite, de tipo euleriano, designado por FLOW, e outro de dispersão lagrangeana, o DISPER. Na figura que se segue são apresentados os dados de entrada e saída de cada um dos módulos.

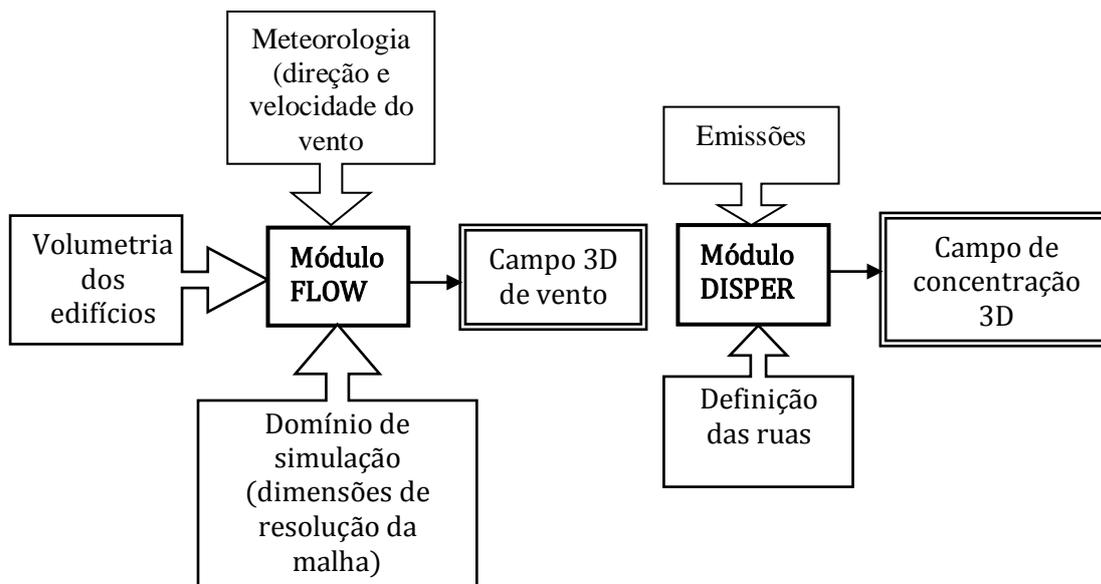


Figura 10 – Estrutura de funcionamento do modelo VADIS (Fonte: Adaptado de Borrego, *et al.*, 2003)

O módulo FLOW calcula o campo de ventos com base nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds para o escoamento estacionário na camada limite e em regime turbulento. O fecho do sistema de equações é feito através da aproximação $k-\varepsilon$ (sendo k a energia cinética turbulenta e ε a dissipação da viscosidade), que calcula os campos tridimensionais das componentes do escoamento, a viscosidade turbulenta, a pressão, a energia cinética turbulenta e a temperatura pelo método dos volumes de controlo/diferenças finitas.

Neste módulo são usadas duas malhas diferentes: a informação relativa à localização e definição dos edifícios e ruas é definida numa malha cartográfica; o campo de ventos é calculado sobre uma malha cartesiana tridimensional, que é sobreposta à malha cartográfica e gira de acordo com a direção do vento (Fig. 11). Como o VADIS usa uma malha estruturada, os edifícios mais complexos têm de ser previamente divididos em paralelepípedos. Assim, para cada obstáculo (edifícios, árvores e vias) o utilizador tem de definir as coordenadas dos cantos inferior esquerdo e superior direito e o respetivo ângulo (entre 0° e 90°). Tendo este modelo a capacidade de identificar a sobreposição de coordenadas, torna-se mais fácil a descrição dos edifícios mais complexos (Borrego, *et al.*, 2003).

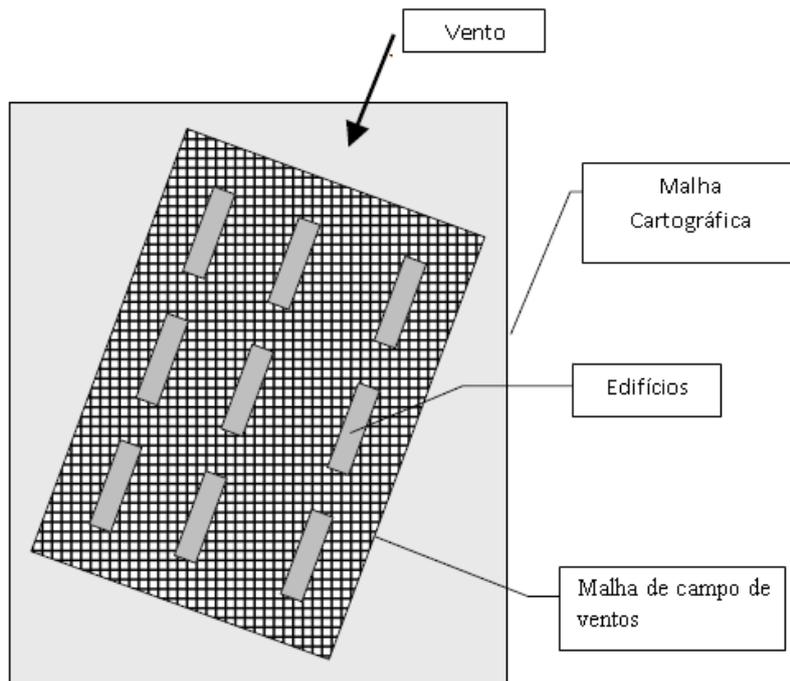


Figura 11 – Malha cartográfica e de campo de ventos (Fonte: Borrego, *et al.*, 2002)

Para funcionamento deste módulo, o utilizador tem de definir também as condições de velocidade e direção do vento medidos a uma altura de referência, bem como as dimensões do seu domínio, que segundo o guia *COST 732-Best Practise Guideline CFD Modelling* (Franke, *et al.*, 2007) tanto a extensão vertical como a extensão lateral do domínio computacional deve ter pelo menos cinco vezes a altura do edifício mais alto.

Em relação ao módulo DISPER, o campo 3D de ventos gerado pelo módulo FLOW, as emissões do tráfego, e a definição das ruas (localização e taxa de emissão) são os requisitos de entrada necessários, fornecendo o campo 3D de concentrações. A metodologia utilizada pelo módulo DISPER, assume a dispersão espacial e temporal da massa de poluente emitido, sendo convenientemente representada por um determinado número de partículas numéricas liberas aleatoriamente no escoamento e o processo de cálculo da dispersão lagrangeana é repetido, ciclicamente, para cada período de tempo considerado.



CAPÍTULO IV

CASO DE ESTUDO: CENTRO URBANO DE AVEIRO

4.1 - Caracterização do Local de Estudo

O caso de estudo desta dissertação localiza-se na cidade de Aveiro, situada no litoral Nordeste de Portugal, Região Centro e sub-região Baixo Vouga. É um município com 78 450 habitantes tendo aproximadamente 200 km² subdivididos em 10 freguesias.

O estudo é focado no centro da cidade de Aveiro, freguesia da Glória, abrangendo a Avenida 25 de Abril, uma das principais vias de tráfego da cidade, onde estão localizadas duas escolas (só uma delas na área de estudo – Escola Secundária José Estevão) e uma estação de monitorização da qualidade do ar (Fig.12). Nos últimos anos, esta zona da cidade de Aveiro tem sido alvo de um conjunto de estudos sobre qualidade do ar, sendo que esta dissertação pretende complementar toda a informação já existente, dando um contributo sobre uma questão mais particular, que é a da queima de biomassa. A existência de duas escolas no local de estudo, como já foi referido, torna-o de particular interesse sob o ponto de vista da exposição humana a poluentes atmosféricos, nomeadamente às partículas (PM10 e PM2,5) pelo seu conhecido efeito negativo na saúde.



Figura 12 – Domínio de estudo (linhas amarelas), com a indicação da Escola Secundária José Estevão (círculo azul) e a Estação de Monitorização de Qualidade do Ar (círculo vermelho) (Fonte: Google Maps, maps.google.pt, 2014)



4.2 - Cartografia do Local de Estudo (Configuração tridimensional de edifícios, árvores e vias)

A qualidade do ar à escala local depende de vários fatores, tais como o formato dos edifícios, das vias de tráfego e das condições meteorológicas. A elevada ocupação habitacional e a altura dos edifícios influencia a dispersão dos poluentes, tendo como principal consequência uma maior permanência dos poluentes ao nível do solo. Para além disto, as árvores também são um aspeto a ter em conta na dispersão e permanência de poluentes em meios urbanos. A presença de árvores assume uma significativa importância, dado que interfere no processo de ventilação natural e, conseqüentemente, na dispersão das emissões provenientes do tráfego rodoviário. Estes efeitos variam em função da interação com as condições meteorológicas, configuração tridimensional dos edifícios, com o tipo de fontes de emissão e suas características (Amorim *et al.*, 2010).

A configuração tridimensional dos edifícios, árvores e principais vias de tráfego do local de estudo foi elaborada através do programa ArcGis. Neste processo foi necessária a definição das alturas dos edifícios e árvores, para isso utilizou-se imagens 3D do *Bing Maps*, estimando-se, para o caso dos edifícios, uma altura média de 2 m por andar. Devido à tipologia da malha de cálculo do modelo VADIS, as árvores, os edifícios e as vias de tráfego foram aproximados a paralelepípedos. Os edifícios estão representados em 468 blocos variando entre 3 e os 12 m; as árvores em 225 blocos com alturas a variar entre 1 e 10 m; as vias em 61 blocos, todos definidos com a altura de 2 metros – Fig.13.



Após este procedimento, os dados foram inseridos num pré-processador, com o objetivo de adquirirem a configuração correta para serem introduzidos no modelo VADIS.



Figura 13 – Representação tridimensional dos edifícios (cinzento), das árvores (verde) e das vias (castanho) no local de estudo



4.3- Qualidade do Ar Local (Análise dos dados de monitorização)



Figura 14 – Estação de monitorização da qualidade do ar do local de estudo (Fonte: APA, qualar.apambiente.pt, 2014)

A estação de monitorização da qualidade do ar existente no local de estudo - Fig. 14 - faz parte da Rede de Qualidade do Ar do Centro, é uma estação do tipo de influência tráfego e começou a funcionar a 15 de janeiro de 2003. A recolha de

dados é efetuada através da rede telefónica fixa (por meio de *modem*) para uma unidade de gestão regional (UGR),

instalada num computador pessoal da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro (CCDR), que permite, através de *software* próprio, a armazenagem e o tratamento dos dados (APA, qualar.apambiente.pt, 2014). Os poluentes medidos em contínuo são: monóxido de azoto (NO), dióxido de azoto (NO₂), óxidos de azoto (NO_x), partículas (PM₁₀), benzeno (C₆H₆) e monóxido de carbono (CO).

Com o intuito de perceber a variação das concentrações de PM₁₀ ao longo do ano de 2012 (dados mais recentes disponibilizados na base de dados on-line sobre qualidade do ar), foi feita uma análise dos dados relativos a este poluente, elaborando-se, para isso, um gráfico com a variação das concentrações médias diárias de PM₁₀ (µg/m³) ao longo do ano desse ano- Fig.15

Da análise do gráfico, conclui-se que as concentrações são mais elevadas nos meses de inverno e, é durante estes meses, onde há um maior número de ultrapassagens do valor limite legislado para as PM₁₀ (50 µg/m³), facto que poderá estar relacionado com a queima residencial de biomassa, uma vez que é também nos meses de inverno onde esta ocorre com maior intensidade e frequência.



Figura 15 – Variação das concentrações médias diárias de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ao longo do ano 2012

Sendo o NO_x um poluente que está intimamente relacionado não só com o tráfego rodoviário, como também com a combustão residencial de biomassa, foi também elaborado, para o mesmo ano, um gráfico com as variações das concentrações de NO_x -Fig.16,

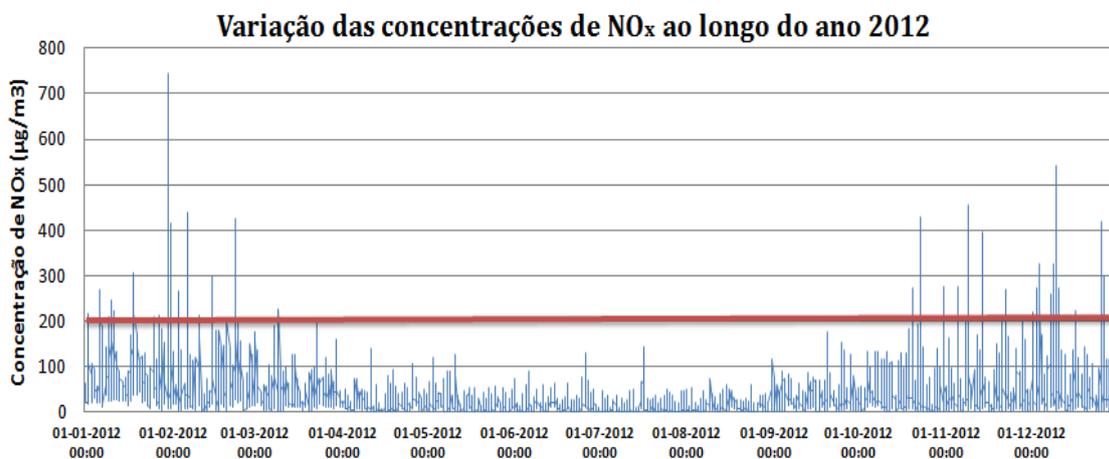


Figura 16 – Variação das concentrações horárias de NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ao longo do ano 2012

O valor limite legislado (horário) para o NO_x é de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e, através da análise da Fig.16 verifica-se que, tal como para as concentrações de PM10, é nos meses de inverno que o valor limite é mais vezes ultrapassado. O facto de as variações das concentrações de PM10 e NO_x serem idênticas sugere que, provavelmente, estes dois poluentes têm as mesmas origens, podendo a combustão residencial de biomassa estar entre essas mesmas.



4.4- Meteorologia

Os dados de velocidade e direção do vento foram obtidos através da estação meteorológica da Universidade de Aveiro, sob gestão do Departamento de Física, a 10 metros de altura. Estes, foram fornecidos desde o ano 2006 até 2010, em base horária, e de 2011 até 2013 em médias temporais de 10 em 10 minutos, pelo que estes últimos, foram convertidos em médias horárias utilizando, para isso, as seguintes fórmulas:

$$u = -U \times \sin(\text{Direção do vento, em radianos})$$

$$v = -U \times \cos(\text{Direção do vento, em radianos})$$

Em que,

U = Velocidade do vento (m/s)

$$\text{Velocidade média horária } \left(\frac{m}{s}\right) = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$$

$$\text{Direção média horária } (^{\circ}) = \frac{360}{2\pi} \times \arctg(\bar{v}; \bar{u}) + 180$$

Em que,

\bar{u} e \bar{v} são médias de u e v, respetivamente

Com o objetivo de perceber as condições típicas de velocidade e direção dos ventos na cidade de Aveiro para, posteriormente, estas serem utilizadas para a simulação numérica, foi realizada uma análise microclimática, sendo elaboradas rosas de ventos anuais e uma octo-anual, a partir do *software* Wrplot (Fig.17, Fig.18 e Fig.19).

