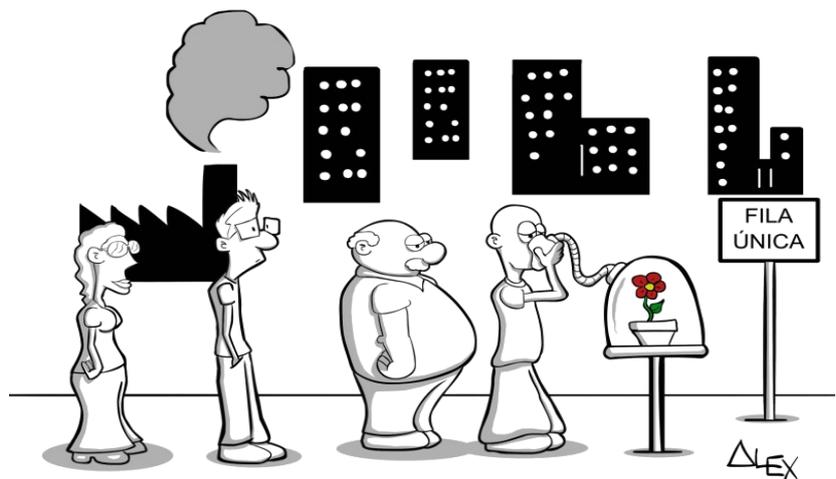




**Sandra Isabel Moreira A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a
Rafael Qualidade do Ar**





**Sandra Isabel Moreira
Rafael**

**A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a
Qualidade do Ar**

Dissertação 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 Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi financiado por fundos FEDER, através do programa operacional fatores de competitividade (COMPETE) e por fundos nacionais, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia, no âmbito do projeto BIOGAIR (PTDC/AAC-AMB/103866/2008).

o júri

presidente

Prof.^a Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

Professora Associado com Agregação do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nelson Augusto Cruz de Azevedo Barros

Professor Associado da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa

Prof.^a Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Professora Doutora Myriam Lopes e ao Professor Doutor Luís Tarelho, orientadores da presente dissertação, pela disponibilidade evidenciada e pelo seu permanente estímulo à inovação e aperfeiçoamento, bem como pela simpatia revelada.

À Eng.^a Ana Cristina Monteiro pelo acompanhamento constante ao longo da execução da dissertação e pela partilha de conhecimentos, demonstrando sempre simpatia e amizade.

À Eng.^a Maria Elisa Sá pela sua disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos, sem os quais a análise do impacte na qualidade do ar não teria sido possível.

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, pela confiança que em mim depositaram e pelo constante apoio e motivação que demonstraram ao longo deste percurso.

Às minhas amigas do coração, Ana Madeira e Liliana Ferreira, pela amizade, apoio e dedicação a que me habituaram.

A todos aqueles que não foram mencionados, que pelo seu apoio, encorajamento, colaboração, boa disposição e amizade contribuíram, igualmente, para a conclusão do presente trabalho.

A todos, o meu profundo agradecimento.

palavras-chave

Biomassa Florestal, Energia, Qualidade do Ar

resumo

A energia representa, desde a antiguidade, um papel fundamental no desenvolvimento social e económica da humanidade. O incremento mundial das necessidades energéticas implicou um aumento crescente das emissões de gases com efeito de estufa, tendo Portugal, em 2009, registado o 3.º maior aumento face aos valores de 1990 (40% acima da média da UE-27). Ao longo dos últimos anos a União Europeia desenvolveu um conjunto de políticas e programas de combate às alterações climáticas e à degradação da qualidade do ar (Diretiva Europeia das Energias Renováveis – 2009/28/CE; Programa Europeu para as Alterações Climáticas, Programa CAFÉ, entre outros) promovendo a diminuição das emissões de poluentes atmosféricos e GEE, bem como a diversificação de fontes de energia renováveis. No âmbito da Diretiva 2009/28/CE, Portugal elaborou o seu Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, fixando os objetivos nacionais para a biomassa florestal e as medidas para a sua consecução.

Diversos estudos comprovam que a combustão da biomassa no setor energético é neutra do ponto de vista de balanço de CO₂, contribuindo para a redução das emissões de origem fóssil deste poluente, podendo, no entanto, contribuir para o aumento das emissões de NO_x, CO e PM.

O presente trabalho teve como objetivo fundamental avaliar o impacto das centrais termoelétricas e de cogeração a biomassa na qualidade do ar, tendo como caso de estudo a região Norte de Portugal Continental. Para o efeito foram criados dois cenários de emissão: um cenário de referência, onde não foram introduzidas as emissões resultantes do funcionamento das centrais a biomassa localizadas na região em estudo, e o cenário CB onde se procedeu à incorporação dessas emissões.

Os resultados obtidos apresentaram uma tendência geral de aumento, ainda que reduzido, das concentrações de NO₂, SO₂, PM₁₀ e PM_{2,5}, relativamente ao cenário de referência. Este incremento foi superior na época de Verão e para poluentes como o NO₂ e o SO₂, verificando-se para o primeiro valores de [+5,97%] e [+14,9%] para os meses de Janeiro e Julho, respetivamente; e de [+2,74%] e [+4,13%], para o segundo. No caso das partículas, os valores obtidos rondaram os [+1,05%] e [+1,6%], para as PM₁₀; e [+1,96%] e [+1,95%] para as PM_{2,5}, respetivamente para os meses de janeiro e julho. Por outro lado, as concentrações O₃ apresentaram um ligeiro decréscimo, cerca de [-1,5 %] e [-1,0%] para os meses de janeiro e julho, respetivamente.

Assim, a análise realizada permitiu concluir que a utilização da biomassa florestal no setor electroprodutor português contribui para a degradação da qualidade do ar, ainda que a uma escala reduzida.

keywords

Forest Biomass, Energy, Air Quality

abstract

Energy represents, since ancient times, a key role in economic and social development of mankind. Increasing global energy requirements resulted in an increasing emissions of greenhouse gases, with Portugal, in 2009, recorded the 3th largest increase compared to 1990 (40% above the average EU-27). Over the last years, European Union has created policies and programs to combat climate change and the degradation of air quality (Renewable Energies Directive – 2009/28/CE; European Program to Climate Changes, Program CAFE, among others) promoting the reduction of air pollutants and GHG emissions, as well as the diversification of renewable energy sources. Under the Directive 2009/28/EC, Portugal established its National Action Plan for Renewable Energy, setting national goals for forest biomass and measures for their achievement.

Several researches show that the biomass combustion in the energy sector is neutral in terms of CO₂ balance, helping to reduce fossil fuel emissions of this pollutant being able, however, contribute to increased emissions of NO_x, CO and PM.

The present study has the goal to evaluate the impacts of power plants and cogeneration biomass on air quality, taking as a study case the north region of mainland Portugal. For this purpose they were created two emission scenarios: a baseline scenario, where emissions from the operation of biomass power plants located in the study area have not been introduced, and the scenario CB, where carried out the incorporation of these emissions. The results showed a general trend of increase, of the concentrations of NO₂, SO₂, PM₁₀ and PM_{2,5}, in relation to the reference scenario, although this has been reduced. This increase was higher in summer season and to pollutants such as NO₂ and SO₂, verifying for the first values of [+5.97%] and [14.9%] for the months of January and July, respectively; and [+2.74%] and [+4.13%] for the second. In the case of particles, the values obtained was around [+1.05%] and [+1.6%] for PM₁₀, and [+1.96%] and [+1.95%] for PM_{2,5}, respectively for the months of January and July. On the other hand, O₃ concentrations showed a slight decrease, about [-1.5%] and [-1.0%] for the months of January and July, respectively.

Thereby, the analysis showed that the energy recovery of forest biomass contributes to the degradation of air quality, albeit at a reduced scale.

Índice

Geral

ÍNDICE GERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABELAS.....	VI
ÍNDICE DE QUADROS	VIII
ACRÓNIMOS	IX
NOMENCLATURA.....	XV
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	4
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
CAPÍTULO II – O SETOR ENERGÉTICO E A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	6
2.1 A EVOLUÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO	6
2.2 A ENERGIA E AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	10
2.3 A QUALIDADE DO AR AMBIENTE	17

2.4	INSTRUMENTOS DE GESTÃO DO RECURSO AR.....	19
2.4.1	<i>Estratégia de Melhoria da Qualidade do Ar</i>	20
2.4.2	<i>Estratégia de Mitigação das Alterações Climáticas</i>	21
2.4.3	<i>Estratégia de Adaptação às Alterações Climáticas</i>	23
2.4.4	<i>Pacote Energia/Clima</i>	26
CAPÍTULO III – UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL PARA FINS ENERGÉTICOS		31
3.1	A BIONERGIA NA EUROPA	31
3.2	TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA FLORESTAL.....	40
3.3	PANORAMA NACIONAL.....	45
3.3.1	<i>A floresta Portuguesa</i>	45
3.3.2	<i>Política energética para o aproveitamento de biomassa florestal</i>	54
3.3.3	<i>Tendências futuras</i>	60
CAPÍTULO IV – CONVERSÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA FLORESTAL.....		61
4.1	PROCESSOS BIOQUÍMICOS E QUÍMICOS	63
4.2	PROCESSOS TERMOQUÍMICOS	64
4.2.1	<i>Combustão de biomassa</i>	67
4.2.2	<i>Emissão de poluentes atmosféricos resultantes do processo de combustão</i>	74
CAPÍTULO V – CASO DE ESTUDO		78
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS CB EM OPERAÇÃO (EM PORTUGAL CONTINENTAL).....	78
5.2	AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	80
5.2.1	<i>Estimativa do caudal volumétrico dos produtos de combustão da biomassa</i>	80
5.2.2	<i>Emissões de Poluentes Atmosféricos</i>	88
5.2.3	<i>Emissões de CO₂</i>	91
5.3	AVALIAÇÃO DO IMPACTE DAS CB NA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO NORTE	93
5.3.1	<i>Caracterização da Região Norte</i>	94
5.3.2	<i>Modelo TAPM</i>	98
5.3.3	<i>Modelo TAPM – Condições de simulação</i>	102
5.3.4	<i>Resultados de simulação</i>	106
CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		123
ANEXOS		133

Índice de

Figuras

FIGURA 1 – CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA, POR COMBUSTÍVEL (MTEP) (FONTE: BP, 2011).....	7
FIGURA 2 – CONSUMO TOTAL DE ENERGIA PRIMÁRIA DA UE-27, POR FONTE DE ENERGIA, EM 2008 (FONTE: EEA, 2011A).	8
FIGURA 3 – REPARTIÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM PORTUGAL NO ANO DE 2010 (FONTE: REN, 2011).....	9
FIGURA 4 – CONSUMO DE ENERGIA FINAL, POR SETOR, EM 2009 (FONTE: DGEG, 2011).....	9
FIGURA 5 – EMISSÕES MUNDIAIS DE CO ₂ , NO PERÍODO DE 1971 A 2009, POR REGIÃO (MT) (FONTE: OECD/IEA, 2011).....	10
FIGURA 6 – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO DE ESTUFA DA UE-27, EM TONELADAS DE CO ₂ EQUIVALENTE, <i>PER CAPITA</i> (FONTE: EEA, 2011C).	11
FIGURA 7 – EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA NA UE-27, POR SETOR, NO ANO DE 2008 (FONTE: EEA, 2011D). ...	12
FIGURA 8 – EMISSÕES DE GEE EM PORTUGAL, POR SETOR DE ATIVIDADE, EM 2009 (FONTE: APA, 2011.)	13
FIGURA 9 – EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO ₂ EQUIVALENTE E DA TEMPERATURA, NO PERÍODO DE 2000 A 2100 (SOBRE O NÍVEL PRÉ-INDUSTRIAL) (FONTE: EEA, 2002).	14
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO DA BIOMASSA (FONTE: ENERSILVA, 2007).	37
FIGURA 11 – RECHEGA E TRANSPORTE DE BIOMASSA EM NATUREZA (FONTE: LOPES <i>ET AL.</i> , 2012).	42
FIGURA 12 - ESTILHAÇADOR MÓVEL (FONTE: ENERSILVA, 2007).....	43
FIGURA 13 – ESTILHAÇADORA DE GRANDES DIMENSÕES EM PARQUE DE PRÉ-TRATAMENTO (FONTE: ENERSILVA, 2007).	43
FIGURA 14 - FARDOS DE BIOMASSA DE PINHEIRO (FONTE: LOPES <i>ET AL.</i> , 2012).	44
FIGURA 15 - CORTADOR EMPILHADOR FLORESTAL <i>WHELLED FELLER-BUNCHER</i> (FONTE: ENERSILVA, 2007).	44
FIGURA 16 - ESTILHAÇAMENTO DE ÁRVORES INTEIRAS QUEIMADAS (FONTE: ENERSILVA, 2007).	45
FIGURA 17 – CARTA DE DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS Nº. 114/2006).....	51

FIGURA 18 – CARTA DE DISTRIBUIÇÃO DAS ESPÉCIES FLORESTAS PRESENTES EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).	52
FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DAS CENTRAIS A BIOMASSA COM PONTOS DE LIGAÇÃO JÁ CONCEDIDOS E DOS LOTES A CONCURSO (FONTE: DGEG, S.D).	56
FIGURA 20 – PRINCIPAIS OPÇÕES DE CONVERSÃO DA BIOMASSA EM ENERGIA TÉRMICA, ELÉTRICA E MECÂNICA (FONTE: CE, 2003).	62
FIGURA 21 – PERDA DE MASSA DE UMA PARTÍCULA DE BIOMASSA DURANTE O PROCESSO DE COMBUSTÃO (FONTE: LOO E KOPPEJAN, 2008).	69
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO DE UM EXEMPLO DE UM REATOR GRELHA (A) E REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FORNECIMENTO DE AR E DAS DIVERSAS ZONAS DE COMBUSTÃO (B) (FONTE: ADAPTADO DE YIN <i>ET AL.</i> , 2008).	71
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO (FONTE: ADAPTADO DE TARELHO, 2008).	73
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CENTRAIS A BIOMASSA ATUALMENTE EM OPERAÇÃO (FONTE: ADAPTADO DE AIFF, 2010).	79
FIGURA 25 – <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO TOTAL DA ENERGIA ELÉTRICA COMERCIALIZADA EM 2011 (FONTE: EDP, 2012).	91
FIGURA 26 – EVOLUÇÃO MENSAL DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA POR TECNOLOGIA, EM 2011 (FONTE: EDP, 2012).	92
FIGURA 27 – EVOLUÇÃO MENSAL DAS EMISSÕES ESPECÍFICAS (FONTE: EDP, 2012).	92
FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA METODOLOGIA SEGUIDA NAS SIMULAÇÕES COM O MODELO TAPM.	94
FIGURA 29 – MAPA DOS CONCELHOS DA REGIÃO NORTE, ENQUADRADOS NAS RESPECTIVAS ZONAS E AGLOMERAÇÕES (FONTE: BORREGO <i>ET AL.</i> , 2009).	95
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA DISTRIBUIÇÃO DAS EMISSÕES DOS DIFERENTES POLUENTES PELOS DIVERSOS SETORES DE ATIVIDADE PARA O DOMÍNIO CDDR-N E PARA PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: BORREGO <i>ET AL.</i> , 2009)	96
FIGURA 31 – CONCELHOS IDENTIFICADOS COMO MAIORES EMISSORES, RELATIVAMENTE AOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS ANALISADOS (COVNM, NO _x , SO ₂ , CO, PM ₁₀ , PM _{2,5} E NH ₃) (FONTE: BORREGO <i>ET AL.</i> , 2009).	98
FIGURA 32 – ESTRUTURA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO TAPM (FONTE: ADAPTAÇÃO DE RIBEIRO, 2005).	99
FIGURA 33 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO EMPREGUES NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO TAPM (FONTE: ADAPTAÇÃO DE TAVARES, 2011).	101
FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO DOS DOMÍNIOS DE SIMULAÇÃO DO MODELO TAPM (FONTE: ADAPTAÇÃO RIBEIRO <i>ET AL.</i> , 2011).	103
FIGURA 35 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS REAÇÕES ENVOLVENDO A CONVERSÃO NO A NO ₂ E FORMAÇÃO DE O ₃ : (A) CICLO FOTOQUÍMICO BÁSICO NO-NO ₂ -O ₃ NA AUSÊNCIA DE COVs; (B) CICLO FOTOQUÍMICO NO-NO ₂ -O ₃ NA PRESENÇA DE COVs (FONTE: ADAPTADO DE ARYA, 1999).	109
FIGURA 36 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS DE NO ₂ E SO ₂ , EM TERMOS PERCENTUAIS, ENTRE OS CENÁRIOS DEFINIDOS, PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.	111
FIGURA 37 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS DE PM ₁₀ E PM _{2,5} , EM TERMOS PERCENTUAIS, ENTRE OS CENÁRIOS DEFINIDOS, PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.	112
FIGURA 38 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS DE O ₃ , EM TERMOS PERCENTUAIS, ENTRE OS CENÁRIOS DEFINIDOS, PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.	113

FIGURA 39 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE NO_2 NO MÊS DE JANEIRO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO..	114
FIGURA 40 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE NO_2 NO MÊS DE JULHO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO. ...	114
FIGURA 41 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE SO_2 NO MÊS DE JANEIRO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO...	115
FIGURA 42 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE SO_2 NO MÊS DE JULHO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO.. ...	115
FIGURA 43 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE PM_{10} NO MÊS DE JANEIRO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO..	
.....	116
FIGURA 44 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE PM_{10} NO MÊS DE JULHO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO...	116
FIGURA 45 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE $\text{PM}_{2,5}$ NO MÊS DE JANEIRO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO..	
.....	117
FIGURA 46 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE $\text{PM}_{2,5}$ NO MÊS DE JULHO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO..	117
FIGURA 47 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE O_3 NO MÊS DE JANEIRO, PARA UM PONTO DO DOMÍNIO....	118
FIGURA 48 – PERFIL HORÁRIO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE O_3 NO MÊS DE JULHO, PARA UM PONTO DE DOMÍNIO.....	118
FIGURA 49 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSIS DE NO_2 E SO_2 , EM TERMOS ABSOLUTOS, ENTRE OS CENÁRIOS	
DEFINIDOS, PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.....	136
FIGURA 50 – VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSIS DE PM_{10} E $\text{PM}_{2,5}$, EM TERMOS ABSOLUTOS, ENTRE OS CENÁRIOS	
DEFINIDOS, PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.....	137
FIGURA 51 - VARIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSIS DE O_3 , EM TERMOS ABSOLUTOS, ENTRE OS CENÁRIOS DEFINIDOS,	
PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.....	138

Índice de

Tabelas

TABELA 1 – POTENCIAL EUROPEU DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PRIMÁRIA A PARTIR DA BIOMASSA (FONTE: CCE, 2005).....	35
TABELA 2 – EVOLUÇÃO DAS ÁREAS POR TIPO DE USO DO SOLO (1000 HA), EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).	46
TABELA 3 – ÁREAS FLORESTAIS, POR ESPÉCIES, NOS IFN DE 1995/1998 E 2005/2006, EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).	46
TABELA 4 - ÁREAS FLORESTAIS, POR ESPÉCIES, NOS IFN DE 1995/1998 E 2005/2006, EM PORTUGAL CONTINENTAL (CONTINUAÇÃO) (FONTE: IFN5, 2007).	47
TABELA 5 – PRINCIPAIS ESPÉCIES FLORESTAIS PRESENTES NA REDE NATURA 2000, EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).....	48
TABELA 6 – VOLUME EXISTENTE POR ESPÉCIE DE ÁRVORE FLORESTAL, EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).	48
TABELA 7 – VOLUME EXISTENTE POR ESPÉCIE DE ÁRVORE FLORESTAL, EM PORTUGAL CONTINENTAL (CONTINUAÇÃO) (FONTE: IFN5, 2007).	49
TABELA 8 – NÚMERO DE OCORRÊNCIAS E ÁREA ARDIDA (HA), POR TIPO DE OCUPAÇÃO FLORESTAL E POR ANO, EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2007).	50
TABELA 9 – BIOMASSA FLORESTAL DISPONÍVEL POR ESPÉCIE, BEM COMO O RESPECTIVO CARBONO ARMAZENADO E CO ₂ EQ, EM PORTUGAL CONTINENTAL (FONTE: IFN5, 2010).	53
TABELA 10 – RENDIMENTOS TÍPICOS (EM BASE DE MADEIRA SECA) OBTIDOS A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE PIRÓLISE (FONTE: ADAPTADO DE BRIGDWATER, 2003).	65
TABELA 11 – FATORES DE EMISSÃO UTILIZANDO A BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL NO PROCESSO DE COMBUSTÃO (FONTE: EMEP/EEA, 2009).	76

TABELA 12 – FATORES DE EMISSÃO UTILIZANDO A BIOMASSA FLORESTAL COMO COMBUSTÍVEL NO PROCESSO DE COMBUSTÃO (CONTINUAÇÃO) (FONTE: EMEP/EEA, 2009)	77
TABELA 13 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR, [%, M/M], EM BASE SECA SEM CINZAS (FONTE: CBE, 2008)	81
TABELA 14 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR, [%, M/M], EM BASE SECA SEM CINZAS, CONSIDERADA PARA O PRESENTE CÁLCULO (FONTE: LOURENÇO, 2011)	82
TABELA 15 – DENSIDADES DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), PARA CADA UMA DAS TECNOLOGIAS EM ESTUDO.	85
TABELA 16 – CARATERIZAÇÃO DAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS A BIOMASSA FLORESTAL EM OPERAÇÃO EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	86
TABELA 17 – CARATERIZAÇÃO DAS CENTRAIS DE COGERAÇÃO A BIOMASSA FLORESTAL EM OPERAÇÃO EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	87
TABELA 18 – QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DOS DIVERSOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS ($\text{T}\cdot\text{ANO}^{-1}$) RESULTANTES DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA FLORESTAL NAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS EM ESTUDO.....	89
TABELA 19 – QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DOS DIVERSOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS ($\text{T}\cdot\text{ANO}^{-1}$) RESULTANTES DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA FLORESTAL NAS CENTRAIS DE COGERAÇÃO EM ESTUDO.	90
TABELA 20 – CARACTERIZAÇÃO DAS CENTRAIS A BIOMASSA LOCALIZADAS NO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO.	104
TABELA 21 – CARACTERIZAÇÃO DAS CENTRAIS A BIOMASSA LOCALIZADAS NO DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO (CONTINUAÇÃO).	105
TABELA 22 – COMPARAÇÃO ENTRE O CAUDAL VOLUMÉTRICO ESPECTÁVEL E O OBSERVADO, PARA AS CENTRAIS DA REGIÃO EM ESTUDO.	105
TABELA 23 – VARIAÇÃO EM TERMOS PERCENTUAIS DAS CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 , O_3 E SO_2 PARA OS MESES DE JANEIRO E JULHO.....	106
TABELA 24 – GASES SECOS PRODUZIDOS NO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA ($\text{KMOL}\cdot\text{KG}^{-1}\text{B BS}$).	135

Índice de

Quadros

QUADRO 1- MEDIDAS DE CONSECUÇÃO DOS OBJETIVOS DELINEADOS PARA A BIOMASSA, POR SETOR DE ATIVIDADE (FONTE: PNAER, 2010).....	57
--	----

Acrónimos

AFN – Autoridade Florestal Nacional

AIE – Agência Internacional de Energia

AIFF – Associação para a competitividade da Indústria da Fileira Florestal

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

APREN – Associação de Energias Renováveis

AQS – Águas Quentes Sanitárias

AR – Alto Representante

BF – Biomassa Florestal

BFP – Biomassa Florestal Primária

BIAS – Erro Sistemático Médio

BOM – *Bureau of Meteorology*

BREF – *Best Available Technologies References documents*

BWM – *Building Wake Module*

C – Símbolo químico do Carbono

CAFE - *Clean Air for Europe* (Ar Limpo para a Europa)

CB – Centrais a Biomassa

CE – Comissão Europeia

CECAC - Comité Executivo da Comissão para as Alterações Climáticas

CELE – Comércio Europeu de Licenças de Emissão

CCE – Comissão das Comunidades Europeias

CCS – *Carbon Capture and Sequestration* (Sequestro e Captura de Carbono)

Cd – Símbolo químico do Cádmio

CO – Fórmula química do Monóxido de Carbono

CO₂ – Fórmula química do Dióxido de Carbono

COV – Fórmula química dos Compostos Orgânicos Voláteis

COVNM – Fórmula química dos Compostos Orgânicos Voláteis Não Metanogénicos

CH₄ – Fórmula química do Metano

CVEB – Centro de Valorização Energética de Biomassa

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

DGRF – Direção Geral de Recursos Florestais

EA – Excesso de Ar

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EEA – *Environmental European Agency* (Agência Europeia do Ambiente)

EGM – *Eulerian Grid Module*

ENAAC – Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas

ENE – Estratégia Nacional para a Energia

ENF – Estratégia Nacional para as Florestas

EMEP – *European Monitoring and Evaluation Program*

EQM – Erro Quadrático Médio

EROS – *Earth Resources Observation Systems*

ETS – *Emissions Trading System* (Sistema de Comércio de Emissões)

Eurostat – Serviço de Estatística das Comunidades Europeias

FE – Fator de Emissão

FER – Fontes de Energia Renováveis

FIT – *Feed-In-Tariff* (Tarifas de aquisição)

GASP – *Global Analysis and Prediction*

GEE – Gases com Efeito de Estufa

GNR – Guarda Nacional Republicana

H₂ – Símbolo químico do Hidrogénio

H₂O – Fórmula química da Água

HCB – Fórmula química do Hexaclorobenzeno

HCL – Fórmula química do Ácido Clorídrico

HCN – Fórmula química do Cianeto de Hidrogénio

HO₂ – Radical hidro peróxilo

IA – Instituto do Ambiente

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

IFN – Inventário Florestal Nacional

IOA – Índice de concordância

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas)

IPSS – Instituições Particulares de Solidariedade Social

IQAr – Índice de Qualidade do Ar

IVA – Imposto sobre o Valor Acrescentado

K – Símbolo químico do Potássio

LAPS – *Limited Area Prediction System*

LF – Leito Fluidizado

LFB – Leito Fluidizado Borbulhante

LFC – Leito Fluidizado Circulante

LP DACC – *Land Processes Distributed Active Archive Center*

LPM – *Langrangian Particle Module*

LRTAP – *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution* (Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância)

M – Molécula inerte

MADRP – Ministério da Agricultura Desenvolvimento Rural e das Pescas

MAO – Ministério do Ambiente e Ordenamento

MAOT – Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território

MAOTDR - Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional

MAPE – Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos

MEID – Ministério da Energia e Inovação e Desenvolvimento

MP – Material Particulado

N₂ – Molécula de Azoto

N₂O – Fórmula química do Óxido Nitroso

Na – Símbolo químico do sódio

NCAR – *US National Center for Atmospheric Research*

NECD – *National Emission Ceilings Directive* (Diretiva que estabelece os valores-limite nacionais de emissão)

NH₂ – Radical amina

NH₃ – Fórmula química do Amoníaco

NO – Fórmula química do Óxido Nítrico

NO₂ – Fórmula química do Dióxido de Azoto

NO_x – Fórmula química dos Óxidos de Azoto

NUT – Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos na União Europeia

O₂ – Símbolo químico do Oxigénio

OECD – *Organization for Economic Co-operation and Development* (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento)

OH – Fórmula química do Hidróxido

ONU – Organização das Nações Unidas

PAA – Programa Comunitário de Ação em Matéria de Ambiente

PCI – Poder Calorífico Inferior

Pb – Símbolo químico do Chumbo

PGF – Planos de Gestão Florestal

PM₁₀ – Partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 µm

PM_{2,5} – Partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PME – Pequenas e Médias Empresas

PNAC – Plano Nacional para as Alterações Climáticas

PNALE – Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão

PNBEPH – Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico

PME – Pequenas e Médias Empresas

PRM – *Plume Rise Module*

PROF – Planos Regionais de Ordenamento Florestal

QA – Garantia de Qualidade

QC – Controlo de Qualidade

QualAr – Base de Dados On-line sobre Qualidade do Ar

REN – Rede Elétrica Nacional

RNAP – Rede Nacional de Áreas Protegidas

RO₂ – Radicais peróxido

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEPNA – Serviço de Proteção da Natureza e do Ambiente

SNAP – *Selected Nomenclature for Air Pollution*

SO₂ – Fórmula química do Dióxido de Enxofre

TAPM – *The Air Pollution Model*

UC – Universidade de Coimbra

UCAR – *University Corporation for Atmospheric Research*

UE – União Europeia

UNECE – *United Nations Economic Commission for Europe* (Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa)

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* (Convenção Quadro das Nações sobre Alterações Climáticas)

Zn – Símbolo químico do Zinco

ZPE – Zona de Proteção Especial

ZEC – Zona Especial de Conservação

Nomenclatura

bar – Unidade de pressão (105 Pa)

bs – Base seca

g.GJ⁻¹ – Unidade de massa (gramas) por unidade de energia, gigajoule (10⁹ J)

GWh – Unidade de energia elétrica, gigawatt hora (10⁹ Wh)

ha – Unidade de medida de área, hectares (10⁴ m²)

K – Unidade de temperatura termodinâmica

km – Unidade de medida de comprimento, quilómetros (10³ m)

kt – Unidade de medida de massa, quilotoneladas (10³ t)

\dot{m} – Caudal mássico [kg.s⁻¹]

mg.GJ⁻¹ – Unidade de massa, miligramas (10⁻³ g), por unidade de energia

Mi – Massa molar do elemento químico i [kg i. kmol⁻¹ i]

mm – Unidade de medida de comprimento, milímetros (0,001 m)

Mt – Unidade de medida de massa, megatoneladas (10⁶ t)

Mt CO₂.eq. – Unidade de medida de massa, megatoneladas de dióxido de carbono equivalente (10⁶ t CO₂.eq.)

Mtep – Unidade de energia, milhões de toneladas equivalentes de petróleo (10⁶ tep)

$M_{\text{tep}} \cdot \text{ano}^{-1}$ – Unidade de energia, milhões de toneladas equivalentes de petróleo (10^6 tep), por ano.

MW – Unidade de medida de potência, megawatt (10^6 W)

MWe – Megawatt elétrico

$MW_{\text{th}} \cdot \text{m}^{-2}$ – Megawatt térmico por unidade de área, metros quadrados

MVA – Unidade de medida de potência aparente, megavolt-ampere (10^6 VA)

$\text{ng I-TEQ} \cdot \text{GJ}^{-1}$ – Concentração tóxica equivalente, nanograma (10^{-9} g) por unidade de energia

n_i – Moles do produto i por unidade de massa de biomassa [$\text{kmol } i \cdot \text{kg}^{-1}$ biomassa]

nm – Unidade de comprimento, nanómetros (10^{-9} m)

P_i – Pressão do elemento químico i [Pa]

ppb – Unidade de concentração, partes por bilião

ppm – Unidade de concentração, partes por milhão

R – Constante dos gases perfeitos [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]

$t \text{CO}_2 \cdot \text{habitante}^{-1}$ – Unidade de medida de massa, por habitante

T_i – Temperatura do produto i [K]

T_s – Temperatura de saída dos gases de exaustão [K]

V – Caudal volumétrico [$\text{Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

V_s – Velocidade de saída dos gases de exaustão [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

W_a – Razão mássica atual de oxigénio de combustão [kg O_2 atual. kg^{-1} R, bs]

W_{AR} – Razão mássica atual de ar de combustão [kg ar atual. kg^{-1} R, bs]

w_{CE} – Fração mássica do carbono na escória em base seca [$\text{kg C} \cdot \text{kg}^{-1}$ E bs]

w_{CV} – Fração mássica do carbono nos volantes em base seca [$\text{kg C} \cdot \text{kg}^{-1}$ V bs]

$w_{j,R}$ – Fração mássica do elemento químico j numa mistura em base seca [$\text{kg}_j \cdot \text{kg}^{-1}$ R, bs]

W_{ER} – Razão mássica de resíduo escória em base seca em relação ao combustível [$\text{kg E bs} \cdot \text{kg}^{-1}$ R]

W_s – Razão mássica estequiométrica de oxigénio de combustão [kg O_2 estequiométrico. kg^{-1} R, bs]

W_{VA} – Razão mássica de humidade no ar de combustão [$\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ ar seco]

W_{VR} – Razão mássica de resíduo volante em base seca em relação ao combustível [$\text{kg V bs} \cdot \text{kg}^{-1}$ R]

W_{WR} – Razão mássica da humidade numa mistura em base seca [$\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ R, bs]

w_{ZE} – Fração mássica de cinzas na escória em base seca [kg cinza. kg^{-1} E bs]

w_{ZV} – Fração mássica de cinzas nos volantes em base seca [kg cinza. kg^{-1} V bs]

y_{iA} – Fração molar do componente i no ar de combustão [kmol i. kmol^{-1} ar seco]

$Y_{s,j}$ – Razão molar estequiométrica de O_2 em relação ao elemento químico j [$\text{kmol O}_2. \text{kmol}^{-1}$ j]

Z – Excesso de ar de combustão [%]

€/MWh – Euros por unidade de energia elétrica, megawatt hora (10^6 Wh)

$\mu\text{g.GJ}^{-1}$ – Unidade de massa, micrograma (10^{-6} g), por unidade de energia

$\mu\text{g.m}^{-3}$ – Unidade de massa, micrograma (10^{-6} g), por unidade de volume

ρ – Densidade [kg.m^{-3}]

η_{th} – Eficiência térmica [%]

Capítulo I – Introdução

1.1 Enquadramento

A energia detém, desde a antiguidade, um papel fundamental no desenvolvimento social e económico da humanidade. Este recurso proporciona conforto pessoal, mobilidade e riqueza, a nível industrial e comercial (EEA, 2006). Contudo, o aumento constante do preço do petróleo, e as consequentes oscilações do preço dos produtos energéticos derivados, permitiram perceber a crescente dependência da Europa face às energias importadas, evidenciando a importância do aprovisionamento energético (REA, 2009). Cumulativamente, os setores dos transportes, indústria, atividades domésticas e serviços, áreas de grande consumo de combustíveis fósseis, apresentam-se como as principais fontes de emissão de Gases com Efeito de Estufa (GEE), sendo hoje responsáveis por cerca de 80% do total das emissões europeias (EEA, 2008a).

Perante esta realidade a Europa foi pressionada no sentido de desenvolver o setor da energia, tendo por base novas fontes que permitissem reduzir a dependência energética e que, ao mesmo tempo, apresentassem um menor impacto ambiental (CCE, 2005). Foram então aprovados uma série de documentos base que contemplavam não só a segurança de abastecimento como também o impulsionar do recurso às Fontes de Energia Renováveis (FER) (MEE, 2008). Um dos documentos mais importantes nesta temática foi a assinatura do Protocolo de Quioto (1997). Neste diploma, as preocupações ambientais ganharam relevância, sendo estabelecido o objetivo de estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera a um nível que minimizasse as interferências antrópicas no sistema climático. Como resultado, foi definido como meta uma redução em cerca de 5,2% de GEE, para os países desenvolvidos, dos níveis correspondentes a 1990, a concretizar durante o período de 2008-2012.

Num contexto de crescimento económico cada vez mais forte, a necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis é preenchida recorrendo à racionalização dos recursos, ao aumento da eficiência dos dispositivos clássicos de conversão de energia e, principalmente, pelo investimento nas energias renováveis que além de contribuírem para diminuir a necessidade de importação de recursos, permitem alcançar o desenvolvimento energético sustentável (MEE, 2008). Este conceito, segundo Stupak (2007), define-se como a energia que apresenta impactes negativos mínimos na saúde humana e no funcionamento saudável dos sistemas ecológicos fundamentais, incluindo o ambiente global, quer durante a sua produção como no seu consumo, e que pode ser fornecida continuamente às gerações vindouras.

As principais fontes renováveis, pressupondo o desenvolvimento sustentável do setor energético, são a biomassa, a energia solar e a energia eólica. No entanto há que dar ênfase a duas particularidades da biomassa: a sua multiplicidade de matérias com potencial energético, entre os quais se destacam os resíduos agrícolas, florestais e industriais, e o seu processo de conversão (MEE, 2008). Este pode gerar três tipos de combustível (sólido, líquido ou gasoso), o que lhe confere uma flexibilidade de adaptação tecnológica de acordo com o objetivo estabelecido. Assim, segundo a Diretiva 2009/28/CE, de 23 de abril de 2009, relativa à promoção da eletricidade a partir de fontes de energias renováveis no mercado interno da eletricidade, biomassa é toda a *fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e urbanos.*

O uso de biomassa como combustível, principalmente como fonte de calor, remonta aos antepassados, estando normalmente associada a comunidades rurais (REHES, 2007). Os avanços tecnológicos observados nos últimos anos têm permitido um crescimento do potencial de utilização desta fonte de energia, representando em 2004, cerca de 4 % do consumo total de energia primária (69 Mtep) (CCE, 2004). Para estimular o aproveitamento da biomassa foi lançado em 2005, pela Comunidade Europeia, o *Plano de Ação da Biomassa*, onde são apresentadas medidas para a promoção da utilização desta Fonte de Energia Renovável nos transportes, no aquecimento, e na produção de eletricidade, acompanhadas de medidas transversais que afetam o abastecimento, o financiamento e a investigação no domínio da biomassa (CCE, 2005).

Além das óbvias vantagens no setor energético, a utilização da biomassa apresenta ainda benefícios a nível social e florestal. Em relação ao primeiro aspeto, destaca-se a neutralidade em termos de emissões de dióxido de carbono (CO₂), bem como o desenvolvimento regional e local, resultado da criação de novos mercados para os proprietários florestais e de novos postos de trabalhos. A nível florestal, a utilização de resíduos florestais como fonte energética apresenta-se como um fator que minimiza o risco de incêndio e a sua gravidade, observando-se ainda uma redução do risco de pragas de insetos e de infeções de raízes do novo povoamento (Stupak *et al.*, 2007).

No caso particular da situação energética portuguesa, esta é caracterizada por escassos recursos energéticos fósseis endógenos, nomeadamente aqueles que asseguram as necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (petróleo, carvão e gás natural). Esta escassez de recursos fósseis traduziu-se numa dependência energética exterior de cerca de 81,2% e numa importação de energia primária na ordem dos 96%, em 2009 (REA 2011, 2011). No entanto, face ao elevado potencial em energias renováveis, Portugal tem vindo ao longo dos últimos anos a investir significativamente na produção de energia com origem em FER, apresentando a terceira subida mais elevada da Europa entre 1999 e 2009. Os esforços desenvolvidos na diversificação do *mix* energético e na promoção de fontes renováveis colocam Portugal entre os Estados-membros da UE com maior incorporação de FER na produção total de eletricidade e entre os principais membros da Agência Internacional de Energia (AIE), constituindo uma referência mundial neste domínio, designadamente no que diz respeito à energia eólica e hídrica (REA 2009, 2010). Em 2009 o peso das renováveis no total da energia primária foi de 20%, valor mais elevado dos últimos 10 anos, registando-se ainda, e segundo dados da DGEG, uma incorporação destas fontes no consumo bruto de energia elétrica de cerca de 50,1% (2010), ultrapassando a meta comunitária de 39% (Diretiva 2001/77/CE).

Face aos recursos endógenos portugueses, a energia hídrica apresenta-se como a principal fonte de energia renovável para produção de eletricidade, com um total de potência instalada em centrais hidroelétricas de cerca de 4888 MW, em 2009. Cerca de um décimo desta potência (466 MW) representa a atual capacidade instalada em centrais a biomassa (DGEG, 2011). Um importante passo para a expansão das centrais a biomassa florestal¹ foi dado em 2006, com o lançamento de um concurso para a atribuição de quinze lotes para centrais a biomassa, totalizando uma capacidade instalada de 100 MW até 2010, e um consumo anual de 1 milhão de toneladas de biomassa florestal (ou resíduos florestais) (REA 2009, 2010).

Em suma, é hoje reconhecido que o recurso à biomassa é uma medida fundamental do ponto de vista dos benefícios ambientais esperados, em particular na redução das emissões de GEE, devido às suas múltiplas aplicações: produção de eletricidade, de calor e de biocombustíveis. Contudo, não foram ainda avaliados de forma integrada e holística os impactes ambientais associados à Cadeia de Valorização Energética de Biomassa (CVEB), desde a produção da matéria-prima à sua utilização final.