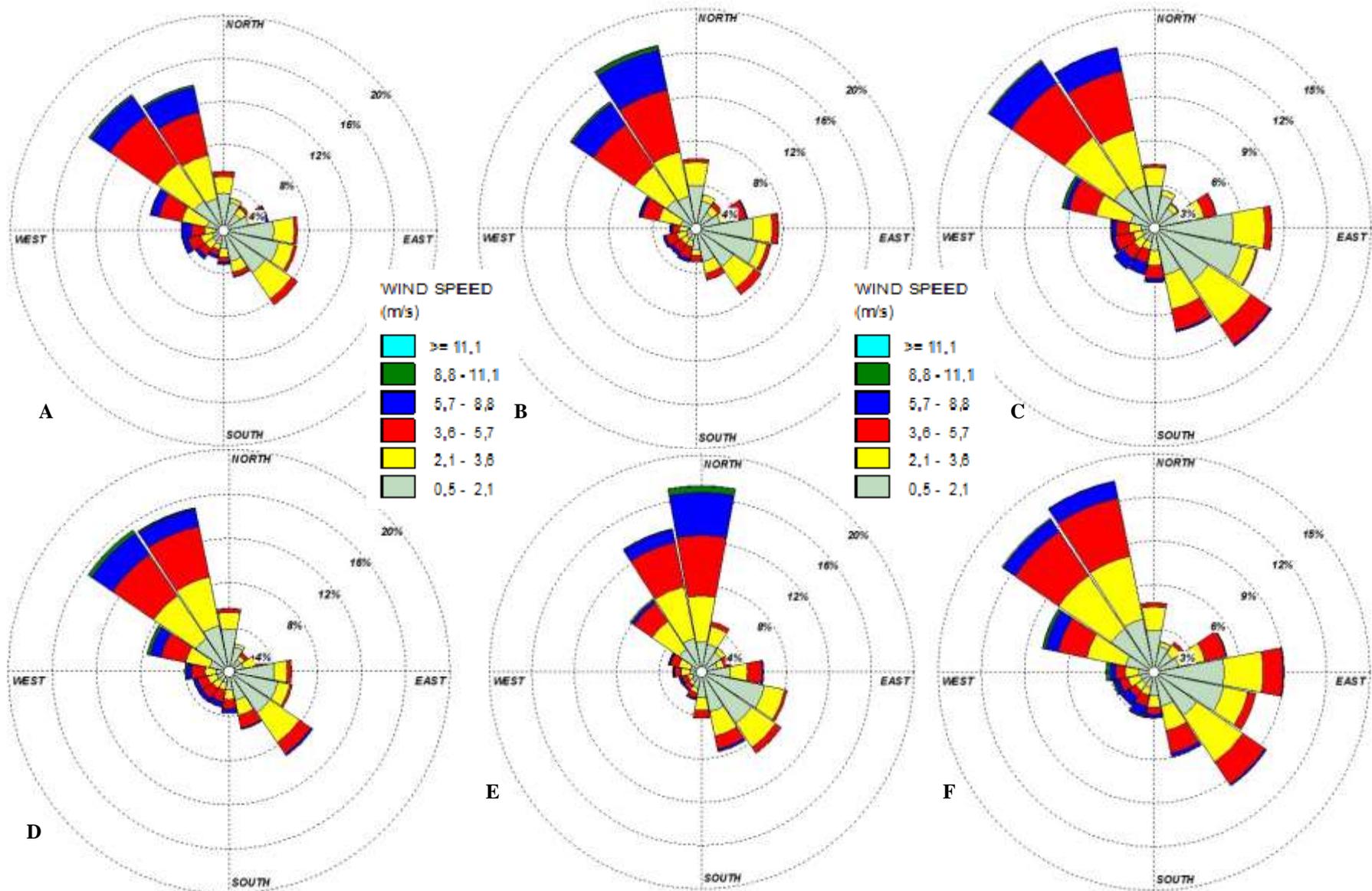


Figura 17 – Rosas de ventos relativa aos anos: A-2006, B-2007, C-2008, D-2009, E- 2010 e F-2011

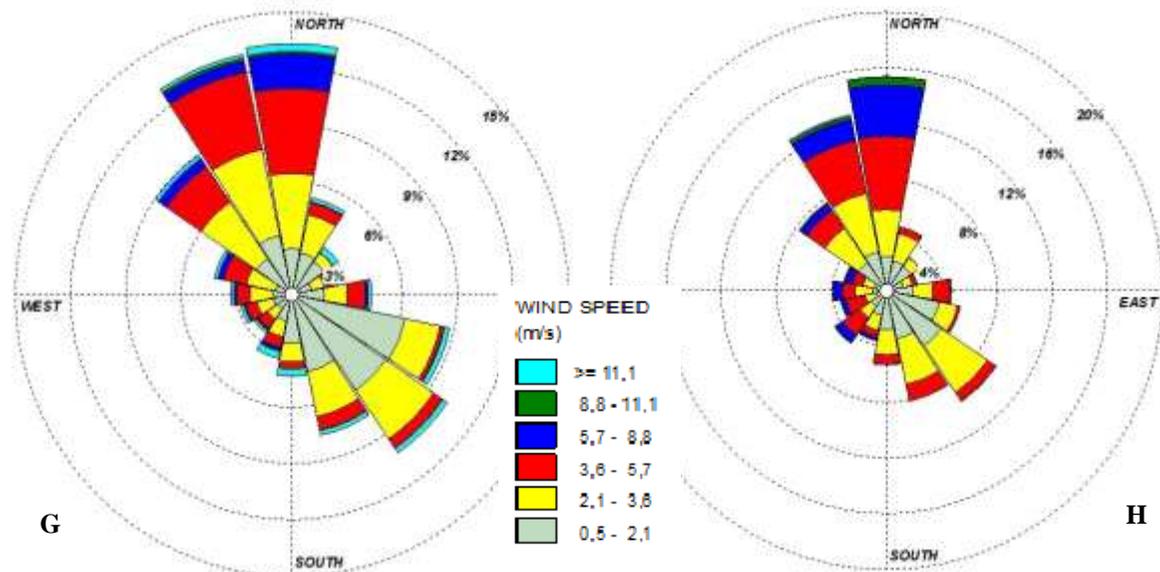


Figura 18 – Rosas de ventos relativas aos anos G- 2012 e H- 2013

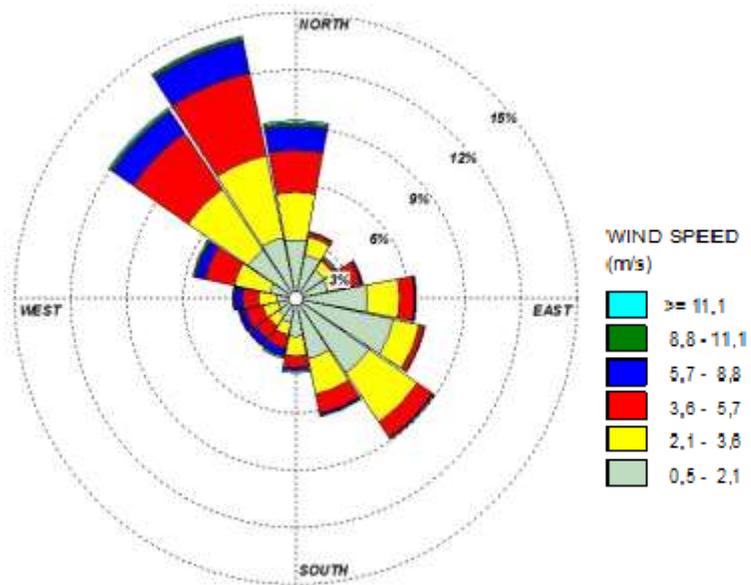


Figura 19 – Rosa de ventos octo-anual (2006-2013)

Verifica-se, através da análise das figuras, que há duas direções predominantes, sendo que norte/noroeste está associado a ventos com maior intensidade e sudeste a ventos de menor intensidade.

4.5- Cenários Meteorológicos para a Simulação Numérica

Para a escolha dos cenários meteorológicos a utilizar na simulação numérica, foram analisados conjuntamente os dados de monitorização e os dados meteorológicos.

A análise dos dados de monitorização foi realizada para os dias, dos meses associados à queima residencial de biomassa do ano de 2012 (janeiro, fevereiro, novembro e dezembro), em que se registaram as maiores concentrações de PM10. Foram então, elaborados gráficos com a variação diária das concentrações de PM10 e de NO_x, com o objetivo de identificar quais as horas do dia em que as concentrações destes poluentes são mais elevadas, e o modo como estão relacionadas.

Após a averiguação de quais as horas do dia em que as concentrações de PM10 são mais elevadas, foi realizada uma análise dos dados de direção e velocidade do vento para esses mesmos períodos, usando o *software* Wrplot. O objetivo passou por compreender quais as condições meteorológicas que se fazem sentir no momento em que são registados episódios de altas concentrações de PM10. Os episódios que foram identificados e onde toda esta análise foi realizada, registaram-se nos dias 6 e 7 de janeiro, 24 e 25 de fevereiro, 14 e 15 de novembro e 10 e 11 de dezembro do ano 2012.



4.5.1 – Análise do episódio de altas concentrações de PM₁₀ registado nos dias 6 e 7 de janeiro de 2012

Na Fig.20 e 21 são apresentadas a variação das concentrações de PM₁₀ e NO_x ao longo destes dois dias e a rosa de ventos para o período onde as concentrações destes poluentes se revelaram mais elevadas, respetivamente.

Na Fig.22 apresentam-se as condições meteorológicas, nomeadamente temperatura, velocidade e direção do vento, referentes aos dias em análise.

A análise realizada nos três pontos subsequentes (4.5.2, 4.5.3 e 4.5.4) é apresentada de forma análoga.

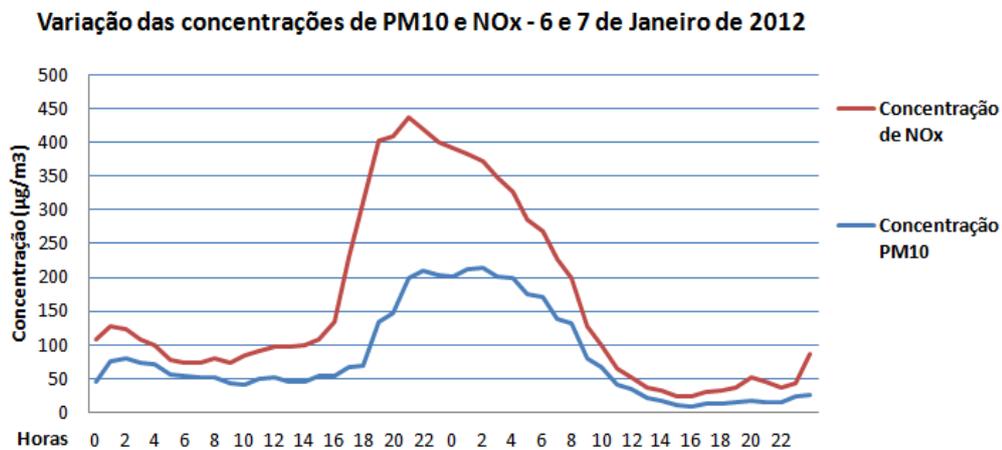


Figura 20 – Variação das concentrações médias horárias de PM₁₀ e NO_x nos dias 6 e 7 de janeiro de 2012

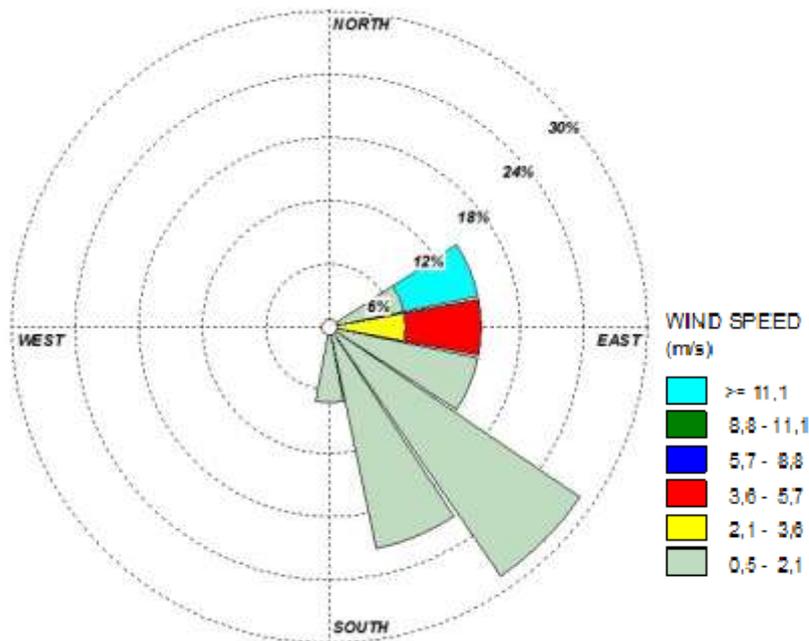


Figura 21 – Rosa de ventos relativa ao período das 20h do dia 6 até às 10h dia 7 de janeiro de 2012

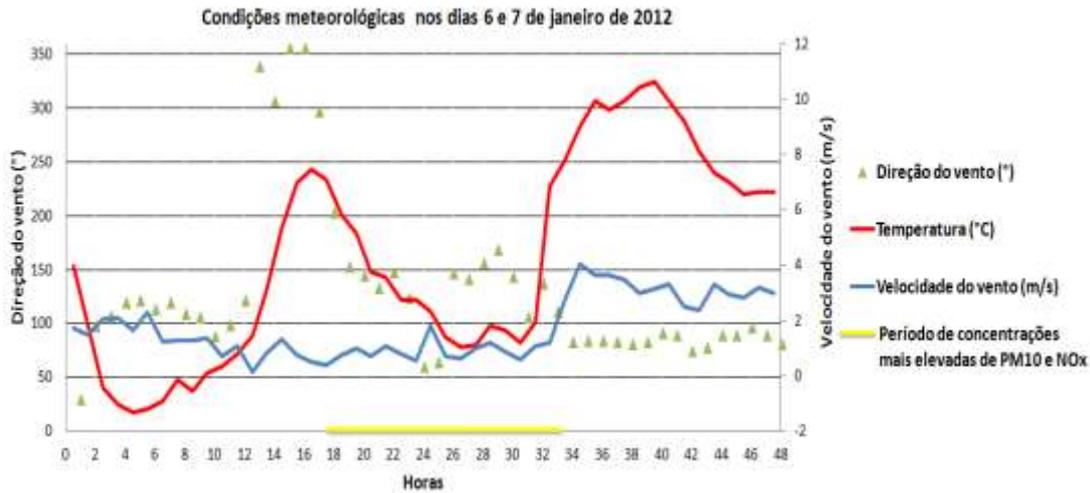


Figura 22 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 6 e 7 de janeiro de 2012

Como se verifica pela análise das Fig.20 e Fig.22, as temperaturas baixam significativamente a partir de uma determinada hora, a partir da qual as concentrações de PM₁₀ e NO_x começam a aumentar (sensivelmente, a partir das 18h). Este facto poderá estar associado a uma maior utilização de equipamentos de combustão de biomassa, a partir dessa hora.

Na Fig.22 observa-se que a direção predominante do vento durante o período de concentrações mais elevadas de PM₁₀ e NO_x é, aproximadamente, 150° (vento Sudeste) e velocidade média de 1 m/s. Esta direção e velocidade do vento constituem o primeiro cenário meteorológico a utilizar nas simulações da dispersão de PM₁₀ com o VADIS.



4.5.2- Análise do episódio de altas concentrações de PM₁₀ registado nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2012

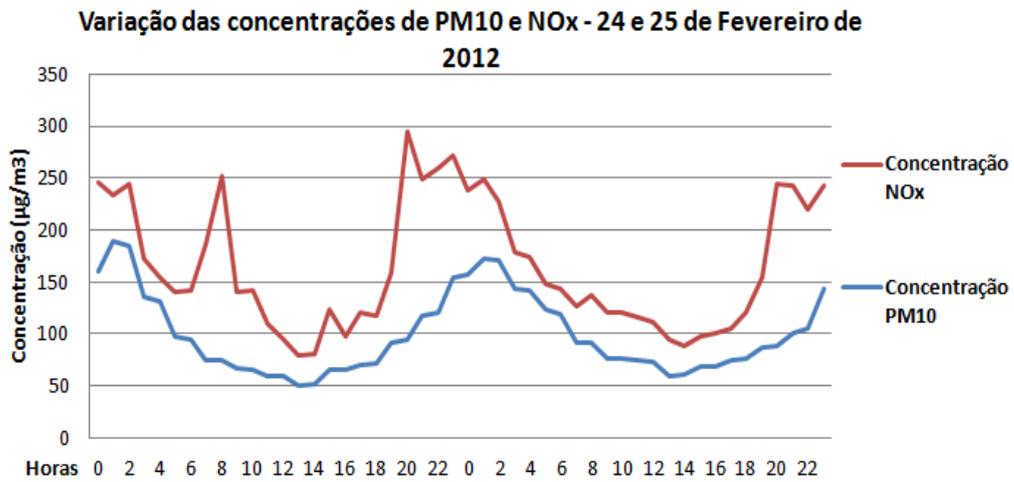


Figura 23 – Variação das concentrações médias horárias de PM₁₀ e NO_x nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2012

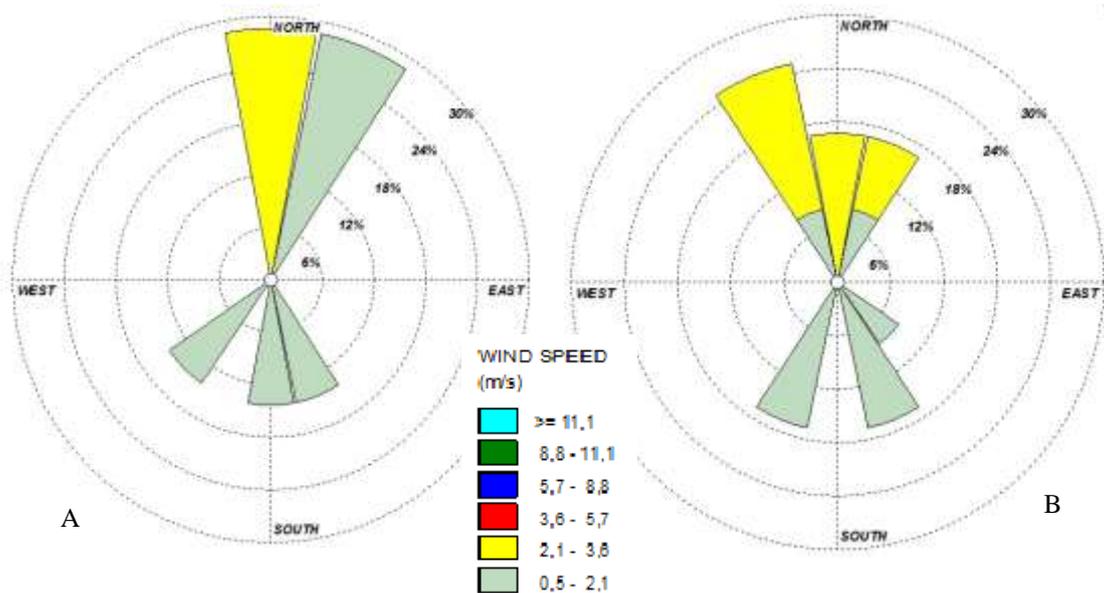


Figura 24 – Rosa de ventos relativa ao período 0h até às 6h do dia 24 de fevereiro de 2012 (A) e relativa ao período 20h do dia 24 até às 6h do dia 25 de fevereiro de 2012 (B)

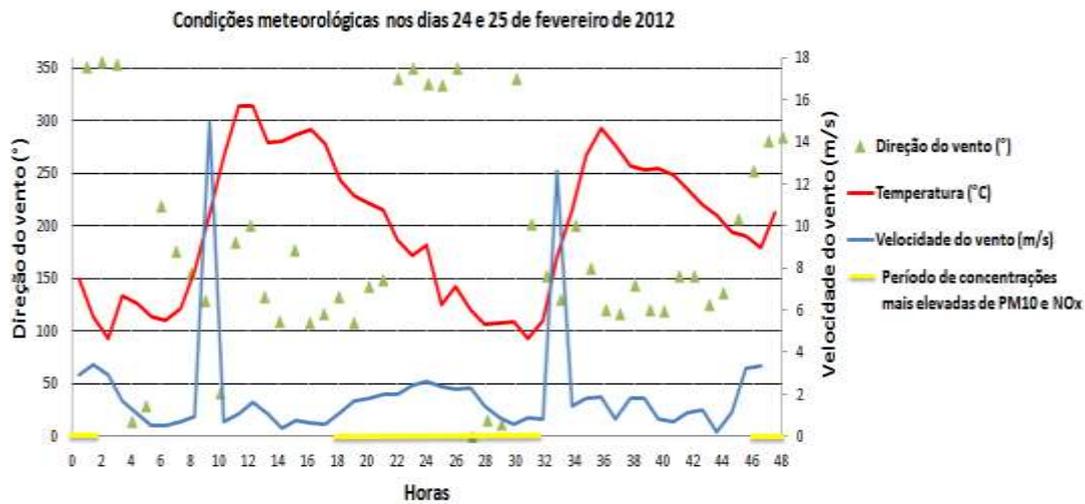


Figura 25 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2012

Verifica-se na Fig.23 que, tal como no mês de janeiro, as concentrações de PM10 e NO_x são de algum modo idênticas e atingem valores muito elevados durante a noite (primeiras e últimas horas dos dias 24 e 25).

Na Fig.25 observa-se que a direção predominante do vento durante o período de concentrações mais elevadas de PM10 e NO_x é, aproximadamente, 350° (vento Norte) e velocidade média de 2,5 m/s; tal como evidenciado no episódio anterior, também neste, as temperaturas sofrem um decréscimo durante o período de concentrações mais elevadas destes poluentes. Esta direção e velocidade do vento correspondem a um segundo cenário meteorológico a utilizar na simulação numérica da dispersão de PM10 com o VADIS, uma vez que os seus valores representam um comportamento do escoamento atmosférico diferente em relação ao primeiro cenário meteorológico (mês de janeiro).



4.5.3- Análise do episódio de altas concentrações de PM10 registado nos dias 14 e 15 de novembro de 2012

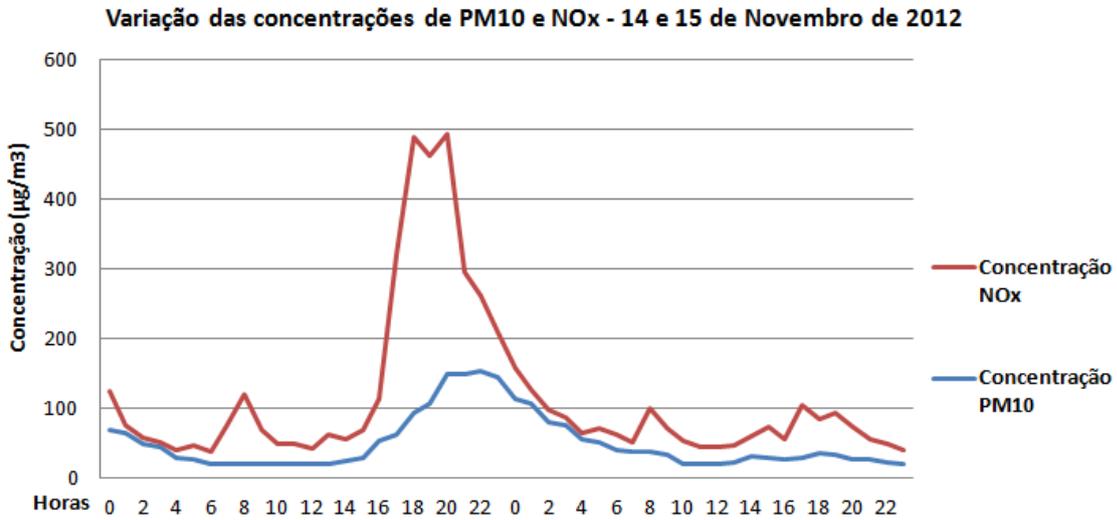


Figura 26 – Variação das concentrações médias horárias de PM10 e NO_x nos dias 14 e 15 de novembro de 2012

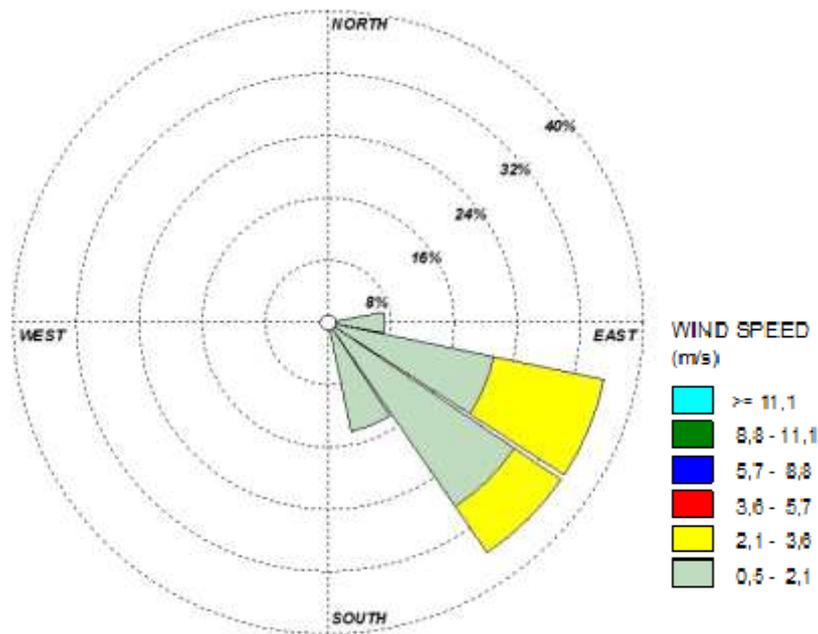


Figura 27 – Rosa de ventos relativa ao período das 20h do dia 14 até 8h do dia 15 de novembro de 2012

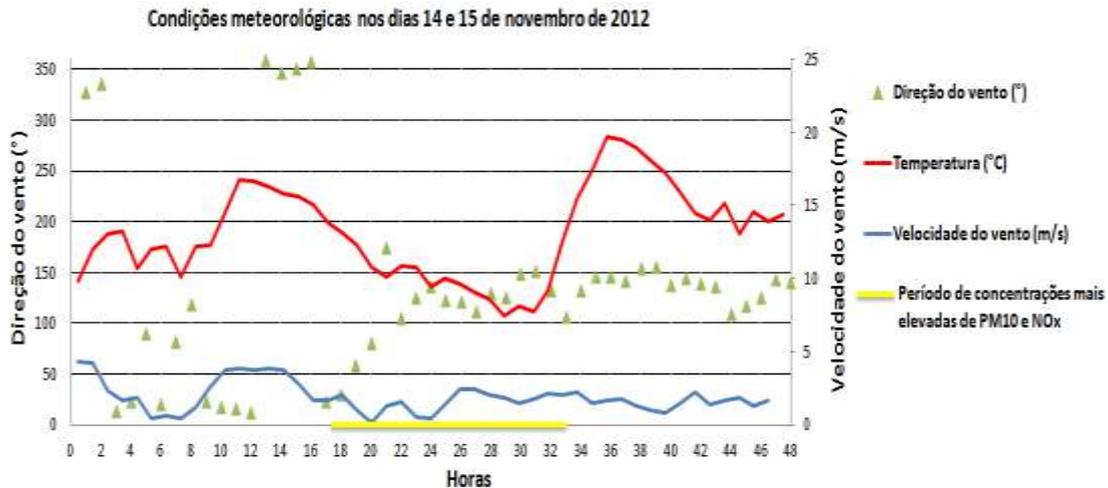


Figura 28 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 14 e 15 de novembro de 2012

Na Fig.26 pode observar-se que, tal como nos episódios anteriores, as concentrações máximas de PM₁₀ e NO_x são atingidas durante a noite, no entanto, neste mês, estas não são atingidas durante a madrugada, mas sim entre as 20 e as 23h. Este período também poderá estar relacionado com a utilização de equipamentos de combustão de biomassa.

Na Fig.28 verifica-se que os valores de temperatura decrescem durante o período durante o qual são registadas altas concentrações dos poluentes em análise; a direção predominante do vento durante este mesmo período é, aproximadamente, 150° e velocidade média de 1 m/s. Estes valores constituem um comportamento do escoamento atmosférico idêntico ao registado no primeiro cenário meteorológico, já selecionado para simular.



4.5.4- Análise do episódio de altas concentrações de PM₁₀ registado nos dias 10 e 11 de dezembro de 2012

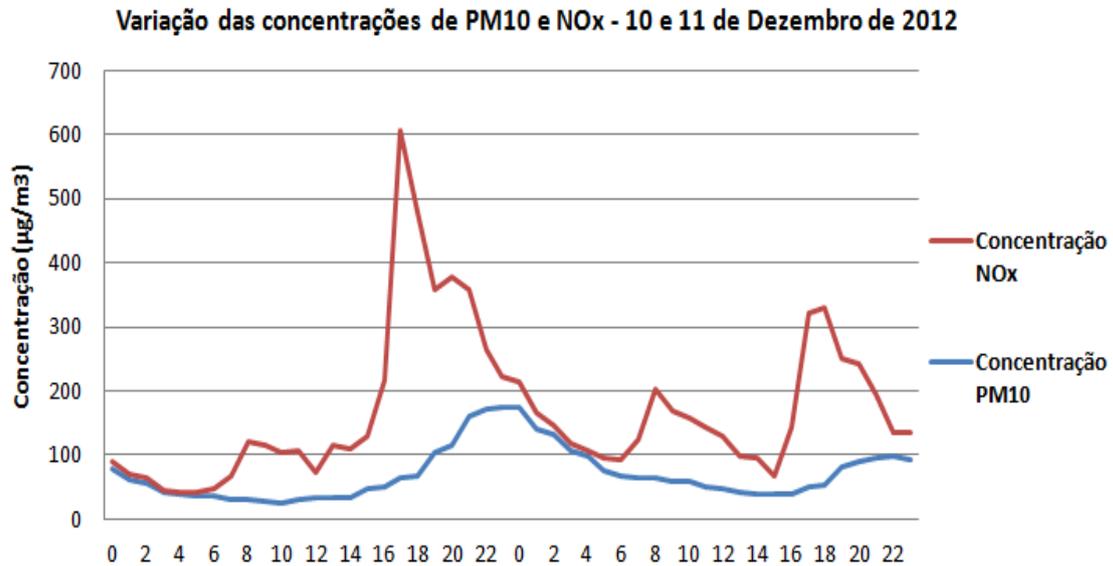


Figura 29 – Variação das concentrações médias horárias de PM₁₀ e NO_x nos dias 10 e 11 de dezembro de 2012