¹ Matéria vegetal proveniente da silvicultura e dos desperdícios de atividade florestal, incluindo apenas o material resultante das operações de condução, nomeadamente de desbaste e de desrama, de gestão de combustíveis e da exploração dos povoamentos florestais, como os ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes e cascas (Decreto-lei nº. 178/2006, de 5 de setembro).

1.2 Relevância do Estudo

Alguns estudos sugerem que o aumento da utilização de energia produzida a partir da biomassa irá fomentar variações ao nível do uso do solo e de emissões de outros poluentes para a atmosfera para além dos GEE. Atualmente ainda não se conhecem pormenorizadamente quais os impactes inerentes à CVEB, nomeadamente os seus efeitos na qualidade do ar (resultantes das alterações de uso do solo, das emissões associadas aos processos de produção e conversão de energia, e ainda dos transportes), bem como a sua amplitude. Neste sentido, a dissertação agora apresentada, encontra-se inserida no projeto BIOG AIR, que pretende avaliar os impactes da CVEB, na qualidade do ar e nas alterações climáticas, em Portugal Continental.

1.3 Objetivos

A presente dissertação pretende constituir um pequeno contributo no desenvolvimento do projeto BIOG AIR, ambicionando responder a uma questão fulcral: qual o efetivo impacte que o recurso à biomassa nos processos termoquímicos pode ter na qualidade do ar, comparativamente com o consumo dos combustíveis fósseis. Assim, o principal objetivo da dissertação prende-se com a avaliação do impacte da conversão energética da biomassa florestal na indústria portuguesa na qualidade do ar. A concretização do objetivo traçado resulta da abordagem de três aspetos fundamentais:

- Caracterização das centrais a biomassa florestal;
- Balanço das emissões de poluentes atmosféricos;
- Avaliação do impacte da operação das Centrais de Biomassa na qualidade do ar, no contexto do setor electroprodutor nacional.

O objeto de estudo da dissertação decai, numa primeira fase, sobre as centrais a biomassa florestal que se encontram atualmente em operação em Portugal, nomeadamente as dez centrais termoelétricas e as oito centrais de cogeração. No entanto, a concretização do objetivo formulado tem como caso de estudo a Região Norte de Portugal Continental. É ainda de salientar que se pretende que a análise realizada permita, complementarmente, desenvolver novos estudos, mais abrangentes, englobando as treze centrais termoelétricas que se encontram planeadas.

1.4 Estruturação da Dissertação

Para dar resposta aos objetivos formulados a dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 do presente estudo apresenta-se uma breve introdução do tema em análise, contextualizando a sua relevância e os objetivos definidos. O Capítulo 2 e 3 resultam de uma revisão aprofundada da literatura, introduzindo-se a problemática da energia, alterações climáticas e estratégias europeias e nacionais associadas (Capítulo 2), bem como o tema da biomassa florestal, o seu desenvolvimento na Europa e em Portugal e as perspetivas futuras (Capítulo 3). No Capítulo 4 são descritos os sistemas de conversão de biomassa em energia, dando-se particular ênfase aos processos termoquímicos. O Capítulo 5 expõe o objeto de estudo, sendo feita uma caracterização das centrais em análise, uma determinação das emissões que lhe estão associadas, bem como as emissões de CO₂ evitadas, seguida da avaliação do impacto do funcionamento das Centrais a Biomassa na qualidade do ar da região Norte. Ainda neste capítulo, é apresentada uma caracterização da região em estudo, bem como a abordagem metodológica adotada (modelo TAPM) na estimativa do impacto das concentrações dos poluentes atmosféricos na qualidade do ar. Para finalizar foram extraídas as principais ilações inerentes a todo o processo (Capítulo 6) e feitas algumas recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo II – O Setor Energético e a Poluição Atmosférica

A energia proporciona conforto pessoal e mobilidade, sendo essencial para a produção da maior parte da riqueza social, industrial e comercial. Por outro lado, a produção e o consumo de energia exercem sobre o ambiente pressões consideráveis (incluindo a produção de calor e eletricidade, a refinação de petróleo e a sua utilização final nas habitações, nos serviços, na indústria e nos transportes). Entre estas pressões incluem-se as emissões de poluentes atmosféricos e GEE, a utilização dos solos, a produção de resíduos e os derrames de petróleo, contribuindo para fenómenos como as alterações climáticas, a destruição dos ecossistemas naturais e a degradação do ambiente antrópico, bem como no incremento de efeitos nocivos para a saúde humana (EEA, 2011a).

O presente capítulo apresenta o estado de arte da Poluição Atmosférica, dando-se particular ênfase ao contributo do setor energético nesta temática. Além disso, pretende-se expor a problemática das alterações climáticas, bem como os instrumentos comunitários e nacionais de gestão da qualidade do ar.

2.1 A Evolução do Setor Energético

A partir do século XIX, durante a revolução industrial, e como resultado dos significativos avanços tecnológicos e económicos verificados, nomeadamente a mecanização industrial e a modernização dos meios de produção, deu-se início a uma intensificação do processo produtivo, com o conseqüente aumento

da extração de matérias-primas e de um elevado consumo de energia. Até então, a madeira apresentava-se como o principal recurso para produção de vapor, mas foi rapidamente substituída pelo carvão e por outros combustíveis fósseis, pois permitiam obter rendimentos superiores (Costa, 2006).

A energia representa um importante fator produtivo na sociedade, nomeadamente nos serviços, transportes e indústria. Esta representa a base do crescimento económico e bem-estar da sociedade e, naturalmente, o seu consumo acompanha o crescimento da economia (EEA, 2008). Atualmente, os combustíveis fósseis apresentam-se como a fonte energética mais utilizada na produção de energia a nível mundial, sendo o petróleo o combustível com maior aplicabilidade e cujo consumo tem apresentado um incremento progressivo ao longo dos anos (período de 1986 a 2010). Por outro lado, o carvão, o gás natural, os biocombustíveis, e as restantes fontes de energia, apresentam uma evolução uniforme para o mesmo período. Este facto é visível na Figura 1 onde se apresenta o consumo de energia primária, por combustível, no período de 1986 a 2010 (BP, 2011).

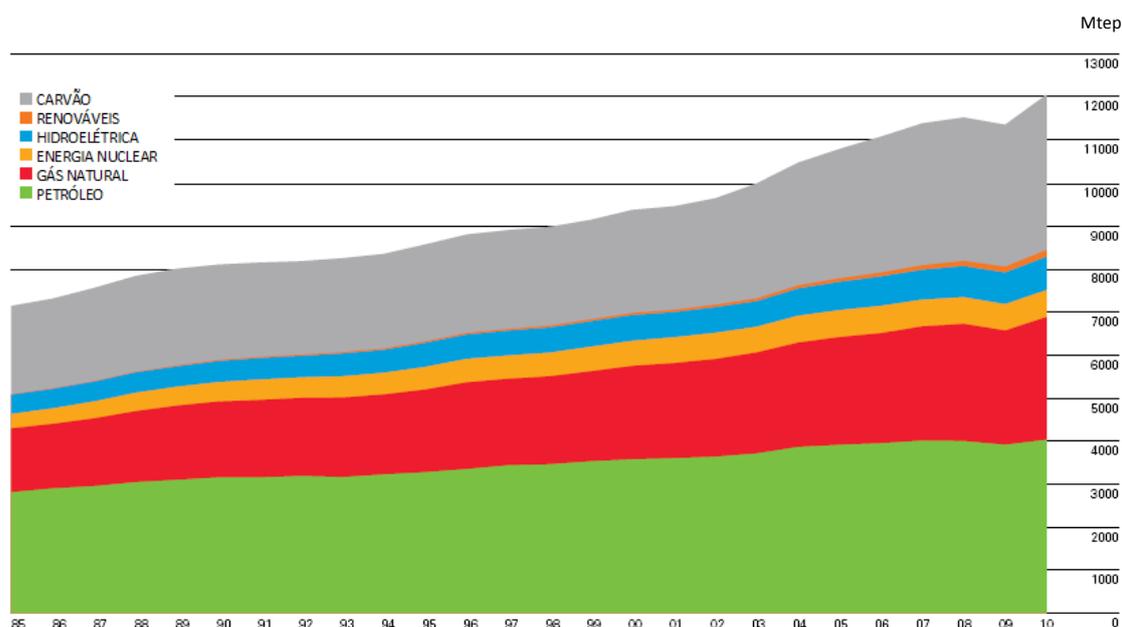


Figura 1 – Consumo mundial de energia primária, por combustível (Mtep) (fonte: BP, 2011).

A nível europeu, os 27 Estados-Membros da União Europeia (UE-27) apresentam-se hoje como o segundo maior consumidor de energia do mundo, predominando o consumo de combustíveis fósseis no seu *mix* energético. Assim, cerca de 79% das necessidades energéticas da média europeia são satisfeitas através do carvão, gás e petróleo; cerca de 13% são satisfeitas através da energia nuclear e os restantes 8% através de fontes de energia renováveis em rápida evolução (EEA, 2011a) (Figura 2).

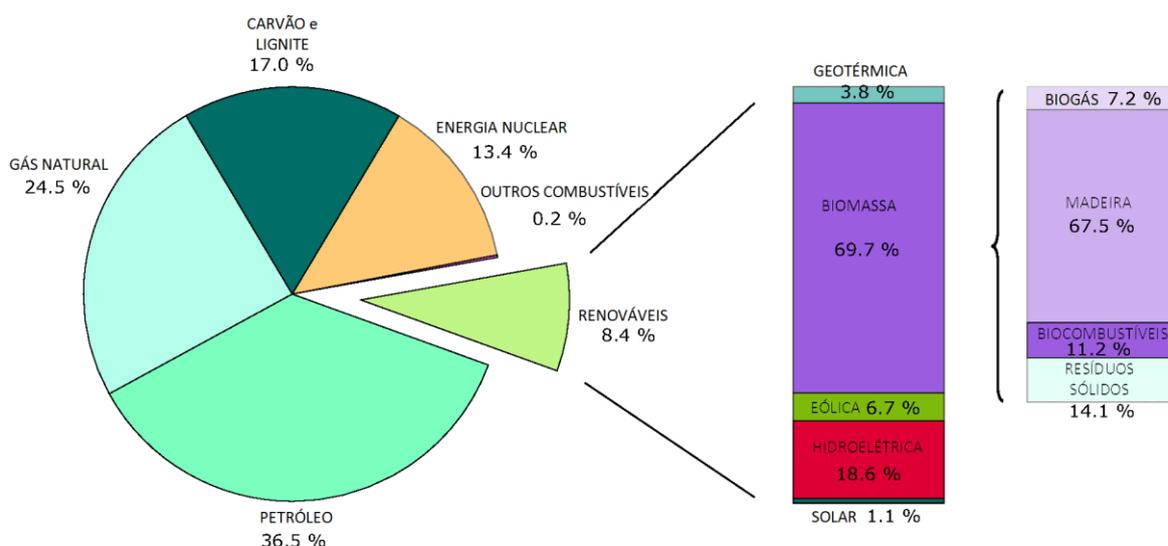


Figura 2 – Consumo total de energia primária da UE-27, por fonte de energia, em 2008 (fonte: EEA, 2011a).

O aumento da procura de energia primária apresenta repercussões económicas e sociais significativas. Atualmente a União Europeia (UE) é dependente em cerca de 50% de fontes externas no fornecimento de energia e poderá, até 2030, aumentar a sua dependência para cerca de 70% (EEA, 2011a). Esta situação, para além dos problemas associados à sustentabilidade e à segurança do abastecimento energético, estimula importantes tensões geopolíticas entre países produtores e países dependentes de energia (CCE, 2007a).

Relativamente ao panorama nacional, e como resultado dos escassos recursos energéticos fósseis endógenos, Portugal apresenta-se fortemente dependente de recursos energéticos importados, com valores de dependência energética de cerca de 81,2% (expressa maioritariamente em combustíveis fósseis) e de importação de energia primária na ordem dos 96%, em 2009 (REA 2011, 2011). No final de 2010, a potência total instalada a nível nacional era cerca de 17 920 MW, repartidos por centrais termoelétricas, com uma potência de 7 407 MW, centrais hidroelétricas com 4 578 MW, e centrais de recursos renováveis, cuja potência correspondia a 5935 MW (REN, 2011). Neste mesmo ano, a produção bruta de energia elétrica no valor de 52 204 GWh.ano⁻¹, foi assegurada pelo funcionamento das várias centrais, cabendo às térmicas 33% do abastecimento do sistema pela queima de combustíveis fósseis. A restante produção de energia foi satisfeita pela produção de origem hídrica (28%) e por outras fontes (34%), tais como a energia da biomassa, a energia eólica, a energia geotérmica e a energia fotovoltaica. A Figura 3 apresenta a distribuição das diversas fontes de produção de energia elétrica para o ano de 2010 (REN 2011).

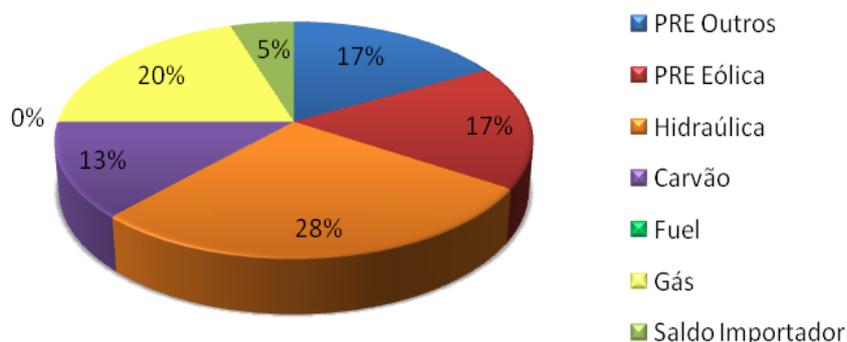


Figura 3 – Repartição da Produção de Energia Elétrica em Portugal no ano de 2010 (fonte: REN, 2011).

No que diz respeito ao consumo final de energia em Portugal, verificou-se um aumento considerável do mesmo desde 1990 (aumento de 80% no período de 1990-2004), como resultado do incremento do consumo no setor dos transportes, indústria e serviços. Assim, o transporte e a indústria representam os setores mais relevantes no contexto do consumo energético, sendo de salientar que desde 1990 que os transportes são o setor com o crescimento mais rápido em termos de utilização de energia, apresentando-se atualmente como o maior consumidor deste recurso (EEA, 2011a). A Figura 4 apresenta o consumo final de energia em Portugal para o ano de 2009, sendo notório que o setor dos transportes (38%) e da indústria (28%) são responsáveis por mais de metade do consumo total de energia final (66%), sendo o restante consumo repartido pelo setor Doméstico (18%), Serviços (12%) e Outros (4%) (DGEG, 2011).

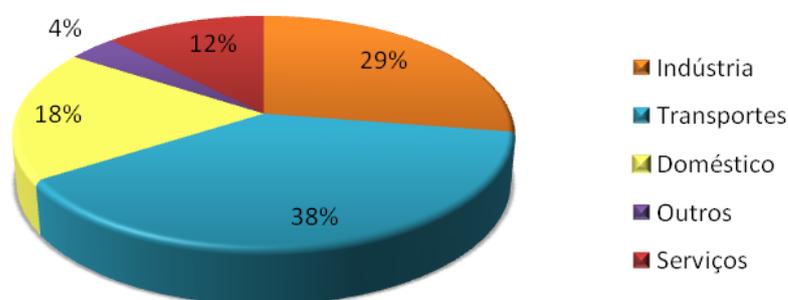


Figura 4 – Consumo de Energia Final, por setor, em 2009 (fonte: DGEG, 2011).

2.2 A Energia e as Alterações Climáticas

Os atuais padrões de produção e consumo de energia não são sustentáveis, tornando-se essencial encontrar um melhor equilíbrio entre os três principais vetores da política energética: a segurança do abastecimento energético, o desenvolvimento económico e a proteção do ambiente (REA 2009, 2010). Assim, face aos diversos e significativos impactes ambientais que lhe estão associados, nomeadamente o incremento do efeito de estufa, a depleção da camada de ozono, as chuvas ácidas, e a poluição fotoquímica, a energia apresenta-se como o maior desafio global do presente século. Neste contexto, a poluição atmosférica, e em particular as alterações climáticas, tem vindo a ser identificada como uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas que o planeta e a humanidade enfrentam na atualidade (APA, s.d.).

Ao longo dos últimos anos tem sido notória uma crescente alteração do estado natural do clima, fomentada por um crescente incremento das emissões de diversos gases que potenciam o efeito de estufa, nomeadamente o vapor de água e o dióxido de carbono (CO_2), bem como o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os compostos halogenados (EEA, 2008b). O consumo de combustíveis fósseis contribui em larga escala para o incremento das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, como resultado do processo de conversão energética, a combustão. Neste processo são ainda libertados poluentes atmosféricos como o dióxido de enxofre (SO_2), os óxidos de azoto (NO_x) e as partículas (PM_{10}) (EEA, 2011b). As emissões de CO_2 são continuamente medidas desde a década pré-industrial, sendo evidente um aumento sucessivo dos seus valores. Estima-se que em 2009 foram emitidas para a atmosfera cerca 28 999 Mt de CO_2 , sendo notório (Figura 5) que os países pertencentes à OCDE representam a região que mais contribuiu para este valor, seguindo-se a China, a Ásia, os Membros da Europa e da Eurásia não pertencentes à OCDE, o Médio Oriente, a América Latina e a África (OECD/IA, 2011).

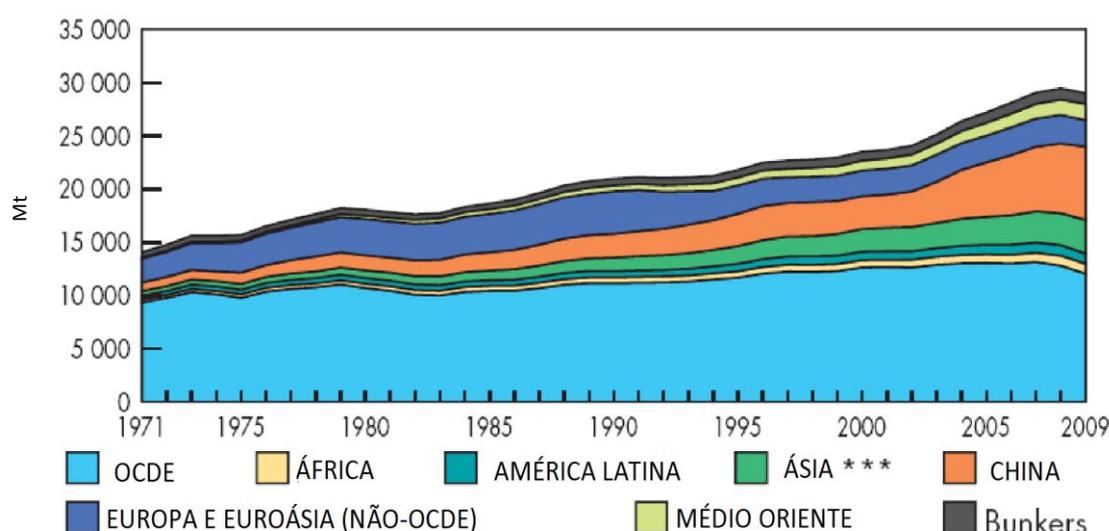


Figura 5 – Emissões mundiais de CO_2 , no período de 1971 a 2009, por região (Mt) (fonte: OECD/IEA, 2011).

A nível europeu, a UE-27, no ano de 2009, apresentou um consumo total de energia primária de cerca de 1703 milhões de toneladas de petróleo equivalente (tep) em eletricidade, aquecimento e transportes (Eurostat, 2011a), correspondendo este consumo à emissão de 4615 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (Eurostat, 2011b). É no entanto de realçar que o contributo para estes valores varia consideravelmente de país para país, dependendo em parte da utilização das fontes de energia renováveis. Assim, a Figura 6 apresenta as emissões de Gases com Efeito de Estufa da UE-27, em toneladas de CO₂ equivalente, *per capita* (EEA, 2011c). A análise da totalidade de emissões de GEE por habitante revela que Portugal, em 2009, possuía uma das mais baixas capitações entre os países da UE-27, onde o valor, na ordem das 7,0 t CO₂.habitante⁻¹, correspondeu ao 7º lugar mais baixo na tabela (valor medio de 7,5 t CO₂.habitante⁻¹). No entanto, Portugal apresentou-se como o 3º país da UE-27 a aumentar a sua capitação de GEE, face aos valores de 1990, com um valor de 40 % acima da média, situação que revela a grande disparidade existente no início dos anos 90 entre a estrutura económica e organização do nosso país face a maioria dos países europeus, e o forte crescimento e alterações profundas da sociedade verificados a nível nacional apos a adesão à UE (REA 2011, 2011).

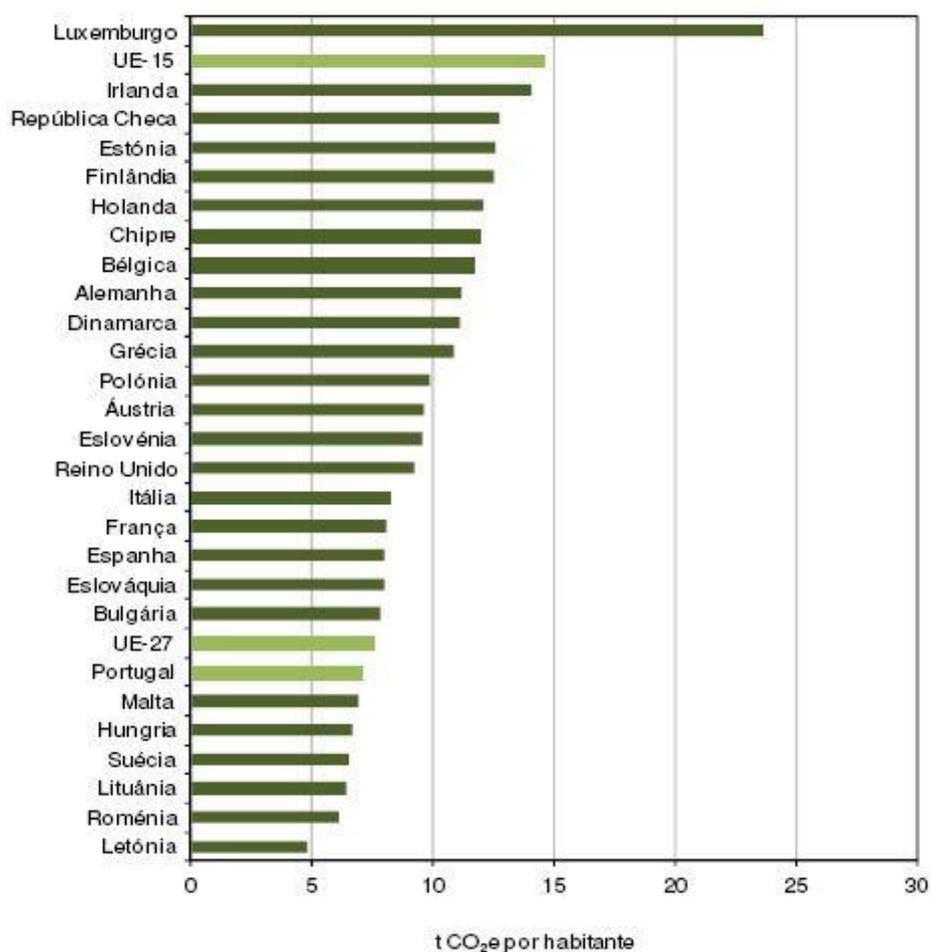
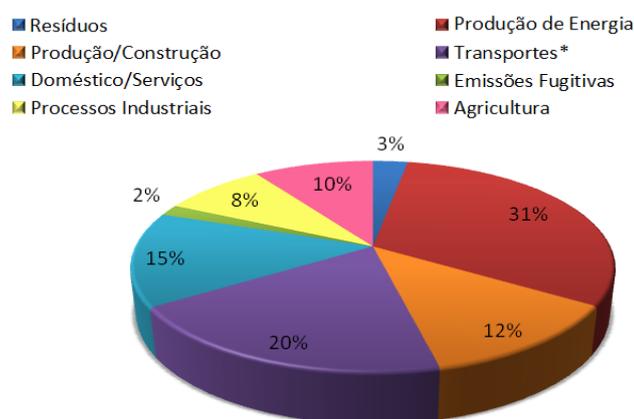


Figura 6 – Emissões de Gases de Efeito de Estufa da UE-27, em toneladas de CO₂ equivalente, *per capita* (fonte: EEA, 2011c).

Em 2008, o setor da produção de energia e dos transportes, apresentaram-se como os principais responsáveis pela emissão de GEE's na Europa, correspondendo a uma percentagem de 50% do total de emissões. A restante percentagem encontra-se repartida pelo setor da Indústria, dos Serviços, da Agricultura, dos Resíduos, e pelas Emissões Fugitivas (Figura 7) (EEA, 2011d). No que diz respeito ao panorama nacional, e segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (2011), no período de 1990 a 2009, as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, os três principais GEE, cresceram a um ritmo médio de 1,3% por ano, situando-se, em 2009, cerca de 1% abaixo da meta nacional de cumprimento no âmbito do Protocolo de Quioto (27%), com um valor de aproximadamente 74,6 Mt CO₂ equivalente. Seguindo a tendência europeia, o setor da produção de energia, incluindo transportes, manteve-se em 2009 como o principal setor responsável pelas emissões de GEE, representando 73% das emissões nacionais e apresentando um crescimento face a 1990 de cerca de 33%. Para o mesmo período, o setor dos transportes, sendo fortemente dominado pelo tráfego rodoviário, foi um dos setores que apresentou maior crescimento de emissões (87%), verificando-se atualmente uma certa estabilização/redução destas emissões. Por outro lado, as emissões provenientes da produção e transformação de energia aumentaram cerca de 23%, sendo este o principal setor responsável pelas emissões de CO₂. Estas tendências são o reflexo do forte crescimento económico registado na década de 90, associado a um aumento da procura de energia e da mobilidade, e caracterizado por um padrão de produção e consumo de energia fortemente dependentes da queima de combustíveis fósseis. Os setores dos resíduos, agricultura e processos industriais apresentam um peso semelhante (11%, 11% e 6%, respetivamente). No entanto, os resíduos e processos industriais apresentam uma tendência de crescimento da ordem dos 28,5% e 7%, respetivamente, face a 1990, enquanto os setores da agricultura e solventes registam uma tendência de redução das emissões de -3% e -14%, respetivamente (Figura 8) (REA 2011, 2011).



* Excluí a aviação internacional (6% do total das emissões de GEE)

Figura 7 – Emissões de Gases com Efeito de Estufa na UE-27, por setor, no ano de 2008 (fonte: EEA, 2011d).

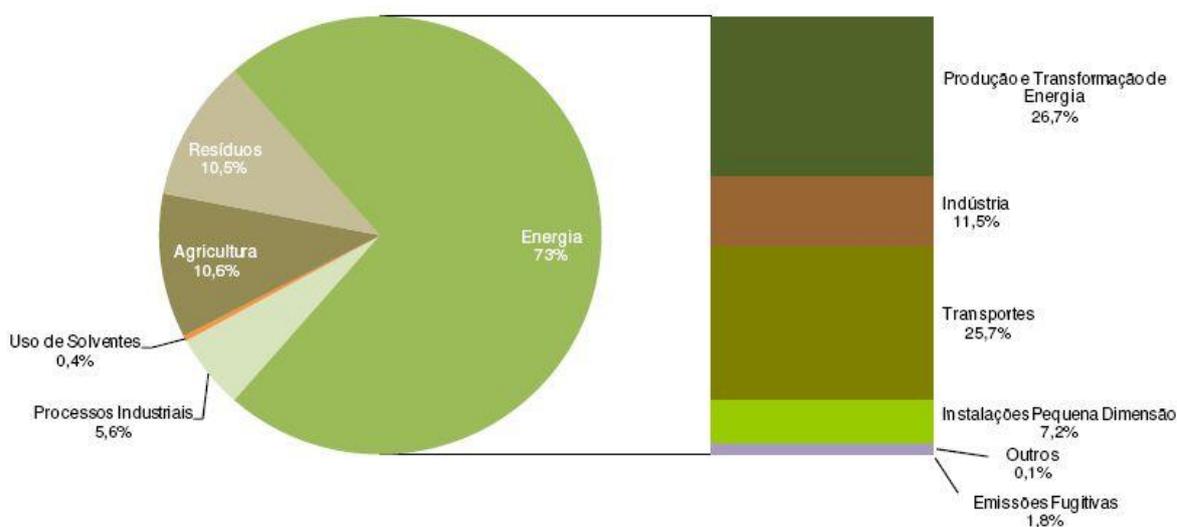


Figura 8 – Emissões de GEE em Portugal, por setor de atividade, em 2009 (fonte: APA, 2011.)

É ainda de salientar, e segundo dados da Agência Internacional de Energia (AIE), que as emissões de CO₂, relacionadas com a produção de energia, deverão aumentar cerca de 1,7% por ano, entre 2002 e 2030. Estima-se que estas emissões atinjam, em 2030, o valor de 38 mil milhões de toneladas, o que representa um aumento de 62% em relação aos níveis apresentados em 2002. Neste aumento tendencial, o carvão representará cerca de 33% (AIE, 2007).

Como resultado do crescente consumo energético e das respetivas emissões de GEE, a concentração atmosférica do CO₂ é continuamente medida desde a década de 50 sendo notório um aumento sucessivo dos seus valores desde a época pré-industrial. Estima-se que nessa altura a concentração terá sido de cerca de 280 ppm, ascendendo em 1990 para 360 ppm, e prevendo-se que atinja um valor de 560 ppm em 2050. A Figura 9 apresenta uma previsão da evolução das concentrações do CO₂ equivalente, bem como a evolução da temperatura, para o período de 2000 a 2100, recorrendo a uma comparação entre um cenário de referência (prevê o aumento contínuo das concentrações de CO₂) e um cenário de estabilização das emissões. Como é possível observar, existe uma relação direta entre as concentrações de CO₂ e a temperatura, sendo que quando as concentrações aumentam a tendência da temperatura será o de acompanhar esse aumento. Por outro lado, quando as concentrações estabilizam a temperatura seguirá esse comportamento (EEA, 2002).

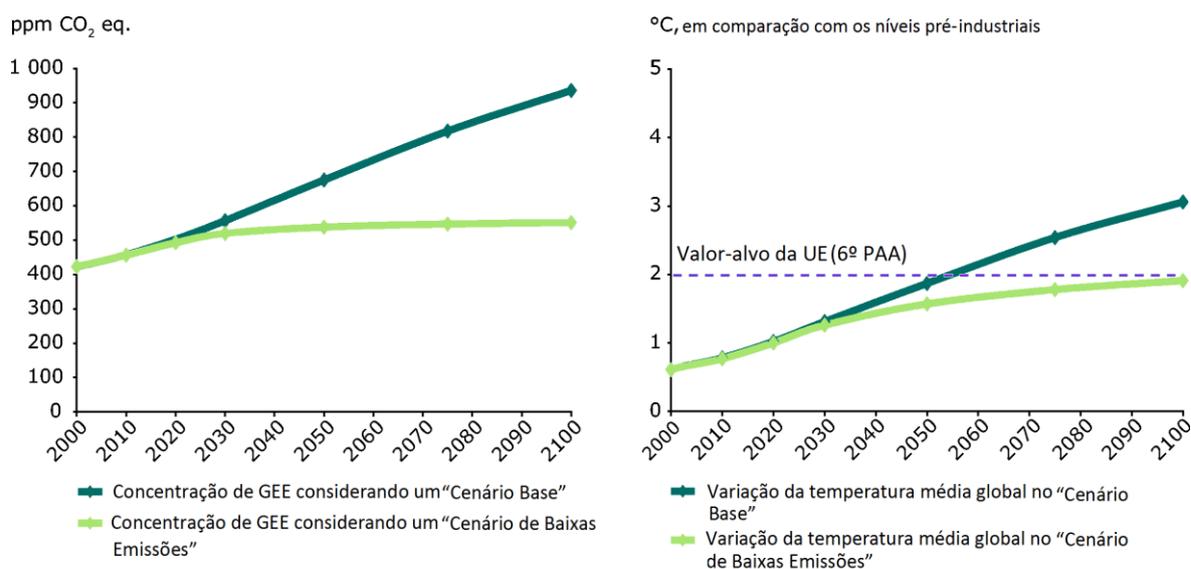


Figura 9 – Evolução das concentrações de CO₂ equivalente e da temperatura, no período de 2000 a 2100 (sobre o nível pré-industrial) (fonte: EEA, 2002).

Assim, face a esta relação, os riscos associados às alterações climáticas são reais, e a sua influência nos sistemas físicos e humanos já se fazem sentir (REA 2009, 2010). As conclusões do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas demonstram que, mesmo que até 2050 se consigam reduzir as emissões para menos de metade em relação aos níveis de 1990, será difícil evitar um aumento da temperatura até 2 °C acima dos níveis pré-industriais. Se as alterações climáticas não forem mitigadas e o aumento da temperatura ultrapassar os 2 °C, estaremos perante cenários de segurança sem precedentes, já que esse facto poderá desencadear uma série de "pontos de basculamento" que levarão a alterações climáticas aceleradas, irreversíveis e amplamente imprevisíveis (AR/CE, 2008).

Deste modo, as alterações climáticas devem ser encaradas como um multiplicador de ameaças que exacerba as tendências, tensões e instabilidade existentes. O principal desafio reside no facto de as alterações climáticas ameaçarem sobrecarregar Estados e regiões que já de si são frágeis e suscetíveis a conflitos. Importa reconhecer que os riscos não são apenas de carácter humanitário; trata-se igualmente de riscos políticos e de segurança que afetam diretamente os interesses europeus. Além disso, de harmonia com o conceito de segurança humana, é óbvio que muitas das questões relacionadas com o impacto das alterações climáticas na segurança internacional estão interligadas e requerem respostas políticas abrangentes (AR/CE, 2008).

O aquecimento global projetado depende dos cenários usados na previsão da evolução das emissões atmosféricas, encontrando-se estes dependentes de complexos fatores políticos e socioeconómicos. Com

base em seis desses cenários, os modelos climáticos projetam para o final do século XXI e em relação ao final do século XX (REA 2009, 2010):

- As melhores estimativas do aumento da temperatura média global apontam para valores entre 1,8 °C (intervalo provável de 1,1 a 2,9 °C) e 4,0 °C (intervalo provável de 2,4 a 6,4 °C);
- Aumento do nível médio do mar de 0,28 [0,18 a 0,38] metros a 0,43 [0,26 a 0,59] metros, principalmente devido à expansão térmica;
- Há maior confiança nos padrões regionais do aquecimento projetado, bem como mudanças na circulação atmosférica, precipitação e alguns aspetos dos fenómenos extremos;
- É muito provável que temperaturas altas, ondas de calor e precipitação intensa ocorram com maior frequência;
- Há um melhor conhecimento da projeção dos padrões de precipitação, sendo muito provável o aumento dos valores da quantidade de precipitação nas altas latitudes, e provável a diminuição da mesma na maior parte das regiões subtropicais.

Como resultado da frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos extremos, é expectável que surjam uma série de repercussões políticas e socioeconómicas a nível internacional. Assim, a Comissão Europeia, em conjunto com o Alto Representante, apresentou ao Conselho Europeu na Primavera de 2008 as principais formas de conflitos decorrentes das alterações climáticas e suscetíveis de sobrevir em diversas regiões do mundo (AR/CE, 2008):

- **Conflitos em torno do acesso aos recursos** – As alterações climáticas modificarão os padrões de pluviosidade e reduzirão a água potável disponível, de 20 a 30% em determinadas regiões. A escassez de água poderá causar agitação civil e conduzir a perdas económicas significativas, inclusive nos países com economias fortes, bem como uma queda na produtividade agrícola, que fomentará a insegurança alimentar, ou o seu agravamento nos países menos desenvolvidos, com uma conseqüentemente escalada (para níveis insustentáveis) dos preços dos géneros alimentícios. É previsível que as conseqüências mais intensas sejam observadas em zonas sujeitas a forte pressão demográfica.
- **Prejuízos e riscos económicos nas cidades costeiras** – As megalópoles e as respetivas infraestruturas de apoio, como as instalações portuárias e as refinarias de petróleo, encontram-se maioritariamente situados junto ao mar ou aos estuários dos rios. Em conseqüência, cerca de um quinto da população mundial reside junto às zonas costeiras, proporção que tenderá a aumentar nos próximos anos. Assim, face à previsível subida do nível do mar e ao aumento da frequência e intensidade das catástrofes naturais, todas estas regiões se encontrarão em situação de risco

eminente. O aumento das catástrofes e das crises humanitárias conduzirá a uma enorme pressão sobre os recursos dos países doadores, em particular sobre as suas capacidades para empreenderem operações de ajuda de emergência.

- **Perda de território e litígios fronteiriços** – De acordo com as projeções dos cientistas, a massa terrestre sofrerá grandes alterações durante este século. O recuo das linhas costeiras e a submersão de vastas superfícies poderá culminar numa perda de território, ou no desaparecimento de países inteiros, por exemplo no caso de pequenos Estados insulares, estimulando litígios em torno de fronteiras terrestres e marítimas ou de outros direitos territoriais. A concorrência em matéria de acesso aos recursos energéticos irá adquirir uma nova dimensão com os potenciais conflitos em torno dos recursos das regiões polares, que passarão a ser explorados em virtude do aquecimento global. Por sua vez, a desertificação poderá desencadear um círculo vicioso de degradação, migração e conflitos territoriais e fronteiriços, ameaçando a estabilidade política de regiões e países.
- **Migração por motivos ambientais** – As camadas populacionais já afetadas por más condições sanitárias, desemprego ou exclusão social tornam-se mais vulneráveis aos efeitos das alterações climáticas, que poderão ampliar ou desencadear fluxos migratórios no interior dos países e entre países. A ONU prevê que até 2020 os migrantes "ambientais" se contem aos milhões, constituindo as alterações climáticas um dos principais motores deste fenómeno.
- **Situações de fragilidade e radicalização** – As alterações climáticas podem aumentar significativamente a instabilidade nos Estados fracos ou em colapso, sobrecarregando a capacidade dos governos, já de si limitada, para responderem eficazmente aos desafios que se lhes colocam. A incapacidade dos governos para satisfazerem as necessidades da população no seu conjunto ou para oferecerem proteção perante as adversidades trazidas pelas alterações climáticas, poderá desencadear a frustração e conduzir a tensões entre diferentes grupos étnicos e religiosos no interior dos países, bem como a uma radicalização política.
- **Tensões causadas pelo abastecimento energético** – Um dos conflitos mais significativos que poderão surgir a propósito dos recursos naturais resultam da intensificação da concorrência no domínio do acesso aos recursos energéticos e do seu controlo. Este aspeto é, já de si, uma causa de instabilidade, e continuará a sê-lo. No entanto, dado que uma grande parte das reservas de hidrocarbonetos se situa em regiões vulneráveis aos impactes das alterações climáticas, e que muitos dos Estados produtores de petróleo e de gás se defrontam já com importantes desafios sociais, económicos e demográficos, é provável que a instabilidade venha a aumentar. Esta situação poderá, por sua vez, aumentar ainda mais a insegurança energética e a concorrência em torno dos recursos.

- **Pressão sobre a governação internacional** – Os impactes das alterações climáticas alimentará as políticas de ressentimento entre os países que mais responsabilidades têm sobre este fenómeno e os que mais sofrem com ele. Os impactes das políticas climáticas de mitigação (ou os fracassos políticos) serão fonte de uma tensão política tanto a nível nacional como a nível internacional.

É no entanto de salientar, que muitos impactes poderão ser evitados, reduzidos ou atrasados através de medidas de mitigação e de um conjunto de medidas de adaptação, designadamente através da regulação das atividades humanas e de uma estratégia de adaptação aos efeitos das alterações climáticas no território e na saúde humana. Confrontar as alterações climáticas é, portanto, um duplo desafio: atacar a origem do problema, isto é, as emissões de gases com efeito de estufa, e preparar as sociedades de todo o mundo para lidar com os impactes biofísicos e socioeconómicos das alterações do clima (Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010).