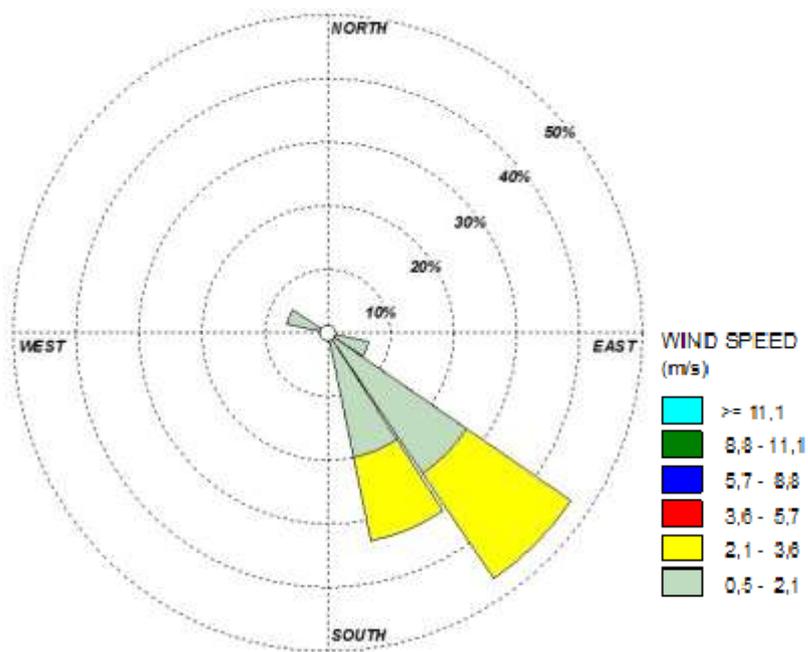


Figura 30 – Rosa de ventos relativa ao período das 16h do dia 10 até às 8h do dia 11 de dezembro de 2012

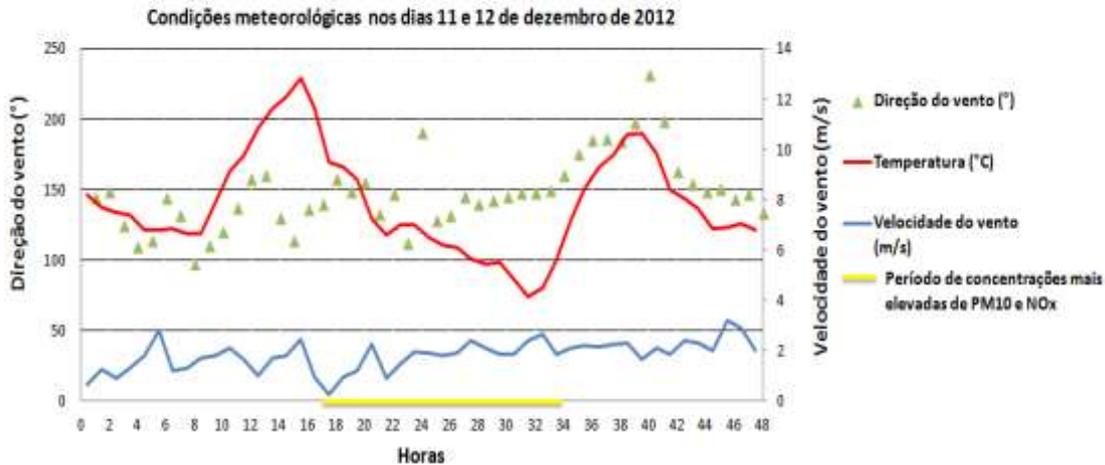


Figura 31 – Condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) nos dias 11 e 12 de dezembro de 2012

Na Fig.29 verifica-se que as concentrações mais elevadas de PM₁₀ são atingidas durante a noite, seguindo o comportamento registado no mês anterior. O mesmo não acontece com as concentrações de NO_x que, neste mês, registam um comportamento diferente dos episódios anteriores, sendo que as concentrações máximas são atingidas durante a tarde dos dias 10 e 11.

Na Fig.31 observa-se que, tal como acontece nos episódios anteriores, as temperaturas registadas nas horas associadas a concentrações elevadas de PM₁₀ são baixas. Já nas horas associadas às concentrações elevadas de NO_x, as temperaturas atingem os máximos do dia. A direção predominante do vento, durante o período de concentrações mais elevadas de PM₁₀, é aproximadamente, 146° e velocidade média de 2 m/s. Estes valores, sendo idênticos aos valores registados no primeiro cenário meteorológico, representam um comportamento do escoamento atmosférico já selecionado para simular.

A tabela 8 é relativa a uma síntese da análise realizada para definição dos cenários meteorológicos a utilizar na simulação numérica com o VADIS.

Tabela 8 – Resumo da análise para definição dos cenários meteorológicos a utilizar na simulação numérica

Episódios de altas concentrações de PM10 identificados (Ano: 2012)	Cenários meteorológicos identificados	Cenários meteorológicos utilizados para a simulação numérica com VADIS
6 e 7 de janeiro	Ventos com 150° e 1 m/s	Ventos com 150° e 1 m/s
24 e 25 de fevereiro	Ventos com 350° e 2,5 m/s	—
14 e 15 de novembro	Ventos com 150° e 1 m/s	—
10 e 11 de dezembro	Ventos com 146° e 2 m/s	Ventos com 350° e 2,5 m/s

4.6 – Inquérito sobre tipologia de instalações de aquecimento residencial

O inquérito realizado no âmbito desta dissertação teve como objetivo caracterizar os hábitos da população residente na área de estudo, relativamente ao uso e tipo de equipamentos para combustão de biomassa residencial, assim como assinalar a tipologia e quantidades de biomassa consumida. Para tal, no inquérito foram incluídas questões acerca do tipo de aquecimento utilizado (lareira aberta, lareira fechada, aquecimento elétrico independente, aquecimento central, ou outros); tipo de combustível utilizado (lenha, eletricidade, gasóleo, ou outros). Para o combustível a lenha pretendeu-se determinar a quantidade consumida, em média, por inverno e por habitação (menos de 1 ton, entre 1-2 ton, entre 2-4 ton, mais de 4 ton) e, ainda, o tipo de madeira consumida (pinheiro, eucalipto, carvalho, acácia, ou outros). Foram também incluídas questões neste inquérito acerca da frequência de utilização dos equipamentos (horas por dia de funcionamento do equipamento e dias por semana de funcionamento do mesmo) – Anexo A.

O inquérito foi realizado no local de estudo, porta-a-porta, entre o mês de fevereiro e março, obtendo-se 13,49% de respostas (378 inquéritos possíveis, 51 inquéritos respondidos). Apesar do número de respostas obtidas ser reduzido, houve indicação,



por parte de vários moradores, de alguns prédios, de que nenhum outro morador utilizaria equipamentos de queima de biomassa. Esta indicação fez com que menos inquéritos fossem respondidos, contudo considera-se que o número de equipamentos de queima de biomassa utilizados no local de estudo é representativo.

Da análise global dos inquéritos verifica-se que 98% dos inquiridos afirmam utilizar equipamentos de aquecimento. Dos vários tipos de equipamentos de aquecimento utilizados nas habitações, 86% dos inquiridos utilizam aquecedores elétricos independentes, 10% lareira aberta, 2% aquecimento central a gás e, os restantes 2% forno a lenha (referente a uma padaria) - Fig.32. As fontes de combustão de biomassa estão mapeadas na Figura 35.

Dos 86% dos inquiridos que utilizam aquecedor elétrico independente, 25% afirma possuir na sua habitação lareira aberta e 12% lareira fechada, contudo não usufruem destes equipamentos de aquecimento ou usufruem muito esporadicamente (em épocas festivas, tal como o natal), não sabendo indicar as quantidades nem a tipologia da madeira utilizada - Fig.32.

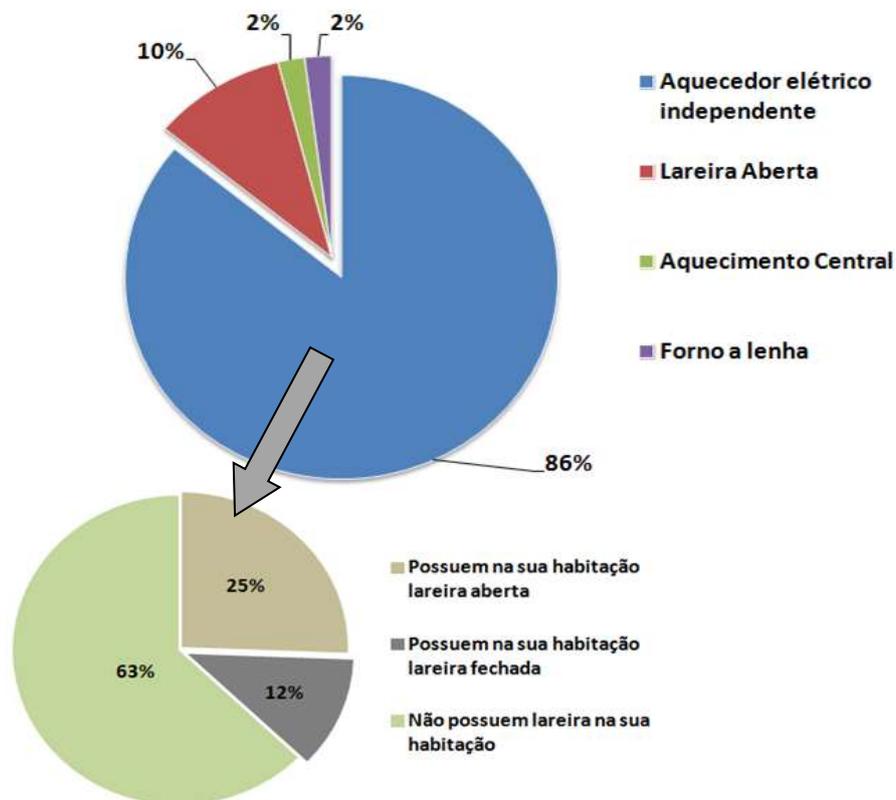


Figura 32 – Taxa de utilização dos vários tipos de equipamentos



Relativamente à quantidade de madeira consumida por inverno, pelos utilizadores de lareira aberta, 60% afirma queimar menos de 1 tonelada, 20% entre 1 -2 toneladas e os restantes 20% entre 2-4 toneladas. (Fig.33).

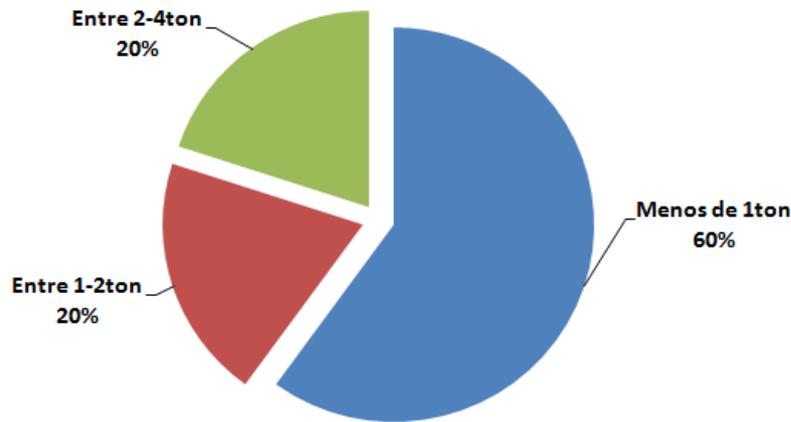


Figura 33 – Quantidades de madeira consumida pelos utilizadores de lareira

Quanto à tipologia de madeira, os utilizadores de lareira aberta afirmam queimar uma mistura de vários tipos de madeira, assim, 20% utiliza uma mistura de acácia e carvalho, 20% mistura de acácia, carvalho e eucalipto, 40% mistura acácia, carvalho, eucalipto e pinheiro e 20% afirma não saber o tipo de madeira que utiliza (Fig.34). A tabela 9 é referente à taxa de utilização diária e semanal de lareira aberta.

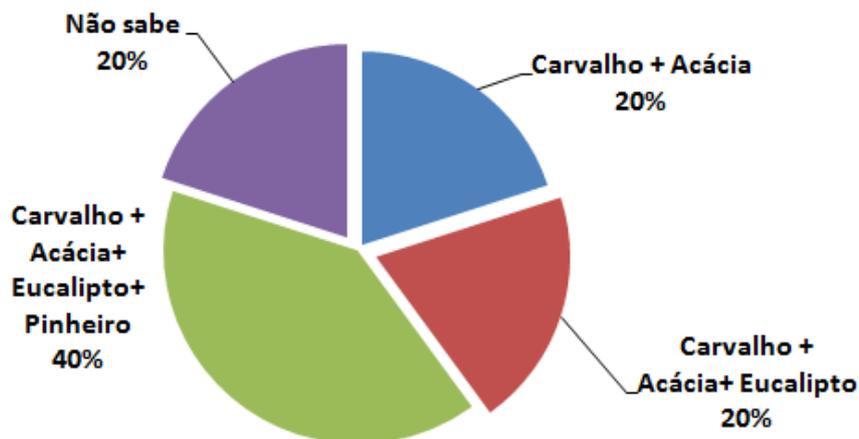


Figura 34 – Tipologia de madeira utilizada pelos utilizadores de lareira aberta



Tabela 9 – Taxa de utilização semanal e diária da lareira aberta

Equipamento	Nº de dias por semana de funcionamento do equipamento	Nº de horas diárias de funcionamento do equipamento
Lareira Aberta	60% - 2 dias/semana 20% - 3 dias/semana 20% - 7 dias/semana	80% - Menos de 4h/dia 20% - Entre 4-8h/dia

No que concerne ao único utilizador de forno a lenha, referente a uma padaria existente no local de estudo, são queimadas entre 7-8 toneladas de eucalipto por inverno, sendo este o único tipo de madeira utilizada. O equipamento funciona 7 dias por semana, ocorrendo queima de madeira entre 4-8 horas por dia.



Figura 35 – Mapeamento das fontes de emissão de combustão residencial identificadas no inquérito (Fonte: Google Maps, maps.google.pt, 2014)

4.7 – Cálculo das Emissões de Partículas

As emissões de partículas foram calculadas com base na seguinte fórmula:

$$\text{Emissões} = \text{Consumo de madeira por inverno} \times \text{Fator de emissão} \times \text{PCI}_{\text{médio}}$$

Em que:

- Emissões de PM10 e PM2,5 (kg)
- Consumo de madeira por inverno (kg)
- Fator de emissão PM10 (kg/MJ); Fator de emissão PM2,5 (g/kg) – neste caso não é necessária a multiplicação pelo $\text{PCI}_{\text{médio}}$ da madeira
- $\text{PCI}_{\text{médio}}$ da madeira = 18,5 MJ/kg (Alves, 2014)

Na tabela 10 são apresentadas as quantidades de madeira consumida por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas.

A tabela 11 é referente aos fatores de emissão utilizados para o cálculo das emissões de partículas. Para as PM10, os fatores de emissão utilizados foram calculados no âmbito do Projeto AIRUSE que, como já foi referido anteriormente, não poderão ser revelados, dado que ainda não foram oficialmente publicados. Para as PM2,5, os fatores de emissão utilizados resultaram de uma média entre os valores calculados para lareira aberta e lareira fechada para as espécies arbóreas predominantes em Portugal, no estudo realizado em 2009 (Capítulo II, 2.4-Fatores de emissão) para a experiência com arranque a frio, por ser a situação mais vulgar.

Tabela 10 – Quantidades de madeira consumidas por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do cenário de referência

<i>Respostas do inquérito pelos utilizadores de lareira aberta</i>	<i>Quantidades assumidas</i>
60% (3 habitações) - Menos de 1 tonelada	700 kg × 3 habitações = 2100 kg
20% (1 habitação) - Entre 1-2 toneladas	1500 kg × 1 habitação = 1500 kg
20% (1 habitação) - Entre 2-4 toneladas	3000 kg × 1 habitação = 3000 kg
	Total = 6600 kg + 7500 kg (Padaria) = 14100 kg

Tabela 11 – Fatores de emissão assumidos para o cálculo das emissões de partículas

	<i>Fator de emissão para PM10</i>	<i>Fator de emissão para PM2,5</i>	<i>Referências</i>
Lareira Aberta	Projeto AIRUSE	14,375 g PM _{2,5} /kg Biomassa	Alves, 2014 Fernandes, 2009
Lareira Fechada	Projeto AIRUSE	11,75 g PM _{2,5} /kg Biomassa	Alves, 2014 Fernandes, 2009
Fogão a Pellets	Projeto AIRUSE		

Tabela 12 – Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o cenário de referência

	<i>Emissões de PM10 (kg)</i>	<i>Emissões de PM2,5 (kg)</i>
Lareira Aberta	222,677	202,688

Para as simulações da dispersão de PM10 a realizar com o VADIS, considerou-se que todas as fontes são pontuais, que emitem em contínuo durante a hora de simulação e que as emissões são efetuadas a 1,5 m acima do edifício onde ocorre a queima de biomassa.

O Anexo I da Portaria nº263/2005 relativo à Parte A- Determinação da Altura das Chaminés através da fórmula geral, informa que a diferença de cotas entre o topo de qualquer chaminé e a mais elevada das cumeeiras dos telhados do

edifício em que está implantada não poderá ser inferior a 3 metros. No entanto, os edifícios da área de estudo não foram abrangidos por esta regra, uma vez que são anteriores ao ano 2005. Na Compilação Legislativa sobre Segurança Contra Incêndios em Edifícios apresentada pela Autoridade Nacional de Proteção Civil, no capítulo V referente à evacuação de gases de combustão, no artigo 93º, é referido que as aberturas de escape de efluentes de combustão devem ser instaladas no mínimo 0,5 m acima da cobertura do edifício. Perante isto, e em conjunto com a observação das chaminés do local de estudo, foi considerado que 1,5 m seria uma altura razoável e representativa da maior parte das chaminés presentes na área de estudo.

A informação expressa nas tabelas 9 a 16 permitiu estimar os cálculos dos caudais mássicos relativos a cada fonte, a utilizar nas simulações.

É necessário, ainda, salientar que devido ao facto de o objetivo principal do presente trabalho se focar, especificamente, no impacte da combustão residencial, as emissões de tráfego não foram consideradas para as simulações, sendo simuladas apenas as emissões referentes à combustão residencial de biomassa.

4.8 - Cenários de Emissão para a Simulação Numérica

Para a simulação numérica foram considerados dois cenários de emissão diferentes do cenário de referência:

1º Cenário de emissão

Pressupõe que os inquiridos que possuem, nas suas habitações, lareira aberta ou fechada e não usufruem do equipamento de combustão de biomassa, passam, no futuro, a usufruir. Com isto, passam a existir mais 16 fontes para além das já existentes no cenário de referência.

Este cenário foi construído com base numa estimativa da procura de biomassa até 2020 como fonte de energia para países da UE27, apresentada pela *European Biomass Industry Association* (EUBIA) (Fig.36), onde se verifica um aumento progressivo dessa tendência ao longo dos anos.

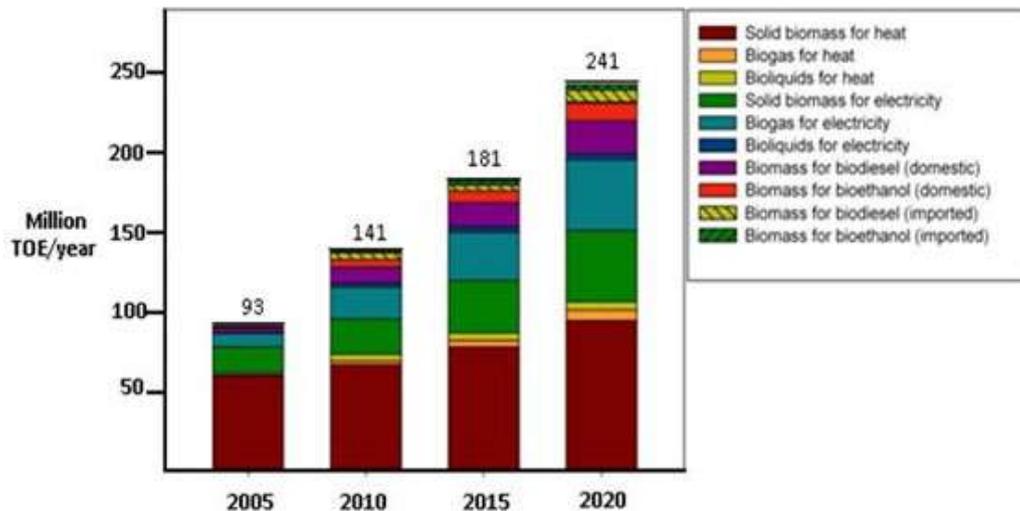


Figura 36 - Estimativa da procura de biomassa como fonte energia nos países da UE27, com base em projeções nacionais de energias renováveis e relatórios sobre eficiência de conversão (Fonte: eubia.org, 2014)

Também na Base de Dados Portugal Contemporâneo, PORDATA, é disponibilizada a variação dos preços da eletricidade para utilizadores domésticos em Portugal ao longo dos anos (Fig.37) e, como se pode verificar, o preço da eletricidade tem vindo a aumentar ao longo dos anos.

A tendência de aumento do preço da eletricidade juntamente com a estimativa de um aumento progressivo na procura de biomassa como fonte de energia, justificam a construção deste cenário, que é passível de vir a acontecer num futuro próximo.

Preços da eletricidade para utilizadores domésticos (€/KWh)

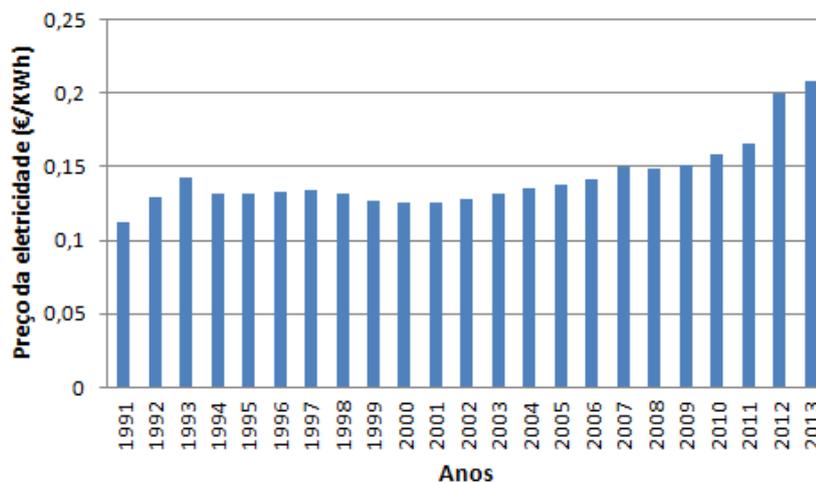


Figura 37 - Variação dos preços da eletricidade para utilizadores domésticos em Portugal (Fonte: pordata.pt, 2014)

Na tabela 13 são apresentadas as quantidades de madeira consumida por inverno, assumidas para o cálculo das emissões de partículas referentes ao 1º cenário de emissão. E de seguida, na tabela 14, evidenciam-se os resultados do cálculo das emissões de partículas para este mesmo cenário.

Tabela 13 - Quantidades de madeira consumidas por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do 1º cenário de emissão

	Quantidades Assumidas
Lareira Aberta	
60% - Menos de 1 tonelada	700 kg × 7 habitações = 4900 kg
20 % - Entre 1-2 toneladas	1500 kg × 2 habitações = 3000 kg
20% - Entre 2-4 toneladas	3000 kg × 2 habitações = 6000 kg
	Total = 13900 Kg
Lareira Fechada	
60% - Menos de 1 tonelada	700 kg × 3 habitações = 2100 kg
20 % - Entre 1-2 toneladas	1500 kg × 1 habitação = 1500 kg
20% - Entre 2-4 toneladas	3000 kg × 1 habitação = 3000 kg
	Total = 6600 kg
	Total = 20500 kg + 14100 kg (cenário de referência) = 34600 kg

Tabela 14- Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o 1º cenário de emissão

	<i>Emissões de PM10 (kg)</i>	<i>Emissões de PM2,5 (kg)</i>
Lareira Aberta	219,519	199,813
Lareira Fechada	40,481	77,55
Total	260 + 222,677 (cenário de referência) = 482,677	277,363 + 202,688 (cenário de referência) = 480,051

2º Cenário de emissão

Pressupõe que 20% da população inquirida que afirmou usar aquecedor elétrico independente como equipamento de aquecimento, passa a usar fogão a pellets (20% de 43 habitações = 9 habitações).

Este cenário foi construído com base em relatórios da Associação Nacional de Pellets Energéticos de Biomassa (ANPEB) que afirmam que a comercialização de

equipamentos de aquecimento a pellets está a aumentar, ainda que esse aumento não se demonstre significativo. Este facto justifica a percentagem definida de população a utilizar este tipo de equipamento. A idealização deste cenário tem como objetivo avaliar o impacte deste tipo de equipamentos nas concentrações de PM10 locais.

Na tabela 15 são apresentadas as quantidades de pellets consumidos por inverno, assumidas para o cálculo das emissões de partículas referentes ao 2º cenário de emissão. E de seguida, na tabela 16, evidenciam-se os resultados do cálculo das emissões de partículas para este mesmo cenário.

Tabela 15 - Quantidades de pellets consumidos por inverno assumidas para o cálculo das emissões de partículas do 2º cenário de emissão

	Quantidades assumidas
Fogão a pellets	
60% - 2 sacos de 15 kg/semana	$30 \text{ kg} \times 17,14 \text{ semanas} \times 5 \text{ habitações} = 2571 \text{ kg}$
20% - 3 sacos 15 kg/semana	$45 \text{ kg} \times 17,14 \text{ semanas} \times 2 \text{ habitações} = 1542,6 \text{ kg}$
20% - 8 sacos 15 kg/semana	$120 \text{ kg} \times 17,14 \text{ semanas} \times 2 \text{ habitações} = 4113,6 \text{ kg}$
	Total = 8227,2 kg

Tabela 16 - Resultados dos cálculos das emissões de partículas para o 2º cenário de emissão

	Emissões de PM10 (kg)
Fogão a pellets	8,846
Total	$8,846 + 222,677 \text{ (cenário de referência)} = 231,52$

CAPÍTULO V

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 – Resultados das simulações numéricas referentes ao 1º cenário meteorológico

5.1.1 - Com cenário de referência de emissão de partículas

O primeiro resultado obtido através da aplicação do VADIS é o campo de ventos, através do módulo FLOW. Para tal, as simulações foram realizadas numa base temporal horária, 22-23h, sendo esta considerada uma hora propícia à utilização de equipamentos de queima residencial de biomassa. Foi necessário ainda, definir a velocidade e direção do vento que, para esta simulação foram de 150° e 1 m/s, assim como a altura (40 m), largura (888 m) e comprimento (888 m) do domínio, sendo estas dimensões transversais a todas as simulações efetuadas.

Na Fig.38 está representado, através do programa Surfer, o campo de ventos obtido para uma altura de corte de 1,5 m. Através desta representação obtêm-se dois tipos de informação: os vetores indicam a direção e o sentido do escoamento atmosférico que, tal como se observa, desloca-se de sudeste para noroeste (SE-NO); a gradação de cores é relativa à intensidade do vento, verificando-se que uma grande parte da área de estudo regista valores de velocidade entre os 0,1 e os 0,4 m/s, sendo os valores máximos entre 0,7 e 0,8 m/s.

Analisando especificamente o escoamento atmosférico na área onde está localizada a Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (Fig.39) (onde são registadas altas concentrações de PM10 para a hora simulada), observa-se que no local exato da estação não existe recirculação do escoamento (fator que poderá favorecer a acumulação de poluentes atmosféricos), e a presença de árvores (representadas a verde) parece não influenciar a velocidade do vento que é, aqui, de sensivelmente 0,3 m/s. Já nas imediações da estação, verifica-se a influência dos edifícios que, pelas suas configurações, provocam fenómenos de recirculação de ar e uma atenuação na velocidade do vento.

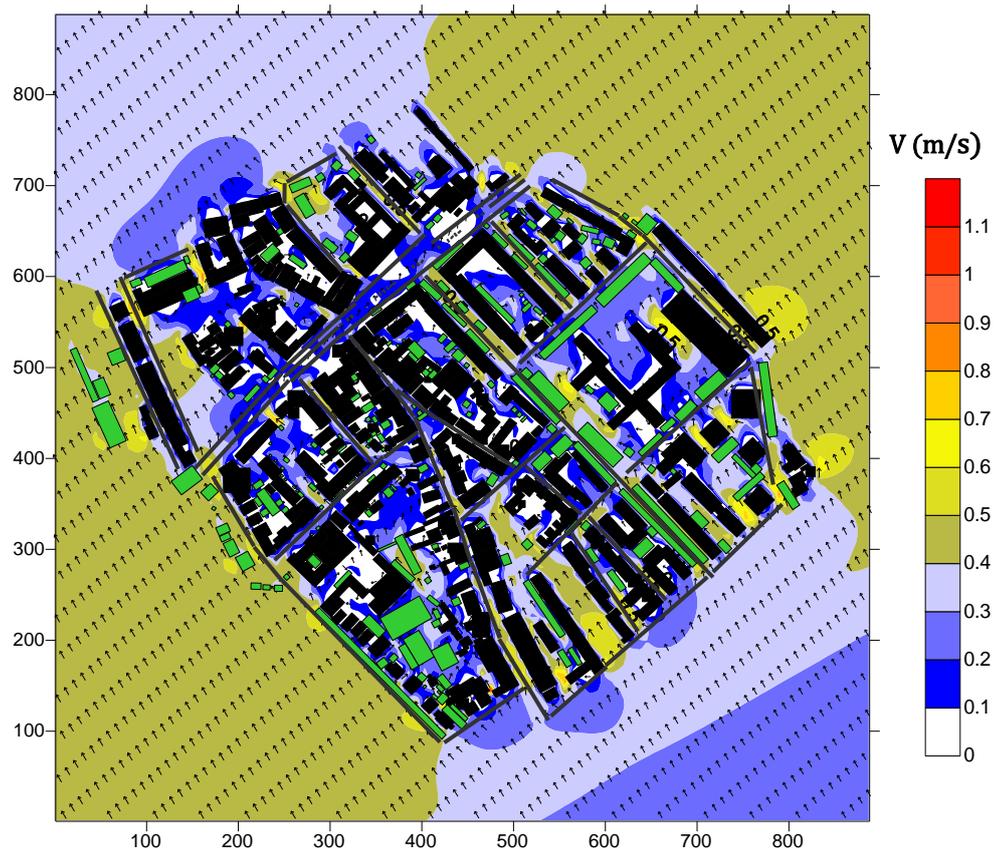


Figura 38 – Representação do campo de ventos no programa Surfer, para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s

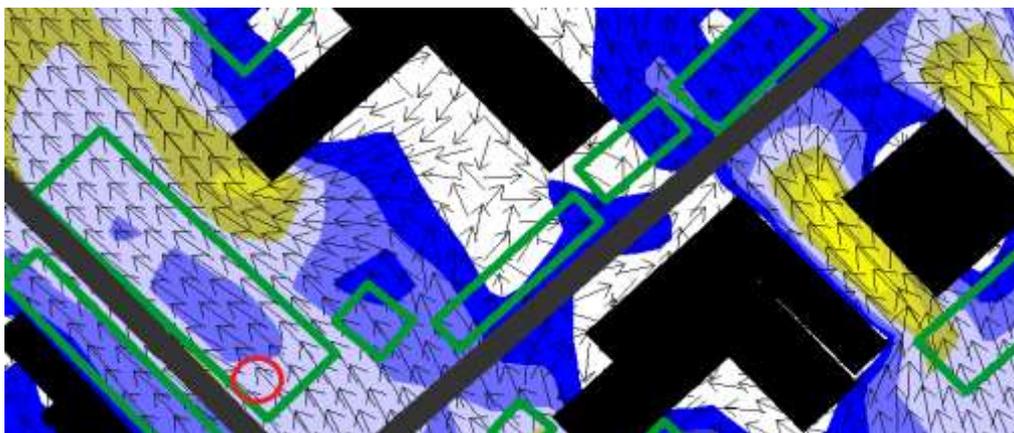


Figura 39 – Representação do escoamento atmosférico na área na Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho) para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s



Posteriormente à obtenção dos campos de ventos, a definição das fontes consideradas e os respetivos caudais mássicos de emissão, permitiram as simulações com o módulo DISPER, obtendo-se os campos de concentrações de PM10 para a área de estudo.