2.3 A Qualidade do Ar Ambiente

A poluição atmosférica apresenta-se como uma das áreas que suscita uma elevada preocupação na maioria dos cidadãos europeus. Esta não apresenta limites físicos, encontrando-se diretamente dependente dos fenómenos atmosféricos de dispersão e transporte, sendo a degradação da qualidade do ar ambiente função das emissões e da variabilidade das condições meteorológicas. Segundo estes princípios, são definidas diversas escalas geográficas de análise, sendo as escalas local e regional/transfronteiriça as mais utilizadas para a avaliação dos poluentes atmosféricos e dos seus impactes. À escala local são os grandes centros urbanos que apresentam uma maior deterioração da qualidade do ar, como resultado das emissões provenientes do setor industrial e do tráfego rodoviário, e cujos maiores impactes se fazem sentir na saúde humana (provocando doenças do foro respiratório e mortes prematuras em toda a Europa), na deterioração do património construído e no ambiente em geral. Por sua vez, à escala regional, os fenómenos de transporte de poluentes e as reações fotoquímicas, fomentam a formação de poluentes secundários, como é o caso do ozono troposférico. Associados a este poluente, para além dos efeitos na saúde e bem-estar humano, os seus impactes fazem-se também sentir na vegetação e nos materiais, tendo ainda um papel relevante no fenómeno do efeito de estufa (EEA, 2011f).

A poluição atmosférica é hoje responsável por várias centenas de milhares de mortes prematuras na Europa, aumentando em cada ano as admissões hospitalares, a medicação extra e os dias de trabalho perdidos, o que se traduz em elevados custos para a União Europeia. Cumulativamente, e apesar dos danos ambientais (ecossistemas, culturas e florestas), resultado de fenómenos de acidificação e eutrofização, serem muito difíceis de quantificar, é provável que sejam também muito substanciais. Os poluentes que

hoje são reconhecidos como os mais preocupantes no que respeita aos impactes na saúde humana são as partículas em suspensão e o ozono troposférico. A exposição máxima e a exposição a longo prazo podem dar origem a uma variedade de efeitos na saúde, desde efeitos mínimos no sistema respiratório até à mortalidade (MAOTDR/IA, 2006). Desde 1997, e segundo a Agência Europeia do Ambiente, estima-se que cerca de 45% da população urbana europeia possa ter estado exposta a concentrações de partículas em suspensão no ambiente acima do limite estabelecido a nível comunitário para a proteção da saúde humana e, até 60% exposta a níveis de ozono superiores ao valor-limite estabelecido a nível comunitário. Estima-se ainda que a exposição a $PM_{2,5}$ (partículas em suspensão) presentes no ar seja responsável por uma redução de mais de oito meses na esperança média de vida da União Europeia (EEA, 2011f).

A qualidade do ar é então o termo que traduz o grau de poluição no ar que respiramos. Em Portugal, a qualidade do ar é medida em estações de monitorização da qualidade do ar, geridas pelas Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) no Continente e pelas Direções Regionais do Ambiente nas Regiões Autónomas. Os dados destas estações de monitorização são transmitidos para uma base de dados de âmbito nacional (QualAr), gerida pela Agência Portuguesa do Ambiente, onde diariamente é calculado e disponibilizado o Índice de Qualidade do Ar (IQAr) para cada uma das Zonas ou Aglomerações e ainda para as cidades de Lisboa, Porto e Barreiro. Este Índice tem como objetivo fornecer informação de fácil leitura sobre o estado da qualidade do ar numa determinada área (Zona/Aglomeração) (REA 2009, 2010).

Com base na análise realizada aos valores diários do Índice relativos ao ano de 2010, constata-se que a classe predominante do IQAr foi “Bom”. Por outro lado, o número de dias com a classificação do IQAr “Mau” aumentou de 2 dias em 2009, para 7 dias em 2010, e foram registados nas zonas de Vale do Sousa, Centro Interior, Zona de Influência de Estarreja e Alentejo Interior. Além disso, a análise dos resultados do IQAr para o mesmo período, permite concluir que se obtiveram melhorias significativas na qualidade do ar em algumas zonas ou aglomerações, nomeadamente nas de Setúbal, Área Metropolitana de Lisboa Sul, Vale do Ave e Braga, que no entanto ainda apresentam um número de dias com classificação “Frac” ou “Médio” significativos (REA 2011, 2011). Assim, a elaboração de Planos de Melhoria da Qualidade do Ar e respetivos programas de execução constitui uma resposta necessária aos resultados da avaliação da qualidade do ar, particularmente em situações de excedência dos valores limite, tendo como objetivo o alcance de níveis que garantam a proteção da saúde humana e do ambiente em geral, através de opções custo/eficácia (Decreto-lei nº. 102/2010).

2.4 Instrumentos de Gestão do Recurso Ar

O ano de 2007 marcou um ponto de viragem na política da União Europeia em matéria de clima e energia. A Europa mostrou-se disposta a assumir uma posição de liderança a nível mundial no que respeita aos desafios colocados pelas alterações climáticas e pelo abastecimento de energia segura, sustentável e competitiva, bem como ao desafio de fazer da economia europeia um modelo de desenvolvimento sustentável no século XXI. Verificou-se uma evolução decisiva na opinião pública, que compreendeu que era imperativo abordar a questão das alterações climáticas e da poluição atmosférica, e que a Europa se devia adaptar a uma nova situação, nomeadamente à redução das suas emissões GEE e ao desenvolvimento de fontes de energia renováveis e sustentáveis (CCE, 2008).

Como resultado, o Conselho Europeu fixou objetivos precisos, juridicamente vinculativos, que representavam de forma clara a determinação da Europa e que pressuponham a modernização da economia europeia através da construção de um futuro no qual as tecnologias e a sociedade se encontram adaptadas às novas necessidades e no qual são criadas novas oportunidades de crescimento e de emprego (CCE, 2008):

- Reduzir, até 2020, as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 20%, aumentando até 30% caso se obtenha um acordo internacional que vincule outros países desenvolvidos a atingir reduções de emissões comparáveis, e os países em desenvolvimento economicamente mais avançados a contribuir adequadamente, de acordo com as suas responsabilidades e respetivas capacidades.
- Elevar para 20% a parte das energias renováveis no consumo energético da UE até 2020.

Além destes aspetos, a necessidade de melhorar a qualidade do ar conduziu os Estados-Membros e a União Europeia a implementar ações diversas e a participar em convenções internacionais. As ações ao nível da UE focaram-se no estabelecimento de normas de qualidade para o ar ambiente, e na luta contra os problemas das chuvas ácidas e do ozono troposférico. Como resultado, as emissões poluentes das grandes instalações de combustão e das fontes móveis foram reduzidas, a qualidade dos combustíveis foi melhorada e integraram-se as exigências de proteção ambiental nos setores dos transportes e da energia. No entanto, apesar dos progressos significativos alcançados, atualmente ainda persistem sérios impactes derivados da poluição atmosférica, tanto à escala europeia como nacional, sendo reflexo deste aspeto, por exemplo, uma inexpressiva redução das concentrações de partículas em suspensão e de ozono na atmosfera, desde 1997 (MAOTDR/IA, 2006).

2.4.1 Estratégia de Melhoria da Qualidade do Ar

Em 2001, a União Europeia considerou que uma correta abordagem dos problemas de qualidade do ar mais persistentes, como os relacionados com o ozono e as partículas, e das questões ambientais como a acidificação e a eutrofização, apenas poderia ser conseguida através da adoção de uma estratégia coerente de combate à poluição atmosférica e aos seus efeitos (MAOTDR/IA, 2006). A nível internacional, a questão das emissões de poluentes atmosféricos está também a ser tratada pela Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância da UNECE (a Convenção LRTAP) e pelos respetivos protocolos.

O Sexto Programa Comunitário de Ação em Matéria de Ambiente (6º PAA) apelou ao desenvolvimento de uma Estratégia Temática sobre Poluição Atmosférica visando atingir níveis de qualidade do ar que não fomentassem efeitos negativos nem riscos significativos para a saúde humana e o ambiente (MAOTDR/IA, 2006). A União Europeia atuou a vários níveis para reduzir a exposição à poluição atmosférica, nomeadamente: através de legislação, pela via da cooperação com setores responsáveis pela poluição atmosférica; através das autoridades nacionais e regionais e de organizações não-governamentais e de investigação, visando reduzir a exposição à poluição atmosférica; e através da redução das emissões e da fixação de valores limites para a qualidade do ar (EEA, 2011e). Por forma a concretizar os objetivos assumidos, a Comissão Europeia lançou um programa de análise técnica e de desenvolvimento de políticas, o Programa CAFE - *Clean Air for Europe*, que presta aconselhamento político integrado e estratégico a longo prazo em matéria de poluição atmosférica, para a proteção da saúde humana e do ambiente (MAOTDR/IA, 2006). O Programa CAFE culminou, em setembro de 2005, na concretização do seu principal objetivo: a publicação da Estratégia Temática sobre Poluição Atmosférica, que estabeleceu medidas e objetivos ambiciosos, mas economicamente viáveis para a política europeia em matéria de qualidade do ar até 2020 (EEA, 2011e).

Ao nível dos Estados-Membros, e como resultado da publicação da Estratégia de 2005, a Comissão Europeia lançou uma abrangente revisão da legislação sobre a qualidade do ar, incluindo a Diretiva relativa aos limites nacionais (Tetos Nacionais de Emissão – TEN) (Diretiva NEC 2001/81/EC). Esta estabelecia os valores-limite nacionais para as emissões dos quatro poluentes atmosféricos principais (óxidos de azoto, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis e amoníaco), prejudiciais para a saúde humana e o ambiente. Atualmente encontra-se em vigor a Diretiva 2008/50/CE de 21 de maio, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa, apresentando-se como uma dos principais instrumentos implementadas para combater a poluição atmosférica, sendo a primeira diretiva comunitária a incluir limites para concentrações de PM_{2.5} (partículas finas em suspensão) no ambiente, consolidando ainda vários textos legislativos em vigor relativos à qualidade do ar num único texto. As ações e medidas definidas na Estratégia dividem-se em dois grandes grupos (EEA, 2011f):

- A. Intervenção ao nível da eficácia da legislação de qualidade do ar e das emissões com a:
- Simplificação da legislação da qualidade do ar (reforço da sua implementação, modernização da monitorização e transmissão de dados e controlo da exposição às PM_{2,5});
 - Revisão da Diretiva relativa aos Tetos Nacionais de Emissão;
 - Coerência com outras políticas ambientais;
- B. Integração da preocupação com a qualidade do ar noutras áreas políticas, tais como:
- Energia – ao nível das pequenas instalações de combustão e emissão de compostos orgânicos voláteis nas estações de abastecimento de combustível;
 - Transportes – ao nível do transporte terrestre, aviação e navegação;
 - Agricultura.

2.4.2 Estratégia de Mitigação das Alterações Climáticas

A 4 de fevereiro de 1991, o Conselho Europeu autorizou a Comissão a participar em nome da Comunidade Europeia nas negociações relativas à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), adotada em Nova Iorque em 9 de maio de 1992. A Convenção-Quadro foi ratificada pela Comunidade Europeia em 1993, considerando-se que esta contribuiu amplamente para a criação de princípios-chave para a luta internacional contra as alterações climáticas, nomeadamente, pela definição do princípio das “responsabilidades comuns mas diferenciadas”. Contribuiu ainda para o reforço da consciencialização do público a nível mundial em relação aos problemas ligados às alterações climáticas. No entanto, a convenção não incluía compromissos quantificados e detalhados por país em termos de redução das emissões de gases com efeito de estufa (EEA, 2011g).

Os Estados signatários da Convenção decidiram portanto, durante a primeira conferência das Partes, que teve lugar em Berlim em março de 1995, negociar um protocolo a aplicar pelos países industrializados para o período posterior a 2000. Na sequência de longos trabalhos, o Protocolo de Quioto foi adotado em 11 de dezembro de 1997, apresentando-se como o instrumento jurídico internacional mais relevante na luta contra as alterações climáticas. O Protocolo estabeleceu metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa para muitos países industrializados, incluindo a maioria dos Estados-Membros da UE (8% em relação aos níveis de 1990, para todos os Estados que eram membros da UE antes de 2004), e limitou o aumento das emissões dos restantes países para o primeiro período de compromisso de 2008-2012 (Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006). Além disso, estipulou que o mais tardar um ano antes do primeiro período de compromissos, os Estados signatários teriam de criar um sistema nacional de

estimativa das emissões de origem humana e da absorção pelos sumidouros de todos os gases com efeito de estufa (EEA, 2011g).

Para a realização dos objetivos assumidos, o Protocolo propôs uma série de meios (EEA, 2011g):

- Reforço ou criação de políticas nacionais de redução das emissões (aumento da eficiência energética, promoção de formas sustentáveis de agricultura, desenvolvimento das fontes renováveis de energia, entre outros);
- Cooperação com as restantes Partes contratantes (intercâmbio de experiências ou de informação, coordenação das políticas nacionais através de licenças de emissão, aplicação conjunta e mecanismo de desenvolvimento limpo).

No âmbito dos compromissos internacionais, nomeadamente do Protocolo de Quioto, Portugal assumiu o objetivo de limitar o aumento das suas emissões de gases com efeito de estufa em 27%, no período de 2008-2012, relativamente aos valores de 1990. Além disso, foram ainda estabelecidas metas para um período posterior (a atingir em 2020) das quais se destacam as seguintes (Seixas, *et al.*, 2008):

- Redução de emissões de gases com efeito de estufa para os setores não abrangidos pelo regime de comércio de emissões (construção, transporte, resíduos), garantindo o contributo de todas as áreas. Para Portugal o objetivo é concretizado com um limite de +1% para o crescimento de emissões de GEE, sobre as registadas em 2005. Este limite será alterado, no caso da redução global de emissões de GEE na UE apresentar como meta os 30%;
- Objetivos juridicamente vinculativos que promovem o aumento da quota-parte das energias renováveis na combinação energética, refletindo as necessidades e o potencial de cada país;
- Alteração do atual regime de CELE, nomeadamente no que se refere à definição, à escala europeia, de tetos de emissão para os diversos setores de atividade; da integração de outros GEE para além do CO₂; e uma redução anual linear de emissões, a fim de atingir uma redução global de 21%, relativamente às emissões verificadas de 2005;
- Novas regras em matéria de sequestro e armazenamento de carbono e de subsídios ambientais.

Para a consecução dos objetivos assumidos, constituem instrumentos fundamentais (APA, s.d.):

- O **Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC)**, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006, de 23 de agosto e alterado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 1/2008, de 4 de janeiro, que define um conjunto de políticas e medidas internas que visam a redução de emissões de GEE por parte dos diversos setores de atividade;

- O **Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE)**, que é aplicável a um conjunto de instalações fortemente emissoras de GEE, e como tal incluídas no Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE);
- O **Fundo Português de Carbono**, criado pelo Decreto-Lei n.º 71/2006, de 24 de março, que visa o desenvolvimento de atividades para a obtenção de créditos de emissão de GEE, designadamente através do investimento em mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Quioto.

Reduzir as emissões é, assim, a primeira linha de combate às alterações climáticas, em particular na mitigação do risco das suas consequências. Para garantir esse objetivo, a União Europeia e Portugal acreditam que o principal instrumento passará pela negociação de um acordo internacional pós-2012, que apresente metas ambiciosas de redução de emissões para os países desenvolvidos, complementado com ações significativas por parte das principais economias dos países em vias de desenvolvimento (Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010).

2.4.3 Estratégia de Adaptação às Alterações Climáticas

Apesar da existência do instrumento internacional para a redução de emissões, o Protocolo de Quioto, e dos correspondentes instrumentos nacionais, considera-se, face aos padrões atuais de conhecimento, que as alterações do clima são inevitáveis, existindo ainda grande consenso de que as emissões globais de gases com efeito de estufa continuarão a aumentar nas próximas décadas. O progresso científico tem, além disso, permitido reconhecer que, mesmo que as concentrações de gases com efeito de estufa alcancem a curto prazo os níveis pretendidos pelos Estados-membros, os tempos característicos associados aos processos climáticos levarão vários séculos a estabilizar, pelo que, face aos dados empíricos e ao atual conhecimento científico, se revela imprescindível que a sociedade adote, com caráter prioritário, as medidas necessárias para a respetiva adaptação às alterações climáticas que se avizinham (REA 2009, 2010).

O IPCC agrega periodicamente o estado da arte em matéria de cenários climáticos, identificando impactes e estimando os custos das respetivas medidas de resposta. No seu 4.º relatório (2007), ficaram evidentes assimetrias regionais na distribuição de impactes, sendo identificadas em particular a região Mediterrânica e o Sul da Europa como as mais vulneráveis e cujos impactes graves serão mais significativos. Para o Sul da Europa, as projeções apontam para temperaturas mais altas e situações de seca, redução das disponibilidades hídricas e consequente diminuição da potência hídrica, implicações no turismo de Verão e, em geral, redução da produtividade agrícola. São também projetados aumentos do

risco na saúde devido ao aumento das ondas de calor e frequência dos fogos florestais (Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010).

Apesar da incerteza que as previsões de longo prazo ainda comportam, o 4.º relatório do IPCC assenta já numa importante base analítica de mudança climática verificada e não só estimada. Na verdade, as observações diretas de alterações do clima atual, expressas no relatório, permitem afirmar que o aquecimento do sistema climático é inequívoco, evidenciado a partir do aumento das temperaturas globais do ar e do oceano, a fusão do gelo e neve e a subida do nível médio do mar. Tem-se por esse motivo observado, entre a comunidade científica, uma convergência crescente, quer quanto às tendências de alteração do clima, quer quanto ao seu grau de certeza ou de previsibilidade. É então claro que o consenso científico é já hoje suficientemente robusto, e que esta é uma matéria onde faz particular sentido evocar o princípio da precaução, pelo que essa incerteza não deve ser motivo para adiar a consciencialização para a necessidade das sociedades se adaptarem às alterações climáticas e para o início das primeiras atividades de adaptação (Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010).

Assim, a Comissão Europeia publicou, em 2007, o Livro Verde sobre *Adaptação às alterações climáticas na Europa – possibilidades de ação da União Europeia*, e, em 2009, o Livro Branco sobre a *Adaptação às alterações climáticas: para um quadro de ação europeu*. Este último estabeleceu um quadro para a redução da vulnerabilidade da UE ao impacte das alterações climáticas, baseando-se na ampla consulta lançada pelo Livro Verde e em ulteriores esforços de investigação que identificaram as medidas a adotar a curto prazo. O quadro apresentado pretendia completar a ação dos Estados-Membros e constituir um apoio aos esforços internacionais mais vastos de adaptação às alterações climáticas, nomeadamente nos países em desenvolvimento (CCE, 2009).

A Adaptação afeta a maioria dos setores económicos e envolve vários níveis de tomada de decisão. Por «adaptação» entende-se, neste contexto, a ação empreendida para enfrentar as alterações climáticas, podendo tratar-se quer de resolver os problemas atuais quer de antecipar as alterações que venham a ocorrer, com o objetivo de reduzir os riscos e os prejuízos com o menor custo possível, explorando eventuais benefícios. Entre os exemplos de medidas que podem ser tomadas destaca-se a exploração mais eficiente de recursos hídricos escassos; a adaptação da legislação, em matéria de construção, às futuras condições climáticas e a fenómenos meteorológicos extremos; a instalação de dispositivos de proteção contra as inundações; a elevação dos níveis dos diques; o desenvolvimento de culturas tolerantes à seca; a escolha de espécies e práticas florestais menos vulneráveis a tempestades e a incêndios; ou ainda a criação de corredores terrestres destinados à migração das espécies (CCE, 2007b).

A adaptação inclui tanto estratégias nacionais ou regionais como medidas concretas tomadas a nível comunitário ou individual, podendo ser preventiva ou reativa. Segundo o descrito no Livro Verde, o desenvolvimento de estratégias de adaptação passa por dois níveis fundamentais (CCE, 2007b):

- **Nível regional** – A adaptação às alterações climáticas constitui um desafio para os responsáveis pelo ordenamento do território na Europa, em especial ao nível regional. O ordenamento do território é uma questão transetorial, sendo assim um instrumento adequado para definir medidas de adaptação rentáveis. Os requisitos mínimos em matéria de ordenamento do território, utilização do solo e modificação da sua utilização, no contexto da adaptação, podem desempenhar um papel importante tanto em campanhas de sensibilização destinadas ao público em geral, aos responsáveis políticos e a especialistas, como no desencadeamento de uma abordagem mais proactiva, a todos os níveis. Será ainda de considerar a elaboração de documentos específicos de orientação técnica e o estudo de casos e de boas práticas. A União Europeia deverá dar apoio às regiões para a implementação do processo de adaptação e o intercâmbio de boas práticas.
- **Nível local** – Muitas das decisões que influenciam direta ou indiretamente a estratégia de adaptação são tomadas a nível local. É ainda a este nível que melhor se conhecem as condições naturais e humanas prevaletentes, logo, as autoridades locais contam-se entre os protagonistas deste processo. As mudanças de comportamento das sociedades e das comunidades depende, em larga medida, do grau de sensibilização para o problema. Os cidadãos e outros intervenientes podem não estar ainda conscientes da escala e da gravidade das consequências das alterações climáticas, designadamente sobre as suas atividades.

Acompanhando a tendência da UE, Portugal, durante 2009, discutiu e elaborou a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAA). O documento orienta-se pelos objetivos de informar, divulgar e sensibilizar os cidadãos quanto ao tema, reduzir o risco e aumentar a eficácia das respostas, e ainda de encetar a cooperação a nível internacional (Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010). Esta Estratégia, conjugada com o Programa Nacional para as Alterações Climáticas, dotou o País de instrumentos de referência para enfrentar os desafios de adaptação às alterações climáticas, promovendo a identificação de um conjunto de linhas de ação e de medidas de adaptação a aplicar, designadamente através de instrumentos de carácter setorial, tendo em conta que a adaptação às alterações climáticas é um desafio eminentemente transversal, que requer o envolvimento de um vasto conjunto de setores e uma abordagem integrada (REA 2009, 2010).

2.4.4 Pacote Energia/Clima

Os acontecimentos políticos dos últimos anos originaram uma alteração da prioridade política em matéria de sustentabilidade ambiental, competitividade e segurança do abastecimento energético. O debate público sobre as fontes de energias renováveis, novas tecnologias, eficiência energética, emissões de gases com efeito de estufa e alterações climáticas colocou igualmente a energia no topo da agenda política a nível europeu e mundial (EEA, 2011h).

Em janeiro de 2007, a Comissão Europeia propôs um pacote integrado relativo à energia e às alterações climáticas. O pacote energético visava estabelecer uma nova Política Energética para a Europa com o objetivo de combater as alterações climáticas e dinamizar a segurança energética e a competitividade, fundamentados por três pilares principais (EEA, 2011h):

- **Um verdadeiro mercado interno da energia:** visa proporcionar alternativas reais aos utilizadores da energia e estimular os avultados investimentos necessários no setor energético. Desde 1 de julho de 2007, todos os cidadãos europeus têm a possibilidade de escolher livremente o seu fornecedor de gás e eletricidade, estando a Comissão Europeia responsável por assegurar a concorrência leal e dinâmica em todos os Estados-Membros.
- **Acelerar a transição para um sistema energético com baixa produção de carbono:** visa manter a posição da União Europeia enquanto líder mundial em energias renováveis, propondo que pelo menos 20% das necessidades energéticas da UE sejam satisfeitas através de fontes de energias renováveis em 2020.
- **Eficiência energética:** visa poupar 20% do consumo de energia primária em 2020, reafirmando um objetivo anterior da Comissão. Propõe igualmente o aumento da utilização de veículos energeticamente eficientes nos transportes; normas mais restritas e melhor rotulagem dos eletrodomésticos, bem como um melhor desempenho energético dos atuais edifícios da UE e uma maior eficiência da produção, transmissão e distribuição de calor e eletricidade.

Em março de 2007, o Conselho Europeu aceitou a maioria das propostas e aprovou ações para desenvolver uma política europeia integrada em matéria de clima e energia. Assim, em 2009 foi adotada pela UE o pacote energia-clima, um conjunto de seis atos legislativos da União Europeia para implementar o “20-20-20 alvos”, a atingir até 2020 (redução de 20% das emissões de GEE em relação a 1990; aumento para 20% da quota-parte das energias renováveis no consumo de energia da UE; e o aumento de 20% da eficiência energética). O núcleo do pacote apresenta-se composto por quatro peças de legislação complementar (EEA, 2011g):

1. **Revisão e fortalecimento do Sistema de Comércio de Emissões (ETS)**, onde se fixam os níveis totais de emissão de cada Estado-Membro e o número de licenças de emissão atribuído a cada instalação dentro do seu território até 2013, prevendo-se uma redução linear anual até 2020 e posteriormente, a substituição progressiva da atribuição gratuita de licenças de leilão, bem como uma expansão do sistema para novos setores e gases (Diretiva 2009/29/CE).
2. A chamada “**Decisão *Effort Sharing***”, que estabelece metas anuais obrigatórias de emissão de gases de efeito estufa para os Estados-Membros, cada um deles contribuindo de acordo com a sua riqueza relativa. Estas metas dizem respeito às emissões dos setores não incluídos no Sistema de Comércio de Emissões de UE, tais como os transportes, a habitação, a agricultura e os resíduos. Em geral, os objetivos nacionais irão reduzir as emissões da UE a partir de setores não ETS em 10% até 2020, em comparação aos níveis de 2005 (Decisão n.º 406/2009).
3. **Metas nacionais obrigatórias para as energias renováveis**. Cada Estado-Membro deverá elaborar um Plano de Ação Nacional que estabeleça as quotas de energia renovável nos setores de transporte, assim como na produção de calor e eletricidade. Os Planos deverão ter em linha de conta os objetivos da UE face à redução da dependência externa de energia e à redução das emissões de GEE (Diretiva 2009/28/CE).
4. Um quadro jurídico para promover o desenvolvimento e utilização segura de **captura, transporte e armazenagem geológica de carbono (CCS)** (Diretiva 2009/31/CE).

A nível nacional, o Governo definiu as grandes linhas estratégicas para o setor da energia, estabelecendo a Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020), (aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de abril de 2010, que substitui a anterior Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de outubro) (MEI, s.d.). As opções de política energética assumidas na ENE 2020 assumem-se como um fator de crescimento de economia, de promoção da concorrência nos mercados da energia, de criação de valor e de emprego qualificado em setores com elevada incorporação tecnológica. Pretende-se assim, manter Portugal na fronteira tecnológica das energias alternativas, potenciando a produção e exportação de soluções com elevado valor acrescentado, que permitam ainda diminuir a dependência energética do exterior e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. A Estratégia nacional tem por objetivo (MEI, s.d.):

1. Reduzir a dependência energética do País face ao exterior para 74% em 2020, atingindo o objetivo de 31% da energia final, através de uma crescente utilização de recursos energéticos endógenos, contribuindo para os objetivos comunitários;
2. Garantir o cumprimento dos compromissos nacionais no contexto das políticas europeias de energia e de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020, 31% do consumo final

- bruto de energia, 60% da eletricidade produzida e 10% do consumo de energia no setor dos transportes rodoviários tenham origem em fontes renováveis;
3. Criar riqueza e consolidar um *cluster* energético no setor das energias renováveis e da eficiência energética, criando mais 121.000 postos de trabalho e proporcionando exportações equivalentes a 400 M€.
 4. Promover o desenvolvimento sustentável criando condições para reduzir adicionalmente, no horizonte de 2020, 20 milhões de toneladas de emissões de CO₂, garantindo de forma clara o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas por Portugal no quadro europeu, bem como a criação de condições para a recolha de benefícios diretos e indiretos no mercado de emissões que serão reinvestidos na promoção das energias renováveis e da eficiência energética.
 5. Reduzir em 25% o saldo importador energético (cerca de 2.000 milhões €) com a energia produzida a partir de fontes endógenas, possibilitando uma redução de importações estimada em 60 milhões de barris de petróleo.

Para além destes objetivos, a política energética para as FER, através da ENE 2020, estabelece igualmente um conjunto de medidas específicas com vista à sua promoção (PNAER, 2010):

- Criar, até 2012, um fundo de equilíbrio tarifário, que contribua para minimizar as variações das tarifas de eletricidade, beneficiando os consumidores e criando um quadro de sustentabilidade económica que suporte o crescimento a longo prazo da utilização das energias renováveis;
- Desenvolver, no âmbito da aplicação do quadro de referência estratégico nacional e dos outros instrumentos de apoio ao desenvolvimento económico, linhas de apoio para o investimento no domínio das energias renováveis, designadamente no apoio ao solar térmico, visando também o incremento das exportações nesses domínios;
- Atualizar o Programa de microprodução, estabelecendo metas mais ambiciosas e introduzir um programa de mini-produção destinado a projetos com potências até 150 kW ou 250 kW, em função das tecnologias;
- Aprovar medidas de promoção da produção de biomassa florestal, para assegurar as necessidades de consumo já instaladas e a instalar, através do acesso a apoios públicos, da promoção da certificação da gestão florestal sustentável, avaliação e promoção das culturas energéticas, bem como da biomassa residual resultante das atividades agrícolas e agroindustriais;
- Criar um sistema de planeamento e monitorização permanente da procura e da oferta potencial de energia de forma a otimizar a gestão integrada dos recursos disponíveis, melhorando a segurança

do abastecimento de energia, promovendo uma utilização mais eficiente, e integrando as diferentes energias renováveis;

- Concretizar o Plano Nacional de Barragens de Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), os novos empreendimentos hídricos em curso e os reforços de potência previstos, permitindo aproveitar melhor o potencial hídrico e facilitar o crescimento da energia eólica, pela introdução de um elemento estabilizador na forma de capacidade reversível nos investimentos previstos;
- Criar condições para a introdução e massificação da utilização do veículo elétrico a nível nacional, potenciador do consumo das energias renováveis produzidas, posicionando Portugal como o país de referência ao nível do teste, desenvolvimento e produção de soluções de mobilidade elétrica.

Neste ponto é ainda de salientar que os Estados-Membros da Comunidade Europeia apresentam potenciais distintos de energia renovável e utilizam diferentes regimes de apoio a nível nacional para a sua promoção, sendo que a maioria dos Estados aplica regimes de apoio que só concedem incentivos a energias provenientes de fontes renováveis produzidas no seu território. Para que os regimes de apoio nacionais funcionem adequadamente, é importante que os Estados-Membros possam controlar o efeito e os custos desses mesmos regimes em função dos seus diferentes potenciais. No entanto, é essencial promover a interligação entre países, uma vez que para além de atenuar a variabilidade, esta interligação pode reduzir os custos de compensação, encorajar uma verdadeira concorrência que conduza a preços mais baixos e apoiar o desenvolvimento de redes de transporte e distribuição. Além disso, a partilha de capacidades de transporte e a sua utilização otimizada poderão contribuir para evitar o recurso excessivo a novas capacidades (Diretiva 2009/28/CE).

A falta de regras transparentes e de coordenação entre os diferentes organismos de autorização impedem a otimização da utilização da energia proveniente de fontes renováveis. Como resultado, a estrutura específica deste setor deverá ser tida em conta no momento em que as autoridades nacionais, regionais e locais, procederem à revisão dos seus procedimentos administrativos de autorização da construção e exploração de instalações e infraestruturas de rede de transporte e distribuição associadas, para a produção de eletricidade, de aquecimento e arrefecimento ou de combustíveis para transportes a partir de FER. Assim, e segundo a Diretiva nº. 2009/28/CE de 23 de abril, os procedimentos de aprovação administrativa deverão ser simplificados com uma calendarização transparente para as instalações que utilizam fontes renováveis. As regras de planeamento e as orientações deverão ser adaptadas de modo a ter em conta a utilização de equipamento elétrico e de aquecimento e arrefecimento economicamente eficiente e respeitador do ambiente.

Cumulativamente, o acesso prioritário e o acesso garantido à eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis são essenciais para a integração destas fontes no mercado interno da eletricidade. Os

requisitos relativos à manutenção da fiabilidade e segurança da rede e à mobilização podem variar consoante as características da rede nacional e da segurança do respetivo funcionamento. O acesso prioritário à rede dá aos produtores de eletricidade proveniente de FER, que a ela estejam ligados, a garantia de que poderão vender e transportar a eletricidade de acordo com as regras de ligação, em qualquer momento, desde que a fonte esteja disponível. Além disso, no caso de a eletricidade proveniente de fontes renováveis se encontrar integrada no mercado diário, o acesso garantido assegura que toda a eletricidade vendida e beneficiária de apoio tenha acesso à rede, permitindo a utilização de um máximo de energia elétrica. No entanto, é de realçar que podem ocorrer situações em que não é possível assegurar plenamente o transporte e a distribuição de eletricidade produzida a partir de FER sem que esta afete a fiabilidade ou a segurança do sistema de rede. Nestas circunstâncias, poderá ser adequado conceder uma compensação financeira aos produtores (Diretiva 2009/28/CE).

Capítulo III – Utilização da Biomassa Florestal para Fins Energéticos

A União Europeia encontra-se empenhada em dar uma resposta forte ao incremento da poluição atmosférica, recorrendo para tal ao desenvolvimento de uma política energética integrada e coerente. Os elementos fundamentais dessa política são, num contexto de crescimento económico cada vez mais forte, a necessidade de reduzir a procura de energia; o aumento da utilização das fontes de energia renováveis, dado o seu potencial de produção interna e a sua sustentabilidade; a diversificação das fontes de energia e o aumento da cooperação internacional. Estes elementos poderão ajudar a Europa a reduzir a sua dependência face às importações de energia, aumentar a sustentabilidade e estimular o crescimento e o emprego (CCE, 2005).

Neste capítulo apresenta-se o estado de arte da Bionergia na Europa, dando-se particular ênfase à Biomassa Sólida. Além disso, pretende-se expor a disponibilidade dos recursos nacionais à implementação da Biomassa Florestal como fonte de energia, bem como a política de promoção desta FER.

3.1 A Bionergia na Europa

O processo de concertação multilateral desenvolvido a partir dos resultados da Conferência do Rio em 1992, nomeadamente no âmbito da biodiversidade e das alterações climáticas, contribuiu de uma forma relevante para a sensibilização da sociedade no que diz respeito aos impactes do consumo de energia,

nomeadamente, a sua relação com as emissões de gases com efeito de estufa e o seu contributo para o aquecimento global (Ferreira *et al.*, 2009).

O controlo do consumo de energia na Europa e a utilização crescente de energia proveniente de fontes renováveis, a par da poupança de energia e do aumento da eficiência energética, constituem partes importantes do pacote de medidas necessárias para reduzir as emissões de GEE e cumprir o Protocolo de Quioto, bem como os restantes compromissos, assumidos a nível comunitário e internacional, de redução das emissões de GEE para além de 2012. Estes fatores apresentam igualmente um importante papel na promoção da segurança do aprovisionamento energético, na promoção do desenvolvimento tecnológico e da inovação e na criação de oportunidades de emprego e desenvolvimento regional, especialmente em zonas rurais e isoladas (Diretiva 2009/28/CE).

Foram já reconhecidas as oportunidades para potenciar o crescimento económico através da inovação e de uma política energética sustentável e competitiva. A produção de energia a partir de fontes renováveis depende frequentemente das pequenas e médias empresas (PME), locais e regionais, constituindo oportunidades significativas de crescimento e emprego nas regiões de investimento. Por conseguinte, a Comissão e os Estados-Membros apoiam as medidas de desenvolvimento tomadas nas esferas nacional e regional nesses domínios, incentivam o intercâmbio das melhores práticas na produção de energia a partir de fontes renováveis entre as iniciativas de desenvolvimento locais e regionais, e promovem a utilização de fundos estruturais nesta área. Cumulativamente, é fundamental apoiar a demonstração e comercialização das tecnologias de produção descentralizada de energia renovável. A transição para este modelo de produção de energia apresenta muitas vantagens, tais como a utilização de fontes de energia locais, o reforço da segurança do abastecimento energético a nível local, o encurtamento das distâncias de transporte e a redução das perdas na transmissão de energia (Diretiva 2009/28/CE).

O Conselho da Primavera de 2004 concluiu que o aumento da utilização de energias renováveis na Europa seria essencial tanto por razões ambientais como de competitividade, tendo a bioenergia² sido destacada pelas inúmeras vantagens que apresenta em relação às fontes de energia convencionais, bem como em relação a outras energias renováveis, em particular os seus custos relativamente baixos, o variado leque de utilização (produção de eletricidade, calor ou combustível), a menor dependência em relação a variações climáticas de curto prazo, a promoção de estruturas económicas regionais e o facto de constituir uma fonte de rendimento alternativa para os agricultores. Neste contexto, o Plano de Ação para a Biomassa, elaborado em dezembro de 2005 pela CE, realça o contributo desta FER para a produção de energia primária, apresentando uma análise dos custos/benefícios da sua utilização, bem como um

² Energia que deriva da biomassa, sendo esta definida como toda a matéria de origem biológica, excluindo a que está retida em formações geológicas (EEA, s.d).

conjunto de medidas destinadas a aumentar o seu desenvolvimento, nomeadamente, através da criação de incentivos de mercado e da eliminação das barreiras ao seu desenvolvimento (CCE, 2005). No que diz respeito aos incentivos de mercado, nomeadamente a utilização desta FER para aquecimento, eletricidade e biocombustíveis, o plano apresenta diversas medidas que incluem: (1) Promoção do melhor desempenho de caldeiras de biomassa doméstica e redução da poluição, com vista à definição de requisitos no âmbito da diretiva *eco design*; (2) Estimular os Estados-Membros a que procedam a uma revisão do valor do IVA no aquecimento de edifícios a biomassa; (3) Promoção da investigação na área das bio refinarias e biocombustíveis de 2ª geração; e (4) Financiamento de campanhas de sensibilização junto aos agricultores e proprietários florestais, face às propriedades das culturas energéticas e às oportunidades que estas oferecem.

No entanto, para o caso específico da biomassa sólida, os incentivos à produção de energia estão atualmente restritos ao setor da eletricidade. Estes encontram-se classificados em quatro categorias (CCE, 2005):

- **Tarifas de aquisição (*feed-in tariffs*):** consiste na introdução de um preço fixo por unidade de energia que é pago ao produtor que utiliza uma fonte de energia renovável, sendo válido para um período de vários anos. Todos os fornecedores de eletricidade suportam, através dos seus consumidores, os custos adicionais do regime através de um pagamento à empresa distribuidora, sendo este proporcional ao volume de venda. Este sistema é o mais usual na UE, nomeadamente em Portugal, Espanha e França;
- **Certificados verdes (*green certificates*):** neste esquema de incentivo, os consumidores, geralmente através dos seus fornecedores de eletricidade, apresentam parte do seu consumo satisfeito a partir de eletricidade de FER. Em consequência, promove-se a criação de um mercado concorrencial na aquisição de certificados, favorecendo os produtores que produzem eletricidade mais barata. Países como a Itália, Bélgica ou Polónia adotaram este tipo de incentivo;
- **Concurso (*tender*):** nos concursos públicos, o Estado possibilita a que as empresas concorram com projetos de produção de eletricidade, estabelecendo um contrato com a empresa vencedora e garantindo um determinado preço. Este mecanismo aplica-se, no caso português, em conjunto com as tarifas de aquisição;
- **Incentivos fiscais (*tax incentives*):** consiste na redução da carga fiscal da eletricidade produzida a partir de FER, aumentando a sua competitividade com os restantes produtores. É usado como um instrumento adicional no Reino Unido e na República Checa.

Cumulativamente, os mecanismos de Quioto – o mercado de emissões, a implementação conjunta e o mecanismo de desenvolvimento limpo – estimulam o desenvolvimento da biomassa. O comércio de licenças de emissão, já em funcionamento ao nível europeu e regulamentado pela Diretiva 2003/87/CE de

13 de outubro, relativa à criação de um regime de comércio de licenças de emissão de GEE na Comunidade Europeia, permitiu aos produtores de energia reduzirem as suas emissões através da co-combustão de biomassa. Por sua vez, o mecanismo de desenvolvimento limpo e a implementação conjunta abrem caminho ao desenvolvimento de projetos que reduzam as emissões de GEE, considerando um cenário de referência sem o projeto. As centrais dedicadas de biomassa podem, neste contexto, ser elegíveis para reduzir as emissões de GEE e ajudar a alcançar as metas definidas (Ferreira *et al.*, 2009).

No que diz respeito à sustentabilidade do sistema, diversos estudos científicos e económicos permitiram concluir que um incremento da utilização da biomassa apresentará quatro benefícios fundamentais, podendo outros ser conseguidos se a UE alargar a sua liderança tecnológica nesses setores. É de notar que os benefícios serão obtidos, em princípio, sem aumento da poluição ou de outros prejuízos para o ambiente (CCE, 2005):

1. Diversificação do abastecimento energético da Europa, aumentando a quota das energias renováveis em 5% e diminuindo a dependência da energia importada de 48% para 42%;
2. Redução das emissões de GEE em 209 milhões de toneladas de CO_{2equivalente} por ano;
3. 250 000 a 300 000 empregos diretos, principalmente em zonas rurais. A gama de valores resulta da apresentação de valores provenientes de diversos estudos;
4. Um potencial ponto de pressão no sentido da diminuição dos preços do petróleo, como resultado de um decréscimo na sua procura.

A biomassa passível de utilização em sistemas de aproveitamento energético, dependendo da sua origem pode ser classificada em quatro categorias (GREENPRO, 2004):

- **Culturas para Fins Energéticos** – São culturas cuja função é o armazenamento da radiação solar para armazenamento em forma de biomassa. Exemplos de colheitas para fins energéticos são a colza, o girassol, o milho, entre outras.
- **Resíduos florestais e agrícolas** – O aproveitamento dos resíduos gerados pelas atividades de cultivo ou de atividades florestais, tal como a palha ou resíduos de madeira permitem a redução dos custos dos produtos principais, valorizando assim estes subprodutos naturais.
- **Subprodutos orgânicos** – O processamento da biomassa para criação de produtos origina um grupo adicional de subprodutos, nomeadamente, resíduos orgânicos, efluentes de agropecuária e resíduos do processamento industrial da madeira e de fibras vegetais. Nestes casos, a reciclagem energética pode conduzir a um aumento da utilidade e assegurar que partes do processo de produção sejam permanente e ambientalmente sustentáveis.

- **Resíduos orgânicos** – Estes resíduos incluem os resíduos domésticos e lamas de efluentes domésticos e industriais, encontrando-se geralmente sujeitos a legislação específica. Consequentemente, a utilização deste tipo de produtos exige o cumprimento de uma gama completa de requisitos legais, desde a sua origem até ao controlo epidémico.

No ano de 2003, a UE produziu cerca de 69 Mtep de energia primária a partir da biomassa, cobrindo cerca de 4% das suas necessidades energéticas. No entanto, a Comissão Europeia estimou que uma utilização integral do seu potencial poderia mais do que duplicar a utilização da biomassa até 2010 (cerca de 185 Mtep). A Tabela 1 apresenta o potencial Europeu para produção de energia a partir da biomassa para o ano de 2010, 2020 e 2030. É no entanto de salientar que os valores apresentados são conservadores pois assentam em três pressupostos basilares: o respeito pelas boas práticas agrícolas; a salvaguarda da produção interna de produtos alimentares; e, a proteção da biodiversidade florestal e agrícola. Através desta, verifica-se que o potencial para 2010 foi estimado em cerca de 2,5 vezes superior ao valor registado em 2003, sendo espetável um sucessivo crescimento na produção de energia. Este crescimento traduzir-se-á em valores 3,5 vezes e 4,5 vezes superior ao valor de 2003, para o ano de 2020 e 2030, respetivamente (CCE, 2005).

Tabela 1 – Potencial Europeu de Produção de Energia Primária a partir da Biomassa (fonte: CCE, 2005).

Biomassa	Mtep		
	Potencial (2010)	Potencial (2020)	Potencial (2030)
Madeira (proveniente diretamente da floresta)	43	39 – 45	39 – 72
Resíduos orgânicos, resíduos da indústria da madeira, resíduos agrícolas e de processamento de alimentos.	100	100	102
Culturas energéticas provenientes da agricultura	43 - 46	76 - 94	102 – 142
TOTAL	186 - 189	215 - 239	243 – 316

Perante as metas estabelecidas pela UE até 2010 (uma quota global de 12% para as energias renováveis, uma quota de 21% no setor da eletricidade e uma quota de 5,75% para os biocombustíveis), a CE considerava as medidas previstas no Plano de Ação para a Biomassa adequadas ao cumprimento dos

objetivos, prevendo um aumento da utilização de biomassa até cerca de 150³ Mtep nesse ano, ou pouco depois disso, repartidos em 55 Mtep para produção de energia elétrica, 75 Mtep para produção de calor e 19 Mtep para transportes, valores inferiores ao potencial total (CCE, 2005). No entanto, a produção de energia primária em 2010 apresentou um valor de 113 Mtep (UE-27), valor que ficou aquém do esperado para essa altura (Eurostat, 2012). É ainda de salientar que para o ano de 2020, a AEBIOM (European Biomass Association) estabelece um cenário de consumo de energia a partir da biomassa de 220 Mtep (incluindo 25 Mtep de importação), divididos entre 120 Mtep para produção de calor, 60 Mtep para produção elétrica e 40 Mtep para transportes. Esta previsão está em linha com os objetivos traçados para a UE, nomeadamente a meta de 20% de fontes de energia renováveis no consumo energético, em 2020.

As fontes de biomassa utilizadas como combustíveis são classificadas de acordo com o estado de agregação em que se encontram: sólido, líquido ou gasoso. O estado de agregação existente determina as possibilidades de utilização das fontes de biomassa e o tipo de infraestrutura de conversão energética necessária. É ainda de salientar que a forma e o estado de agregação dos produtos de biomassa processados são determinados pelas tecnologias e sistemas de conversão disponíveis, sendo que para cada tipo de utilização existe um método de operação otimizado para as características da biomassa, bem como níveis de desempenho específicos. Para se obter uma operação eficiente, estes níveis e características devem manter-se dentro de limites rígidos (GREENPRO, 2004).

O recurso às fontes de biomassa permite a obtenção de três tipos fundamentais de energia: energia calorífica, energia mecânica e energia elétrica (GREENPRO, 2004).

- **Energia Calorífica:** o calor é normalmente produzido em sistemas de combustão. Em pequena escala o calor pode ser usado para aquecer uma habitação (lareiras, salamandras, entre outros) e em grande escala para produzir calor em centrais que, por meio de redes térmicas, distribuem o calor a diversas habitações para aquecimento ambiente e da água de banhos. Para sistemas de combustão estacionários, cuja única função seja a produção de calor, predominam os combustíveis sólidos, no que diz respeito à biomassa. A madeira, como resíduo ou matéria-prima, pode ser usada para produção de calor, com reduzidos custos de processamento, de trituração ou secagem.
- **Energia mecânica:** a energia mecânica é produzida por meio de geradores de calor e energia, como as máquinas a vapor ou motores de combustão interna. Nestas, o combustível líquido ou gasoso é inflamado nos cilindros de um motor de combustão. A expansão da mistura combustível/ar, causada pela combustão é então convertida em energia. O calor produzido por este processo é

³O cenário de 2010 previsto no Plano de Ação para a Biomassa contempla a fração das importações. Por sua vez, as projeções do EurObservER para o mesmo ano, não considerando importações, apresentam um valor de produção de energia primária de cerca de 105 Mtep (Eurostat, 2012).

dissipado para o ambiente, através de um sistema de arrefecimento. Como exemplo temos a utilização do biodiesel ou do etanol no setor dos transportes.

- **Energia Elétrica:** os sistemas que produzem energia mecânica, em motores de combustão ou em turbinas de combustão direta e indireta, são acoplados a geradores elétricos. Estes convertem a energia mecânica em energia elétrica. A utilização de energia mecânica para produção de energia elétrica produz aproximadamente dois terços de calor, para um terço de eletricidade, o que evidencia o aumento da eficiência económica da cogeração (produção simultânea de calor e eletricidade) em aplicações estacionárias.

A transformação da biomassa em distintos tipos de energia, através de diferentes tipos de conversão, encontra-se esquematizada na Figura 10.

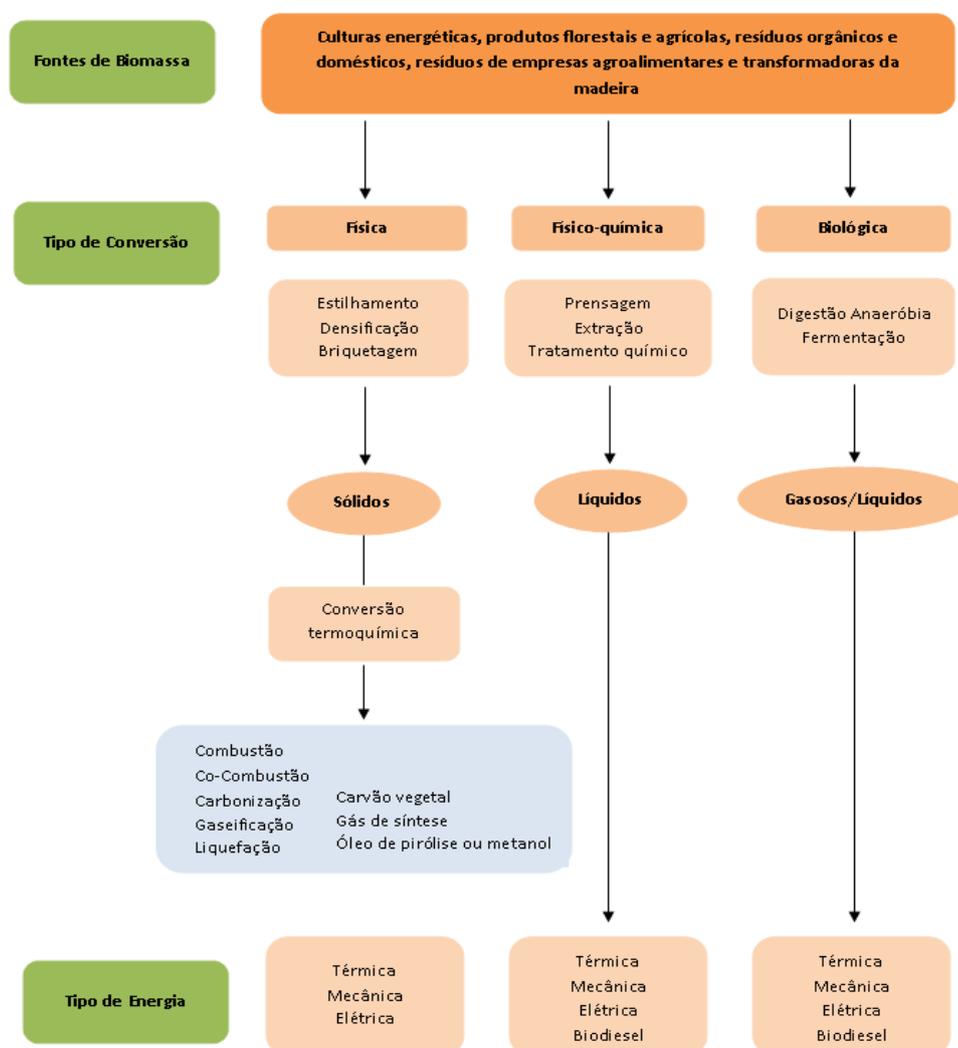


Figura 10 – Representação esquemática dos processos de conversão da biomassa (fonte: Enersilva, 2007).

No caso particular da biomassa sólida, a sua fonte reside nos produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), resíduos da floresta e das indústrias conexas, e ainda a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. No entanto, grande parte da biomassa sólida tem origem em produtos derivados da madeira, nomeadamente, dos que resultam das operações de retirada de lenha das florestas ou de processos da indústria madeireira. No desbaste da floresta, para além dos troncos das árvores utilizados na indústria do mobiliário e construção, são recolhidos resíduos de madeira de menor qualidade, impossibilitando a sua utilização como matéria-prima. Devido ao elevado teor de cinzas, estes resíduos são ideais para a reciclagem energética, sendo utilizados especialmente em centrais de fornecimento de calor de grandes dimensões e em centrais de cogeração. É de salientar que a partir destes resíduos podem ser recolhidos cerca de 0,4 a 0,8 toneladas de lenha seca, por hectare de floresta, sendo que esta recolha aumenta para cerca de 1,5 toneladas anuais, como resultado da manutenção das florestas de uso permanente (GREENPOR, 2004).

Cumulativamente, outros subprodutos, nomeadamente a palha ou o feno são usados para produzir energia, a partir da biomassa. Os resíduos de pós-colheita estão usualmente disponíveis a nível local e em grandes quantidades, sendo que um hectare de palha apresenta um teor de energia de cerca de 73 GJ, o que equivale aproximadamente a 2.000 litros de gasóleo de aquecimento. Contudo, a palha e outros produtos deste tipo possuem características de combustão diferentes dos combustíveis lenhosos. Consequentemente, o ponto de fusão das cinzas e o comportamento de emissões da biomassa exigem uma abordagem técnica diferente. Até à data, tem sido apenas possível conseguir uma reciclagem energética, a grande escala, de palha em centrais de cogeração (GREENPOR, 2004).

Enquadram-se ainda no conceito de biomassa sólida os materiais em fim de vida, como mobiliário deteriorado e madeira velha, onde a sua valorização energética contribui diretamente para gestão deste tipo de resíduos, nomeadamente através da sua eliminação. No entanto a sua reciclagem energética encontra-se sujeita a regulamentação ou legislação que restringe este aproveitamento face ao potencial risco de contaminações com substâncias tóxicas, tais como químicos, tintas ou algo similar. Existem ainda outras fontes de resíduos de madeira como a recolhida durante as atividades de gestão do território, nomeadamente em trabalhos de manutenção de estradas e auto estradas, e dos trabalhos em parques florestais e jardins, sendo estes resíduos geralmente uma mistura de madeira, folhas e troncos. O teor energético destas misturas é relativamente baixo, devido ao grande número de impurezas, nomeadamente as significativas quantidades de solo que geralmente existem na mistura, responsáveis pela produção de um elevado teor de cinzas. As restantes impurezas existentes, tais como embalagens de plástico, sacos e outros resíduos conduzem a níveis elevados de substâncias tóxicas libertadas para a atmosfera pelo que a sua valorização deve ser devidamente controlada (GREENPOR, 2004).

Neste contexto, entende-se por biomassa florestal primária (BFP) a *fração biodegradável dos produtos gerados na floresta e que são processados para fins energéticos* (Enersilva, 2007). No caso das florestas Europeias, a BFP é formada pelos materiais vegetais procedentes das seguintes operações silvícolas: podas, seleção de toijas, desbastes, cortes fitossanitários e controlo da vegetação espontânea. Também se incluem os resíduos de aproveitamento madeireiro, quer sejam provenientes de cortes finais ou de cortes intermédios, lenhas provenientes das podas e desramações e material vegetal proveniente de culturas energéticas, lenhosas ou herbáceas, instalados em terrenos florestais. É ainda de salientar que dentro da biomassa florestal, para além da BFP, existe ainda a biomassa florestal secundária que se caracteriza pela matéria orgânica residual (costaneiros, serrins, licores negros, recortes, aparas, entre outros.) gerada nos processos da indústria de transformação da madeira, tal como as serrações, fábricas de celulose, tábuas e contraplacados, carpintarias e indústrias de mobiliário. Também se inclui neste tipo de biomassa os restos de madeira procedentes de outras atividades industriais (paletes e embalagens) e de resíduos urbanos (Enersilva, 2007).

É ainda de salientar as inúmeras vantagens associadas à utilização da biomassa florestal, fatores que justificam a sua crescente expansão. No que se refere à combustão em centrais termoelétricas, esta não provoca um aumento líquido do carbono na atmosfera uma vez que o carbono emitido durante a combustão foi previamente capturado pela floresta. Além disso, mesmo sem se considerar o sequestro de carbono, a queima de biomassa apresenta um enorme benefício no que diz respeito à redução do efeito de estufa, com valores próximos de -148%, apresentando ainda reduzidos teores de cinzas e enxofre (menos 90%), quando comparado com uma situação de referência de queima de carvão. Há, portanto, um balanço zero, ou um equilíbrio, na produção de energia a partir de biomassa florestal (Enersilva, 2007).

Um outro aspeto prende-se com o desenvolvimento rural, criação de emprego e economia local/regional. As zonas rurais, de um modo geral, caracterizam-se por terem uma população cada vez mais envelhecida, com um débil ou nulo crescimento populacional, associadas às fracas oportunidades de emprego que existem nestas áreas. Assim, nos meios rurais, é fundamental a aposta nos recursos endógenos como forma de criação de riqueza, cumprindo-se os três grandes objetivos da sustentabilidade: coesão social, desenvolvimento económico e proteção do ambiente. O aproveitamento da biomassa florestal para fins energéticos enquadra-se precisamente nesse âmbito, na medida em que permite criar oportunidades económicas, oportunidades sociais e a valorização e proteção do ambiente. As oportunidades económicas ligadas à biomassa centram-se essencialmente no facto de se valorizar um recurso endógeno com vista à criação de riqueza e de bens tão essenciais como a eletricidade e calor, e de se estimular a criação e/ou dinamização de empresas locais e regionais, nomeadamente no setor dos transportes de carga e dos serviços florestais (Enersilva, 2007).

Do ponto de vista social, o uso da biomassa florestal para fins energéticos consagra oportunidades de emprego, direto e indireto, sobretudo a montante da central (operações florestais e transporte), com os

respetivos ganhos monetários, oferecendo oportunidades de emprego diferenciado e indiferenciado (estima-se que a sua incidência para um potencial total avaliado em cerca de 70 Mtep.ano⁻¹ seja de 4.500 a 8.000 postos de trabalho por cada Mtep.ano⁻¹ produzida (Conferência de Madrid, 1994)), o que permite empregar pessoas com diferentes níveis de escolaridade e introduzir oportunidades de maior estabilidade social. É ainda de referir que os benefícios sociais, económicos e ambientais que advêm do uso da biomassa florestal para fins energéticos não devem ser quantificados apenas ao nível dos ganhos em sentido estrito (criação de emprego, ganhos monetários, riqueza, entre outros), mas também ao nível dos custos e danos evitados, designadamente pela redução do risco de incêndio (Enersilva, 2007).

Relativamente a este último aspeto, a biomassa resultante da atividade florestal (operações de gestão dos combustíveis, operações de condução e operações de exploração dos povoamentos), e a fitomassa de sub-coberto, que se encontra no terreno sem qualquer tipo de tratamento pode originar um conjunto de inconvenientes, dos quais se destacam: a proliferação de pragas e doenças; a obstrução das acessibilidades no interior das florestas; e o aumento do risco de incêndio (apresenta uma relevância acrescida no caso europeu, uma vez que os incêndios florestais se apresentam como a principal causa de destruição de vastas áreas florestais). A remoção da biomassa florestal, para além de gerar uma maior valorização económica da propriedade florestal, caso sejam transferidos para a fileira da produção energética, contribui para a mitigação dos problemas especificados. Na medida em que a remoção da biomassa pode conduzir à efetiva diminuição da área ardida, pela diminuição do risco de incêndio, os benefícios desta prática traduzem-se igualmente nos danos e gastos evitados. No que diz respeito aos danos evitados, é de referir: o valor da madeira que arde; o valor paisagístico; e os níveis acrescidos de erosão e degradação dos sistemas pedológicos e hidrológicos a que ficam sujeitas as áreas ardidas. Quanto aos gastos, a prevenção de incêndios e a subsequente diminuição da área ardida, permitem que sejam efetuadas grandes poupanças no combate aos incêndios e nas ações de rearborização de áreas ardidas (Enersilva, 2007).

3.2 Tecnologias de Aproveitamento da Biomassa Florestal

Um sistema de exploração de biomassa florestal pode ser entendido como um conjunto de operações florestais desenvolvidas com o objetivo de abastecer uma unidade transformadora de energia. As tecnologias e técnicas usadas para o aproveitamento da biomassa são diversas e encontram-se em permanente evolução. A escolha das técnicas mais adequadas está condicionada por diversos fatores como: a densidade e dispersão da biomassa, o estado de conservação da rede viária, o tipo de povoamento, as características físicas do terreno e dos centros de consumo, os impactes ambientais associados, entre outros. Todos estes fatores são ainda ponderados numa ótica de eficiência económica, ou seja, da obtenção de um maior rendimento financeiro (Enersilva, 2007).

Uma exploração florestal inclui quatro operações fundamentais (DGRF, 2003):

1. **Abate** – Consiste no corte das árvores, o mais perto do solo possível, para que as operações posteriores sejam facilitadas. Nesta operação utiliza-se uma motosserra, que por ser um equipamento fácil de transportar, pode ser utilizado em qualquer tipo de terreno;
2. **Processamento** – A operação inclui o corte dos ramos (eliminação dos ramos e da bicada após o abate da árvore), toragem (seccionamento transversal do tronco, através de cortes perpendiculares ao seu eixo) e descasque das árvores abatidas (remoção da casca da árvore), apresentando como objetivo a comercialização da madeira. Inclui-se ainda nesta operação os processos de trituração e enfardamento. O primeiro é caracterizado pela redução da BF a partículas de pequenas dimensões, sendo normalmente designadas por estilha, permitindo a sua transformação num biocombustível homogéneo. O enfardamento implica a compactação da biomassa e o seu corte em fardos, permitindo não só o incremento da densidade da BF como também a otimização das etapas de transporte e armazenamento;
3. **Rechega e Extração** – O processo de extração implica a movimentação do material lenhoso para junto de uma via principal, ficando o mesmo empilhado em áreas específicas, os carregadouros. Esta pode incluir uma fase inicial de rechega, na qual o material que se encontra disperso pelo local de abate, é deslocado e concentrado junto aos trilhos de extração e posteriormente transferido para o carregadouro. O conjunto destas duas operações é normalmente denominado por transporte primário;
4. **Carregamento e Transporte** – Nesta fase, o material acumulado nos carregadouros é colocado em veículos de transporte, sendo conduzido ao seu destino final. O conjunto destas duas operações é normalmente denominado como transporte secundário.

Neste contexto, é ainda de salientar que o teor de humidade dos combustíveis de biomassa apresenta uma gama de variação elevada, dependendo do tipo de biomassa, do tempo de colheita, da forma como é efetuado o pré-tratamento, bem como do método e tempo de armazenamento (Loo e Koppejan, 2008). Face ao teor de água presente neste tipo de biomassa, a secagem (natural ou forçada) torna-se uma operação de pré-tratamento imprescindível para a melhoria da qualidade da BF como biocombustível sólido, apresentando-se como o principal parâmetro de avaliação da qualidade da biomassa como biocombustível. São diversas as razões que fundamentam a realização do processo de secagem da biomassa, nomeadamente (Loo e Koppejan, 2008):

- O poder calorífico (disponibilidade energética) de um biocombustível depende essencialmente do teor de humidade, portanto, uma diminuição do conteúdo em água levará a um aumento da eficiência da conversão termoquímica;

- O teor de humidade deve ser reduzido e o mais constante possível, o que permite uma otimização do processo de combustão (reduzidas emissões de poluentes, minimização dos problemas técnicos e menor consumo de energia);
- O armazenamento de combustíveis de BF com elevado teor de humidade, poderá fomentar a proliferação de fungos, face à maior taxa de degradação biológica a que o biocombustível fica sujeito;
- A secagem da biomassa promove uma diminuição acentuada dos custos totais relativos aos processos de pré-tratamento.

Assim, as operações que constituem o pré-tratamento da biomassa visam obter um biocombustível sólido homogéneo adequado ao sistema de produção de energia, apresentando como principais benefícios: (1) Reduzir os custos de investimento, de operação e de manutenção, bem como as despesas com pessoal, utilizando um biocombustível adequado ao funcionamento de um sistema automático de alimentação; (2) Reduzir os custos associados ao transporte, armazenamento e processamento, através do incremento da densidade da biomassa florestal; (3) Reduzir as impurezas e partículas (por exemplo, pedras, areia, vidros, plásticos, entre outros) contidas no biocombustível, aumentando a sua qualidade; (4) Melhorar a eficiência de conversão e minimizar os problemas técnicos que ocorrem em centrais a biomassa; e (5) Reduzir os impactos ambientais resultantes do aproveitamento energético (Loo e Koppejan, 2008; Silva, 2009).

Na execução das operações que constituem um sistema de exploração florestal são utilizadas diversas tecnologias mecanizadas dependendo da idade das árvores (2,5 ou 10 anos) ou do tamanho dos resíduos. Seguidamente são abordados os aspetos gerais das tecnologias e técnicas frequentemente empregues no aproveitamento da biomassa nas florestas (Enersilva, 2007):



Figura 11 – Recolha e transporte de biomassa em natureza (fonte: Lopes *et al.*, 2012).

- **Recolha e transporte de biomassa em natureza:** o método consiste em recolher e efetuar o transporte da biomassa sem que esta passe por nenhum processo de compactação, nem de estilhaçamento (Figura 11). Atualmente este método é cada vez menos utilizado, uma vez que o transporte em termos de peso de carga leva muito menos que outros processos, o que o torna mais caro. Assim, o transporte de biomassa em natureza apenas é aconselhável em situações de distâncias muito

reduzidas (10 a 15 km) entre a floresta e os centros de consumo.

- **Processamento em estilha no local:** a operação consiste em transformar a biomassa em estilhas no espaço florestal utilizando estilhaçadores móveis de pequenas dimensões (Figura 12). Posteriormente a biomassa é transportada para as unidades finais, ou unidades intermédias, em forma de estilha. Estes procedimentos permitem a secagem natural melhorando as propriedades da biomassa florestal, o que apresenta grandes vantagens em relação ao transporte em natureza. A principal condicionante deste tipo de operação, é que só deve ser realizada em locais que tenham bons acessos viários. Além disso, o sistema necessita de adquirir diversos equipamentos, o que se traduz em maiores custos no investimento inicial, bem como de condições físicas, que garantam a instalação de um destroçador.



Figura 12 - Estilhaçador móvel (fonte: Enersilva, 2007).



Figura 13 – Estilhaçadora de grandes dimensões em parque de pré-tratamento (fonte: Enersilva, 2007).

- **Parques de pré-tratamento:** nestes parques a biomassa chega em natureza e sofre uma transformação de acordo com a necessidade das características do material (Figura 13). O dimensionamento dos parques de pré-tratamento processa-se de forma a garantir a quantidade de recursos necessários à cobertura da sua capacidade de tratamento, dispendo em simultâneo de um mercado potencial nas proximidades, que permita assegurar a colocação do produto. Para além do tratamento da biomassa, o parque tem por finalidade regular as quantidades fornecidas,

ajustando a oferta e a procura em termos de tempo. De uma forma generalizada, as principais operações que se podem realizar nos parques de pré-tratamento são: armazenamento da matéria-prima, trituração e secagem natural ou forçada. A instalação destes parques tem como grande vantagem a flexibilidade em relação ao fluxo e características da biomassa que vão de encontro

com as necessidades de otimização dos processos de logística. Como desvantagens deste sistema destacam-se os custos associados ao eventual aluguer ou compra de terrenos para a sua instalação; a necessidade de bons acessos e de condições físicas à instalação do parque; e a aquisição de diversos equipamentos.

- **Enfardamento da biomassa:** este método tem como princípio, a compactação dos materiais enfardados (Figura 14). As enfardadeiras são sistemas de recolha de restos florestais que têm por princípio a compactação dos materiais em fardo podendo desta forma otimizar o armazenamento e o transporte. A logística do transporte dos fardos é um sistema semelhante ao utilizado no transporte da madeira, recorrendo-se ao mesmo tipo de camiões e à mesma forma de carregamento. O enfardamento da biomassa tem como principais vantagens: a



Figura 14 - Fardos de biomassa de pinheiro
(fonte: Lopes *et al.*, 2012).

otimização do espaço físico para armazenamento e transporte, sem perda da consistência dos fardos; e a segurança do armazenamento, face à redução do risco de combustão. Por outro lado, as enfardadeiras não podem operar em locais declivosos e requerem um elevado investimento inicial.



Figura 15 - Cortador empilhador florestal
whelled feller-buncher (fonte: Enersilva, 2007).

- **Sistema Feller-buncher:** neste sistema pretende-se executar o mínimo de operações possíveis na exploração, de modo a rentabilizar todo o processo de colheita e transporte da biomassa à fábrica. O método *full-tree* (fuste inteiro) consiste basicamente no corte e num primeiro ajuntamento de árvores inteiras, através de cortador empilhador florestal *whelled feller-buncher* (Figura 15), seguindo-se a rechega com um ajuntador *skidder*, o estilhaçamento das árvores com um estilhaçador de facas e o transporte à fábrica com camiões contentores «tipo banheira». Face ao seu alto rendimento, este sistema é utilizado para o aproveitamento da biomassa

nas culturas energéticas lenhosas. O sistema apresenta como vantagens o aproveitamento de áreas que necessitam de cortes antecipados por as árvores se apresentarem mortas ou danificadas, devido a fatores bióticos ou abióticos (ex.: incêndios florestais); a rentabilização de produtos de baixo valor; a execução de uma operação indispensável ao início do processo de reflorestação e/ou reorganização da floresta, com obtenção de receitas e com custos reduzidos; proceder aos restantes processos necessários à reconversão florestal; incrementar a rentabilidade na produção de energia a partir de biomassa em comparação com os processos tradicionais. No entanto a aplicação do sistema não é aconselhável em regiões com declives acentuados ou que apresentem limitações em termos de estabilidade do solo, necessitando de possuir diversas máquinas a trabalhar e plena coordenação entre as várias operações.



Figura 16 - Estilhaçamento de árvores inteiras queimadas (fonte: Enersilva, 2007).

- **Aproveitamento da árvore inteira:** neste processo, ao contrário do que se verifica nos casos anteriores, a biomassa utilizada corresponde ao fuste inteiro. As árvores processadas neste sistema apresentam um reduzido valor económico, sendo fruto de desbastes, povoamentos de baixa rentabilidade, culturas energéticas, árvores de áreas de cortes antecipados ou danificados por incêndios (Figura 16), vendavais ou pragas e doenças. As árvores são aproveitadas para a obtenção de estilha.

3.3 Panorama Nacional

3.3.1 A floresta Portuguesa

Face aos longos períodos de crescimento das espécies arbóreas, o coberto florestal que hoje existe advém das diversas intervenções realizadas ao longo dos últimos anos, sendo patente que as ações agora tomadas terão consequências na vitalidade do setor daqui a um século. Assim, a evolução no setor florestal mede-se em décadas. Durante o século XX, o setor florestal português teve um desempenho surpreendente. No Continente a área de espaços florestais arborizados aumentou expressivamente sobretudo devido ao sobreiro e pinheiro bravo até à década de 70 e ao eucalipto desde a década de 50, atingindo em 1995 um valor máximo de 3,3 milhões de hectares. Processos equivalentes mas de dimensão

desigual ocorreram nos Açores e Madeira, onde só a arborização de baldios pelo Estado representou, desde a década de 50 até ao meio da década de 70, cerca de 28 mil hectares e 17 mil hectares, respetivamente. Cumulativamente, para além da ação do Estado, a evolução da área florestal ficou associada à crescente valorização que os proprietários florestais e a sociedade em geral têm vindo a reconhecer à floresta em comparação com outros usos de solo alternativos, em particular em relação aos matos (ou incultos) até meados do século e, a partir dessa altura, em relação à própria agricultura (Resolução do Conselho de Ministros nº. 114/2006).

De acordo com o último Inventário Florestal Nacional (IFN5), realizado entre 2005 e 2006, a floresta portuguesa ocupa cerca de 3,46 Milhões de hectares, representando 38,8% do território continental. É ainda de salientar o aumento registado de 109.000 hectares entre os dois últimos IFN (1995/1998 e 2005/2006) (IFN5, 2007). A Tabela 2 apresenta a evolução das áreas dos distintos tipos de uso de solo entre 1995 e 2005, em Portugal Continental.

Tabela 2 – Evolução das áreas por tipo de uso do solo (1000 ha), em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

Tipo de uso do solo	1995/1998	2005/2006
Floresta	3.349	3.459
Matos	2.055	1.927
Agricultura	2.973	2.930
Outros usos	396	432
Águas interiores	107	162

Quanto ao tipo de floresta, a evolução registada evidencia uma redução nas áreas de povoamentos (diminuição de 26.000 hectares) e um aumento global de 28.000 hectares para as áreas ardidas e áreas de corte raso. As principais espécies florestais em Portugal Continental são, por ordem decrescente, o pinheiro bravo, o eucalipto e o sobreiro, representando cerca de 74% das áreas florestais existentes (AIFF, 2010). As Tabelas 3 e 4 apresentam a evolução da ocupação florestal entre os dois últimos IFN, em Portugal Continental.

Tabela 3 – Áreas florestais, por espécies, nos IFN de 1995/1998 e 2005/2006, em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

Áreas Florestais por Espécies (Un. 1000 ha)	1995/1998	2005/2006
Pinheiro-bravo	976	885
Eucalipto	672	740

Tabela 4 - Áreas florestais, por espécies, nos IFN de 1995/1998 e 2005/2006, em Portugal Continental (continuação)
(fonte: IFN5, 2007).

Áreas Florestais por Espécies (Un. 1000 ha)	1995/1998	2005/2006
Sobreiro	713	716
Azinheira	462	413
Carvalhos	131	150
Pinheiro-manso	78	130
Castanheiro	41	30
Folhosas diversas	102	86
Resinosas diversas	27	25
TOTAL	3.201	3.175

A evolução das áreas florestais por espécie no período que decorreu entre os dois últimos IFN apresentou padrões distintos de variação. Não deixa de ser importante realçar que os padrões de variação demonstram de alguma forma as motivações económicas dos produtores florestais, a gestão do risco do investimento (considerando o efeito dissuasor dos incêndios, das pragas e doenças florestais) e a rentabilidade de cada espécie florestal (AIFF, 2010):

- Com uma variação positiva, originando aumentos assinaláveis de área em valor absoluto e valor relativo num período aproximado de 10 anos, destacam-se o eucalipto (+10%, cerca de 68.000ha) e o pinheiro manso (+68%, cerca de 52.000ha). Destaque também para os carvalhos com um aumento de 14% (cerca de 19.000ha);
- A única espécie que apresentou uma tendência de alguma estabilização foi o sobreiro, com uma variação positiva de cerca de 0,4%;
- Com uma variação negativa, originando reduções de área relevantes, destacam-se o pinheiro bravo (-9,1%, correspondendo a uma redução de 91.000 ha) e a azinheira (-10,6%, correspondendo a uma redução de cerca de 49.000 ha). Também pela negativa destaca-se o castanheiro, que apresenta a maior redução em valor relativo (-25,9%).

A Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) é uma das áreas nucleares de conservação da natureza e da biodiversidade que integra o Sistema Nacional de Áreas Classificadas. A ocupação florestal possui uma importância muito relevante nas áreas protegidas, abrangendo, de acordo com os dados disponibilizados pelo último IFN, 174.722 ha, o que corresponde a 5,5% da área florestal nacional. Relativamente à ocupação florestal, destaca-se o pinheiro bravo como a espécie florestal com maior predominância na

RNAP (6,5% da área total nacional de pinheiro bravo está em área protegida). Ao nível da Rede Natura 2000 a floresta possui um peso particularmente relevante, ocupando cerca de 35% da superfície das Zonas de Proteção Especial (ZPE) e 47% das Zonas Especiais de Conservação (ZEC). Estas últimas, através da sua dimensão territorial, possuem cerca de 23,3% da área florestal nacional (738.319 ha), o que é esclarecedor quanto à importância da floresta e da sua gestão na conservação dos habitats e da biodiversidade. Ao nível das principais espécies florestais, e tal como sucede na RNAP, é o pinheiro bravo que ocupa a maior parte da área florestal, seguindo-se o sobreiro (AIFF, 2010). A Tabela 5 apresenta as principais espécies florestais inseridas na Rede Natura 2000 e respetivas áreas.

Tabela 5 – Principais espécies florestais presentes na Rede Natura 2000, em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

Rede Natura 2000	Espécies Florestais					
	Sobreiro		Pinheiro-bravo		Eucalipto	
	Há	% ⁴	ha	%	Há	%
ZPE	32.859	4,6	42.040	4,8	29.552	4,0
ZEC	142.405	19,9	211,483	23,9	107.639	14,6

Relativamente ao volume dos povoamentos (m³ com casca), a análise comparativa do último decénio apresenta uma quebra de 14 milhões de m³ totais para o pinheiro bravo, e um aumento de 6 milhões de m³ totais para o eucalipto, traduzindo a variação ocorrida na área florestal de cada uma destas espécies no mesmo período (AIFF, 2010). As Tabelas 6 e 7 apresentam o volume total (inclui as árvores em povoamentos puros, mistos dominantes, jovens puros/dominantes e dispersos) existente por espécie florestal.

Tabela 6 – Volume existente por espécie de árvore florestal, em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

Povoamentos	Volume existente (x 1000 m ³)
Pinheiro-bravo	85.756
Eucaliptos	45.828

⁴ Em % do total para a espécie a nível nacional.

Tabela 7 – Volume existente por espécie de árvore florestal, em Portugal Continental (continuação) (fonte: IFN5, 2007).

Povoamentos	Volume existente (x 1000 m³)
Sobreiro	24.773
Azinheira	7.566
Carvalhos	5.405
Pinheiro-manso	4.330
Castanheiro	1.631
Acácias	521
Outras folhosas	4.325
Outras resinosas	1.639
TOTAL	181.774

Um dos principais problemas que a floresta portuguesa enfrenta em termos de sustentabilidade é a excessiva fragmentação da propriedade, com cerca de 93% da área florestal a pertencer a mais de 400 mil proprietários, sendo a restante área do Estado e baldios. Portugal é o país da União Europeia com mais floresta nas mãos de proprietários privados que, em grande parte, se defrontam com a sua baixa rentabilidade. Este problema tem particular incidência na floresta do Norte e do Centro, assim como nalgumas áreas serranas do Sul, traduzindo-se num défice de gestão das áreas florestais a que se vem juntar o crescente abandono de muitas áreas agrícolas. Esta situação é uma das principais responsáveis pela dimensão do flagelo dos incêndios, tendo tomado ao longo dos últimos anos proporções de calamidade pública (AIFF, 2010).

Existe uma variabilidade anual no que respeita às áreas ardidas, seguindo de perto as condições climáticas. É recorrente salientar a existência de vários fatores na causa dos incêndios, de entre as quais as causas humanas são as mais importantes, na maioria dos casos alheias às características da floresta. Habitualmente, a maior parte da área ardida em Portugal Continental encontrava-se ocupada por matos. No entanto, esta tendência tem-se invertido nos anos mais recentes. O ano de 2009 evidenciou um retrocesso nos resultados obtidos face aos anos anteriores (2006-2008), não obstante a meta inscrita no Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios ter sido atingida (área ardida anual inferior a 100 mil hectares até 2012). De acordo com o Relatório Anual de Áreas Ardidas e Ocorrências de 2009 (Autoridade Florestal Nacional), entre 1999 e até 2009 o eucalipto e o pinheiro bravo foram as espécies florestais mais afetadas pelos incêndios florestais (AIFF, 2010). A Tabela 8 apresenta a evolução do número de fogos florestais bem como a totalidade das áreas ardidas, em Portugal Continental.