A representação dos campos de concentração foi também realizada com o programa Surfer, para a mesma altura de corte, e é apresentada na Fig.40.

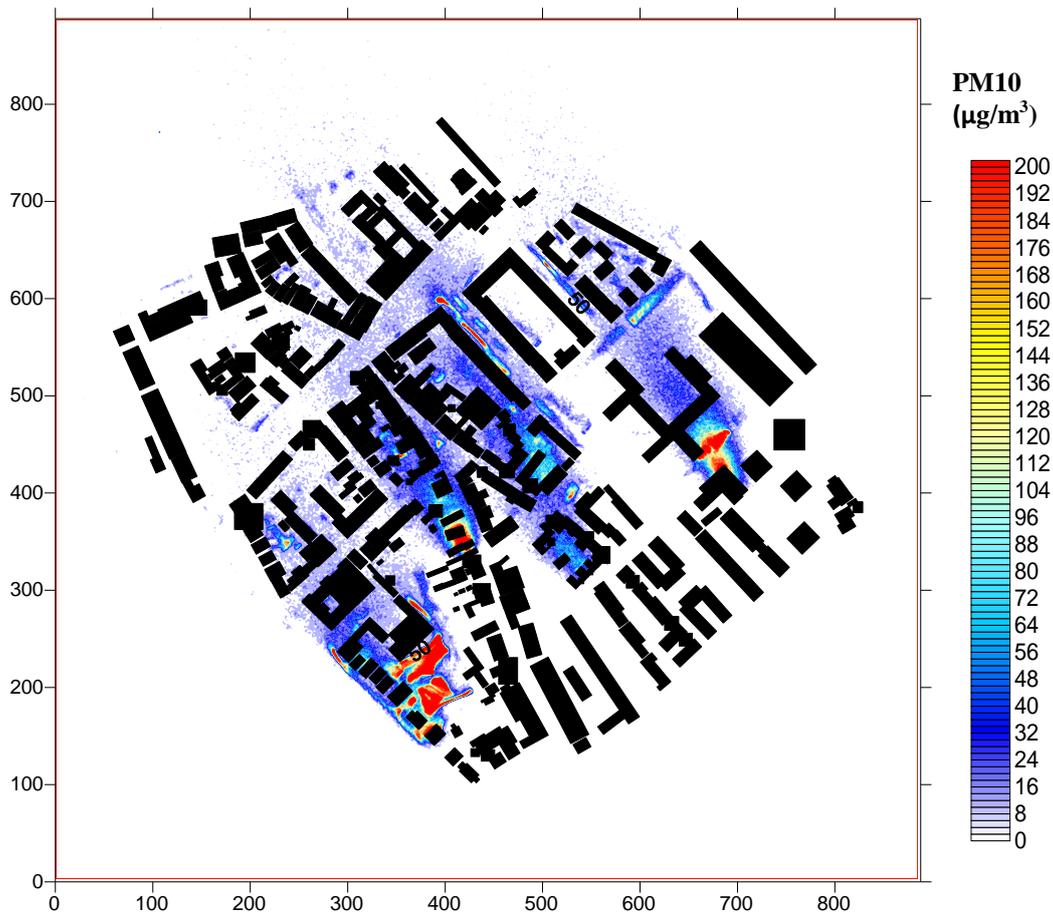


Figura 40 – Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com cenário de referência de emissões de partículas

Para esta simulação, verifica-se que a concentração de partículas acompanha o escoamento atmosférico, que se desloca para noroeste (tal como demonstrado no campo de ventos); a existência de alguns *hot-spots* na área de estudo, onde as concentrações máximas de PM10 são atingidas, com valores de 200 µg/m³; a generalidade do local de estudo apresenta concentrações de PM10 que variam entre 10 e 50 µg/m³. Nota-se também a influência da configuração dos edifícios



sobre as concentrações de PM10, pois estas junto aos edifícios, aumentam para valores próximos das 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Contudo, o local junto à EQA apresenta valores nulos de concentração de PM10 (Fig.41).

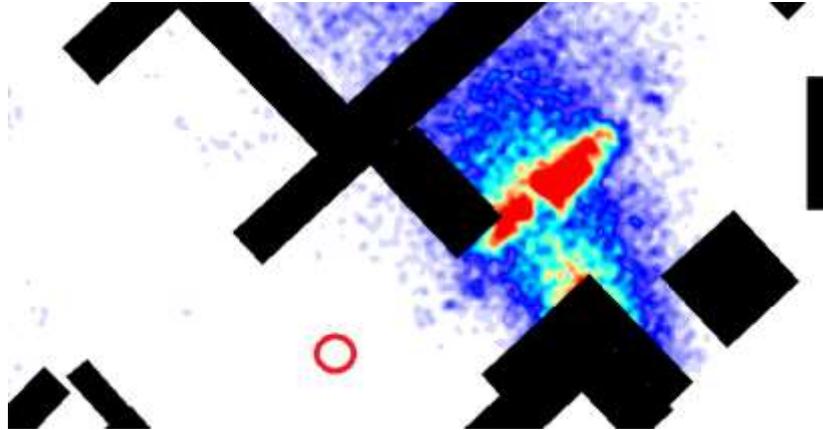


Figura 41 – Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, junto à Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho) para a simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com cenário de referência de emissão de partículas

É importante referir que há um conjunto de fatores que podem ter influenciado os resultados obtidos, sendo que são comuns às simulações realizadas:

- **Dados Meteorológicos** - Estes foram fornecidos em médias temporais de 10 em 10 minutos, e posteriormente transformados em médias horárias. O que significa que os valores utilizados de velocidade e direção do vento (1 m/s, 2,5 m/s, 150°, 350°, respetivamente), estaticamente são valores representativos do comportamento típico da velocidade e da direção do vento para o período onde se registaram altas concentrações de PM10, contudo têm um desvio padrão associado que representa a variabilidade das observações em relação à média. A variação da direção e da velocidade do vento, durante a hora de simulação, para cada um dos cenários meteorológicos é apresentada nas Fig.42 e Fig.43.

Sabendo que a direção e velocidade do vento são parâmetros importantes para a definição do comportamento do escoamento atmosférico (campo de ventos), o facto de se ter considerado uma média horária da direção e da velocidade do vento na simulação, quando na realidade foram registadas flutuações nos valores destes parâmetros (portanto, vários comportamentos do escoamento

atmosférico) poderá, de alguma forma, originar uma inexactidão dos resultados obtidos, nomeadamente no que diz respeito à distribuição especial das partículas, mais especificamente na localização dos *hot-spots*.

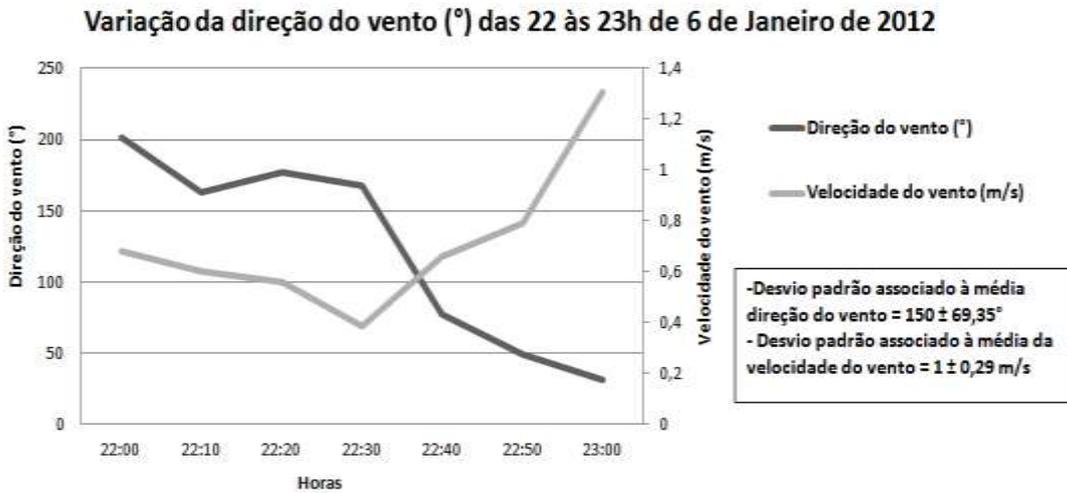


Figura 42- Variação da direção e velocidade do vento, durante a hora de simulação, referente ao 1º cenário meteorológico

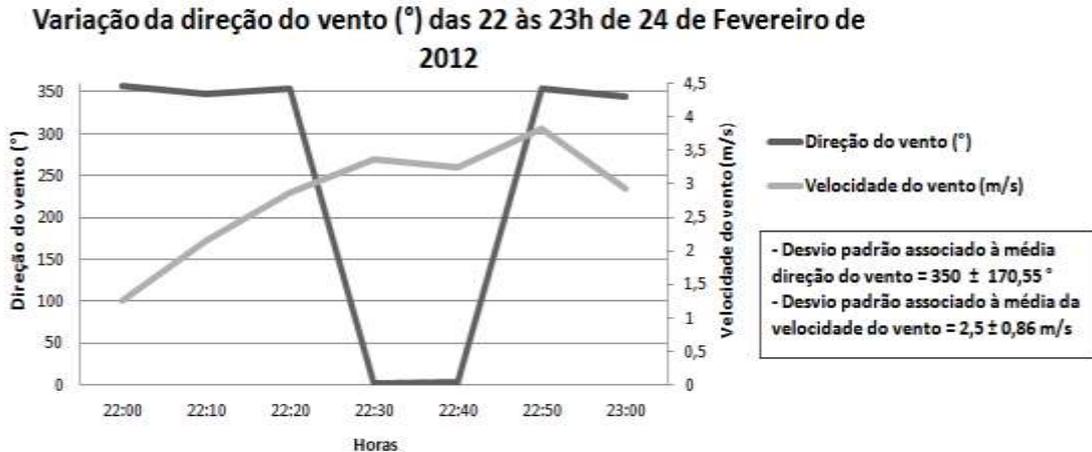


Figura 43 - Variação da direção e velocidade do vento, durante a hora de simulação, referente ao 2º cenário meteorológico

- **Altura das emissões** - Foi considerado que todas as emissões referentes à combustão de biomassa seriam efetuadas 1,5 m acima do edifício onde ocorre a queima, o que pode não corresponder à realidade.

A evacuação dos gases e partículas é uma consequência da diferença de pressão entre os gases quentes no interior da chaminé e a coluna de ar exterior, à altura da chaminé. O ar introduz-se na base da chaminé empurrando os gases para o exterior. Sabe-se que a velocidade do vento é mais constante e elevada quanto maior for a altitude, e quanto maior for a altura da chaminé mais facilmente os gases de combustão são extraídos (Princípio de Bernoulli aplicado às chaminés). Ao pressupor a altura da emissão 1,5 m acima do edifício, assume-se que a conceção das chaminés não está de acordo com a atual legislação (que impõe que a diferença de cotas entre o topo de qualquer chaminé e a mais elevada das cumeeiras dos telhados dos edifícios onde está implantada não pode ser inferior a 3 m) e, portanto, a exaustão de gases e partículas não é tão eficaz.

- **Temperatura** – É sabido que, durante o inverno, à noite, a temperatura junto à superfície baixa rapidamente, criando uma camada de ar frio (inversão térmica) e, como esta é mais densa, tende a não seguir a convecção natural das massas de ar, impedindo o seu movimento ascendente, fazendo com que os poluentes se mantenham próximos da superfície. Verifica-se que, esta parece ser uma situação que é comum a todos os episódios de altas concentrações de PM₁₀ analisados, onde as temperaturas baixam significativamente a partir de uma determinada hora, a partir do qual as concentrações de PM₁₀ e NO_x começam a aumentar. No entanto, para verificar, com certeza, a existência de fenómenos de inversão térmica seria necessária a obtenção de um perfil vertical de temperatura associado aos dias em análise.

A temperatura não foi um parâmetro considerado para a simulação numérica da dispersão de PM₁₀, uma vez que o VADIS carece de validação adicional no seu módulo térmico, em particular em condições de estratificação térmica. Sabendo que a temperatura intervém na química dos poluentes e desempenha também um papel importante na sua dispersão vertical na atmosfera, o facto de não ter sido um parâmetro considerado para as simulações efetuadas, principalmente quando há indícios da existência de fenómenos de inversão térmica, pode ter influenciado

os resultados obtidos, nomeadamente no que diz respeito aos valores das concentrações de PM10.

○ **Emissões de partículas** – O cálculo das emissões referentes à combustão de residencial de biomassa foi conseguido através da realização do inquérito à população residente no local de estudo. Apesar de se considerar que o número de equipamentos de combustão de biomassa identificados no inquérito é representativo para a área de estudo, podem existir, de facto, mais equipamentos em funcionamento do que aqueles que foram considerados para o cálculo das emissões de partículas. Isto significa que, nas simulações consideradas pode ter existido uma subestimação das emissões de partículas.

Foi realizada, ainda, uma análise de sensibilidade ao modelo: foi aumentado o número de partículas (quanto maior o número de partículas numéricas libertadas no escoamento, maior será a representatividade, em termos de massa emitida de poluente) e o *time-step* (período de tempo relativo a cada ciclo de cálculo da dispersão) foi diminuído com o intuito de aumentar a precisão dos resultados obtidos. Os resultados desta análise permitiram concluir que nenhum destes parâmetros influenciou, de forma notória, as simulações efetuadas.

5.1.2 - Com 1º cenário de emissão de partículas

A simulação referente a este cenário de emissão de partículas foi realizada para mesmas condições que o anterior, ou seja, com uma base temporal horária (22-23h) e com o mesmo número de partículas numéricas e o mesmo *time-step*. O campo de ventos para este cenário é igual ao do cenário de referência estando representado na Fig.38.

Posteriormente à definição das fontes para este cenário de emissões e os respetivos caudais mássicos, foi obtido o campo de concentrações de PM10 representado na Fig.44 para uma altura de corte de 1,5 m.