Tabela 8 – Número de ocorrências e área ardida (ha), por tipo de ocupação florestal e por ano, em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

	2000	2005	2008	2009
Nº de ocorrências	34.109	35.698	13.832	26.339
Área de povoamentos ardidos (ha)	68.646	213.517	5.463	24.094
Área de matos ardidos (ha)	90.958	124.745	11.781	61.923
TOTAL	159.604	338.262	17.244	86.017

Relativamente à área ardida, é de salientar o ano de 2008 com um registo anómalo no decénio 2000-2009, devido ao reduzido número de ocorrências e baixa área ardida. Da análise efetuada é também de realçar o facto de, no que concerne ao período 2000-2009, o ano de 2009 ser o primeiro em que um registo superior a 5.000 incêndios florestais não se traduziu em mais de 100.000 ha de área ardida (diminuição de 63.976 ha relativamente à medida do decénio considerado). Os grandes incêndios possuem um impacto muito expressivo no somatório global das áreas ardidas. Se atendermos aos incêndios com dimensão de área ardida entre 100 ha e 500 ha, constatasse que estes são responsáveis por cerca de 19% da área total ardida no último decénio. Importa salientar que a área total ardida no período compreendido entre 2000-2009, 1.499.926 ha (povoamentos e matos), não corresponde a áreas ardidas na íntegra tendo-se assistido a uma redução do intervalo de tempo entre incêndios recorrentes nas mesmas áreas por motivos sociais, ambientais e económicos (AIFF, 2010).

Fazendo uma análise conjunta aos grandes incêndios no último decénio, é perceptível a dimensão do impacto que estes possuem para a floresta portuguesa e no quanto é determinante a sua rápida extinção, uma vez que 3% dos incêndios florestais, com dimensão superior a 100 ha, originaram 77% da área ardida total. Quanto às causas dos incêndios, os resultados apurados com base nas ignições com investigação concluída pela GNR/SEPNA mantêm as tendências de comportamentos associados a negligência. De facto, para o total das causas determinadas entre 2006 e 2009, as ocorrências associadas à ação humana (uso do fogo, acidental e incendiarismo) constituem a esmagadora maioria das ocorrências (98,5%). O uso do fogo, associado a ações negligentes, representa 52% do total, salientando-se as queimadas como a principal causa. O incendiarismo assume também uma expressão relevante, com cerca de 42% do total das ignições com causas determinadas, destacando-se as motivações imputáveis como a principal causa associada a esta subcategoria. Salienta-se que tanto o uso do fogo como o incendiarismo apresentam uma tendência de estagnação/subida ligeira. Por outro lado, as ocorrências por causa acidental são a única categoria de causas que apresenta uma tendência de redução para o mesmo período. Num somatório global do decénio, a análise revela dados extremamente preocupantes: uma área total ardida de 1.499.926 ha, dos quais 54%

são povoamentos florestais (810.615 ha), uma média de 25.023 ocorrências.ano⁻¹, das quais 98,5% estão associadas à ação humana (AIFF, 2010).

Na Figura 17 apresenta-se a carta de distribuição de biomassa florestal, que constitui uma base de informação territorial onde as intervenções a nível da implementação de medidas de silvicultura preventiva se tornam prioritárias de forma a diminuir a carga combustível e o risco de incêndio associado, e que segundo critérios de integração das políticas energética nacional e florestal, suportará a definição de pontos injetores de energia (Resolução do Conselho de Ministros n.º. 114/2006).

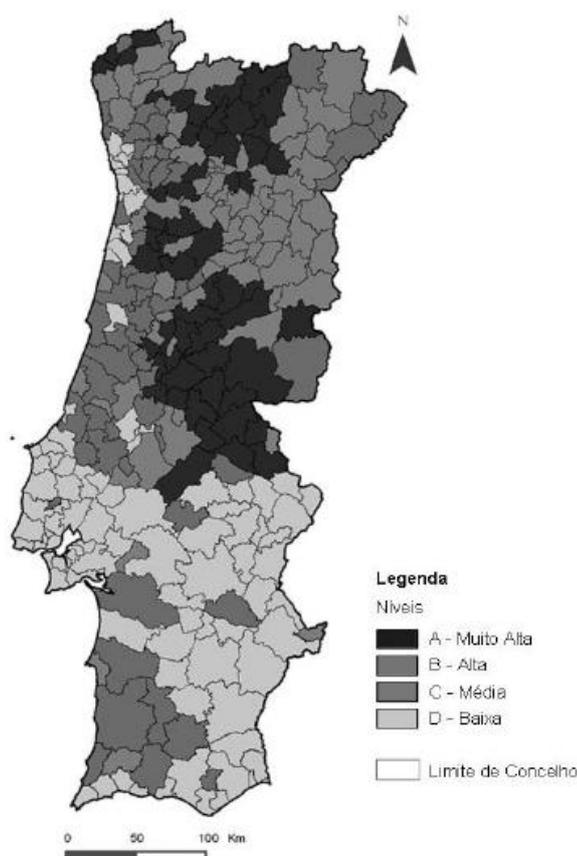


Figura 17 – Carta de distribuição de biomassa florestal em Portugal Continental (fonte: Resolução do Conselho de Ministros n.º. 114/2006).

Em comparação, apresenta-se na Figura 18 a carta de distribuição das principais espécies florestais presentes em Portugal Continental. Analisando ambas as cartas (Figura 17 e Figura 18), verifica-se uma relação entre elas sendo de notar que os níveis considerados na carta de distribuição de biomassa florestal, de uma forma geral, coincidem com a presença/ausência dos povoamentos florestais predominantes.

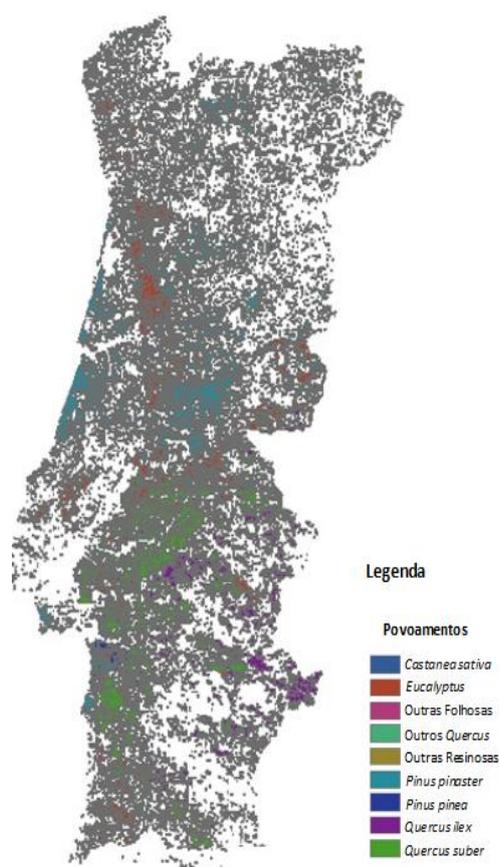


Figura 18 – Carta de distribuição das espécies florestas presentes em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2007).

Da evolução recente das emissões portuguesas de GEE, destaca-se, desde o ano de 2005, um abrandamento e um decréscimo dessas emissões. Até então, as emissões nacionais tinham aumentado praticamente ininterruptamente desde 1990. De acordo com o Inventário Nacional de Emissões de 2010 (relativo ao ano 2008), as emissões de GEE, sem contabilização das emissões de alteração do uso do solo e florestas, foram estimadas em cerca de 78,4 Mt CO₂equivalente, encontrando-se, para o ano de 2008, cerca de 3,3% acima da quantidade atribuída. A este valor será necessário abater o efeito dos sumidouros florestais e agrícolas de carbono (CECAC, 2010).

De acordo com a avaliação do estado de cumprimento com o Protocolo de Quioto e analisando o contributo florestal constata-se (AIFF, 2010):

- No que diz respeito à nova floresta e desflorestação, o maior fator de incerteza está ligado à determinação das áreas de florestação e desflorestação que ocorrerão durante o período de cumprimento e que deverão ser conhecidos em detalhe quando estiverem concluídos os trabalhos

de estimativa de alterações de uso de solo em curso, com base na Cartografia de Ocupação do Solo.

- Para a contabilização da floresta existente salienta-se em particular o risco de incêndios anómalos nos próximos anos. Contudo, a evolução climática dos últimos meses e os resultados alcançados nos últimos dois anos, bastante inferiores às médias históricas verificadas, limitam para já a probabilidade de cenários catastróficos em repetição do que aconteceu em 2003 e, em menor escala, em 2005.
- Tendo em conta as atuais estimativas, o valor de carbono em risco poderá ser equivalente a cerca de 14 Mt CO₂equivalente.

A Tabela 9 apresenta a totalidade da biomassa disponível em Portugal Continental, bem como a sua distribuição por espécie florestal, compreendendo as árvores em povoamentos puros, mistos dominantes, jovens puros ou dominantes, mistos dominados e dispersos. Além disso, apresenta-se ainda a quantidade de carbono armazenado por espécie florestal, bem como o seu equivalente em CO₂, compreendendo biomassa aérea e subterrânea das árvores em povoamentos anteriormente especificados.

Tabela 9 – Biomassa florestal disponível por espécie, bem como o respetivo carbono armazenado e CO₂eq, em Portugal Continental (fonte: IFN5, 2010).

Espécie	Biomassa total (k t)	C armazenado total (k t)	CO ₂ equivalente total (k t)
Pinheiro-bravo	49.690	24.845	91.098
Eucaliptos	36.252	18.126	66.462
Sobreiro	34.925	17.463	64.029
Azinhaira	10.671	5.336	19.564
Carvalhos	6.527	3.264	11.966
Pinheiro-manso	5.325	2.663	9.763
Castanheiro	2.407	1.204	4.414
Acácias	716	358	1.313
Outras folhosas	4.989	2.495	9.147
Outras resinosas	963	482	1.766
Total	152.465	76.233	279.519

3.3.2 Política energética para o aproveitamento de biomassa florestal

No âmbito da Diretiva 2009/28/CE, de 23 de abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis (Diretiva FER), Portugal elaborou o seu Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) para o horizonte de 2020. Este Plano de Ação fixa os objetivos nacionais relativos à quota de energia proveniente de fontes renováveis consumida nos setores dos transportes, da eletricidade e do aquecimento e arrefecimento em 2020, bem como as respetivas trajetórias de penetração de acordo com o ritmo da implementação das medidas e ações previstas em cada um desses setores (PNAER, 2010).

Portugal dispõe hoje de um regime de acesso à rede elétrica que dá prioridade às FER, quer ao nível de planeamento e desenvolvimento da rede, quer ao nível da gestão corrente, através da prioridade do despacho. Para além disso foram criados ao longo dos últimos anos um conjunto de apoios de natureza financeira e fiscal ao investimento nas energias renováveis, muito impulsionados com a criação de tarifas diferenciadas para a energia elétrica produzida em centrais renováveis, *feed-in tariff* (FIT), em função do grau de maturidade das várias tecnologias disponíveis no mercado nacional (PNAER, 2010).

A ENE 2020 incorpora os objetivos da política energética estabelecida pelo XVIII Governo projetando-os para o horizonte de 2020 e tem como ambição manter Portugal na liderança da revolução energética, nomeadamente, no que respeita à utilização de energias renováveis, as quais, nesta estratégia, contribuem amplamente para a concretização da grande maioria desses mesmos objetivos (subcapítulo 2.4.4). Um dos cinco eixos de atuação da Estratégia Nacional para a Energia assenta na forte promoção do desenvolvimento das energias renováveis, nomeadamente através da fixação de novos objetivos de produção para as FER; da agilização dos procedimentos administrativos; da introdução dos biocombustíveis; da valorização da biomassa florestal e do Programa “Água Quente solar” (Enersilva, 2007).

A atual base da produção renovável nacional está fundamentalmente assente na combinação da energia hídrica e da energia eólica. Porém, a visão nacional para este setor passa pela diversificação da carteira de energias renováveis, apostando em tecnologias já maduras e que possam dar um contributo mais imediato para o sistema electroprodutor, bem como na investigação e desenvolvimento de tecnologias e de projetos em fase de teste/demonstração que apresentem potencial de criação de valor na economia nacional (MEID, s.d). Nesta visão, enquadram-se fontes renováveis como o biogás, os biocombustíveis, a geometria, a energia das ondas, e, em particular, a biomassa florestal, estando previstos instrumentos próprios para a sua promoção e desenvolvimento tecnológico (PNAER, 2010). Entre estes destaca-se em especial o Decreto-Lei nº. 5/2011 de 10 de janeiro, que estabelece as medidas destinadas a promover a produção e o aproveitamento de biomassa, garantindo o abastecimento das centrais dedicadas a biomassa florestal e fixando o incentivo à venda da eletricidade associado ao cumprimento dessas medidas (Decreto-Lei nº. 5/2011).

O aproveitamento de biomassa florestal para energia elétrica, ou simultaneamente para produção de energia elétrica e calor (cogeração), enquadra-se na organização do Sistema Elétrico Nacional, o qual se baseia na existência de dois sistemas complementares: o Sistema Elétrico Público e o Sistema Elétrico Independente – Produção em Regime Especial, de sistemas de menor dimensão e instalações de cogeração, ambas não integradas totalmente nas grandes fileiras energéticas, mas relacionando-se com elas. Neste contexto, no capítulo da valorização da biomassa, a ENE 2020 aponta para a necessidade de aumentar a potência instalada, assim como a adoção de medidas de valorização da biomassa florestal, em regime a compatibilizar com as indústrias da madeira e da pasta de papel e medidas de avaliação de critérios de remuneração da eletricidade produzida, tendo em conta as especificidades tecnológicas e critérios ambientais (MEID, 2010).

Um importante passo para a expansão das centrais a biomassa florestal foi dado em fevereiro 2006, com o lançamento de um concurso para a atribuição de quinze lotes para centrais termoelétricas a biomassa florestal, totalizando uma capacidade instalada de 100 MW, a concretizar até 2010. O concurso teve como ponto de partida os seguintes pressupostos: quantidade de fitomassa disponível, redução do risco estrutural de incêndio, criação de emprego local na recolha de biomassa florestal, criação de dinâmicas de inovação na gestão e exploração florestal, e distribuição dos pontos de ligação disponíveis ao nível das subestações onde é possível haver uma injeção de potência na rede (DGEG, 2006). É de salientar que o concurso apresentou duas tipologias de Central: de 2 a 5 MVA, orientada para as dinâmicas locais, e de 10 a 11 MVA, orientada para grupos industriais; sendo que dos quinze lotes duas centrais não serão concretizadas, duas encontram-se já a laborar, com uma capacidade de 3,3 MW e 1,92 MW, encontrando-se os restantes lotes em processo de licenciamento (Enersilva, 2007).

A Figura 19 apresenta a localização das centrais com pontos de ligação já concedidos e dos lotes a concurso. Para além dos projetos já em funcionamento e do concurso público de 2006, nas regiões Norte e Centro de Portugal, existem quatro novas licenças para centrais termoelétricas a localizar em Cabeceiras de Basto (Norte), com um máximo de potência de 12 MW; em Gondomar (Norte), com 13 MW; em Oleiros (Centro), com 9,3 MW; e para o reforço da central de Mortágua, com 10 MW, que permitirá um aumento da potência instalada em 57 MW (Enersilva, 2007). Atualmente, e segundo dados de 2009, a capacidade instalada em centrais a biomassa é de cerca de 500 MW (REA 2009, 2010) esperando-se, contudo, atingir os 958 MW em 2020 (PNAER, 2010).

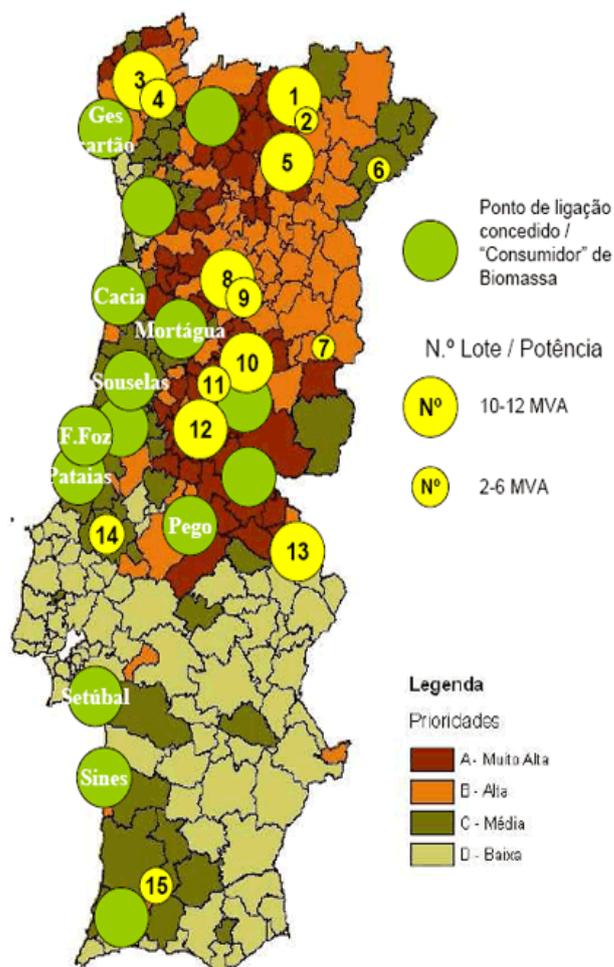


Figura 19 – Localização das centrais a biomassa com pontos de ligação já concedidos e dos lotes a concurso (fonte: DGEG, 2006).

Neste âmbito é ainda de salientar que a promoção da utilização da biomassa inclui a utilização da BF em centrais de cogeração de elevada eficiência energética, face às significativas vantagens que o processo acarreta para a eficiência global do sistema e do aproveitamento da energia contida nesta FER. Os sistemas de cogeração promovem o aproveitamento local do calor residual originado no decorrer dos processos industriais para produção de energia elétrica, permitindo o seu consumo na própria central ou a sua injeção na rede elétrica de serviço público. Atualmente verifica-se a existência de oito centrais de cogeração instaladas nas indústrias do setor florestal que procedem ao aproveitamento da biomassa florestal para a produção de calor, totalizando uma potência nominal de 154 MVA (AIFF, 2010).

Cumulativamente, e como resultado das trajetórias e objetivos traçados a nível nacional para as energias renováveis, o PNAER apresenta um conjunto de medidas para a sua consecução, encontrando-se estas desenvolvidas por FER e subdivididas pelos diversos setores de atividade. No Quadro 1 apresentam-se as medidas traçadas para o caso particular da biomassa, procedendo-se a uma descrição das mesmas e a uma breve avaliação do seu impacte no contexto socioeconómico português (PNAER, 2010).

Quadro 1- Medidas de consecução dos objetivos delineados para a Biomassa, por setor de atividade (fonte: PNAER, 2010).

Setor	Descrição	Resultado/Impacto Previsto	Datas chave
Eletricidade	Definir incentivos a aplicar às centrais dedicadas a biomassa florestal no âmbito de um quadro de vinculação a determinadas condições, mediante acordos voluntários com os promotores das centrais.	Desenhar um quadro de compromisso com os promotores das centrais de biomassa que possibilite a concretização dos projetos, vinculando os promotores a medidas de apoio à política florestal, organização da cadeia logística, valorização económica local, responsabilidade social e ainda, ao cumprimento de prazos de construção na implementação dos projetos.	2010
Aquecimento & Arrefecimento	Potenciar a utilização de equipamentos mais eficientes na utilização da biomassa, com baixas emissões de partículas.	Promover a utilização da biomassa no aquecimento residencial	2010/2011
	Promover o consumo interno de <i>pellets</i> através da aquisição/substituição doméstica de caldeiras a <i>pellets</i> .	Promover a utilização da biomassa no aquecimento residencial	2010/2011
	Dinamizar o Centro de Biomassa para a Energia	Criar um centro de investigação, certificação e coordenação global do setor da biomassa, em articulação entre o MEID, o MADRP e o MAO, tendo em conta a capacidade científica e tecnológica já instalada em centros de investigação e os promotores/empresas do setor. Crescimento da utilização sustentável da biomassa.	2010/2011
	Criar parques intermédios de recolha e estilhaçamento de biomassa, bem como a instalação de plataformas de armazenamento intermédio da biomassa.	Aumentar a sustentabilidade do fornecimento de biomassa florestal, promover o desenvolvimento regional e a criação de postos de trabalho estáveis nas regiões onde existe biomassa.	2010/2011
	Incrementar a Florestação em todo o Território Nacional. Utilização permanente do fundo florestal para promover o investimento na florestação do país.	Otimizar a gestão da fileira florestal e aumentar de forma sustentável a produção de biomassa.	2010 e seguintes
Geral	Fomentar as culturas energéticas em solos não utilizáveis por outras utilizações agrícolas.	Otimizar a gestão da fileira florestal e aumentar de forma sustentável a produção de biomassa.	2010 e seguintes
	Montar um sistema de controlo e fiscalização do uso adequado das matérias-primas.	Assegurar a sustentabilidade da biomassa utilizada, bem como os compromissos assumidos para a produção de eletricidade.	2010/2011
	Prever mecanismos de regulação do mercado.	Fazer face a eventuais desequilíbrios e distorções na formação dos preços da oferta de matéria-prima	2010/2011
	Lançar programas de cofinanciamento de equipamentos de aquecimento ambiente e de águas sanitárias através da utilização de recuperadores de calor e de caldeiras alimentadas a biomassa.	Promover a introdução e utilização de pequenos equipamentos a biomassa para o aquecimento ambiente e AQS nos setores doméstico e nos serviços públicos e equiparados (instalações municipais, escolas, IPSS...)	2010
	Lançar programa de apoio para a promoção da certificação da gestão florestal sustentável.	Garantir a gestão sustentável dos recursos florestais, evitando que a utilização deste recurso para fins energéticos colida com a indústria já instalada.	2010/2011
	Fazer acompanhamento e auditoria da tipologia da biomassa florestal utilizada nos projetos de valorização energética. Operacionalização do observatório da biomassa	Garantir a gestão sustentável dos recursos florestais. Monitorizar o impacto da utilização de biomassa nos setores industriais desta FER.	2011 e seguintes

Como referido no Decreto-Lei nº. 5/2011 de 10 de janeiro, a biomassa apresenta uma elevada importância para o país pela sua transversalidade à gestão florestal. Conjuntamente com as fileiras industriais, a valorização energética da biomassa promoverá uma gestão profissional das florestas nacionais, contribuindo para a diminuição da probabilidade de ocorrência de incêndios florestais, através da limpeza das florestas, e, conseqüentemente minimizar as emissões de GEE atribuídas a este setor (atualmente apresentam um elevado peso no cômputo geral das emissões nacionais), bem como para a sua sustentabilidade. Neste sentido, a Estratégia Nacional (ENF) para as Florestas aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 114/2006, de 15 de setembro, reconheceu a importância que o setor representa para o desenvolvimento do País e destacou o valor dos recursos florestais para a sociedade nas suas diversas funções e valências económicas, sociais e ambientais.

A integração da valorização da biomassa, no quadro das políticas florestais, encontra-se contextualizada no âmbito do Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios, e através da concretização territorial dos instrumentos de planeamento florestal, designadamente dos Planos Regionais de Ordenamento Florestal (PROF) e dos Planos de Gestão Florestal (PGF). A utilização do território no âmbito do planeamento florestal regional deve fundamentar as práticas de gestão a aplicar aos espaços florestais, permitindo a aplicação regional das diretrizes estratégicas nacionais e a monitorização da gestão florestal sustentável, que devem ser perfeitamente articuladas com outras políticas ambientais, nomeadamente a das energias renováveis, e mais concretamente, a promoção de biomassa (Resolução do Conselho de Ministros n.º. 114/2005).

A produção de energia a partir de fontes renováveis assume grande importância geoestratégica e está em consonância com o objetivo da política energética comunitária de redução da dependência do petróleo. O aumento no recurso a fontes de energia renováveis irá igualmente contribuir para atingir os compromissos assumidos no âmbito do Protocolo de Quioto de redução das emissões de gases com efeitos de estufa, cujas medidas são concretizadas em Portugal pelo Plano Nacional para as Alterações Climáticas. O aproveitamento da biomassa gerada nas matas em resultado da execução das ações de instalação, gestão e extração de produtos florestais, constitui um importante contributo para o incremento da taxa de utilização de Fontes de Energia Renováveis em Portugal, facto consignado no PNAC, que considera a biomassa e outros subprodutos e produtos florestais com um papel potencial para o aproveitamento energético. Apesar das indústrias florestais estarem a utilizar cada vez mais biomassa para a produção de energia, a maior parte desta biomassa provém de resíduos da atividade madeireira ou industrial e não da recolha da biomassa combustível da floresta. No entanto, é importante assinalar que a indústria respondeu positivamente aos incentivos oferecidos no passado. Através do Programa Prime e da medida MAPE, as unidades industriais concretizaram projetos de aproveitamento energético utilizando biomassa florestal em instalações de cogeração (caldeiras de biomassa) (Resolução do Conselho de Ministros n.º. 114/2005).

Cumulativamente, a ENF considera o aproveitamento da biomassa florestal para a produção de energia uma atividade promissora para promover a redução do material combustível, principalmente com os atuais custos do petróleo, propondo assim, para além do apoio à utilização da biomassa florestal em centrais de energia, a realização de uma discriminação positiva a esta atividade fora da área de influência das centrais, desde que o material consumido seja biomassa florestal proveniente da gestão de combustíveis, no âmbito das medidas de silvicultura preventiva e da exploração florestal (instalação, condução e extração). É ainda de salientar o facto de os grandes contributos para a valorização da biomassa florestal, poderem ser dadas nas regiões onde o Conselho Nacional de Reflorestação intervém, nomeadamente através da definição de uma adequada rede de infraestruturação ao nível da paisagem, passando pela implementação de faixas de redução de combustível e, posteriormente, pela sua manutenção (Resolução do Conselho de Ministros nº. 114/2005).

Ainda neste contexto é de realçar que a promoção da biomassa florestal para produção de energia elétrica foi um dos objetivos identificado no quadro das medidas do Programa Nacional para a Redução da dependência do Petróleo, propondo-se então a definição de um tarifário adequado ao enquadramento remuneratório das FER. O Decreto-Lei n.º 33-A/2005, de 16 de fevereiro veio estabelecer uma tarifa favorável para a energia produzida em centrais de biomassa florestal (cerca de 109 €.MWh⁻¹). Esta tarifa é bastante superior à atribuída à da energia produzida em centrais hídricas, eólicas, de resíduos sólidos urbanos (RSU) ou biogás de aterro, sendo apenas inferior à tarifa da eletricidade produzida em centrais fotovoltaicas. Este diploma refere ainda que as remunerações aplicáveis à eletricidade produzida a partir de biomassa florestal serão garantidas durante os primeiros 15 anos a contar desde o início do fornecimento de eletricidade à rede.

Existem ainda muitas outras possibilidades para o aproveitamento da biomassa florestal que requerem investigação adequada. Entre estas possibilidades estão sistemas de produção de energia localizada (por exemplo, o aquecimento de uma escola). Dada a disponibilidade de matéria-prima em Portugal, as externalidades negativas de deixar esta matéria-prima acumular-se na floresta (sendo exemplo os incêndios florestais), e as várias políticas ambientais europeias ou globais a que Portugal aderiu, a ENF recomenda como uma prioridade da estratégia o financiamento à investigação de processos para a adoção de tecnologias utilizadoras da biomassa florestal para a produção localizada de energia, propondo igualmente que seja financiada a investigação e experimentação à escala real mediante concurso público. No entanto, o carácter inovador de que se reveste o aproveitamento de biomassa para energia, confere a esta atividade um risco potencial, estando prevista, e segundo a Resolução do Conselho de Ministros nº. 114/2006 de 15 de setembro, a criação de um Observatório que acompanhe e monitorize o aproveitamento de biomassa para energia.

3.3.3 Tendências futuras

Com a nova Estratégia Nacional para a Energia, apresentada no início de 2010, o eixo das Energias Renováveis refere o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate as alterações climáticas, permitindo que em 2020 60% da eletricidade produzida tenha origem em fontes renováveis. Este plano reitera o valor anteriormente apontado para a Biomassa, dando prioridade à instalação efetiva da potência já atribuída (250 MW de potência instalada), integrando mecanismos de flexibilidade na concretização dos projetos, assim como aprovar medidas de promoção da produção da biomassa florestal, assegurando a satisfação das necessidades de consumo já instaladas e a instalar. Será necessário um verdadeiro impulso para a concretização desta meta, que aparentemente num horizonte de 10 anos parece totalmente realizável, não deixa de ter falhado a anterior meta de forma significativa (MEID, 2010).

Do lado da biomassa para aquecimento nada concreto é referido nesta nova estratégia, mas uma das medidas críticas para incentivar esta fonte renovável será a redução da taxa do IVA incidente sobre os combustíveis derivados da madeira e a penalização fiscal do teor de CO₂ dos combustíveis fósseis, contribuindo assim de forma crucial para a limpeza das florestas e redução dos riscos que lhe estão associados. É na área da produção de calor para aquecimento através de sistemas limpos, baratos e eficientes que países menos desenvolvidos nesta área, como Portugal, devem apostar. A produção de *pellets* encontra-se hoje a dar os primeiros passos, fazendo parte do caminho a percorrer para a instalação de caldeiras modernas que permitam o aquecimento de edifícios públicos e residenciais. Estes sistemas podem funcionar em regime de cogeração, produzindo eletricidade e calor. No entanto, será a *tri-geração*, e não a cogeração, a tecnologia que mais se adequará ao clima português, aproveitando o calor produzido no verão, período em que as necessidades de aquecimento são quase nulas, para produzir frio (MEID, 2010).

A biomassa florestal será, no futuro, um recurso de múltipla aplicabilidade, podendo ser utilizado para aquecimento, arrefecimento, eletricidade e transportes, respondendo a grande parte das futuras necessidades das sociedades. No entanto, o desenvolvimento da bioenergia passará pela utilização crescente das culturas energéticas e com a consequente diminuição, de forma progressiva, do contributo dos resíduos florestais. As culturas florestais energéticas, como o salgueiro, choupo ou eucalipto, são sistemas intensivos de produção de biomassa e caracterizados por ciclos de corte curtos, entre um a seis anos. Esses sistemas permitem, para além de uma maior mecanização das operações, uma gestão orientada para uma sustentabilidade mais facilitada e uma redução da pressão na exploração da biomassa florestal (MEID, 2010).

Capítulo IV – Conversão Energética de Biomassa Florestal

As propriedades inerentes da biomassa determinam tanto a sua utilização para um determinado processo de conversão como as possíveis dificuldades subsequentes que possam surgir. As tecnologias de conversão desta FER incluem uma ampla variedade de fontes de biomassa e opções de conversão, possibilitando a produção de calor, eletricidade e combustíveis. É ainda de salientar que a utilização da biomassa pode ser feita de forma direta ou através da sua conversão num produto intermédio, segundo um conjunto de tecnologias que abrangem diferentes tipos de reatores, motores, caldeiras, refinarias, turbinas, células de combustível, entre outros (Ferreira *et al.*, 2009).

Os processos de conversão da biomassa são normalmente selecionados segundo um conjunto de fatores: tipo final de energia; normas ambientais; tipo e quantidade de biomassa disponível em cada região; e políticas governamentais. No entanto, é a forma na qual a energia é necessária que determina o tipo de processo, seguido da quantidade e tipo de biomassa disponível (Mckendry, 2001). Geralmente os processos de conversão de biomassa encontram-se divididos em dois processos tecnológicos fundamentais, conversão termoquímica, particularmente adequado para materiais herbáceos de humidade reduzida, tais como, resíduos da indústria madeireira; e bioquímica, apropriada para plantas herbáceas de humidade elevada (legumes, cana-de-açúcar de beterraba, milho, sorgo), culturas marinhas e estrume. Cumulativamente pode ainda recorrer-se a processos químicos (Figura 20) (Ferreira. *et al.*, 2009).

Demirbas (2004) expõe no seu artigo as tecnologias de maior relevo no panorama atual, destacando-se: (1) Carbonização de biomassa lenhosa em carvão vegetal; (2) Gaseificação de biomassa para a obtenção de produtos gasosos; (3) Pirólise de biomassa e resíduos sólidos para a obtenção de produtos líquidos, sólidos e gasosos; (4) Extração de fluídos/ liquefação da biomassa para a obtenção de produtos líquidos; (5) Hidrólise de biomassa para a obtenção de açúcares e etanol; (6) Utilização de biomassa para produção de energia elétrica através de combustão direta ou gaseificação e pirólise; (7) Co-combustão de biomassa com carvão; (8) Conversão biológica de biomassa e resíduos (produção de biogás, tratamento de águas residuais); (9) Densificação de biomassa (produção de briquetes e *pellets*); (10) Aplicações domésticas de combustível lenhoso; (11) Conversão de biomassa em metanol e etanol destinados a motores de combustão interna.

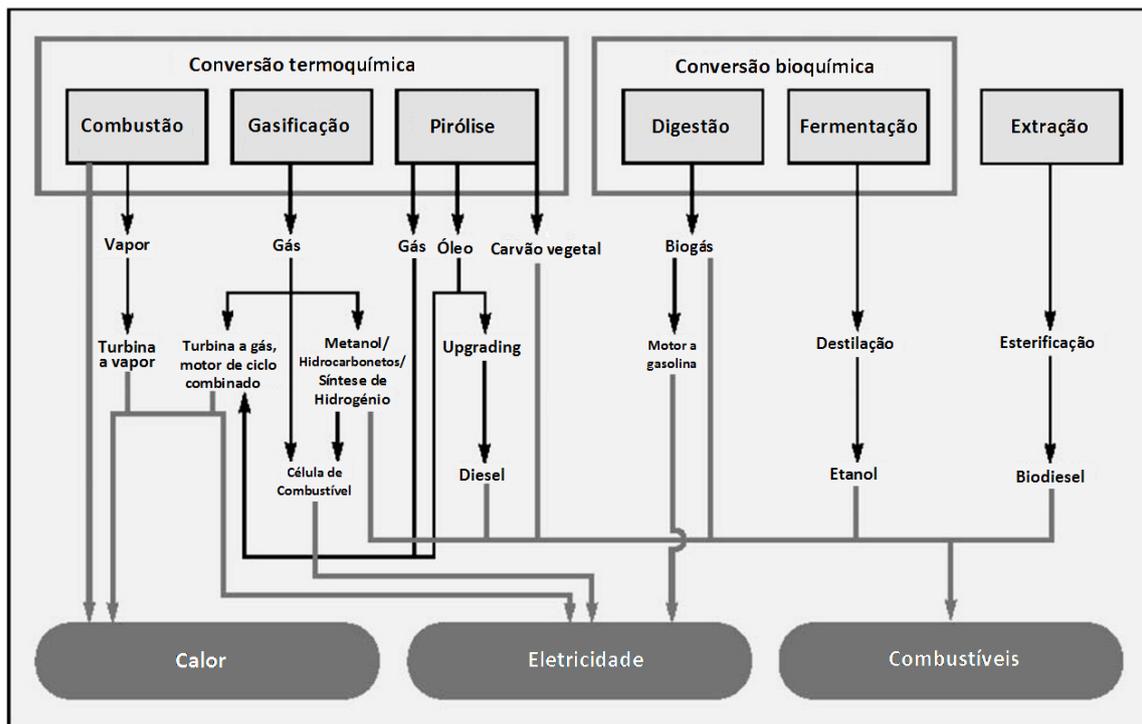


Figura 20 – Principais opções de conversão da biomassa em energia térmica, elétrica e mecânica (fonte: CE, 2003).

Neste capítulo apresenta-se o estado de arte dos sistemas de conversão de biomassa florestal, dando-se particular ênfase aos processos termoquímicos. Além disso, dado que o âmbito da dissertação se encontra centrado na produção de energia elétrica por combustão direta, apresentam-se descritos os principais processos de combustão.

4.1 Processos Bioquímicos e Químicos

A conversão bioquímica apresenta-se como o processo através do qual a biomassa é convertida em gás (CO_2 e CH_4), resíduos e água, segundo uma cadeia de transformações sucessivas desencadeadas pela ação de diversos microrganismos. Os processos bioquímicos englobam dois tipos fundamentais de sistemas (Mckendry, 2001):

- **Fermentação:** Amplamente conhecida como o método comercialmente empregue na produção de etanol, apresentando como matéria-prima as culturas de açúcar (como por exemplo, cana-de-açúcar e beterraba de açúcar) e as culturas de amido (milho, trigo, entre outros), ricos em açúcar e celulose (Mckendry, 2001). A escolha da biomassa como matéria-prima apresenta-se como uma etapa essencial do processo, determinando a viabilidade do sistema, pelo que o custo da biomassa deve estar compreendido entre 55 a 80% do valor do produto final. Assim, por um lado a biomassa à base de amido é geralmente mais económica do que os materiais à base de açúcar, necessitando no entanto de um processamento adicional; por outro lado a biomassa lignocelulósica (madeira, palha, entre outros) encontra-se facilmente disponível requerendo contudo, e face à presença de moléculas com longas cadeias de polissacarídeos, uma preparação dispendiosa e complexa, salientando-se a necessidade de uma prévia hidrólise ácida ou enzimática para que os açúcares resultantes possam ser fermentados para etanol. A fermentação apresenta-se como um processo biológico relativamente simples, consistindo primeiramente na extração do açúcar, por trituração das culturas de biomassa, procedendo-se em seguida à sua mistura com água em fermentadores previamente aquecidos. No fermentador, e por ação de microrganismos, na maioria dos casos, a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, verifica-se a conversão dos açúcares a etanol, podendo este ser utilizado como biocombustível no setor dos transportes (Ferreira *et al.*, 2009).
- **Digestão Anaeróbia:** Consiste fundamentalmente na conversão de material orgânico em biogás (mistura de metano e dióxido de carbono, apresentando ainda pequenas quantidades de outros gases, nomeadamente sulfureto de hidrogénio) por ação de bactérias (acidogénicas e metanogénicas) num ambiente anaeróbio (digestor) (Mckendry, 2001). A digestão anaeróbia é uma tecnologia comercialmente comprovada e largamente utilizada no tratamento de resíduos orgânicos com elevado teor de humidade (80 a 90% de humidade), encontrando-se o processo desenvolvido em três fases: hidrólise, acidogénese e metanogénese. Assim, a fase hidrolítica é caracterizada pela degradação das macromoléculas (glúcidos, proteínas e lípidos) até ao nível dos seus monómeros (açúcares, aminoácidos, glicerol e ácidos gordos), por ação de exoenzimas. As micromoléculas resultantes alimentam um conjunto de estirpes bacterianas anaeróbias e facultativas sendo responsáveis pela produção de compostos simples como o metanol, etanol, ácido fórmico, ácido acético, propílico, butírico, valérico e láctico, caracterizando a fase acidogénica. Alguns dos gases resultantes desta fase apresentam-se como contaminantes do

biogás, sendo responsáveis pelos maus cheiros e corrosão dos equipamentos. Por fim, os ácidos produzidos são convertidos a biogás, constituindo a fase metanogénica. É ainda de salientar que a eficiência do processo encontra-se dependente de fatores físico-químicos cujo controlo é indispensável, merecendo especial destaque a temperatura e pH do meio, o teor de nutrientes e permeabilidade do reator ao ar (Ferreira *et al.*, 2009). Em Portugal o recurso à digestão anaeróbia é ainda limitado face ao potencial existente para esta tecnologia, encontrando-se atualmente em execução 30 sistemas.

Como processo meramente químico destaca-se a transesterificação que se caracteriza pela separação da glicerina dos óleos vegetais para a obtenção do biodiesel (éster metílico). O processo inicia-se juntando o óleo vegetal (éster de glicerina) com álcool metílico (ou metanol) e ainda um catalisador (sódio ou hidróxido de potássio) para acelerar o processo. Após a reação obtém-se a glicerina (subproduto muito utilizado na indústria farmacêutica, cosmética e alimentar) e o biodiesel (Ferreira *et al.*, 2009).

4.2 Processos Termoquímicos

Os processos de conversão termoquímica permitem transformar a energia química presente na biomassa em energia térmica, apresentando-se atualmente como a tecnologia de maior aplicabilidade na valorização energética da biomassa florestal. Dentro da conversão termoquímica encontram-se disponíveis quatro opções tecnológicas fundamentais: a pirólise, a liquefação, a gasificação e a combustão, sendo este último, e face à sua fiabilidade e disponibilidade, o processo usualmente aplicado na indústria de produção de energia térmica. Contudo, a gasificação e a pirólise são processos de conversão que apresentam um interesse crescente, uma vez que permitem ampliar o uso da biomassa como energia alternativa, nomeadamente através da produção de gás combustível (Demirbas, 2005).

É ainda de salientar que, em condições ambientais normais, a biomassa não é auto-inflamável, pelo que a extração de energia passa por um processo de conversão termoquímica complexo. A primeira fase prende-se com o aquecimento da partícula de combustível, ocorrendo até a biomassa atingir uma temperatura próxima da temperatura do sistema. A taxa de aquecimento pode variar entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a mais de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, dependendo de vários fatores, destacando-se o tamanho da partícula de combustível, tipo de alimentação e regime de fluidização. Durante os estágios iniciais do aquecimento, em que se verificam temperaturas baixas, a água fisicamente adsorvida na superfície externa e contida nos poros da partícula vai evaporando. Uma vez que a vaporização consome energia, a presença de água (humidade) no combustível contribui para a diminuição da velocidade de aquecimento. Assim, o teor de humidade da biomassa, e como anteriormente referido, apresenta-se como um fator de extrema importância,

evidenciando a necessidade de, em algumas circunstâncias, proceder-se à secagem prévia da biomassa (Basu, 2006).

A pirólise pode ser definida como um processo de degradação térmica, sendo que este se desenvolve na ausência de oxigénio e a temperaturas médias. Apresenta-se como uma das fases nos processos de combustão e gasificação, seguindo-se a oxidação completa ou parcial dos produtos da pirólise. Tendo em conta as condições em que ocorre o processo, nomeadamente, a velocidade de aquecimento, temperatura de reação, pressão, gás de inertização e tempo de residência dos produtos no meio reacional, consideram-se distintos tipos de pirólise, cada um deles maximizando ou minimizando uma determinada fração de produtos (Tabela 10) (Brigdwat, 2003). Assim, face às condições operatórias, a pirólise apresenta-se caracterizada segundo três processos fundamentais (Onay e Kockar, 2003):

- **Carbonização** (ou pirólise lenta): Caracterizada pela utilização de baixas temperaturas (na ordem dos 300 °C) e elevados tempos de residência, maximizando a produção de resíduo carbonoso (carvão). O produto derivado resulta da lenta volatilização do combustível, bem como das reações secundárias de coqueificação e polimerização dos produtos primários voláteis, apresentando uma densidade energética superior à biomassa original (duas vezes superior ao material de origem).
- **Pirólise rápida**: Caracterizada pelo recurso a temperaturas moderadas (cerca de 600 °C) e baixos tempos de residência. Uma vez que os gases formados são rapidamente arrefecidos, maximiza-se a fração líquida dos produtos. O combustível líquido pode ser refinado para a produção de bio-óleo e biocombustíveis líquidos com alto teor de hidratos de carbono, ou utilizado diretamente para a produção de calor e eletricidade.
- **Gasificação pirolítica**: Caracterizada pelo recurso a elevadas temperaturas e a longos tempos de residência, maximizando a conversão da biomassa a gás combustível. Este pode ser utilizado para a produção de calor e energia ou sintetizados para a produção de metanol ou amónia.

Tabela 10 – Rendimentos típicos (em base de madeira seca) obtidos a partir de diferentes tipos de pirólise (fonte: adaptado de Brigdwat, 2003).

	Líquido (%)	Carvão (%)	Gás (%)
Carbonização	30	35	35
Pirólise rápida	75	12	13
Gasificação pirolítica	5	10	85

O processo de liquefação apresenta-se como um processo de conversão termoquímica de fase líquida a baixas temperaturas (250 a 350 °C) e a altas pressões (100 a 200 bar). Em comparação com a pirólise, o processo de liquefação apresenta uma maior eficiência na produção de bio-óleo, bem como um poder calorífico superior, face ao reduzido teor de oxigénio. Em rigor, consideram-se dois tipos distintos de liquefação: direta e indireta. A liquefação direta ocorre numa atmosfera redutora de hidrogénio, ou mistura de hidrogénio e monóxido de carbono, a altas pressões e a temperaturas moderadas. Ao contrário do que acontece na liquefação indireta, a biomassa é diretamente convertida em produtos líquidos, sendo o processo auxiliado pela presença de catalisadores e solventes. Por outro lado, a liquefação indireta engloba diversas operações, ocorrendo a produção de gás de síntese (CO, CO₂, H₂ e CH₄), por gasificação. O gás será convertido a metanol ou a hidrocarbonetos, por ação de catalisadores (Loo e Koppejan, 2008).

A gasificação afigura-se como um processo de degradação térmica que promove a conversão de um combustível sólido ou líquido num combustível gasoso, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). O gás resultante é constituído por uma mistura de monóxido de carbono, hidrogénio, metano, dióxido de carbono e nitrogénio, cujas proporções variam dependendo das condições do processo, do tipo de gasificador, do teor de humidade e do tipo de biomassa utilizada (Basu, 2006). Trata-se de uma tecnologia relativamente antiga, sendo aplicada essencialmente ao carvão. No entanto, a gasificação com vapor apresenta-se atualmente como uma tecnologia de interesse crescente face ao gás que produz (rico em H₂), uma vez que este pode ser usado em células de combustível, representando uma forma de produção de energia mais limpa (Franco *et al.*, 2003).

Em geral, a gasificação envolve a reação entre o carbono e o agente de gasificação, a temperaturas elevadas, para produzir um produto gasoso que pode ser usado para produção de energia elétrica ou calor ou mesmo como matéria-prima para síntese de químicos, combustíveis líquidos ou outros combustíveis gasosos como o hidrogénio (Ferreira *et al.*, 2009). Ao contrário dos processos de combustão, que utilizam excesso de agente oxidante, o processo de gasificação opera em condições sub-estequiométricas, com o fornecimento de agente oxidante devidamente controlado, garantindo que o calor e o gás de gasificação sejam produzidos à medida que o combustível sólido é convertido (Rezaiyan e Cheremisinoff, 2005).

O tipo de agente de gasificação apresenta-se como um fator determinante na composição do gás produzido, bem como na elaboração do balanço energético do processo. Geralmente utilizam-se três tipos de agente de gasificação – ar atmosférico, oxigénio puro ou vapor de água – sendo possível realizar o processo com misturas entre si. A escolha do tipo e rácio de agente de gasificação depende do objetivo do processo ou até mesmo da disponibilidade energética externa que é possível fornecer. Assim, a gasificação com ar atmosférico ou oxigénio puro é chamada de gasificação direta, sendo caracterizada, para além da produção de gás combustível, pela oxidação parcial do combustível de entrada com o ar ou oxigénio, o que permite fornecer alguma da energia necessária à ocorrência das reações endotérmicas. É ainda de salientar que a gasificação com ar atmosférico é mais económica do que a gasificação com O₂, sendo o primeiro um

recurso que se encontra disponível livremente. O gás produzido neste caso é um gás com baixo poder calorífico. Já a gasificação com vapor, ou gasificação indireta, produz um gás cuja composição é bastante melhorada, chegando-se a produzir um gás de médio poder calorífico. Cumulativamente, a gasificação com vapor reduz o efeito diluidor do N_2 proveniente do ar atmosférico, bem como o CO_2 produzido pela combustão, minimizando a necessidade de um agente de gasificação mais caro, como é o caso do oxigênio puro. Contudo, torna-se num processo altamente endotérmico, pois não ocorre a oxidação parcial do combustível no reator o que poderia fornecer alguma energia ao processo (Franco *et al.*, 2003).

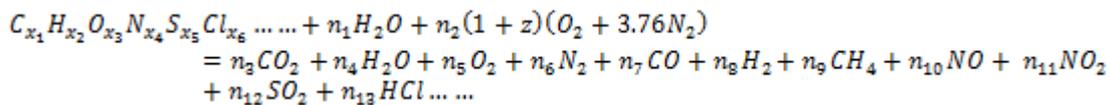
Através de processos de síntese, o gás combustível pode ser usado para a produção de metanol e para a produção de água quente e vapor (através da sua combustão), bem como utilizado em turbinas a gás ou motores de combustão para a produção de calor e eletricidade, sendo que esta só deve ser feita após a remoção de contaminantes, tais como, partículas, cinzas e componentes alcalinos (Loo e Koppejan, 2008). É ainda de salientar que o recurso ao combustível gasoso em detrimento dos combustíveis sólidos permite uma menor libertação de poluentes gasosos, bem como uma menor deposição de resíduos nas superfícies de permuta de calor, tornando a combustão eficiente e ambientalmente aceitável.

A co-combustão de biomassa encontra-se habitualmente associada à combustão de biomassa e carvão para a produção de energia. Comparativamente à queima isolada de carvão ou biomassa, a co-combustão apresenta vantagens, entre as quais se destacam a redução do total de emissões por unidade de energia produzida, nomeadamente dos níveis de emissão de óxidos de enxofre, de metais pesados ou de dioxinas e furanos; a minimização de desperdícios e, dependendo da composição química da biomassa utilizada, a redução dos níveis de poluição do solo e água (Abelha, 2005; Pereira, 2006). O processo de co-combustão pode ser aplicado em instalações já existentes que operem com combustíveis sólidos, fomentando a capitalização do investimento realizado na instalação de infraestruturas energéticas dedicadas aos combustíveis fósseis tradicionais. Os custos associados a eventuais adaptações nestas unidades (sistemas de alimentação, tratamento de gases, entre outros) representam apenas uma pequena percentagem dos custos de implementação de uma instalação dedicada exclusivamente à combustão direta da biomassa (Knoef e Stassen, 1995).

4.2.1 Combustão de biomassa

A combustão de biomassa é caracterizada pela sua queima a altas temperaturas, na presença de um agente oxidante em excesso (ar ou oxigênio), com o objetivo de garantir as condições ótimas para uma combustão completa do biocombustível (Silva, 2009). Em condições ideais, a combustão representa uma oxidação completa da parte orgânica do biocombustível sólido em gases simples como CO_2 e H_2O (Oberberger *et al.*, 2006). No entanto, na prática não se verificam as condições ideais, resultando, na

maioria dos casos, produtos inqueimados devido ao processo de combustão incompleto. Esta tecnologia envolve uma série de acontecimentos físicos e químicos de elevada complexidade. Para um bom dimensionamento e controlo de todo o processo, é necessário o conhecimento das propriedades do biocombustível sólido a utilizar bem como as condições em que essas propriedades poderão influenciar o comportamento do próprio processo de combustão (Jenkins *et al.*, 1998; Loo e Koppejan, 2008). A combustão da biomassa pode ser entendida e representada simplificada pela seguinte reação:



(Equação 1)

De salientar que o primeiro termo dos reagentes se refere à composição da biomassa e que se encontra bastante simplificada, sendo representada apenas pelos compostos maioritários. O segundo termo dos reagentes expressa o teor de humidade do biocombustível sólido, parâmetro que pode limitar o processo de combustão. O terceiro termo é referente ao ar de combustão, encontrando-se unicamente representado por uma mistura binária dos compostos maioritários da atmosfera com proporções de 21% e 79%, para o O₂ e N₂, respetivamente. Outros compostos presentes na atmosfera como o CO₂ e o vapor de água são desprezados, uma vez que as suas quantidades são insignificantes. O parâmetro z [%] diz respeito ao excesso de ar necessário para efetuar uma combustão completa do biocombustível (Jenkins *et al.*, 1998).

Tratando-se de um mecanismo complexo, a combustão de biomassa produz diversos tipos de compostos. Os produtos principais são o CO₂, H₂O, O₂ e N₂, havendo produção de outros compostos em menores quantidades como o CO, H₂, metano, óxidos de azoto e enxofre, entre outros. Produtos como o HCl são emitidos devido à presença de compostos alcalinos em grandes quantidades na biomassa (Jenkins *et al.*, 1998).

O processo de combustão ocorre de uma forma sequencial através de um conjunto de reações enquadradas nas seguintes fases: secagem, pirólise, gasificação e por último, a combustão. Iniciando o processo de combustão, a biomassa começa por perder o seu teor de humidade, sendo que esta fase ocorre a uma temperatura próxima dos 100 °C. Nesta fase, dependendo do teor de humidade da biomassa, a câmara de combustão apresenta uma temperatura relativamente baixa o que tende a retardar o processo. Após a secagem, inicia-se a fase de pirólise e combustão gasosa, onde ocorre a libertação de voláteis e gases como o CO e o CO₂ em quantidades consideráveis. Paralelamente à decomposição térmica da biomassa, ocorre o fenómeno de fragmentação das partículas, resultado do choque térmico, da secagem e da libertação de matéria volátil. A fragmentação encontra-se relacionada com a oxidação total ou parcial

da partícula seguida do seu arrastamento para fora do sistema de combustão, o que se traduz numa diminuição da eficiência térmica e da conversão do carbono, ocorrendo conseqüentemente perda de energia e emissão de partículas para o ambiente (Moreira, 2007; Tarelho, 2008). Por último, o processo de combustão termina com a oxidação do carbonizado e a retenção de cinzas (Araújo, 2008; Loo e Koppejan, 2008). A Figura 21 apresenta o comportamento de uma partícula de biomassa durante o processo de combustão para as diferentes fases.

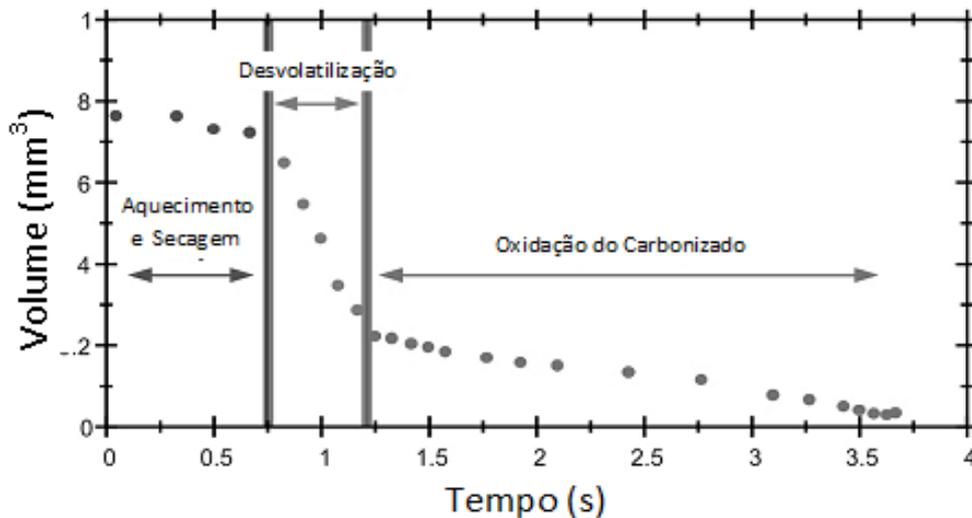


Figura 21 – Perda de massa de uma partícula de biomassa durante o processo de combustão (fonte: Loo e Koppejan, 2008).

Assim, é notório que inicialmente ocorre uma pequena perda de massa num período de cerca de 0,75 [s], correspondendo à fase de secagem. Posteriormente, nas fases de desvolatilização e combustão gasosa verifica-se, uma elevada taxa de consumo de massa num curto espaço de tempo (entre os 0,75 e 1,25 [s]). Contrariamente, a fase de oxidação do carbonizado é caracterizada por uma perda lenta de massa durante um longo período de tempo (Loo e Koppejan, 2008).

A maioria dos processos tradicionais de combustão caracterizam-se por apresentar fracos desempenhos ambientais e energéticos, pelo que a necessidade de reduzir custos e de minimizar os níveis de emissão de poluentes, têm conduzido ao desenvolvimento de novas tecnologias de combustão. Atualmente são usadas diversas técnicas para a combustão da biomassa, desde reatores contínuos a descontínuos. Atendendo ao âmbito do presente trabalho, apenas serão enunciadas as principais tecnologias utilizadas na combustão de biomassa para fins energéticos em reatores contínuos, nomeadamente, em sistemas de combustão em leito fixo (grelha) e em leito fluidizado.

Combustão em Grelha

A combustão em grelha foi o primeiro sistema de combustão usado para combustíveis sólidos, tendo sido considerada a tecnologia de combustão mais versátil nos anos 80 (Werther *et al.*, 2000). Atualmente, são especialmente usadas na combustão de biomassa, resíduos urbanos, e em algumas pequenas fornalhas de carvão, podendo utilizar combustíveis sólidos de um amplo conjunto de dimensões. Os equipamentos de combustão com grelha possuem uma capacidade na ordem dos 4 a 300 MWe, sendo que a combustão num processo de produção combinada de calor e energia apresenta geralmente uma capacidade entre os 20-50 MWe. O calor libertado por área de grelha pode ser até cerca de 4 MWth.m⁻², resultando este valor do elevado teor de voláteis e baixa quantidade de cinza dos combustíveis típicos de biomassa (Yin *et al.*, 2008).

O sistema de grelha apresenta-se constituído por quatro componentes: o alimentador de combustível, a grelha, o alimentador de ar primário e secundário e o descarregador de cinzas. A alimentação da biomassa é realizada por alimentadores mecânicos automáticos. As grelhas encontram-se na parte inferior da câmara de combustão e possuem duas funções: transporte longitudinal do combustível e distribuição do ar primário (entrada de ar pela parte inferior da grelha). Existem diversos tipos de grelhas, sendo estas classificadas em grelhas estacionárias ou mecânicas (também designadas por móveis), podendo estas últimas ser classificadas em móvel ou de tambor, de balanço, recíprocas, e vibratórias ou oscilantes (Yin *et al.*, 2008).

As grelhas estacionárias não se deslocam, e como tal, a sua inclinação apresenta-se como a sua principal característica permitindo que a biomassa deslize pela grelha, por efeito da gravidade, e seja combustada. As desvantagens deste sistema prendem-se com o risco de avalanche do combustível dentro do reator e com as dificuldades no controlo do processo de combustão. Por sua vez, nas grelhas mecânicas, a biomassa entra por um dos lados da grelha e durante o processo de queima é transportada ao longo da câmara de combustão até ao coletor de cinzas. Uma vez que neste tipo de grelha não existe mistura entre a alimentação e o processo de combustão, verifica-se um maior controlo do processo e um aumento na eficiência de conversão de carbono. Como referido anteriormente, incluídas neste tipo de grelhas encontram-se as grelhas recíprocas, sendo estas caracterizadas pelo transporte da biomassa com movimentos ascendentes ou descendentes provocando a combustão do resíduo à medida que esta se vai deslocando até ao coletor de cinzas. Por sua vez, as grelhas vibratórias, face ao seu movimento, espalham o combustível de forma uniforme, apresentando-se como um sistema pouco usado atualmente. A sua única vantagem, em comparação com as restantes grelhas mecânicas, é apresentar menos peças móveis diminuindo os custos associados à manutenção (Yin *et al.*, 2008).

O ar de combustão, para sistemas tipo grelha, incluem duas componentes: ar através da grelha ou ar primário, ar acima da grelha ou ar secundário. O ar primário tem como função principal garantir uma distribuição adequada do ar ao longo do leito de combustão, enquanto o ar secundário promove a mistura com os gases provenientes do leito de combustão, reduzindo as emissões (Yin *et al.*, 2008). A Figura 22

apresenta a configuração de um sistema de combustão de grelha recíproca, bem como uma representação do sistema de fornecimento de ar.

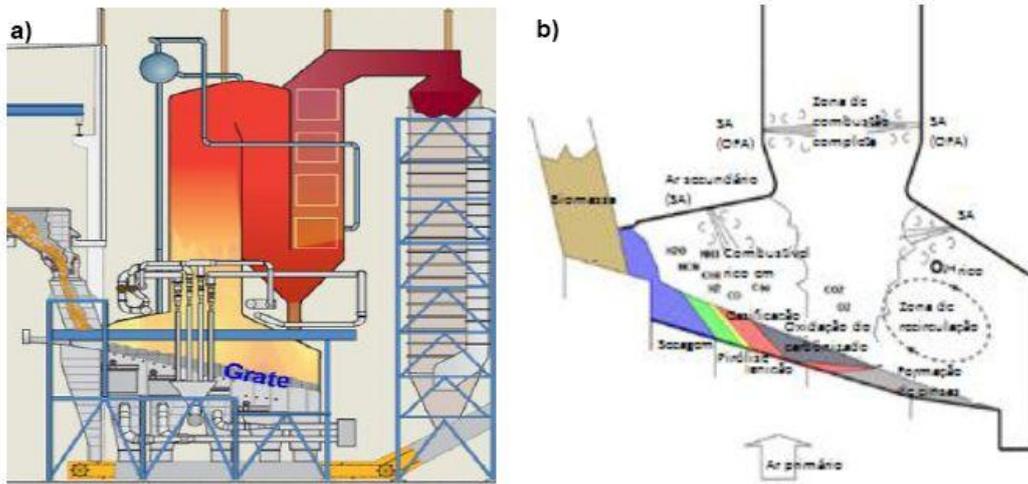


Figura 22 – Representação de um exemplo de um reator grelha (a) e representação esquemática do fornecimento de ar e das diversas zonas de combustão (b) (fonte: adaptado de Yin *et al.*, 2008).

Os sistemas de combustão em grelha operam com temperaturas entre os 850 e 1400 °C (Quaak *et al.*, 1999), sendo normalmente arrefecidos a água, o que promove a redução dos fenômenos de *slagging* e o prolongamento do tempo de vida dos materiais. Um aspeto importante no processo de combustão é a dimensão das partículas face às características e dimensões das grelhas de combustão, pois partículas com dimensões superiores à grelha permitem reduzir a formação de inqueimados nas cinzas (sob a forma de carbono) e nos gases de combustão (sob as formas de monóxido de carbono, fuligem, hidrogénio e alguns hidrocarbonetos) (Oberberger, 1998).

Combustão em Leito Fluidizado

Atualmente, a combustão em leito fluidizado (LF) representa um dos sistemas mais usados para queima de biomassa. Esta tecnologia apresenta grande flexibilidade pois permite a queima de combustíveis com reduzido poder calorífico e teor de humidade elevado, apresentando taxas de transferência de calor e de massa mais elevadas quando comparadas com os restantes sistemas. Para além de ser uma tecnologia eficiente, é considerada limpa, dado que permite minimizar as emissões de alguns poluentes,

nomeadamente NO-térmico e dióxido de enxofre (SO₂), possibilitando ainda a redução da colmatagem dos permutadores por cinzas fundidas e dos problemas associados às escórias e às incrustações. No entanto existem restrições no que diz respeito à utilização de combustíveis com elevado teor em cinzas, dado que, na gama de temperaturas do funcionamento do leito fluidizado, as cinzas com elevado teor de compostos alcalinos poderão formar compostos com baixo teor de fusão. Estes compostos poderão formar aglomerados no leito, constituídos por cinza e areia ligados após fusão, podendo causar a sua desfluidização (Khan *et al.*, 2009). Como resultado, nestas condições será essencial a instalação de equipamentos de elevada eficiência de separação de sólidos (ciclones, filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos), bem como uma potência de ventilação apreciável para vencer as perdas de carga do distribuidor e do leito.

Os sistemas de combustão em leito fluidizado exigem normalmente longos períodos de arranque, que podem ir até às quinze horas, sendo economicamente viáveis para instalações em grande escala, com potências superiores a 30 MW_{th}. No entanto, para instalações inferiores, os custos de investimento e operação são bastante elevados quando comparado com os sistemas de combustão em grelha. Cumulativamente, a combustão em LF carece de um pré-aquecimento do reator, antes de se iniciar o processo de combustão, usualmente com gás, até aos 400-500 °C, dependendo das propriedades do tipo de biomassa. Após este aquecimento a temperatura do leito é aumentada, com a introdução do combustível sólido, até se atingir a temperatura de operação de 850 °C, podendo variar na gama dos 800-900 °C (Tarelho, 2001)

O LF resume-se, então, a um volume de partículas (leito), de variada natureza (biomassa, cinza, areia), que é suportado por uma placa de distribuição de gás. As partículas são sustentadas em movimento vigoroso através do ar que se escoia em sentido ascendente ao leito (Figura 23). O reator de leito fluidizado é constituído por duas regiões distintas: a primeira onde a concentração de sólidos é elevada, denominada de leito, e uma segunda região onde a concentração de sólidos é bastante inferior, denominada por espaço livre acima do leito (*freeboard*). Normalmente o leito é constituído por areia, cinzas e um material adsorvente para a remoção de SO₂, tal como dolomite ou calcário. Para além da remoção de SO₂, o leito serve de reservatório de calor para que as reações químicas se processem com maior estabilidade, proporcionando elevadas taxas de transferência de calor e de massa. Estas características devem-se às propriedades específicas da areia que, sendo um material de reduzida dimensão e, face ao facto de estar fluidizado, aumenta o contacto entre o material do leito e as partículas de combustível, melhorando, deste modo, as trocas de calor e de massa entre o leito, o gás de fluidização e as partículas de combustível (Tarelho, 2001).

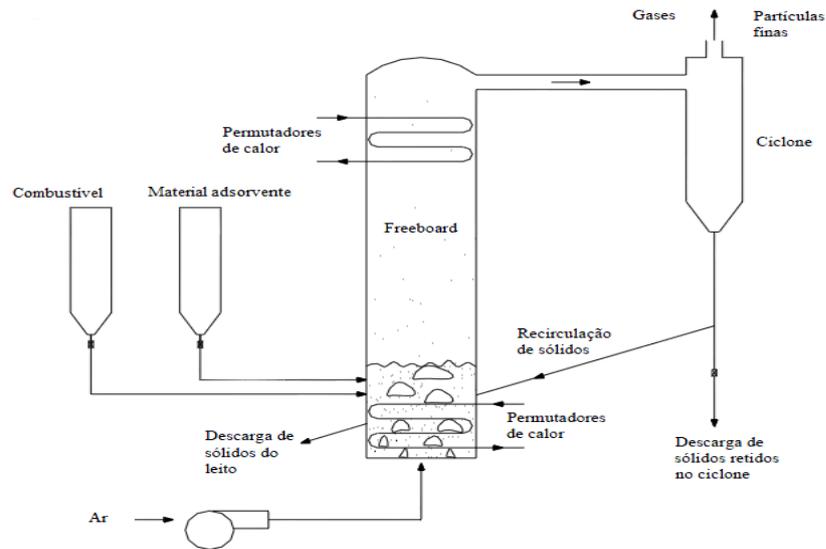


Figura 23 – Representação esquemática de um Sistema de Leito Fluidizado (fonte: adaptado de Tarelho, 2008).

Para pequenas velocidades de ar de fluidização, este percola pelo leito sem perturbar as partículas, permanecendo o leito fixo. À medida que a velocidade do gás aumenta, o leito expande-se suavemente e quando a força ascendente do ar é equivalente ao peso do leito atinge-se a situação mínima de fluidização. Se a velocidade do ar aumentar para valores superiores à mínima fluidização (tipicamente entre 1 a 2 m.s^{-1}), o leito expande-se um pouco mais e começa a ser atravessado por bolhas de gás (Leito Fluidizado Borbulhante ou LFB) (Grupta & Sathiyamoorthy, 1999; Matos, 1988; e Tarelho, 2001). O regime de fluidização conhecido como LFB faz uso de uma velocidade superficial de gás da ordem de algumas vezes o valor mínimo (tipicamente 3 vezes). Em alternativa, quando a velocidade do gás ultrapassa a velocidade terminal das partículas de areia, estas são arrastadas pela corrente gasosa para fora do reator, sendo separadas dos gases de combustão, por um ciclone, e recirculadas para o leito do reator. Este regime de fluidização é conhecido como Leito Fluidizado Circulante (LFC) (Tarelho, 2001).

No leito fluidizado borbulhante, o ar primário é fornecido através do fundo do leito. O material do leito encontra-se no fundo da caldeira e é normalmente composto por areia siliciosa com cerca de 1 mm de diâmetro. O ar secundário é fornecido através de várias entradas situadas em zonas superiores do leito, assegurando um fornecimento de ar faseado, reduzindo assim as emissões de NO_x . As principais vantagens do leito fluidizado borbulhante dizem respeito à flexibilidade relativamente ao tamanho das partículas e teor de humidade da biomassa. Por sua vez, o leito fluidizado circulante é conseguido aumentando a velocidade de fluidização e através da utilização de partículas de areia mais pequenas – cerca de $0,2$ a $0,4$

mm de diâmetro. A elevada turbulência deste tipo de tecnologia permite uma melhor transferência de calor e uma temperatura do leito mais homogênea. Este tipo de caldeiras possui uma grande flexibilidade relativamente à qualidade do combustível, sendo capazes de queimar de forma eficaz combustíveis com elevados teores de cinzas. As principais desvantagens do leito fluidizado circulante encontram-se relacionadas com as maiores dimensões necessárias para a instalação, representando custos mais elevados, face à perda de material do leito, bem como face à necessidade de se recorrer a combustíveis com partículas de menores dimensões (Loo e Koppejan, 2008).

4.2.2 Emissão de poluentes atmosféricos resultantes do processo de combustão

À medida que a combustão prossegue, através das diversas etapas do processo, são libertados poluentes dos biocombustíveis sólidos. Contudo, um bom controlo do processo pode eliminá-los, antes de estes serem emitidos para o ambiente. A emissão de poluentes atmosféricos durante a combustão da biomassa respeita, essencialmente, a: poluentes resultantes de combustão incompleta, cujos índices de emissão encontram-se fortemente dependentes do sistema de queima (equipamento e processo); e poluentes cuja formação e emissão dependem, primordialmente, da quantidade dos respetivos elementos percursores presente no combustível utilizado.

Relativamente ao primeiro grupo, onde se encontram inseridos os poluentes inqueimados, incluem-se ainda o CO, hidrocarbonetos, voláteis condensados, aromáticos, hidrocarbonetos policíclicos, entre outros. A formação destes poluentes resulta da baixa temperatura de combustão, ou seja, da escassa mistura combustível/ar e ainda, do curto tempo de residência na câmara de combustão. De uma maneira generalizada, estas emissões podem ser minimizadas dirigindo a combustão para que esta atinja um grau de queima mais eficaz ou um menor teor de carbono nas cinzas, através de uma mistura adaptada combustível/comburente, temperaturas de combustão elevadas e adequado tempo de residência na região de altas temperaturas. Quanto ao segundo grupo, a emissão de poluentes encontra-se relacionada com a composição da biomassa integrada. De entre as emissões libertadas na combustão da biomassa destacam-se os compostos de azoto (NOx e N₂O), os óxidos de enxofre (sobretudo o SO₂), gases ácidos, como por exemplo HCl, e metais pesados, tais como Pb, Zn, Cd (Werther *et al.*, 2000).

A formação de NOx num processo de combustão encontra-se dependente da presença de elementos voláteis, na maioria NH₃ e HCN, sendo ainda resultado da oxidação do azoto molecular com o oxigénio do ar de combustão. Geralmente o NH₃ divide-se em radicais de NH₂ e NH, podendo ser oxidados para formar NO ou, em alternativa, poderão reagir com os radicais NO e OH para formar N₂. Cumulativamente, o azoto presente no resíduo carbonoso irá reagir formando NO, N₂ e N₂O, sendo de salientar que este último é

excessivamente sensível à temperatura, originando N_2 a temperaturas superiores a $900\text{ }^\circ\text{C}$ (Werther *et al.*, 2000). No caso do enxofre e dos metais pesados, face ao baixo teor existente na biomassa, as emissões existentes são na maioria dos casos insignificantes mas, poder-se-ão tornar importantes caso se utilize biomassa proveniente de madeiras pintadas ou tratadas (Jenkins *et al.*, 1996).

Além destes poluentes, a emissão de partículas num processo de combustão apresenta particular importância face aos efeitos que lhe estão associados. Os efeitos da inalação de material particulado (MP) em suspensão dependem fundamentalmente das propriedades químicas e físicas das partículas. Enquanto a sua dimensão e densidade influenciam determinantemente o grau de profundidade com que as mesmas penetram no sistema respiratório, nomeadamente a sua capacidade em alcançar os pulmões, a sua composição química determina a extensão dos impactes que estas terão nos tecidos destes órgãos. Atualmente, os maiores efeitos toxicológicos (asma, doenças cardiovasculares, entre outros) encontram-se associados às frações deste material com menores diâmetros, nomeadamente a MP com um diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ($PM_{2,5}$). A emissão de partículas encontra-se, em parte, associada à emissão de compostos inqueimados, estando estes relacionados com as questões operacionais anteriormente mencionadas. Para além da emissão destes compostos, a emissão da matéria mineral introduzida no sistema, por via do combustível, representa um contributo importante no total de MP emitido. A quantidade de cinzas, transportada por um efluente atmosférico, depende essencialmente do caudal de alimentação do combustível, do excesso de ar e da distribuição do ar de combustão (Jenkins *et al.*, 1996).

A nível técnico surgem, igualmente, questões relevantes associadas à combustão da biomassa, merecendo especial atenção a corrosão do equipamento e a formação de incrustações. A formação de escórias e incrustações promovem uma redução da transferência de calor nas superfícies do equipamento e originam problemas de corrosão e erosão que diminuem o tempo de vida útil do mesmo. Os elementos inorgânicos presentes nos combustíveis de biomassa apresentam-se como os principais responsáveis pela formação de incrustações nas superfícies do equipamento. Por sua vez, os elementos alcalinos, em particular o potássio (K) e o sódio (Na), presentes na biomassa diminuem a temperatura de fusão das cinzas incrementando os problemas relacionados com a sua deposição e com a formação de depósitos nas tubagens da instalação. Estes depósitos, formados durante a combustão da biomassa, apresentam-se mais densos e mais difíceis de remover que os depósitos formados pela combustão do carvão (Demirbas, 2005). De salientar que quanto maior o teor em cinzas de um determinado biocombustível sólido, menor será a energia disponível desse combustível, promovendo um aumento dos custos de operação, uma vez que se torna necessário implementar um sistema de despoeiramento eficiente para o tratamento do efluente gasoso (poeiras) (Mckendry, 2002; Khan *et al.*, 2009).

No âmbito da proteção, controlo e gestão da qualidade do ar ambiente e das obrigações decorrentes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas e do Protocolo de Quioto, os países

européus comprometeram-se a elaborar anualmente o inventário nacional de emissões antropogénicas por fontes e remoção por sumidouros de poluentes atmosféricos (Resolução do Conselho de Ministros nº. 68/2005). O Guia do Inventário relativo às emissões de poluentes atmosféricos do EMEP/EEA (2009) fornece orientações de carácter metodológico para compiladores e investigadores dos inventários nacionais interessados em calcular as emissões de poluentes atmosféricos, disponibilizando para tal um conjunto de capítulos relativos a fontes setoriais específicas, onde se encontram reunidos diversos fatores de emissão e métodos de cálculo. Os fatores de emissão (FE) são expressão da taxa de emissão de um dado poluente atmosférico dividida pela taxa de produção da atividade que lhe deu origem, sendo resultado da compilação dos FE incluídos em versões anteriores do Guia e da informação disponibilizada no documento BREF das melhores tecnologias disponíveis em grandes instalações de combustão. É ainda de salientar que a combustão da biomassa florestal encontra-se inserida no SNAP 01 (combustão na indústria energética e de transformação) dos setores de atividade (EMEP/EEA, 2009).

As Tabelas 11 e 12 apresentam os fatores de emissão dos diversos poluentes emitidos durante o processo de combustão da biomassa para produção de energia, tendo como unidade de atividade o consumo de combustível.

Tabela 11 – Fatores de emissão utilizando a biomassa florestal como combustível no processo de combustão (fonte: EMEP/EEA, 2009).

Poluente	Valor	Unidade
NOx	211	g.GJ ⁻¹
CO	258	g.GJ ⁻¹
NMVOC	7,3	g.GJ ⁻¹
SOx	11	g.GJ ⁻¹
TSP	51	g.GJ ⁻¹
PM ₁₀	38	g.GJ ⁻¹
PM _{2,5}	33	g.GJ ⁻¹
Pb	21	mg.GJ ⁻¹
Cd	1,8	mg.GJ ⁻¹
Hg	1,5	mg.GJ ⁻¹
As	9,5	mg.GJ ⁻¹
Cr	9,0	mg.GJ ⁻¹
Cu	21	mg.GJ ⁻¹
Ni	14	mg.GJ ⁻¹
Se	1,2	mg.GJ ⁻¹

**Tabela 12 – Fatores de emissão utilizando a biomassa florestal como combustível no processo de combustão
(continuação) (fonte: EMEP/EEA, 2009)**

Poluente	Valor	Unidade
Zn	181	mg.GJ ⁻¹
PCB	60	µg.GJ ⁻¹
PCDD/F	50	ng I-TEQ.GJ ⁻¹
HCB	6,0	µg.GJ ⁻¹
Benzopireno	1,12	mg.GJ ⁻¹
Benzo(b)fluoranteno	0.04	mg.GJ ⁻¹
Benzo(k)fluoranteno	0.02	mg.GJ ⁻¹
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0.37	mg.GJ ⁻¹

Capítulo V – Caso de Estudo

Como referido anteriormente, a presente dissertação pretende contribuir para a avaliação do impacto da cadeia de valorização energética de biomassa na qualidade do ar atmosférico, em Portugal Continental. Como resultado, procedeu-se à caracterização de cada uma das centrais, termoelétricas e de cogeração, atualmente em operação segundo diversos critérios, nomeadamente, a sua localização, a potência nominal instalada, a eficiência térmica, as tecnologias de combustão, o consumo de biomassa, o ano de entrada em funcionamento, entre outros parâmetros (subcapítulo 5.1). Cumulativamente foram estimadas as emissões associadas à atividade de cada uma das centrais em estudo (subcapítulo 5.2), apresentando-se como um dos dados de entrada do sistema de modelos que se inserem no Projeto BIOAIR. Posteriormente procedeu-se à avaliação do impacto das CB na qualidade do ar da região Norte através da aplicação do modelo matemático TAPM, procurando-se estimar o impacto deste tipo de indústria à mesoescala (subcapítulo 5.3).

5.1 Caracterização das CB em operação (em Portugal Continental)

Ao contrário do que seria espectável face às medidas tomadas pelo Governo Português no âmbito da promoção da utilização de energia proveniente da biomassa florestal (subcapítulo 3.4.2), constatou-se que a potência instalada desta FER evoluiu exigentemente nos últimos anos, encontrando-se as metas traçadas para 2010 ainda longe de serem alcançadas. A evolução observada resulta maioritariamente do insucesso do concurso para a construção de novas centrais, verificando-se que das quinze propostas apresentadas somente duas se encontram em operação, correspondendo a um acréscimo de apenas 5,3 MVA. Diversos

fatores contribuíram para o atual panorama nacional sendo de se realçar três aspetos fundamentais: (1) o elevado tempo associado à tramitação dos processos de licenciamento; (2) a ausência de uma rede logística de recolha de biomassa complementar ao negócio da madeira; e (3) os recentes e ainda em estruturação mercados de biomassa. Cumulativamente, e não obstante os aumentos da tarifa de venda de energia produzida em centrais de biomassa florestal, verificados no período de 2005 a 2007, a tarifa nacional é ainda uma das mais baixas da UE, estimulando a exportação da BF (Figo, 2006).

A Figura 24 apresenta a distribuição espacial das dezoito centrais a biomassa florestal atualmente em operação em Portugal Continental, encontrando-se estas divididas em dez centrais termoelétricas e oito centrais de cogeração, com um total de potência nominal instalada de 273 MVA.