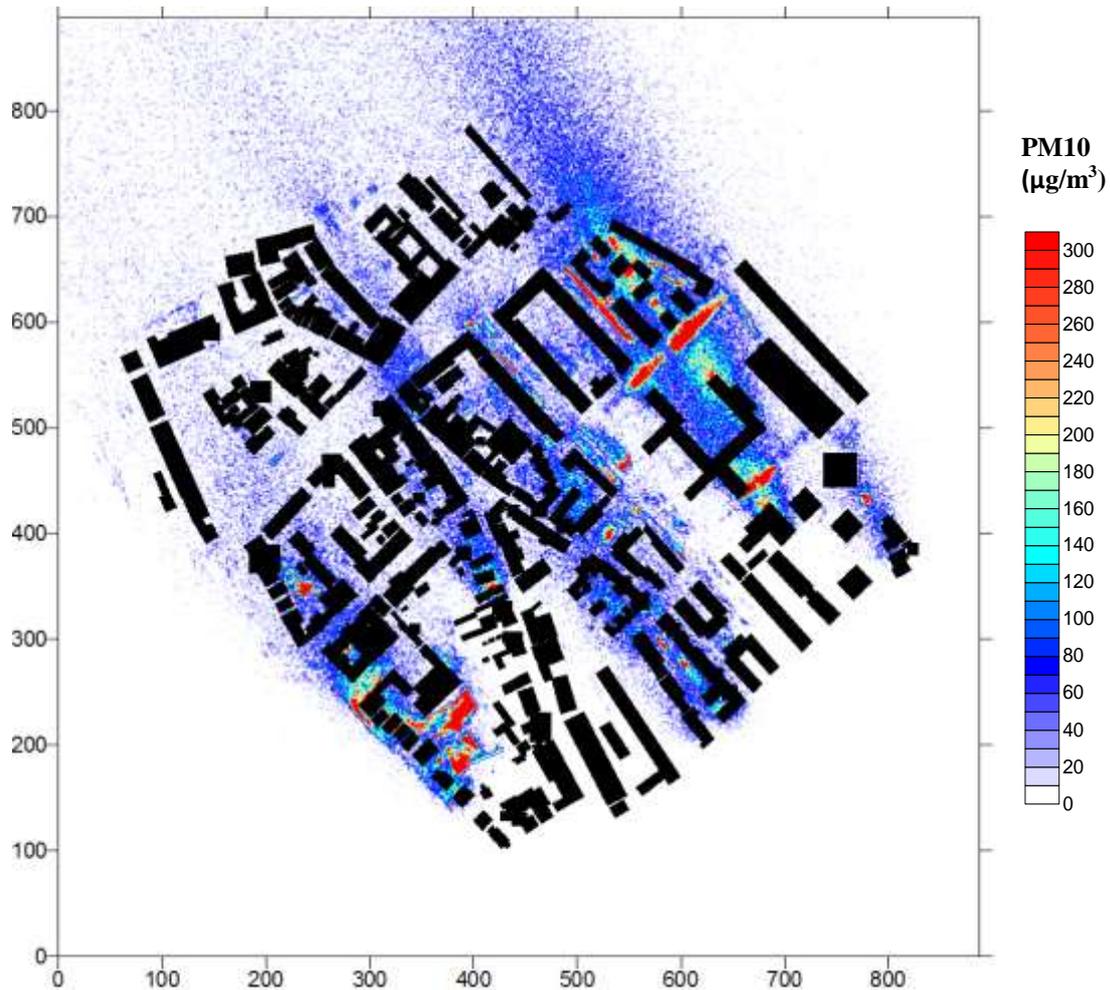


Figura 44 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com o 1º cenário de emissão de partículas

Para esta simulação, observa-se que a concentração de partículas, tal como para o cenário de referência de emissões de partículas, acompanha o escoamento atmosférico, deslocando-se para noroeste; verifica-se a formação de um maior número de *hot-spots* comparativamente com o cenário de referência, sendo que, nestes locais, as concentrações são agora de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; a área onde se registam concentrações nulas é menor em relação ao cenário anterior, ou seja, a área afetada é maior; a generalidade do local de estudo apresenta concentrações de PM10 que variam entre 10 e 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A influência das árvores e dos edifícios na formação de *hot-spots* é notória, pois verifica-se que estes são formados juntos aos edifícios e em locais onde existe abundância de árvores (Fig.40 e Fig.44).

5.1.3 - Com 2º cenário de emissão de partículas

Esta simulação também foi realizada para as mesmas condições que o cenário de referência de emissão de partículas sendo que o campo de ventos está representado na Fig.38. Para a definição das fontes associadas a este cenário, de entre todas as habitações associadas ao uso de aquecedor elétrico independente, foram escolhidas, ao acaso (uma vez que, no inquérito não foi incluída nenhuma questão sobre a possibilidade de no futuro, o inquirido adquirir este tipo de equipamento de combustão e, portanto, não há qualquer informação sobre quais as habitações disponíveis para o efeito), as 9 habitações, com os respetivos caudais mássicos associados.

Posteriormente, foi obtido o campo de concentrações de PM10, representado na Fig.45. Nesta, observa-se que o campo de concentrações de PM10 é muito idêntico ao obtido para a simulação com o cenário de referência: a concentração de partículas acompanha o escoamento atmosférico deslocando-se para noroeste; os *hot-spots* formados situam-se nos mesmos locais e com concentrações também de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; a generalidade da área de estudo apresenta concentrações de PM10 que também variam entre 10 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

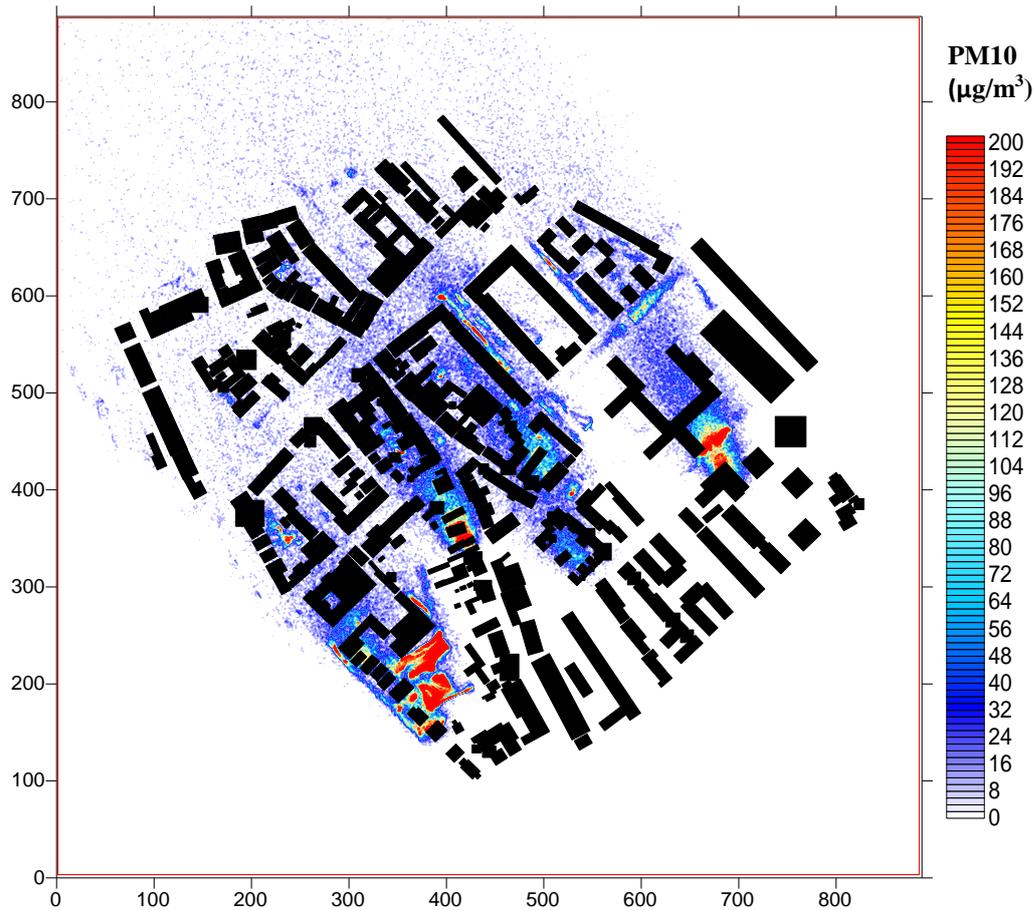


Figura 45 - Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 150° e 1 m/s e com o 2º cenário de emissão de partículas

5.2 - Resultados da simulação numérica referentes ao 2º cenário meteorológico com cenário de referência de emissão de partículas

Esta simulação efetuou-se de modo análogo à simulação anteriormente apresentada, tendo desta vez a direção do vento um valor de 350° e 2,5 m/s de velocidade. Os resultados obtidos acerca do campo de ventos foram analisados, igualmente, com o programa Surfer e estão representados na Fig.46. Nesta, observa-se que a direção do escoamento atmosférico faz-se, agora, de noroeste para sudeste (situação inversa à 1ª simulação); a velocidade do vento é nula ou com valores até os 0,2 m/s junto dos edifícios, aumentando progressivamente o seu valor com a distância aos edifícios, sendo 0,8-1,4 m/s a gama de valores de velocidade do vento mais sentida na área de estudo.

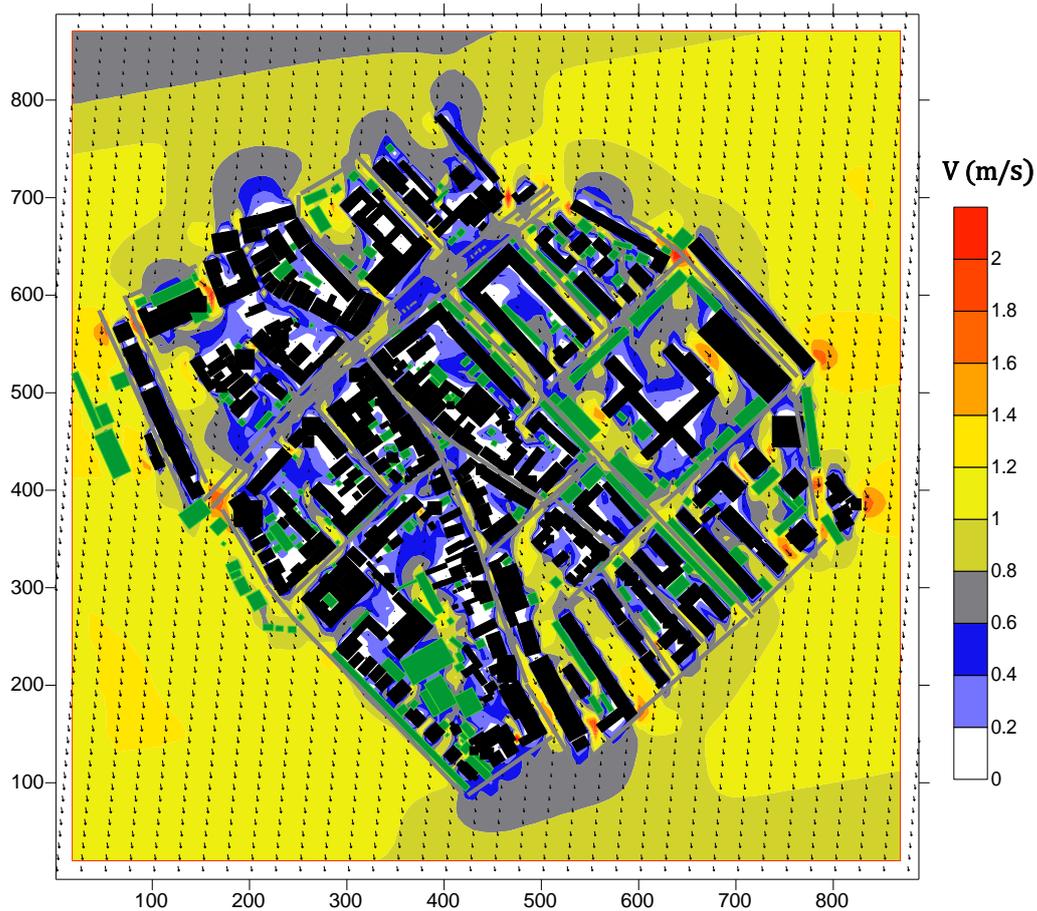


Figura 46- Representação do campo de ventos no programa Surfer, para a simulação com ventos de 350° e 2,5 m/s e com cenário de referência de emissão de partículas

No local junto à EQA (Fig.47), verifica-se que há recirculação de ar e abrandamento da velocidade do vento próximo das árvores, duas situações que são propícias à não dispersão dos poluentes atmosféricos.

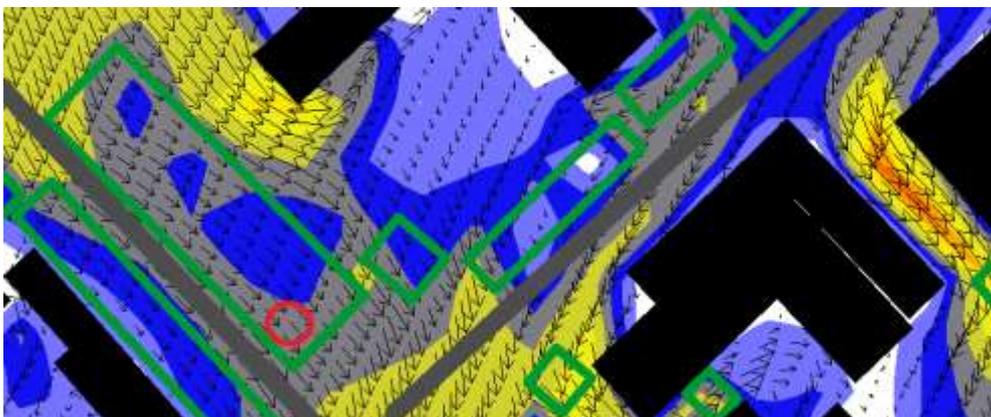


Figura 47 - Representação do escoamento atmosférico na área na Estação de Monitorização da Qualidade do Ar (círculo vermelho), para a simulação com ventos de 350° e 2,5 m/s



Posteriormente, de forma análoga à simulação anterior, foi obtido o campo de concentrações de PM10 para a área de estudo, representado na Fig.48.

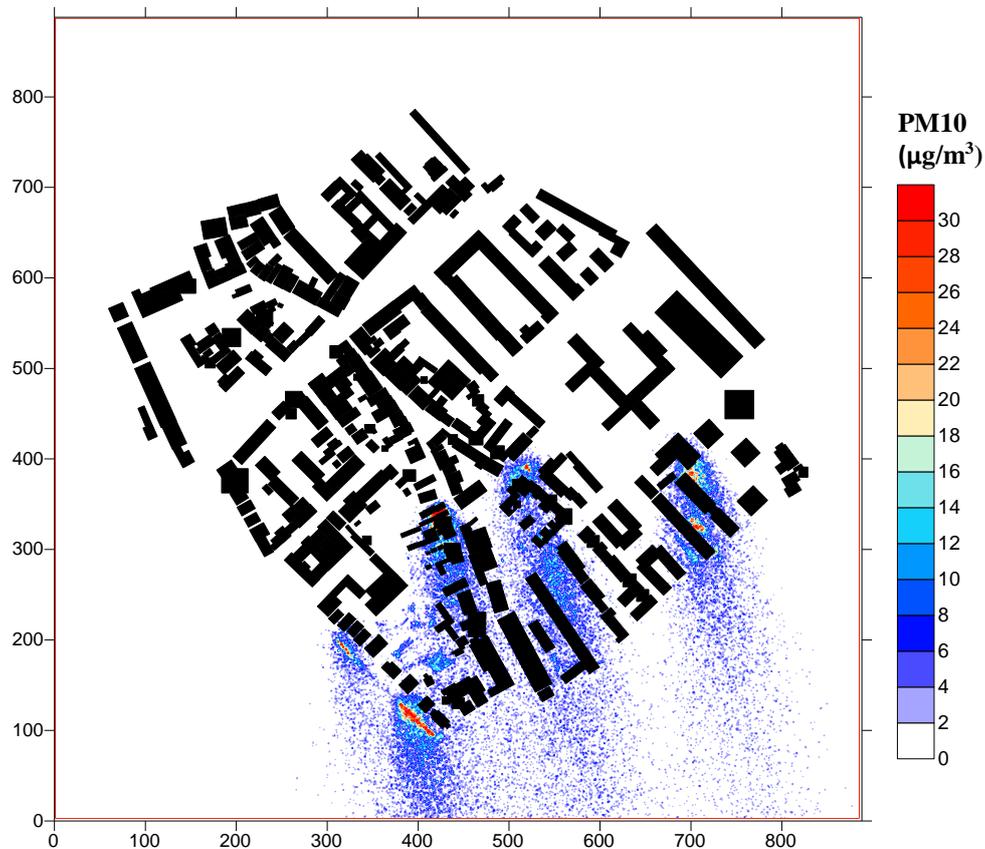


Figura 48 – Representação do campo de concentrações de PM10 no programa Surfer, relativamente à simulação com ventos de 350° e $2,5 \text{ m/s}$ e com cenário de referência de emissão de partículas

Nesta, verifica-se que devido à velocidade do vento ser maior e ter direção sudeste (SE), as partículas são transportadas para a zona mais a sudeste do domínio de estudo, levando aí à formação de *hot-spots*. Nestes locais, a concentração máxima de PM10 é de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a gama de valores de concentração que mais abrange o domínio é entre $4\text{-}8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. É de notar que as concentrações têm valores que, neste caso, não ultrapassam o valor limite diário para as PM10 que é de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Analisando a área junto à EQA, observa-se que as concentrações de PM10 continuam a ser nulas, tal como sucedido na simulação do primeiro cenário meteorológico.

Para este cenário meteorológico não foram realizadas simulações para os dois cenários de emissão de partículas, uma vez que o comportamento do escoamento atmosférico iria ser o mesmo que o evidenciado para o cenário de referência de emissão, ou seja, prevê-se também haver transporte das partículas (visto que a velocidade do vento é elevada) para a zona mais a sudeste da área de estudo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

A combustão da biomassa florestal é cada vez mais utilizada no setor doméstico, nomeadamente como fonte de energia para aquecimento. Sabe-se que esta tem um grande impacto na qualidade do ar, devido à emissão de poluentes atmosféricos, nomeadamente material particulado, que assume um papel importante devido às consequências que acarreta para o ambiente e saúde humana.

Com isto, o objetivo da presente dissertação envolveu em primeiro lugar uma caracterização da população da área de estudo relativamente ao uso de equipamentos para combustão de biomassa, para posteriormente realizar um estudo detalhado do impacte na qualidade do ar, nomeadamente no que se refere às PM10, resultante da utilização desses mesmos equipamentos.

Para alcançar os objetivos propostos foi realizado um inquérito e a sua análise permitiu concluir que a maioria da população residente na área de estudo usa equipamentos de aquecimento, sendo o aquecedor elétrico independente o mais vulgarmente utilizado. Apesar de os inquiridos utilizarem aquecedor elétrico independente, 25% destes afirma possuir uma lareira aberta na sua habitação e 12% lareira fechada, cuja utilização é muito esporádica. Relativamente a equipamentos de combustão de biomassa, a taxa de utilização é de apenas 10%, sendo que a lareira aberta é o único equipamento utilizado. A maioria dos inquiridos que afirmam usufruir da lareira aberta, usam uma mistura de vários tipos de madeira, sendo “menos de uma tonelada” a resposta mais utilizada quanto às quantidades de biomassa consumidas por inverno.

Posteriormente utilizou-se o modelo CFD VADIS, que permite um elevado detalhe espacial e um conhecimento pormenorizado das condições de escoamento atmosférico e, conseqüente efeito sobre a dispersão de poluentes. Para as simulações numéricas realizadas foram utilizados dois cenários meteorológicos diferentes resultantes de uma análise meteorológica para os dias onde, na estação de monitorização da qualidade do ar presente na área de estudo, foram registadas altas concentrações de PM10, durante os meses de inverno de 2012. Essa análise permitiu concluir que as duas situações meteorológicas

predominantes, durante os períodos analisados, são ventos Sudeste (150°) e ventos Norte (350°) com velocidades médias de 1 m/s e 2,5 m/s, respetivamente.

Para cada cenário meteorológico, foram simuladas: as emissões de referência, obtidas através do inquérito realizado à população da área de estudo; as emissões referentes ao primeiro cenário de emissão, que admite uma maior utilização de equipamentos de combustão de biomassa por parte dessa mesma população e as emissões referentes ao segundo cenário de emissão que admite que 20% dos inquiridos que afirmaram usar o aquecedor elétrico independente como equipamento de aquecimento passam a usar fogão a pellets.

Os resultados obtidos através das simulações numéricas da dispersão de PM₁₀ realizadas com VADIS, no local de estudo, para o cenário de referência, permitiram concluir que:

1. A combustão residencial de biomassa poderá exercer um impacte significativo na qualidade do ar da área de estudo, pois evidenciou-se a formação de *hot-spots* com concentrações horárias de PM₁₀ $\approx 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para um dos cenários meteorológicos (vento com 150° e velocidade de 1 m/s), sendo este valor 4 vezes superior à média diária definida na legislação ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e 5 vezes superior à média anual ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
2. No local onde está situada a EQA, as concentrações de PM₁₀ associadas à queima residencial são nulas, contudo há um conjunto de fatores que poderão ter tido influência nos resultados obtidos, podendo haver alguma inexatidão no que se refere aos valores de concentração de PM₁₀ obtidos e, em relação à localização dos *hot-spots*.

Os resultados obtidos através das simulações numéricas da dispersão de PM₁₀ realizadas com VADIS, no local de estudo, para o primeiro cenário de emissão permitiram concluir que aumentando a utilização de lareiras abertas e fechadas como equipamentos de combustão de biomassa, o impacte associado é significativamente maior ao impacte evidenciado para o cenário de referência, uma vez que os *hot-spots* formados evidenciaram concentrações de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas conclusões vêm reforçar, mais ainda, a ideia de que é necessária a implementação de medidas legislativas de carácter preventivo a este impacte,

nomeadamente no que concerne à certificação de equipamentos de combustão residencial de biomassa.

Relativamente ao segundo cenário de emissão de partículas, a simulação realizada permitiu concluir que as emissões de partículas inerentes ao uso de fogão a pellets têm uma influência reduzida no total de concentrações de PM10 registadas, comparativamente ao cenário de referência (por cada quilograma de madeira queimada, no cenário de referência, são emitidos 0,0158 kg/PM10, enquanto que por cada quilograma de pellets queimadas são emitidos 0,001 kg/PM10). Essa influência não é perceptível nos resultados analisados através do programa Surfer, uma vez que se observou que o campo de concentrações de PM10 é muito idêntico ao registado para a simulação com o cenário de referência, sendo a localização dos *hot-spots* formados a mesma e as concentrações aí registadas também são as mesmas (200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Conclui-se então, que os fogões a pellets são equipamentos de combustão de biomassa que, no que diz respeito às PM10, têm um impacte muito reduzido na qualidade do ar local. Esta conclusão vem reforçar também a ideia de que é necessário criar regulamentação, com base em promover gradualmente a utilização destes sistemas a biomassa mais eficientes.

Para trabalho futuro propõe-se a simulação de um cenário de emissão que admita também a utilização de fogões a pellets como equipamentos de aquecimento sendo o seu uso extrapolado para toda a área de estudo. Para tal, incluir-se-ia a realização de um inquérito à população residente no local de estudo sobre a predisposição desta em adquirir este tipo de equipamento de combustão residencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Alves C., “*Action B4 – Emission profiles for biomass burning*”, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2014 (*Documento ainda não publicado)

Alves C., Gonçalves C., Fernandes A.P., Tarelho L., and Pio C., “*Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types*,” *Atmospheric Research*, vol. 101, pp. 692-700, 2011

Amorim JH., Miranda, AI & Borrego C., “*Modelação numérica da dispersão de poluentes atmosféricos no centro de Lisboa*”, Actas da VIII Conferência Nacional de Ambiente. Lisboa – Portugal, 2003

Amorim J.H., Rodrigues V., Tavares R., Valente J., Borrego C., “*CFD Modelling of the Aerodynamic Effect of Trees on Urban Air Pollution Dispersion*”, *Science of the Total Environment* 461–462, 541-551, 2013

Borrego, C., Martins, J.M., Lemos, S. and Guerreiro, C., “*Second generation Gaussian dispersion model: the POLARIS model*”. *International Journal of Environment and Pollution* 1997 - Vol. 8, No.3/4/5/6 pp. 789 – 795, 1997

Borrego C., Tchepel O., Costa A.M., Amorim J.H., Miranda A.I., “*Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale*”, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 5197-5205, 2003

Borrego C., Valente J., Carvalho, A. E. Lopes M., and Miranda A.I., “*Contribution of residential wood combustion to PM10 levels in Portugal*”, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 642-651, 2010

Carvalho N.P.R., “*Implementação do plano de controlo, inspeção e ensaio na produção de pellets de madeira*”, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, 2011

Centro da Biomassa para a Energia, “*Atlas da Biomassa Florestal Residual produzida em Portuga Continental*”, 2007

Costa, A.M.L.L., “*Modelação de microescala da exposição a poluentes atmosféricos em áreas urbanas*”, Tese de doutoramento, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2008

DGEG - Direção Geral e Energia e Geologia, "Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico", 2011

Duarte M.A.C., "Emissões de compostos carbonosos pela queima doméstica de biomassa", Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2011

EEA, European Union emission inventory report 1990–2010 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). European Environment Agency, 2012

EPA, *Emission Inventory Improvement Program, EIIP: "Residential Wood Combustion"*, Volume III, Capítulo 2, *United States Environmental Protection Agency, 2001.*

Fernandes A.P., Alves C.A., Goncalves C., Tarelho L., Pio C., Schimdl.C , Bauer H., "Emission factors from residential combustion appliances burning Portuguese biomass fuels," *J Environ Monit*, vol. 13, pp. 3196-206, Nov 2011.

Fernandes A. P. S., "Emissão de PM_{2,5} e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa", Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2009

Ferreira M. C. C., "Consumo Doméstico de Biomassa Lenhosa e Emissões Atmosféricas na cidade de Bragança", Escola Superior Agrária Instituto Politécnico de Bragança Bragança 2012.

Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B., "*COST 732 - Best Practise Guideline CFD Modelling*", COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007

Gelencsér A. "*Carbonaceous Aerosol*", Springer: Dordrecht, Netherlands. ISBN: 1-4020-2886-5., 2004

Gonçalves C.V.M., "Contribuição da combustao de biomassa na emissao de poluentes.", Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2011.

Gonçalves C., Alves C., Fernandes A.C., Monteiro C., Tarelho L., MEvyugina, *et al.*, "*Organic compounds in PM_{2.5} emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species*", *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 4533-4545, 2011

Rodrigues V.A.M., "Simulação do efeito da vegetação na qualidade do ar em zonas urbanas", Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2009.

Sobral S., "Fábrica de briquetes/peletes – Implementação na região Alentejo", Seminário: Fileira de biomassa em três regiões da Europa, 2000.

Karve P., "*A Report solstice*", Conference on Biomass-Based Fuels and Cooking Systems (BFCS), 2000

McDonald J.D., Zielinska B., Fujita E.M., Sagebiel J.C., Chow J.C., Watson J.G., "*Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion*", Environmental Science and Technology 34, 2080–2091, 2000.

Monteiro A., Miranda A.I., Borrego C, and Vautard R., "*Air quality assessment for Portugal*", *Sci Total Environ*, vol. 373, pp. 22-31, Feb 1 2007

Moussiopoulos N., Berge E., Bohler T., Leeuw F., Gronskei K.N., Tombrou M., "*Ambient Air Quality, Pollutant Dispersion and Transport Models*", EEA, Copenhagen, 1996.

Rabaçal M.E.R:F., "Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas", Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

Trozzi C., "*Small Combustion*", EEA, Emission Inventory Guidebook., 2009.

Vallero, D., "*Fundamentals of Air Pollution*", 4ª Edição, Elsevier, Londres – Reino Unido, 2008

Vardoulakis S., Fisher, B.E., Pericleous K., Flesca N.G., "*Modelling air quality in street canyons: a review*", Atmospheric Environment, 37 [155 – 182], 2002.

Williams A., Jones J.M., Ma L., Pourkashanian M., "*Pollutants from the combustion of solid biomass fuels*", Prog. Energy Combustion. Sci., 38:113-137, 2012

Sítios na Internet :

- www.apambiente.pt, 2013
- www.qualar.apambiente.pt, 2013
- www.portugal.gov.pt, 2013
- www.epa.gov, 2014
- www.anpeb.pt, 2014
- www.eubia.org, 2014
- www.pordata.pt, 2014
- www.maps.google.pt, 2014

ANEXOS

Anexo A

Inquérito

Utiliza Equipamento de Aquecimento em casa? Sim Não

Se respondeu Sim indique qual o equipamento que utiliza:

Lareira Aberta Lareira Fechada (com recuperador de calor)

Aquecimento central Aquecedor elétrico independente

Outro Qual? _____

Qual o combustível utilizado?

Lenha Eletricidade Gasóleo Outro Qual? _____

Se respondeu Lenha indique qual o tipo de madeira que utiliza:

Pinheiro Eucalipto Carvalho Acácia Outro

Qual? _____

Que quantidade de combustível gasta, em média, por Inverno?

Lenha: Menos de 1ton 1-2 ton

2-4 ton Mais de 4ton

Gasóleo: Menos de 1000L 1000-2000L

2000-4000L Mais de 4000L

Outra Qual? _____

Quantas horas, em média, funciona o equipamento por dia?

Menos 4 horas 4-8 horas Mais de 8 horas

Quantos dias por semana utiliza o equipamento? _____

Anexo B



Departamento de Ambiente e Ordenamento
Ano letivo 2013/2014

Sara Mendes Pereira, aluna de Mestrado de Engenharia do Ambiente da Universidade de Aveiro, está a realizar a dissertação intitulada “*Impacte da queima residencial de biomassa na qualidade do ar*”, orientada pela Prof. Dra. Myriam Lopes e pelo Prof. Dr. Jorge Humberto Amorim.

Pretende-se com este trabalho fazer um estudo mais detalhado sobre o impacte que a utilização de diversos tipos de biomassa (lenha, pellets) e diferentes sistemas de queima (lareira aberta, lareira fechada, fogão de pellets) têm na qualidade do ar, na cidade de Aveiro. Para concretizar este objetivo, uma das fases do trabalho consiste em realizar um pequeno inquérito, a uma amostra da população, para caracterizar uma área de estudo relativamente ao uso de equipamentos para combustão de biomassa.

Agradecemos a sua colaboração!

Para mais informações e detalhes sobre esta dissertação:
sara.mendes.pereira@ua.pt

Aveiro, 10 de Fevereiro de 2014

A Orientadora: _____