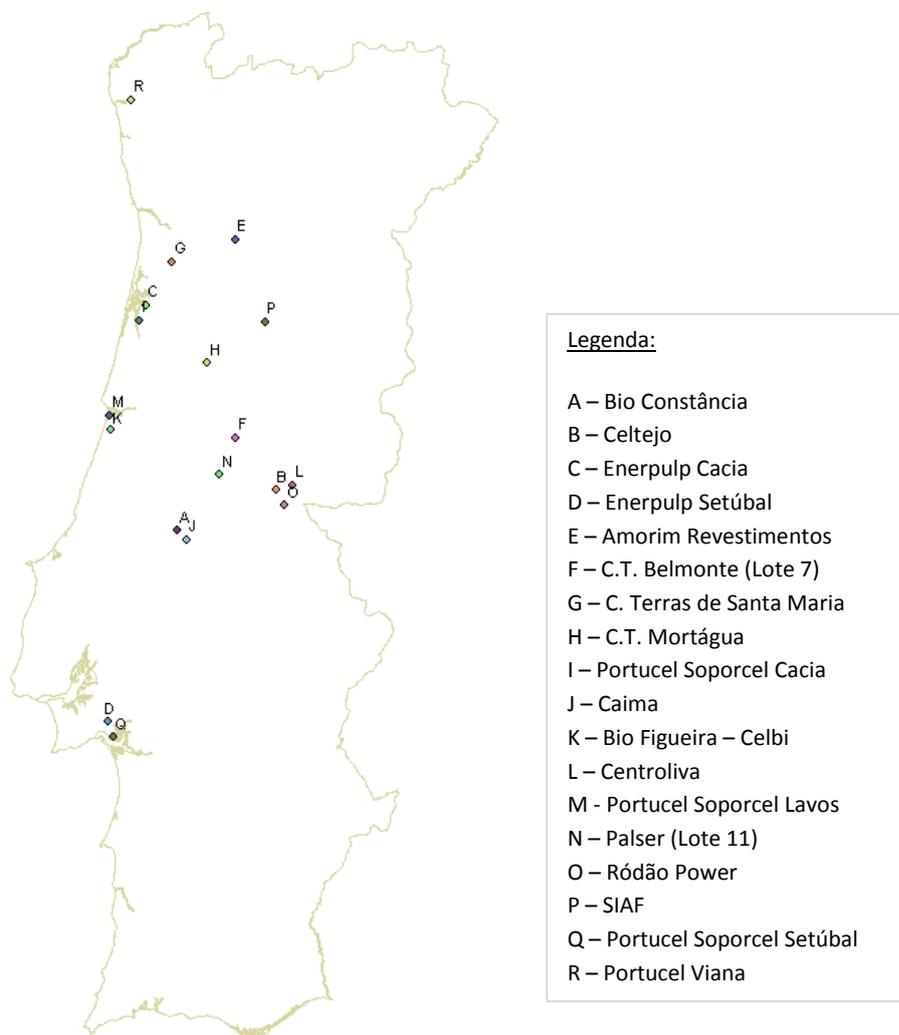


Figura 24 – Distribuição espacial das Centrais a Biomassa atualmente em operação
(fonte: Monteiro *et al.*, 2011)

As Tabelas 16 e 17 (subcapítulo 5.2.1) apresentam a compilação das principais características das centrais a biomassa em operação em Portugal Continental. É de salientar que os dados obtidos resultaram da consulta de diversas fontes de informação, nomeadamente a base de dados de fontes renováveis de energia, resumos não técnicos de Estudos de Impacte Ambiental e o relatório do Roteiro Nacional das Energias Renováveis; bem como pela aplicação de equações matemáticas. É ainda de salientar que se procurou confirmar os dados recolhidos através do contacto com as centrais em questão, no entanto, face à incerteza de alguns dados e à impossibilidade da sua confirmação foi necessário admitir alguns pressupostos.

No que diz respeito aos valores assumidos, o tempo de funcionamento das centrais foi determinado considerando um período de operação de 24 horas durante 350 dias, sendo atribuído um período de 15 dias para operações de manutenção, o que resultou num tempo de funcionamento (TF) de 8400 horas. Relativamente à eficiência (η_{th}) global das centrais, nos casos em que não foi possível a confirmação do seu valor, assumiu-se um valor de 25% para as centrais termoelétricas e de 30% para as centrais de cogeração. É de notar que estas últimas apresentam eficiências superiores uma vez que não se verifica a dissipação de energia primária sob a forma de calor, ao contrário do que acontece nas centrais termoelétricas. É ainda de salientar que a potência elétrica nominal (Pot_e), em MWe, nos casos em que não era conhecida, foi determinada multiplicando a potência em MVA pelo fator de potência, que se considerou ser de 0,98. Por sua vez, o Poder Calorífico Inferior (PCI) da BF em base seca, e uma vez que não foi possível caracterizar detalhadamente a constituição da matéria-prima utilizada em cada central, foi obtido através da análise dos dados disponíveis na literatura, tendo-se optado por um valor de 16500 kJ.kg^{-1} (Lourenço, 2011).

Perante a compilação dos diversos dados procedeu-se à determinação do consumo de biomassa ($t_{seca} \cdot \text{ano}^{-1}$) para cada uma das centrais, recorrendo-se para tal à aplicação da Equação 2. É de notar que a potência elétrica presente na equação se encontra expressa em MVA.

$$\dot{m}_B = \frac{Pot_e \times TF \times 3600}{PCI \times \eta_{th}}$$

(Equação 2)

5.2 Avaliação das Emissões Atmosféricas

5.2.1 Estimativa do caudal volumétrico dos produtos de combustão da biomassa

No presente subcapítulo pretende-se determinar, face às características de cada uma das centrais em estudo, o caudal volumétrico dos produtos de combustão da biomassa. Deste modo, foi necessário seguir uma metodologia de cálculo que consistiu na execução de três etapas fundamentais: (1) determinação do ar de combustão; (2) cálculo do caudal mássico dos produtos de combustão; (3) e cálculo do caudal volumétrico. É ainda de salientar que todos os cálculos realizados foram efetuados com base no pressuposto da oxidação completa dos elementos químicos que compõem a biomassa florestal.

De uma forma geral, considera-se que um combustível sólido em base seca é constituído por carbono, hidrogénio, enxofre, oxigénio, azoto e cinzas. Assim, a massa unitária de um combustível sólido (B) pode ser expressa segundo os seus elementos constituintes e a sua proporção, nomeadamente pela sua percentagem mássica, segundo o apresentado na Equação 3.

$$1 \text{ kg}_B = C \frac{\text{kg}_C}{\text{kg}_B} + H \frac{\text{kg}_H}{\text{kg}_B} + S \frac{\text{kg}_S}{\text{kg}_B} + O \frac{\text{kg}_O}{\text{kg}_B} + N \frac{\text{kg}_N}{\text{kg}_B} + \text{cinza} \frac{\text{kg}_{\text{cinza}}}{\text{kg}_B}$$

(Equação 3)

Segundo Berggren (2000), a composição elementar da biomassa florestal é composta por 40-50% de carbono, 40-45% de oxigénio, 4,5-6% de hidrogénio e 0,3-3,5% de azoto. A Tabela 13 apresenta a composição elementar típica para as duas espécies de biomassa mais utilizadas como combustível em Portugal Continental (CBE, 2008).

Tabela 13 – Composição elementar, [%, m/m], em base seca sem cinzas (fonte: CBE, 2008)

Espécie	Parte	C %	N%	H%	S%	O%
Eucalipto	Ramos	45,20	0,250	5,60	0,006	48,94
	Folhas	49,30	1,130	6,40	0,024	43,15
Pinheiro	Ramos	47,30	0,380	6,30	0,122	45,90
	Bicadas	48,40	1,150	6,50	0,172	43,78

No entanto, para o presente cálculo, e uma vez que não é conhecida a constituição pormenorizada do combustível utilizado nas diversas centrais, admitiu-se que esta é constituída por casca e ramos de eucalipto. Assim, a composição elementar (% m/m), em base seca, para o tipo de biomassa selecionado apresenta-se na Tabela 14, tendo sido determinada num estudo executado por Lourenço (2011).

Tabela 14 – Composição elementar, [%, m/m], em base seca sem cinzas, considerada para o presente cálculo (fonte: Lourenço, 2011)

Composição elementar	Tipo de Biomassa
	Casca e Ramos de Eucalipto
Carbono (%)	47,88
Hidrogénio (%)	6,34
Azoto (%)	0,45
Cinzas (%)	6,11
Oxigénio (%)	39,22
Enxofre (ppm)	<100

▪ **Ar de Combustão**

Estando o processo de combustão e os seus produtos diretamente dependentes da presença de ar, tornou-se imprescindível determinar as necessidades atuais de ar de combustão (W_{AR}). Foi então fundamental conhecer, numa primeira fase, as necessidades estequiométricas de oxigénio que permitem efetuar a oxidação completa da biomassa (W_S) (Equação 4).

$$W_s = 32 \times \left[\sum \frac{Y_{sj} \times w_{jR}}{M_j} - \frac{w_{OR}}{32} \right]$$

(Equação 4)

w_{jR} – fração mássica do elemento j em R [$kg_j \cdot kg_R^{-1}$]

M_j – massa molar do elemento j [$kg_j \cdot kmol_j^{-1}$]

$Y_{s,j}$ – consumo estequiométrico de O_2 [$kmol_{O_2} \cdot kmol_j^{-1}$], dado pela seguinte expressão:

$$Y_{s,j} = \frac{kmol \text{ estequiométrico de } O_2}{kmol \text{ elemento } j} = 1 \text{ (para o C)} = 0,25 \text{ (para o H)} = 1 \text{ (para o S)}$$

Assim,

$$W_s = 1,392 \frac{kg_{O_2} \text{ estequiométrico}}{kg_{biomassa}}$$

Por razões que se prendem com a velocidade de transferência de massa ao nível das partículas sólidas, é muito difícil evitar a ocorrência de inqueimados gasosos e sólidos. Uma forma de minorar este problema prende-se com a redução das dimensões do material e expô-lo à corrente gasosa (aumentando a agitação ou turbulência) ou aumentando a relação comburentes/combustível para além das quantidades estequiométricas. Deste modo, admitindo um excesso de ar, z , de 50%, as necessidades atuais de oxigénio (W_a) são dadas pela Equação 5.

$$W_a = W_s \times \frac{100 + z}{100} \quad (\text{Equação 5})$$

$$W_a = 2,088 \text{ kg } O_2 \text{ atual} / \text{kg}_{\text{biomassa}}$$

No caso de ar atmosférico, e nas condições de excesso de oxigénio definidas, a razão atual de ar de combustão é dada pela Equação 6.

$$W_{AR} = W_a \times \left(\frac{M_A}{Y_{O_2,A} \times M_{O_2}} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

$$M_A = \text{massa molar do ar seco} = 28,84 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

$$M_{O_2} = \text{massa molar do oxigénio} = 32 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

$$y_{O_2,A} = \text{fração molar do oxigénio em base seca} = 0,21 \text{ kmol}_{O_2} \cdot \text{kmol}_{Ar \text{ seco}}^{-1}$$

Assim,

$$W_{AR} = 8,961 \text{ kg ar} / \text{kg}_{\text{biomassa}}$$

Como resultado, o caudal mássico de ar para a combustão da biomassa, $\dot{m}_{ar\ B}$, para cada uma das centrais em estudo, apresenta-se nas Tabelas 16 e 17, tendo o mesmo sido determinado por aplicação da Equação 7.

$$\dot{m}_{ar\ B} = W_{AR} \times \dot{m}_B \quad [kg_{ar} \cdot s^{-1}]$$

(Equação 7)

$$\dot{m}_B = \text{caudal de biomassa} [kg_{biomassa} \cdot s^{-1}]$$

▪ **Caudal mássico dos produtos de combustão**

Os produtos gasosos resultantes da combustão são constituídos por um conjunto diversificado de substâncias, considerando-se para efeito do presente cálculo apenas os seus componentes maioritários. Assim, o caudal mássico de cada produto de combustão resultou da aplicação da Equação 8, sendo de salientar que as equações associadas ao balanço mássico elementar, em kmol do elemento i por kg de biomassa seca (n_i), se encontram explicitadas no Anexo I.

$$\dot{m}_{gás\ i\ B} = n_i \times M_i \times \dot{m}_B \quad [kg_{gás\ i} \cdot s^{-1}]$$

(Equação 8)

$$\dot{m}_{gás\ i\ B} = \text{Caudal mássico do composto } i$$

$$n_i = \text{kmol do produto } i \text{ por unidade de biomassa seca} [kmol_i \cdot kg_B]$$

$$M_i = \text{massa molar do produto } i [kg \cdot kmol^{-1}]$$

Assim, o caudal total de gases de combustão da biomassa foi determinado por aplicação da Equação 9, apresentando-se os resultados obtidos nas Tabelas 16 e 17.

$$\dot{m}_{gases} = \sum \dot{m}_{gás\ i\ B} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

(Equação 9)

▪ **Caudal volumétrico dos produtos de combustão**

Uma vez calculado o caudal mássico dos produtos de combustão, a determinação do caudal volumétrico passou primeiramente pela determinação das densidades de cada produto (ρ_i) (Equação 10). Este valor foi obtido por aplicação da equação dos gases perfeitos, onde P_i se apresenta como a pressão do gás de combustão i ; R , como a contante dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); e T_i , como a temperatura do produto de combustão i . É de salientar que para o presente cálculo se admitiu uma pressão de uma atmosfera no interior do reator, considerando-se ainda uma temperatura de 1123 K (850 °C), para os reatores de leito fluidizado, e de 1398 K (1125°C) para os reatores em grelha. A Tabela 15 apresenta as densidades de cada um dos produtos de combustão, para cada uma das tecnologias.

$$\rho_{gás\ i} = \frac{P_i \times M_i}{R \times T_i} \quad [\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}]$$

(Equação 10)

Tabela 15 – Densidades dos produtos de combustão ($\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$), para cada uma das tecnologias em estudo.

Tecnologia de combustão	Densidades ($\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)			
	ρ_{CO_2}	ρ_{H_2O}	ρ_{N_2}	ρ_{O_2}
Grelha	0,3835	0,1569	0,2440	0,2789
Leito fluidizado	0,4774	0,1953	0,3038	0,3472

Deste modo, o caudal volumétrico de cada produto de combustão ($V_{gás\ i}$) e o caudal total de gases (V_{gases}) foram determinados por aplicação da Equação 11 e 12, respetivamente, apresentando-se os resultados obtidos nas Tabelas 16 e 17.

$$V_{gás\ i\ B} = \frac{\dot{m}_{gás\ i\ B}}{\rho_{gás\ i}} \quad [\text{Nm}^3_{gás\ i}\cdot\text{s}^{-1}]$$

(Equação 11)

$$V_{gases} = \sum V_{gás\ i\ B} \quad [\text{Nm}^3\cdot\text{s}^{-1}]$$

(Equação 12)

Tabela 16 – Caracterização das Centrais Termoelétricas a biomassa florestal em operação em Portugal Continental.

Central	Localização (Distritos de Influência)	Potência Nominal		Tecnologia de Combustão	Consumo Biomassa (kt seca.ano ⁻¹)	Caudal mássico de ar (kg _{AR} .s ⁻¹)	Caudal mássico dos produtos de combustão (kg.s ⁻¹)	Caudal volumétrico dos produtos de combustão (Nm ³ .s ⁻¹)	Ano de operação ⁵
		POTe							
		MVA	MWe						
Centrais Termoelétricas									
Centroliva	Castelo Branco	5,0	4,9	Grelha	36,7	10,875	12,617	51,057	1998
Mortágua	Viseu	10,0	9,8	Grelha	73,3	21,721	25,200	101,975	1999
Ródão Power	Castelo Branco	14,0	13,7	Leito Fluidizado	103	30,522	35,411	115,096	2006
Bio Constância	Santarém	13,0	12,7	Leito Fluidizado	95,3	28,240	32,764	106,492	2009
Terras de Santa Maria	Aveiro	10,0	9,8	Grelha	73,3	21,721	25,200	101,975	2008
Portucel Soporcel Cacia	Aveiro	12,5	12,3	Leito Fluidizado	91,6	27,144	31,492	102,357	2009
Portucel Soporcel Setúbal	Setúbal	12,5	12,3	Leito Fluidizado	91,6	27,144	31,492	102,357	2009
Belmonte (Lote 7)	Castelo Branco	2,0	2,0	Grelha	14,7	4,356	5,054	20,451	2010
Palser (Lote 11)	Castelo Branco	3,0	2,9	Grelha	22,0	6,519	7,564	30,606	2010
Bio Figueira – Celbi	Figueira da Foz	37,0	36,3	Leito Fluidizado	271	80,305	93,169	302,825	2009

⁵ Fonte: Base de dados de fontes renováveis de energia (s.d).

Tabela 17 – Caracterização das Centrais de Cogeração a biomassa florestal em operação em Portugal Continental.

Central	Localização (Distritos de Influência)	Potência Nominal		Tecnologia de Combustão	Consumo Biomassa (kt seca.ano ⁻¹)	Caudal mássico de ar (kg _{AR} .s ⁻¹)	Caudal mássico dos produtos de combustão (kg.s ⁻¹)	Caudal volumétrico dos produtos de combustão (Nm ³ .s ⁻¹)	Ano de operação ⁶
		POTe							
		MVA	MWe						
Centrais de Cogeração									
Caima	Santarém	14,0	13,7	Leito Fluidizado	85,5	25,336	29,395	95,541	1999
Enerpulp Cacia	Aveiro	28,0	27,4	Leito Fluidizado	171	50,672	58,789	191,081	2005
Enerpulp Setúbal	Setúbal	40,0	39,2	Leito Fluidizado	244	72,304	83,886	272,654	2004
Portucel Soporcel Lavos	Figueira da Foz	25,0	24,5	Leito Fluidizado	153	45,338	52,601	170,967	2004
Portucel Viana	Viana do Castelo	27,0	26,5	Leito Fluidizado	165	48,894	56,726	184,377	2002
SIAF	Viseu	5,0	4,9	Grelha	30,5	9,038	10,486	42,431	1996
Amorim Revestimentos	Aveiro	1,0	1,0	Pulverizador	6,11	1,811	2,101	8,500	2004
Celtejo	Castelo Branco	14,0	13,7	Leito Fluidizado	85,5	25,336	29,395	95,541	1992

⁶ Fonte: Base de dados de fontes renováveis de energia (s.d).

5.2.2 Emissões de Poluentes Atmosféricos

De acordo com o disposto na Decisão da Comissão 2007/589/CE, de 18 de julho, relativa às orientações gerais aplicáveis à monitorização e comunicação de informações relativas às emissões de GEE resultantes de atividades industriais, existem duas metodologias que permitem determinar as emissões de poluentes atmosféricos. Estas compreendem:

1. Uma metodologia baseada no cálculo, que determina emissões de fluxos-fonte com base em dados das atividades obtidos por meio de sistemas de medição e de parâmetros adicionais resultantes de análises laboratoriais ou de fatores normalizados;
2. Uma metodologia baseada em medições, que determina as emissões de uma fonte de emissão por meio de medição contínua da concentração dos gases com efeito de estufa, relevantes no fluxo de gases de combustão.

Face ao nível de detalhe da informação recolhida, a metodologia adotada decaiu sobre o cálculo das emissões de forma individualizada, através da aplicação de um modelo genérico de estimativa de emissão de um dado poluente (E_i). O modelo resulta do produto de duas variáveis: o indicador da atividade (A_i) e o fator de emissão por unidade de atividade (FE_i) (EMEP/EEA, 2009) (Equação 13).

$$E_i = A_i \times FE_i \times 10^{-6}$$

(Equação 13)

Ainda neste contexto, é de salientar que os dados da atividade constituem informações sobre o fluxo de materiais, tendo-se recorrido ao consumo de combustível, expresso em unidade de energia ($\text{GJ}\cdot\text{ano}^{-1}$), como indicador da atividade. Por sua vez, os fatores de emissão aplicados resultaram da compilação efetuada no Capítulo IV (Tabelas 11 e 12). Assim, a emissão dos poluentes atmosféricos encontra-se expressa em unidade de massa por ano ($\text{t}\cdot\text{ano}^{-1}$). As Tabelas 18 e 19 apresentam as emissões dos diversos poluentes que resultam da combustão da biomassa florestal, para cada uma das centrais em estudo.

Tabela 18 – Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos (t.ano⁻¹) resultantes do processo de combustão da biomassa florestal nas Centrais Termoelétricas em estudo.

Poluentes Atmosféricos	Centrais Termoelétricas									
	Centroliva	Mortágua	Ródão Power	Bio Constância	Terras de Santa Maria	Portucel Soporcel Cacia	Portucel Soporcel Setúbal	Belmonte (Lote 7)	Palser (Lote 11)	Bio Figueira – Celbi
NOx	127,61	255,19	358,59	331,79	255,19	318,91	318,91	51,18	76,57	943,49
CO	156,03	312,04	438,47	405,70	312,04	389,94	389,94	62,58	93,62	1153,65
NMVOC	4,42	8,83	12,41	11,48	8,83	11,03	11,03	1,77	2,65	32,64
SOx	6,65	13,30	18,69	17,30	13,30	16,63	16,63	2,67	3,99	49,19
TSP	30,84	61,68	86,67	80,20	61,68	77,08	77,08	12,37	18,51	228,05
PM ₁₀	22,98	45,96	64,58	59,75	45,96	57,43	57,43	9,22	13,79	169,92
PM _{2,5}	19,96	39,91	56,08	51,89	39,91	49,88	49,88	8,00	11,98	147,56
Pb	0,013	0,025	0,036	0,033	0,025	0,032	0,032	0,005	0,008	0,094
Cd	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,0027	0,0004	6,50E-04	0,008
Hg	0,001	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,0023	0,0004	5,00E-04	0,007
As	0,006	0,011	0,016	0,015	0,011	0,014	0,014	0,002	0,004	0,042
Cr	0,005	0,011	0,015	0,014	0,011	0,014	0,014	0,0020	0,003	0,040
Cu	0,013	0,025	0,036	0,033	0,025	0,032	0,032	0,005	0,008	0,094
Ni	0,008	0,017	0,024	0,022	0,017	0,021	0,021	0,003	0,005	0,063
Se	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	2,91E-04	4,4E-04	0,005
Zn	0,109	0,219	0,308	0,285	0,219	0,270	0,270	0,040	0,066	0,809
PCB	3,63E-05	7,26E-05	1,02E-04	9,43E-05	7,26E-05	9,07E-05	9,07E-05	1,46E-05	2,18E-05	2,68E-04
PCDD/F	3,03E-08	6,05E-08	8,50E-08	7,86E-08	6,05E-08	7,56E-08	7,56E-08	1,21E-08	1,82E-08	2,24E-07
HCB	3,63E-06	7,26E-06	1,02E-05	9,43E-06	7,26E-06	9,07E-06	9,07E-06	1,46E-06	2,18E-06	2,68E-05
Benzopireno	6,80E-04	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,000272	4,06E-04	0,005
Benzo(b)fluoranteno	2,42E-05	4,84E-05	6,80E-05	6,29E-05	4,84E-05	6,05E-05	6,05E-05	9,70E-06	1,45E-05	1,79E-04
Benzo(k)fluoranteno	1,21E-05	2,42E-05	3,40E-05	3,14E-05	2,42E-05	3,02E-05	3,02E-05	4,85E-06	7,26E-06	8,94E-05
Indeno(1,2,3 cd)pireno	2,24E-04	4,47E-04	6,29E-04	5,82E-04	4,47E-04	5,60E-04	5,60E-04	8,97E-05	1,34E-04	1,65E-03

Tabela 19 – Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos ($t \cdot ano^{-1}$) resultantes do processo de combustão da biomassa florestal nas Centrais de Cogeração em estudo.

Poluentes Atmosféricos	Centrais Cogeração							
	Caima	Enerpulp Cacia	Enerpulp Setúbal	Portucel Soporcel Lavos	Portucel Viana	SIAF	Amorim Revestimentos	Celtejo
NOx	297,67	595,34	849,49	532,67	574,45	106,19	21,27	297,67
CO	363,97	727,95	1038,71	651,32	702,41	129,84	26,01	363,97
NMVOC	10,30	20,60	29,39	18,43	19,87	3,67	0,74	10,30
SOx	15,52	31,04	44,29	27,77	29,95	5,54	1,11	15,52
TSP	71,95	143,90	205,33	128,75	138,85	25,67	5,14	71,95
PM₁₀	53,61	107,22	152,99	95,93	103,46	19,12	3,83	53,61
PM_{2,5}	46,55	93,11	132,86	83,31	89,84	16,61	3,33	46,55
Pb	0,030	0,059	0,085	0,053	0,057	0,011	0,002	0,030
Cd	0,003	0,005	0,007	0,005	0,005	9,06E-04	1,81E-04	0,003
Hg	0,002	0,004	0,006	0,004	0,004	7,55E-04	1,51E-04	0,002
As	0,013	0,027	0,038	0,024	0,026	0,005	9,58E-04	0,013
Cr	0,013	0,025	0,036	0,023	0,025	0,005	9,07E-04	0,013
Cu	0,030	0,059	0,085	0,053	0,057	0,011	0,002	0,030
Ni	0,020	0,040	0,056	0,035	0,038	0,007	0,001	0,020
Se	0,002	0,003	0,005	0,003	0,003	6,04E-04	1,21E-04	0,002
Zn	0,255	0,511	0,73	0,457	0,493	0,091	0,018	0,255
PCB	8,46E-05	1,69E-04	2,42E-04	1,51E-04	1,63E-04	3,02E-05	6,05E-06	8,46E-05
PCDD/F	7,05E-08	1,41E-07	2,01E-07	1,26E-07	1,36E-07	2,52E-08	5,04E-09	7,05E-08
HCB	8,46E-06	1,69E-05	2,42E-05	1,51E-05	1,63E-05	3,02E-06	6,05E-07	8,46E-06
Benzopireno	1,58E-03	0,003	0,005	0,003	0,003	5,63E-04	1,13E-04	1,58E-03
Benzo(b)fluoranteno	5,64E-05	1,13E-04	1,61E-04	1,01E-04	1,09E-04	2,01E-05	4,03E-06	5,64E-05
Benzo(k) fluoranteno	2,82E-05	5,64E-05	8,05E-05	5,05E-05	5,45E-05	1,01E-05	2,02E-06	2,82E-05
Indeno(1,2,3 cd)pireno	5,22E-04	1,04E-03	1,49E-03	9,34E-04	1,01E-03	1,86E-04	3,73E-05	5,22E-04

5.2.3 Emissões de CO₂

Segundo Maket It Be (2010), os sistemas de produção de eletricidade e calor a biomassa apresentam maior sustentabilidade, quando comparados com aqueles que utilizam carvão, fuelóleo ou gás natural como combustível. Como referido anteriormente, a biomassa possibilita a produção energética inserida num ciclo neutro de carbono, traduzindo-se em emissões nulas de CO₂. Neste contexto, revelou-se essencial avaliar o total de emissões evitadas com o recurso a esta FER em 2011, tendo como base a emissão específica de CO₂, por parte das centrais termoelétricas inseridas no *mix* energético nacional. Assim, as emissões evitadas (t CO₂) foram determinadas por aplicação da Equação 14, onde E_e representa o total de energia elétrica produzida pelas centrais (kWh) e EE a emissão específica de CO₂ (g.kWh⁻¹).

$$Emissões\ evitadas = E_e \times EE \times 10^{-6}$$

(Equação 14)

Segundo o Decreto-Lei nº80/2006, de 4 de abril, o *mix* energético nacional define-se como a *distribuição percentual das fontes de energia primária na produção da energia elétrica da rede nacional*. A Figura 25 apresenta o *mix* de produção total da energia elétrica comercializada em 2011, observando-se que a contribuição da produção de eletricidade em regime especial (PRE), onde se incluem as fontes de energia renovável, atingiu os 40,9%, sendo a restante energia produzida em centrais termoelétricas convencionais (carvão e gás natural) (28,5%), em grandes hídricas (15,1%), e em outras centrais (15,4%). Cumulativamente, a Figura 26 permite observar a evolução mensal da energia elétrica consumida por tecnologia, destacando-se o mês de setembro como o mês que apresenta a menor contribuição das energias renováveis (EDP, 2012).

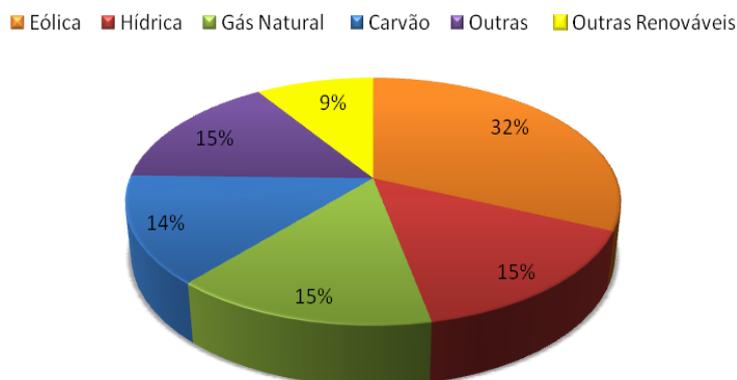


Figura 25 – *Mix* de produção total da energia elétrica comercializada em 2011 (fonte: EDP, 2012).

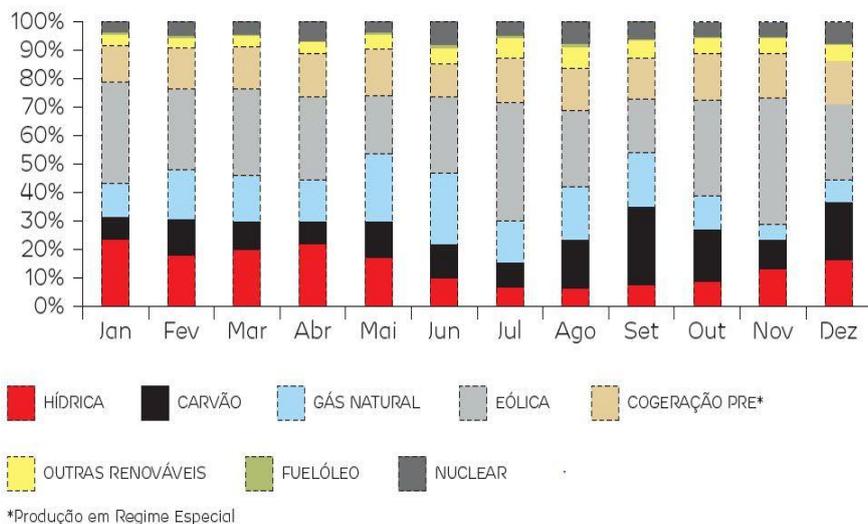


Figura 26 – Evolução mensal da energia elétrica consumida por tecnologia, em 2011 (fonte: EDP, 2012).

À produção de energia elétrica a partir de fontes não renováveis ou convencionais encontram-se associadas emissões específicas de poluentes atmosféricos, destacando-se o CO₂ como o principal poluente libertado pelas centrais termoelétricas. As emissões específicas representam a quantidade de emissões de poluentes por unidade de energia elétrica produzida (para o *mix* de produção total de energia comercializada pela EDP), tendo atingido em 2011 um valor médio de emissão de cerca de 237,13 g CO₂. kWh⁻¹ (EDP, 2012). A Figura 27 apresenta a evolução mensal das emissões específicas associadas à energia elétrica comercializada pela EDP serviço universal para o referido ano, observando-se que o valor máximo é atingido no mês de setembro.

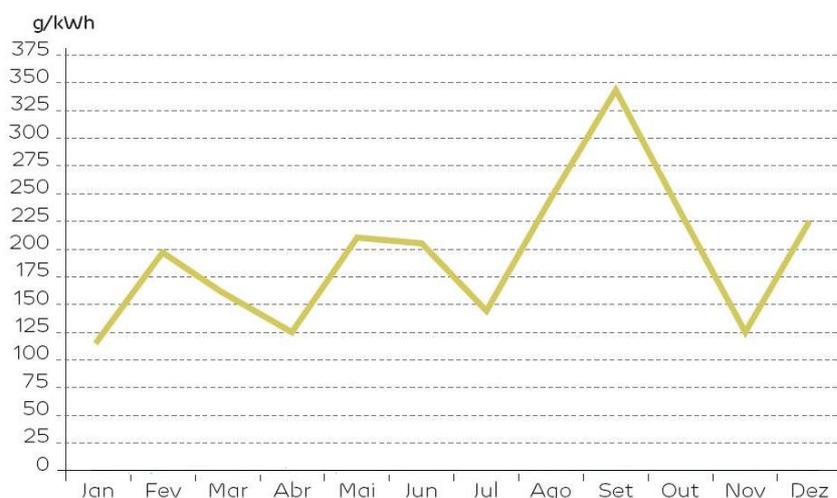


Figura 27 – Evolução mensal das emissões específicas (fonte: EDP, 2012).

Uma vez conhecido o valor da intensidade carbónica, o passo seguinte consistiu na determinação do valor médio anual de produção de energia elétrica. Este foi obtido por aplicação da Equação 15, onde Pot_e representa o total de potência elétrica instalada nas centrais (273 MVA) e t o período de funcionamento das mesmas (h).

$$E_e = Pot_e \times t \times 10^{-3} \quad \text{(Equação 15)}$$

Tendo sido considerado um período de funcionamento de 8400 h para cada uma das centrais em estudo, a energia elétrica produzida foi de 2293,2 GWh. Assim, através da multiplicação entre a intensidade carbónica e o valor da energia elétrica produzida, o total das emissões evitadas corresponde a um total de 543,8 kt CO₂, repartindo-se em 237 e 306,8 kt CO₂ face à operação de centrais termoelétricas e de cogeração, respetivamente. É no entanto de salientar que para o cálculo se assumiu que a energia elétrica produzida contribuiu na totalidade para o setor electroprodutor português.

Face ao contexto nacional, em que segundo o Inventário de Emissões Atmosféricas (2012) o setor da energia em 2010 foi responsável pela emissão de 49654 Gg CO₂ equivalente, as emissões evitadas pelas centrais a biomassa assumem importância, correspondendo a cerca de 1,1 % do valor total emitido. Além disso, quando comparada com as emissões associadas a uma das principais centrais termoelétricas de Portugal Continental, a Central do Pego, que possui dois grupos produtores de energia elétrica, com potências de 314 MWe, responsável por uma produção anual superior a 4,5 milhões de MWh e pela emissão de 1619,5 kt CO₂ em 2010 (Tejo Energia, 2010), as emissões evitadas representam cerca de 33,6 % desse valor.

5.3 Avaliação do impacto das CB na qualidade do ar da Região Norte

Tendo como objetivo avaliar o impacto das centrais a biomassa na qualidade do ar, selecionou-se como área de estudo a região Norte de Portugal Continental. Para a presente avaliação tornou-se imprescindível conhecer a situação das concentrações de poluentes atmosféricos num período de tempo específico. Neste sentido, utilizou-se como suporte de informação o Inventário de Emissões de Poluentes Atmosféricos da Região Norte de 2009 (Borrego *et al.*, 2009), que apresenta uma estimativa das emissões de CO, NO_x, COVNM, PM₁₀, PM_{2,5}, NH₃ e SO₂, resultantes da totalidade dos setores de atividade SNAP, para uma caracterização da região em estudo, e o Guia do Inventário relativo às emissões de poluentes atmosféricos do EMEP/EEA (2005) para a constituição do cenário de referência da presente avaliação (cenário para o ano de 2008). Posteriormente incorporaram-se as emissões resultantes do funcionamento das centrais (cenário

CB) e procedeu-se à previsão das concentrações através do modelo numérico TAPM. O diferencial das simulações permitiu avaliar a real influência das centrais na qualidade do ar. É ainda de salientar que as simulações realizadas dizem respeito aos meses de janeiro e julho, o que permitiu analisar a variação dos impactos das centrais no período de inverno e de verão, bem como retirar ilações do contributo da meteorologia na qualidade do ar. A Figura 28 sintetiza a metodologia seguida nas simulações realizadas com o modelo TAPM.

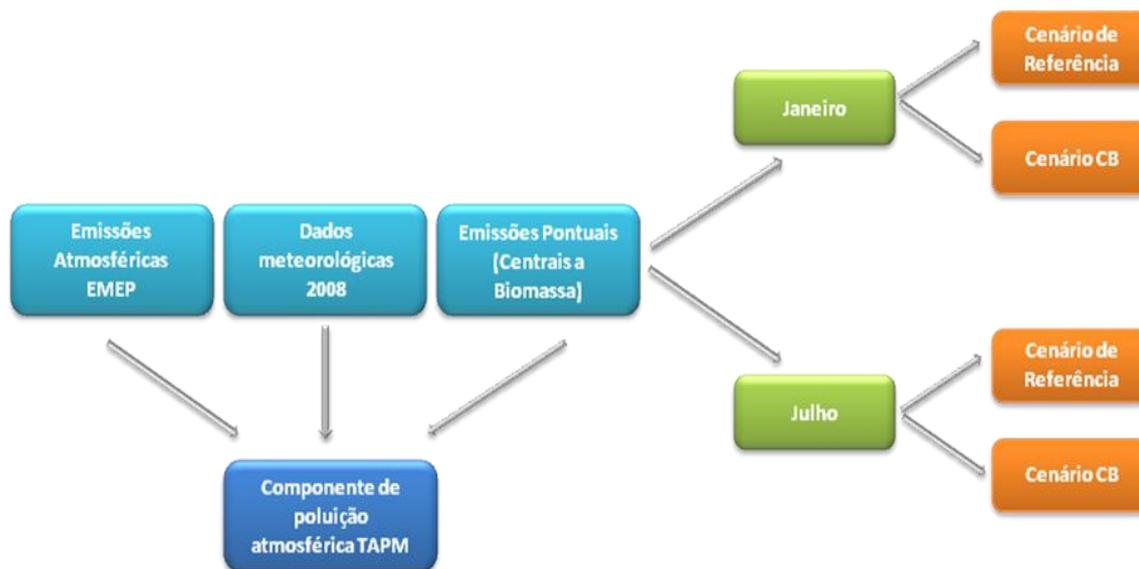


Figura 28 – Representação esquemática da metodologia seguida nas simulações com o modelo TAPM.

5.3.1 Caracterização da Região Norte

A região norte de Portugal Continental é constituída pelos distritos do Porto, Vila Real, Braga, Bragança, Viana do Castelo e parte dos distritos de Aveiro, Viseu e Guarda, num total de 86 concelhos. Estes concelhos integram a zona Norte Litoral e Norte Interior, estando agrupados em quatro aglomerações⁷ - Vale do Sousa, Vale do Ave, Braga e Porto Litoral (Figura 29) (Borrego *et al.*, 2009). Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística de 2009, a região possui uma área de 21 283,9 km² (aproximadamente 24%

⁷ Aglomeração – zona que constitui uma conurbação caracterizada por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que o número de habitantes se situe entre os 250 000 e os 50 000 e tenha uma densidade populacional superior a 500 hab.km⁻² (Decreto-lei n.º 102/2010, de 23 de setembro).

da área total de Portugal Continental) e uma população residente de 3 745 575 habitantes (cerca de 35% da total populacional de Portugal Continental) (Tavares, 2011).

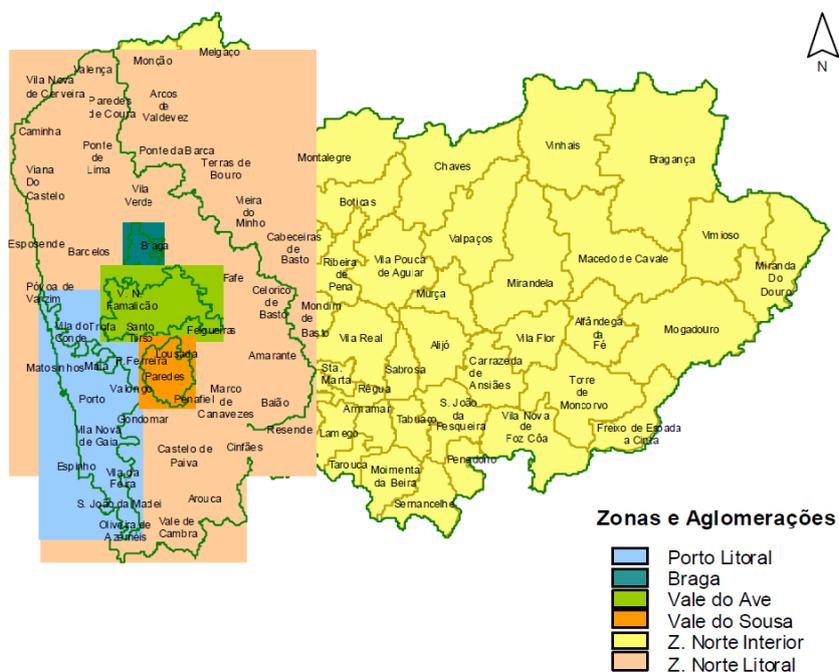


Figura 29 – Mapa dos concelhos da Região Norte, enquadrados nas respectivas zonas e aglomerações (fonte: Borrego et al, 2009).

No que diz respeito às emissões de poluentes atmosféricos na área em estudo, esta apresenta um contributo significativo no total nacional de emissões (cerca de 30%, em média, para cada um dos poluentes), quando comparada com a sua área territorial, destacando-se o CO e o SO₂ como os poluentes com maior peso relativo na região (Borrego et al., 2009). Segundo o exposto no Inventário das Emissões de Poluentes Atmosféricos da Região Norte, os transportes rodoviários, os processos de combustão, os processos de produção e uso de solventes, destacam-se como os principais setores emissores, apontando-se a elevada densidade populacional – 176,0 hab.km⁻², 1,5 vezes superior à de Portugal Continental – e o intenso tecido industrial existente na região como principais fatores responsáveis. A Figura 30 apresenta a distribuição das emissões dos diferentes poluentes analisados (área de abrangência da CDDR-N), pelas várias atividades poluentes, para o domínio CDDR-N e para Portugal Continental (Borrego et al., 2009).

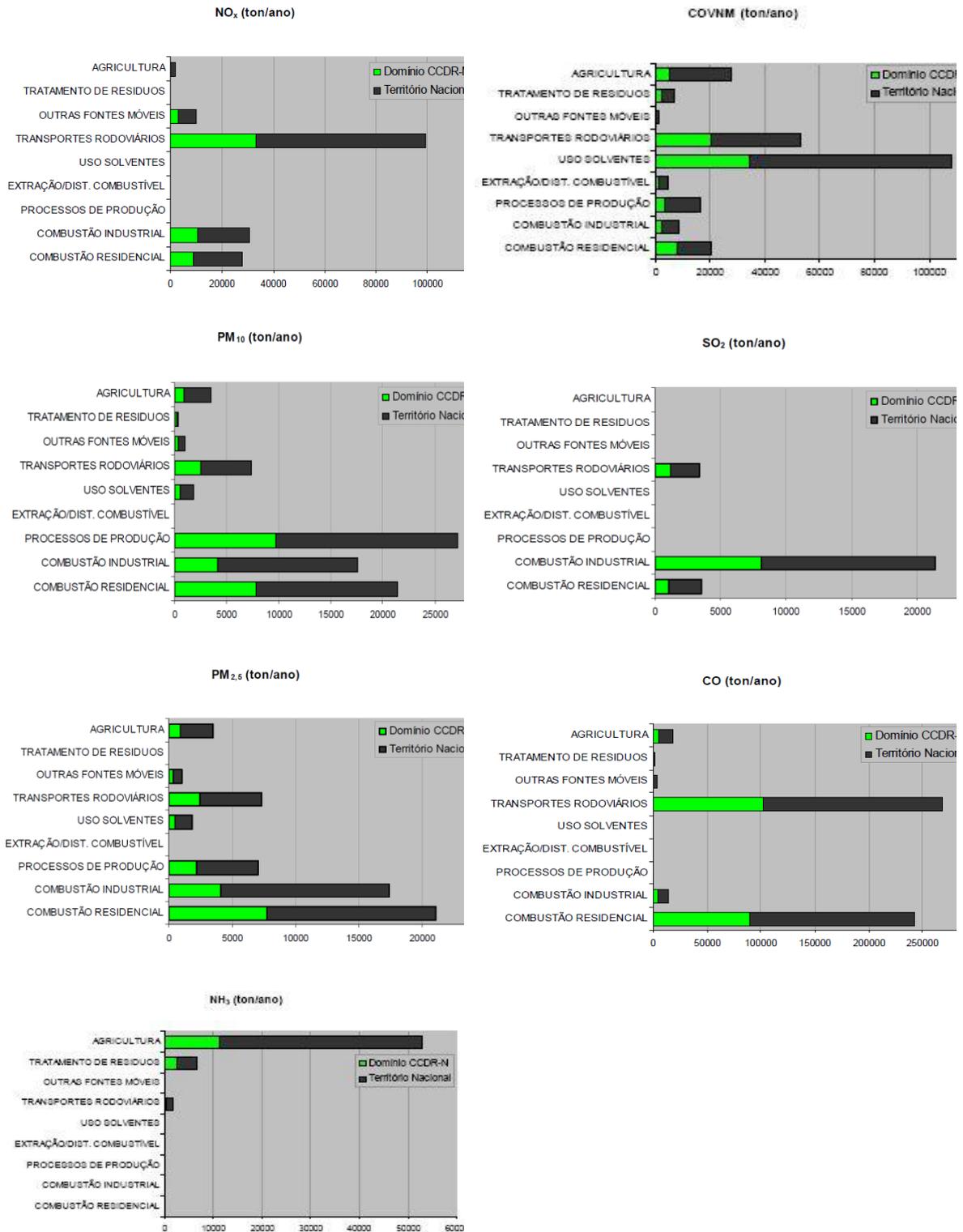


Figura 30 – Representação gráfica da distribuição das emissões dos diferentes poluentes pelos diversos setores de atividade para o domínio CCDR-N e para Portugal Continental (fonte: Borrego *et al.*, 2009)

Pela análise da Figura 30 constata-se que, a nível regional, os transportes rodoviários e a combustão residencial apresentam-se como as principais fontes emissoras de NO_x e CO, correspondendo, respetivamente, a cerca de 37% e 33,4% das emissões nacionais. Estas duas atividades contribuem ainda para as emissões totais de SO₂, sendo, no entanto, o setor da combustão industrial o principal responsável pelas emissões deste poluente. No caso das emissões de COVNM, estas encontram-se especialmente associadas aos transportes rodoviários bem como às atividades que utilizam solventes. Por sua vez, as partículas, nomeadamente as PM₁₀, resultam maioritariamente dos processos de produção, combustão industrial e combustão residencial. Por último, o NH₃ apresenta-se como o poluente com menor representatividade no total das emissões da Região Norte (cerca de 23,2%), destacando-se a atividade agrícola como o principal setor de emissão, verificando-se no entanto alguma contribuição do setor de tratamento e deposição de resíduos.

Relativamente à distribuição espacial das emissões, e segundo Borrego *et al.* (2009), evidenciam-se a cidade do Porto e área urbana envolvente, e ainda as zonas urbanas e industriais de Braga e Guimarães, como as áreas que apresentam as emissões mais elevadas, sendo estas comuns aos diversos poluentes em análise. Estas áreas encontram-se particularmente afetadas por todas as atividades antropogénicas (com exceção da agricultura), destacando-se os setores associados à indústria, serviços e fontes móveis. No caso das emissões provenientes do setor agrícola, as áreas interiores, onde a urbanização é muito inferior e a agricultura é um setor dominante, apresentam-se como as principais afetadas. Cumulativamente, a especificação do poluente potencialmente mais relevante para cada setor de atividade, proporciona uma caracterização detalhada da situação das emissões na região Norte. Assim, verifica-se (Borrego *et al.*, 2009):

- Combustão residencial e comercial – CO;
- Combustão industrial – NO_x;
- Processos de produção – PM₁₀;
- Extração e distribuição de combustíveis – COVNM;
- Uso de solventes – COVNM;
- Transportes rodoviários – CO;
- Outras fontes móveis – NO_x;
- Tratamento e deposição de resíduos – COVNM;
- Agricultura – NH₃.

É ainda de salientar que dos 86 concelhos que se encontram sob a alçada da CCDR-Norte, doze apresentam as emissões mais elevadas em termos regionais, designadamente: Arouca, Barcelos, Braga, Feira, Gondomar, Valongo, Maia, Matosinhos, Oliveira de Azeméis, Porto, Vila Nova de Famalicão e Vila Nova de Gaia (Figura 31). Verifica-se que, em média, a percentagem relativa do Grupo 12+, para cada um

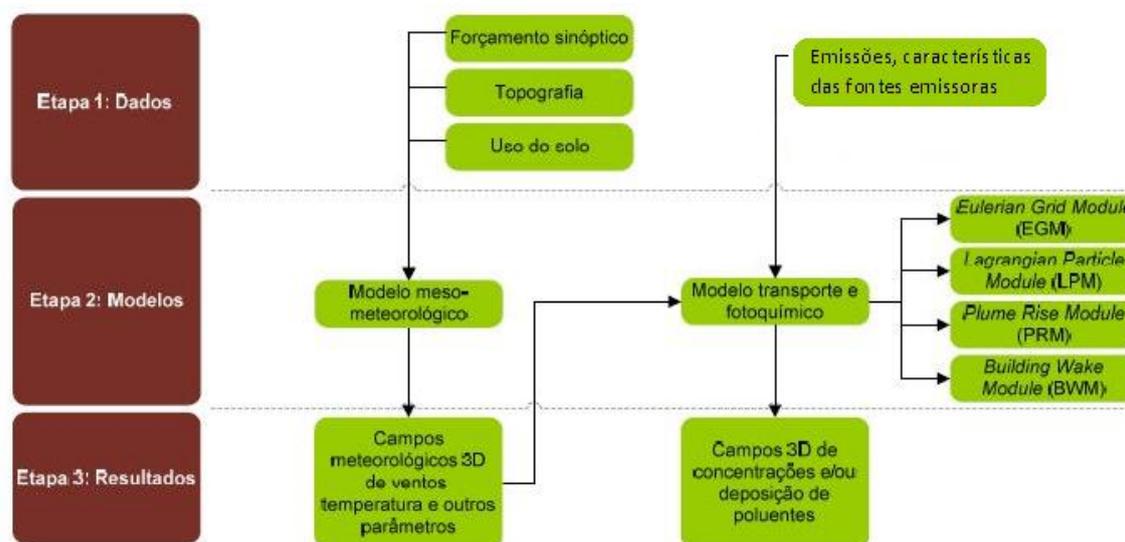


Figura 32 – Estrutura de funcionamento do modelo TAPM (fonte: adaptação de Ribeiro, 2005).

O módulo meteorológico resolve equações primitivas que descrevem as variáveis atmosféricas sobre uma malha tridimensional cuja coordenada vertical segue o traçado do terreno (*terrain-following*). Esta aplicação pertence ao grupo de modelos usados para o prognóstico à mesoscala dos campos meteorológicos e por isso recorre a bases de dados topográficas e de uso do solo para caracterizar detalhadamente o terreno e os parâmetros que afetam a evolução da situação meteorológica. O modelo resolve a equação da conservação da quantidade de movimento para a componente horizontal do vento (u e v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]), a equação da continuidade de um fluido incompressível para a componente vertical (w [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]), e equações escalares para a temperatura potencial e humidade específica. A componente meteorológica apresenta ainda a opção de não-hidrostático na resolução da equação da continuidade, incluindo parametrizações dos processos microfísicos que contribuem para a formação de nuvens/precipitação, usos do solo, cobertura vegetal, turbulência e fluxos de radiação. Nestas equações a turbulência é determinada resolvendo a equação da energia cinética turbulenta e o coeficiente de dissipação de *Eddy*, sendo os seus valores utilizados posteriormente na representação do fluxo vertical pela aproximação do gradiente de difusão (Hurley *et al.*, 2005a).

É ainda de salientar que para que a transferência de informação entre a escala sinóptica e a escala regional seja mais eficaz, o TAPM permite a utilização da técnica de *nesting*. Assim, é assegurado que os campos de ventos obtidos para uma região relativamente pequena incluem os efeitos introduzidos por estruturas orográficas, não contempladas no domínio de estudo mais pequeno, mas que modificam de forma significativa o regime de circulação. Para o forçamento inicial das condições de fronteira o modelo

utiliza por defeito os dados da análise sinóptica realizados pelo *Bureau of Meteorology* australiano sendo também possível usar dados europeus do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

No que diz respeito à componente de transporte e dispersão atmosférica, esta pode ser determinada segundo uma formulação lagrangeana, especialmente útil para a realização de estudos junto a fontes pontuais, com simulação dos efeitos dos edifícios próximos; ou com base num modelo euleriano de dispersão que inclui reações fotoquímicas entre os poluentes reativos. Esta componente encontra-se constituída por quatro sub-módulos: (1) *Eulerian Grid Module* (EGM), responsável pela resolução de equações de prognóstico de concentração e pela correlação da concentração e da temperatura potencial virtual; (2) *Lagrangian Particle Module* (LPM), responsável pelos cálculos relativos à dispersão junto à fonte; (3) *Plume Rise Module* (PRM), responsável pelos cálculos associados à dispersão da pluma; e (4) *Building Wake Module* (BWM), responsável pelos cálculos relativos à dispersão junto a edifícios (Hurley *et al.*, 2005a). É ainda de salientar que a componente fotoquímica do TAPM é baseado num mecanismo semi-empírico denominado *Generic Reaction Set* (GRS), (Azzi *et al.*, 1992) com uma modificação para o peróxido de hidrogénio (Venkatran *et al.*, 1997), sendo ainda incluídas as reações na fase gasosa do SO₂ e das PM (Seinfeld e Pandis, 1998).

No entanto, e não obstante as capacidades do modelo, o seu domínio horizontal encontra-se limitado a uma grelha 1500 km x 1500 km, uma vez que assume uma grelha uniforme desprezando a curvatura da Terra. Cumulativamente, não pode ser usado para circulações atmosféricas de elevada altitude ou para condições meteorológicas extremas; não considera parametrizações de larga escala das nuvens, recorrendo a parametrizações típicas para grelhas de 3 km ou inferiores; e não tem em conta processos de gelo ou neve. Além disso, o mecanismo químico GRS empregue é pouco sensível a pequenas alterações nos inventários de emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV), sendo imprescindível uma rigorosa seleção do mecanismo químico a utilizar face à região em estudo (Hurley *et al.*, 2005a).

Neste ponto é ainda de salientar que a validação de um sistema de previsão constitui uma etapa fundamental no processo de controlo e garantia de qualidade de modelação (QA/QC), permitindo retirar ilações sobre a precisão do modelo, nomeadamente, estimar as incertezas e potenciar a sua redução (Borrego *et al.*, 2008). Verificou-se que a validação do modelo TAPM foi efetuada em trabalhos anteriores, tanto para a componente meteorológica como para a componente de transporte e dispersão atmosférica, pelo que este processo se revelou dispensável no presente estudo. A título de exemplo considerou-se o trabalho realizado por Tavares (2011), que procedeu à validação do TAPM para a região em análise, comparando os dados estimados com os dados das estações meteorológicas de fundo, disponíveis na plataforma QualAr.

As estações de fundo caracterizam-se por não se encontrarem sob influência direta de fontes emissoras, pelas baixas concentrações de poluentes e pela ausência de oscilações diárias significativas,

representando a poluição a que qualquer cidadão se encontra sujeito, mesmo estando distante de potenciais fontes emissoras (Figueiredo, 2011). A seleção das estações de monitorização seguiu as diretrizes estabelecidas no Anexo II (objetivos de qualidade dos dados) do Decreto-Lei nº 102/2010 de 23 de setembro relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa, propondo uma eficiência mínima de 90% na recolha de dados para os poluentes SO₂, NO₂, NOx, CO, C₆H₆, PM₁₀ e PM_{2,5}. No entanto, a diretiva não considera a perda de dados decorrentes de ações de manutenção e calibração regular dos analisadores de qualidade do ar, pelo que se considerou uma eficiência mínima de recolha de dados de apenas 85% (Lameiras, 2009). As estações de monitorização que respeitam a condição citada apresentam-se esquematizadas na Figura 33.

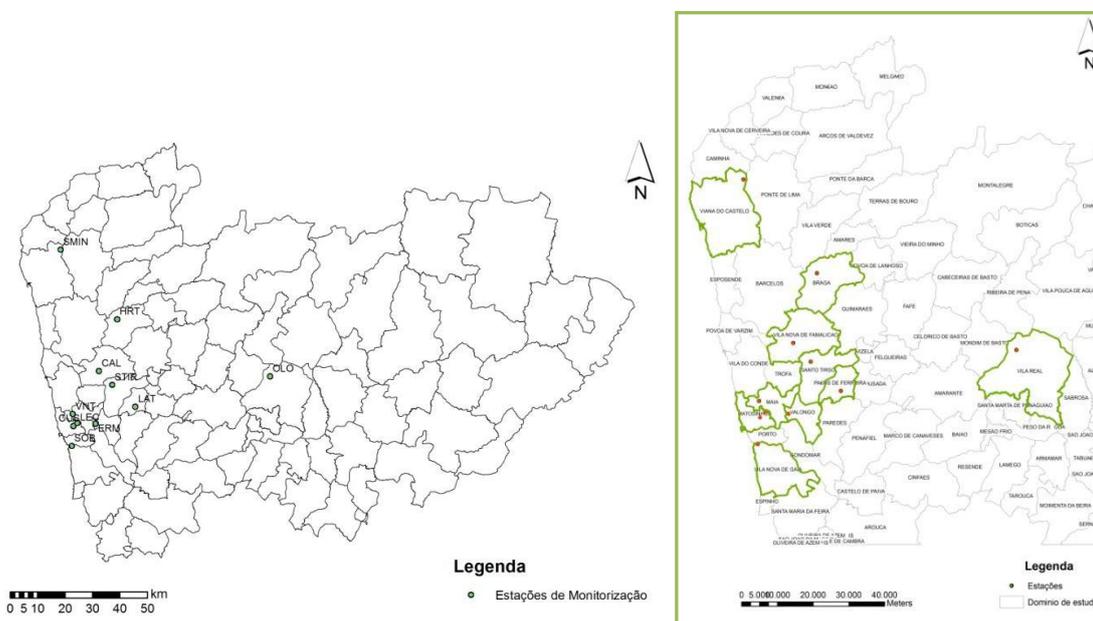


Figura 33 – Localização geográfica das estações de monitorização empregues na avaliação de desempenho do modelo TAPM (fonte: adaptação de Tavares, 2011).

A validação realizada por Tavares (2011) consistiu na análise qualitativa e quantitativa dos dados, isto é, na determinação das séries temporais (permitem comparar visualmente as concentrações simuladas e observadas ao longo do tempo) e na aplicação de parâmetros estatísticos específicos, nomeadamente r, EQM, BIAS e IOA. O coeficiente de correlação (r) traduz a relação linear entre as concentrações observadas e as previstas, permitindo avaliar se as duas variáveis em estudo variam da mesma forma ao longo do tempo, isto é, se estão correlacionadas entre si. Este parâmetro pode assumir qualquer valor no intervalo [-1,1], estando próximo dos extremos quando a relação entre as duas variáveis é forte e próxima da linear. Os parâmetros BIAS e EQM são indicativos do desvio existente entre as concentrações simuladas e observadas, em termos sistemáticos (BIAS) e em termos absolutos (EQM), sendo zero o valor ideal para ambos. Com o

BIAS é possível saber qual a tendência dos erros cometidos pelo modelo (BIAS negativo demonstra que o modelo tem tendência para sobrestimar as concentrações e BIAS positivo demonstra a tendência para subestimar as concentrações), enquanto o EQM permite avaliar a magnitude desses mesmos erros (Monteiro, 2007; Ribeiro, 2008). Por sua vez, o IOA avalia as variações entre as concentrações previstas e observadas, sendo que perante um valor de 1,0 se considerada um ajuste perfeito do modelo, e um bom comportamento do mesmo se o valor for superior a 0,5, (Hurley *et al.*, 2005b).

Segundo a análise realizada verificou-se que os valores do coeficiente de correlação se encontram aquém do que seria ideal, facto que pode ser justificado pela dimensão dos dados analisados, somente informação referente a dois meses. Esta situação poderia ser resolvida utilizando técnicas de correção dos erros sistemáticos que, segundo Borrego *et al.* (2011) permitem obter melhorias significativas nos coeficientes de correlação e, assim, melhorar as previsões da qualidade do ar feitas pelo TAPM. É de salientar que para as PM₁₀ e NO₂ os valores do parâmetro BIAS foram positivos, indicador da sobrestimação das concentrações por parte do modelo, ao contrário do que se verificou para o SO₂ e O₃, onde o modelo apresentou a tendência de subestimar as concentrações do poluente na atmosfera. Relativamente ao índice de concordância, os valores obtidos foram satisfatórios para a maioria das estações, apresentando-se o SO₂ e PM₁₀ como os poluentes que apresentam estações com menores índices de concordância. Por outro lado, o ozono representa o poluente com um maior número de estações com IOA superior a 0,5. É de referir que sendo o O₃ um poluente secundário, para o qual se conhece a curva característica da variação diária das suas concentrações, não sendo estas um reflexo direto das emissões estimadas, justifica o melhor desempenho do TAPM face aos restantes poluentes (Sousa, 2007). Cumulativamente, verificou-se que é para a estação do Centro de Lacticínios que as simulações de NO₂ e SO₂ são mais próximas das concentrações medidas nas estações de monitorização, enquanto que no caso do O₃ se destaca a estação de Ermesinde. Relativamente às PM₁₀, a estação de Lamas de Olo é aquela que reúne os melhores valores de IOA e r e cuja dimensão dos erros em termos sistemáticos e absolutos é menor (Tavares, 2011). Contudo, esta estação apresenta um conjunto de características especiais, encontrando-se localizada no Parque Natural do Alvão (zona protegida), a 1086 m de altitude, onde a agricultura e a criação de gado se apresentam como as atividades predominantes, tendo como objetivo a monitorização da poluição regional de fundo, resultante do transporte de poluentes a longa distância, e as emissões da região (Correia, 2007).

5.3.3 Modelo TAPM – Condições de simulação

Domínio de simulação

Como explicitado anteriormente, o TAPM utiliza uma base de dados global com dados de altitude do terreno, uso do solo, temperatura do mar e análises meteorológicas sinópticas. Assim, a simulação

numérica com o TAPM foi iniciada com a introdução de dados de análises sinóticas europeias de 2008, fornecidos pelo CSIRO (resultado dos modelos de previsão meteorológica *Limited Area Prediction System* (LAPS) e *Global Analysis and Prediction* (GASP) do *Bureau of Meteorology* (BOM) da Austrália); de dados de orografia, uso do solo e vegetação provenientes da *Earth Resources Observation Systems* (EROS⁸); e de dados referentes à temperatura superficial do mar, fornecidos pela *USNational Center for Atmospheric Research* (NCAR)⁹.

Posteriormente aplicou-se a técnica de *nesting* a três domínios, correspondendo cada um deles à Península Ibérica (D1), às Regiões Norte e Centro (D2) e à Região Norte (D3), com resoluções espaciais de 12,5×12,5 km²; 5×5 km² e 2×2 km², respetivamente. É de salientar que as dimensões dos domínios foram definidas de modo a manter uma relação entre os tamanhos das células de cálculo, tendo-se optado por uma resolução de 2,5 km por ser aquela que apresenta os melhores resultados. Em termos verticais, o modelo usa um domínio de 8 km, distribuído por 25 níveis de espaçamento desigual, mais apertado junto ao solo. O domínio D3 corresponde ao domínio de simulação da qualidade do ar, apresentando uma área de 216×146 km² (Figura 34), tendo sido escolhido de forma a incluir o maior número de fontes emissoras com influência na qualidade do ar da Região Norte, nomeadamente grandes fontes industriais e tráfego rodoviário. As dimensões deste domínio permitiram ainda simular as circulações de mesoescala existentes e dominantes na zona costeira da Região Norte, em particular a brisa marítima (responsável por uma parte do transporte de poluentes atmosféricos), possibilitando assim um conhecimento mais aprofundado da origem dos episódios de poluição nesta região. Salienta-se ainda que os domínios D1 e D2 abrangeram uma área de 1350×912,5 km² e 540×365 km², respetivamente.

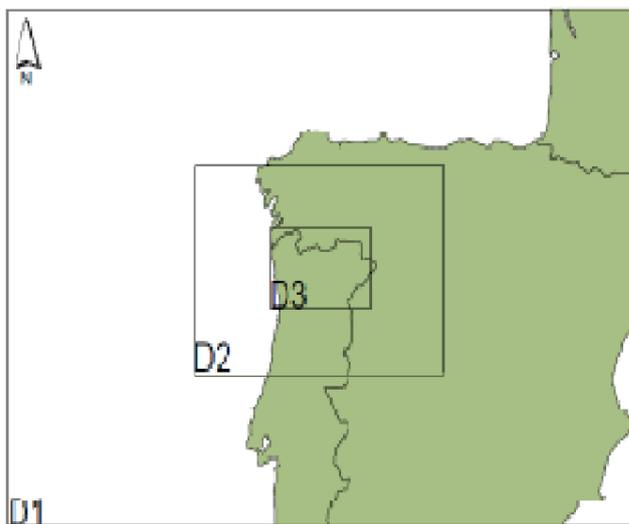


Figura 34 – Representação dos domínios de simulação do modelo TAPM (fonte: adaptação Ribeiro *et al.*, 2011).

⁸ Apresenta um sistema de coordenadas de latitude e longitude com um espaçamento de 1 km (LPDAAC, s.d.).

⁹ Fornece médias mensais de longo termo, para um espaçamento de 100 km com base nas coordenadas de latitude e longitude (UCAR, s.d.).

Emissões

Os dados de entrada utilizados na componente de poluição atmosférica foram obtidos através do Guia do Inventário de emissões atmosféricas para o ano de 2005, elaborado pela Agência Europeia do Ambiente (EMEP/EEA), para todos os setores de atividade, tendo como fonte de informação os inventários nacionais. O inventário EMEP/EEA, realizado de acordo com as normas da União Europeia, disponibiliza informação a nível nacional (NUT I – Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos na União Europeia) em 19 países, desagregada por 11 tipos de atividade e por espécie poluente, constituindo uma base comparativa entre os diferentes países. No que diz respeito às fontes poluidoras, consideraram-se dois tipos: grandes fontes (atividades de carácter industrial, doméstico e de serviços de grande dimensão) e fontes em área (atividades poluidoras de carácter difuso e pontual, de menor dimensão).

Assim, como dados de entrada do cenário de referência, foram fornecidos ao modelo dois ficheiros de emissões, nomeadamente:

- Emissões em área dos setores doméstico, industrial, serviços e agrícola, afetadas de um perfil de variação, inseridas no modelo como uma grelha; e
- Emissões em área do tráfego automóvel, afetadas de um perfil horário de variação, inseridas no modelo como uma grelha.

Por sua vez, para a simulação do cenário CB, para além dos ficheiros anteriormente especificados foi ainda fornecido ao modelo um ficheiro de emissões pontuais, referente às emissões das centrais em estudo. Este resultou da compilação de diversos dados, nomeadamente, coordenadas militares (m), altura da chaminé e respetivo raio interno (m), velocidade ($m.s^{-1}$) e temperatura (K) de saída dos gases de combustão, bem como o caudal mássico de cada um dos poluentes em análise ($g.s^{-1}$). É de salientar que a informação necessária à elaboração do ficheiro foi obtida através de contacto direto com as centrais inseridas na região em estudo, com exceção do caudal mássico dos poluentes atmosféricos que foi obtido por estimativa. As Tabelas 20 e 21 apresentam os dados anteriormente expostos para cada uma das centrais inseridas na região em estudo.

Tabela 20 – Caracterização das Centrais a biomassa localizadas no domínio de simulação.

Dados de entrada		Centrais		
		Portucel Viana	Amorim Revestimentos	Terras de Santa Maria
Coordenadas militares (m)	Lat	526152,24	446149,19	435545,63
	Long	151601,66	162544,65	175063,15

Tabela 21 – Caracterização das Centrais a biomassa localizadas no domínio de simulação (continuação).

Dados de entrada	Centrais			
	Portucel Viana	Amorim Revestimentos	Terras de Santa Maria	
Altura da chaminé (m)	93,15	24	40	
Raio interno da chaminé (m)	1,83	1,10	1,80	
Vs dos gases de exaustão (m.s ⁻¹)	8	13	15	
Ts dos gases de exaustão (K)	413	408	573	
Poluentes Atmosféricos (g.s ⁻¹)	NOx	18,216	0,675	8,092
	SO ₂	0,950	0,035	0,422
	PM ₁₀	3,281	0,121	1,457
	COVNM	0,630	0,024	0,280

É ainda de salientar que face à informação recolhida no âmbito da presente avaliação, foi possível determinar o caudal volumétrico do efluente gasoso de cada uma das centrais em estudo, permitindo uma comparação entre o valor estimado (subcapítulo 5.2.1), resultado das características do combustível e das condições de combustão, e o valor observado (Tabela 22). O caudal observado, em Nm³.s⁻¹, resultou da aplicação da Equação 16, onde D representa o diâmetro interno da chaminé (m) e v a velocidade de saída dos gases de combustão (m.s⁻¹).

$$Q_V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times v$$

(Equação 16)

Tabela 22 – Comparação entre o caudal volumétrico espectável e o observado, para as centrais da região em estudo.

Centrais	Caudal estimado (Nm ³ .s ⁻¹)	Caudal observado (Nm ³ .s ⁻¹)
Portucel Viana	184,38	84,17
Amorim Revestimentos	8,50	49,42
Terras de Santa Maria	101,975	152,68

Pela observação da Tabela 22 verifica-se uma significativa diferença entre os dois caudais, sendo de salientar que os valores do caudal estimado seguem a tendência esperada, isto é, associado a um consumo elevado de biomassa (caudal mássico de combustível) encontra-se uma produção elevada de gases de

combustão. Assim, a discrepância de valores pode ser justificada pelos pressupostos assumidos, nomeadamente o tipo de biomassa utilizada, o excesso de ar e a temperatura do reator, dados característicos de cada central, e que influenciam diretamente a metodologia de cálculo utilizada.

5.3.4 Resultados de simulação

Uma vez realizadas as simulações procedeu-se à análise dos resultados recorrendo-se à representação gráfica dos mesmos com recurso ao *software* Surfer (versão 9). As Figuras 36 a 38 apresentam as diferenças (em termos percentuais) entre as concentrações médias mensais estimadas para o cenário CB e o cenário de referência, para o período em estudo, encontrando-se as variações em termos absolutos (das concentrações médias mensais) expostas no Anexo II (Figuras 49 a 51). É de salientar que para uma melhor perceção da ordem de grandeza das variações, a Tabela 23 apresenta a gama de variação dos poluentes analisados (PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 e SO_2), no período em estudo. A avaliação do contributo das centrais a biomassa na qualidade do ar, representada sob a forma de variações percentuais entre cenários, resultou da aplicação de uma metodologia de cálculo, cuja formulação matemática se apresenta na Equação 17.

$$Variação (\%) = \frac{CB - CR}{CR} \times 100$$

(Equação 17)

Tabela 23 – Variação em termos percentuais das concentrações médias mensais de PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 e SO_2 para os meses de janeiro e julho.

Variação das concentrações (%)	Janeiro	Julho
PM_{10}	[-0,18 ; 1,05]	[0,0017 ; 1,64]
$PM_{2,5}$	[-0,28 ; 1,96]	[-0,03 ; 1,95]
NO_2	[-0,076 ; 5,97]	[-0,08 ; 14,88]
O_3	[-1,53 ; 0,014]	[-0,998 ; 0,018]
SO_2	[-1,72 ; 2,75]	[-0,035 ; 4,13]

Cumulativamente, procedeu-se ainda à representação gráfica do perfil horário das concentrações máximas de cada um dos poluentes em estudo, com recurso ao *software* Microsoft Office Excel, tendo

como principal objetivo a avaliação do seu comportamento no período em análise. Para tal recorreu-se a um gráfico de linhas que permite apresentar a tendência de cada valor ao longo do tempo (744h) (Figuras 39 a 48). É ainda de salientar que as concentrações representadas foram obtidas para um ponto específico do domínio, apresentando-se este como a principal fonte emissora do cenário CB (Central de Viana do Castelo).

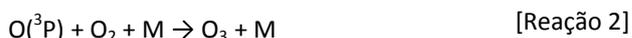
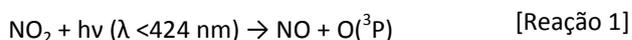
Numa primeira análise aos dados de qualidade do ar, é notório que a variação entre os dois cenários é diminuta, facto que não significa necessariamente uma reduzida influência das centrais a biomassa na qualidade do ar, uma vez que o TAPM não apresenta uma elevada sensibilidade perante simulações de fontes pontuais (Hurley, 2008). Por outro lado, é igualmente relevante ter em conta a análise de desempenho do modelo, uma vez que os dados estimados pelo TAPM revelam uma tendência para sobrestimar as concentrações de PM_{10} e de NO_2 e de subestimar as concentrações de O_3 e de SO_2 . No entanto, e tendo em consideração estes aspetos no tratamento dos resultados, a observação das figuras permite verificar a existência de uma variação positiva para os poluentes NO_2 , SO_2 , PM_{10} e $PM_{2,5}$, o que permite concluir que as centrais aumentam, ainda de que forma reduzida, as concentrações destes poluentes na atmosfera, contribuindo consequentemente para a degradação da qualidade do ar desta região. Este aumento é notório em ambos os meses analisados, verificando-se que amplitude dos valores é claramente superior no mês de Julho para poluentes como o NO_2 e SO_2 . É ainda visível que o incremento das concentrações é localizado, apresentando-se o distrito de Viana do Castelo como o mais afetado, facto que pode ser justificado por ser a zona onde se situa a maior central a biomassa da região Norte. Cumulativamente não é perceptível qualquer variação nas áreas adjacentes da central de cogeração Amorim Revestimentos e da central termoelétrica Terras de Santa Maria, pelo que não lhes é atribuída qualquer influência na qualidade do ar, facto que pode ser justificado pela reduzida dimensão destas indústrias.

É de salientar que face às condições meteorológicas de estabilidade atmosférica, características dos meses de inverno, que proporcionam uma menor dispersão de poluentes como o NO_2 e SO_2 , seria de esperar que as variações percentuais fossem mais elevadas no mês de janeiro. No entanto tal não se verifica, situação que pode ser justificada por uma redução das emissões no cenário de referência (para o mês de julho), associado à diminuição da intensidade do tráfego rodoviário e de alguma produção industrial, característicos de um mês tipicamente utilizado para férias, acentuando assim a influência das emissões provenientes da central. Além disso, sendo a região norte caracterizada climaticamente por um inverno muito chuvoso, estão garantidas condições para uma expressiva remoção de poluentes atmosféricos por via húmida, podendo constituir um fator relevante para a diferença de variação percentual observada.

Um outro aspeto de extrema importância ao nível da dispersão de poluentes atmosféricos prende-se com a altura efetiva da chaminé, sendo esta determinada pelo somatório da altura da chaminé e pela altura

da sobre-elevação da pluma. Face a este parâmetro, temos que um correto dimensionamento da altura da chaminé (determinada em função do nível de emissões de poluentes atmosféricos, da proximidade de obstáculos, dos parâmetros climatológicos e das condições de descarga dos efluentes gasosos) favorece a dispersão de poluentes atmosféricos até que estes atinjam o nível do solo. Por outro lado, uma vez que a temperatura de exaustão é significativamente superior à temperatura ambiente, determina a densidade da pluma (menos densa que o ar ambiente), promovendo a sua elevação e consequentemente permitindo que os poluentes existentes no fluxo gasoso sejam emitidos para a atmosfera a uma altura mais elevada, o que se traduz num incremento da sua dispersão. É no entanto de realçar que o contributo destes parâmetros encontram-se diretamente relacionados com a altura da camada de mistura, uma vez que quanto mais elevada for a altura desta camada, maior será o volume de ar onde os poluentes se vão poder dispersar.

No caso do O₃, os resultados obtidos evidenciam uma variação negativa em ambos os meses, sendo o único poluente onde se verifica tal variação, indicando um decréscimo da concentração deste poluente na zona de influência da central de Viana do Castelo. É no entanto evidente que a redução verificada é superior durante o mês de janeiro. Uma vez que o ozono troposférico é o principal produto de diversas reações fotoquímicas complexas que ocorrem na baixa atmosfera na presença de radiação solar, oxigénio e de gases precursores do ozono, como o NO_x e os compostos orgânicos voláteis, seria espetável que o aumento das concentrações de NO_x resultasse num aumento das concentrações de O₃. Assim, os resultados observados podem ser explicados pelo ciclo básico de formação fotoquímica do ozono troposférico. Este resulta da recombinação de um átomo de oxigénio no estado fundamental O(³P) (reação 2), produzido pela fotólise do dióxido de azoto (NO₂) (reação 1), com uma molécula de oxigénio (O₂) na presença da substância inerte M, a qual absorve o excesso da energia vibracional e estabiliza a produção dos moléculas de O₃. No entanto, o ozono produzido reage rapidamente com NO promovendo a regeneração do NO₂ (reação 3). Como resultado, dependendo das suas concentrações iniciais e na ausência de reações de interconversão com outras espécies químicas, as moléculas NO, NO₂ e O₃ atingem o estado foto-estacionário sem produção efetiva do ozono (Figura 35 (a)).



Assim, a formação efetiva do ozono ocorre apenas se o NO₂ for produzido a partir da reação do NO com outras espécies que não o O₃, como por exemplo os COVs (incluindo metano e COVNM de origem biogénica e antropogénica). Neste caso, as reações de degradação dos COVs levam à formação dos radicais livres

peróxido ($\text{RO}_2\bullet$) (reação 4) e hidro peróxilo ($\text{HO}_2\bullet$) (reação 5), que por sua vez irão reagir rapidamente com NO promovendo a sua conversão a NO_2 (Figura 35 (b)).

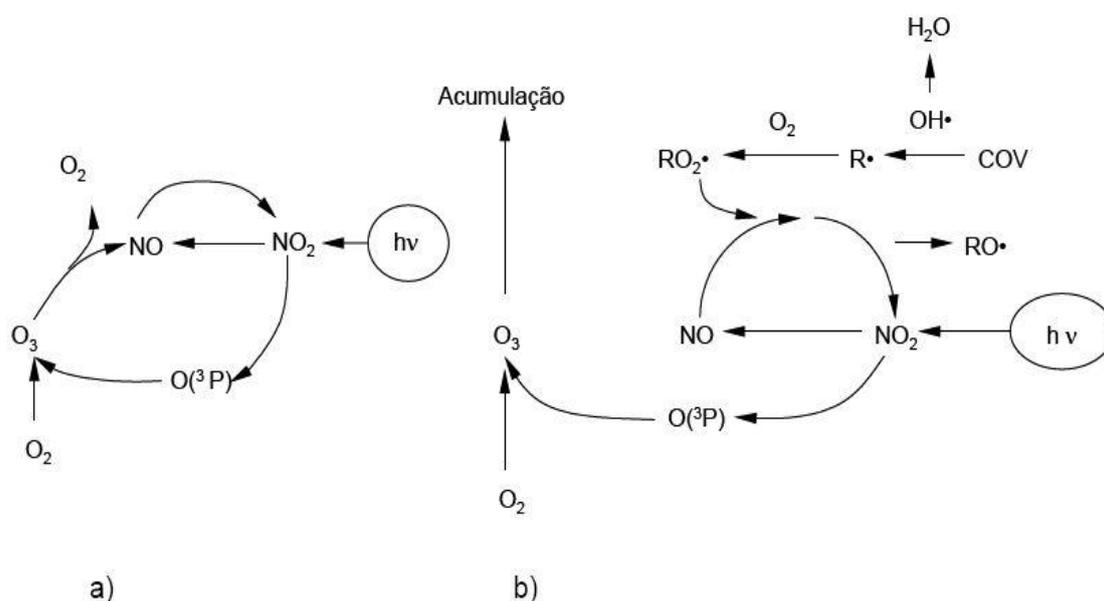
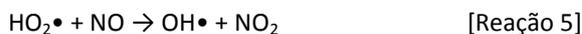


Figura 35 – Representação esquemática das reações envolvendo a conversão NO a NO_2 e formação de O_3 : (a) ciclo fotoquímico básico NO- NO_2 - O_3 na ausência de COVs; (b) ciclo fotoquímico NO- NO_2 - O_3 na presença de COVs (fonte: adaptado de Arya, 1999).

Assim, consoante a relação entre as concentrações dos compostos intervenientes no ciclo de ozono, serão privilegiadas as reações de produção ou as reações de consumo deste poluente. Uma vez que as áreas envolventes de uma fonte poluente, como é o caso da central de Viana, são caracterizadas pela presença de concentrações significativas de NO, a reação 3 apresenta especial importância no consumo de ozono, e em particular durante o período noturno e de inverno, quando perante a ausência de radiação solar não ocorre a fotólise de NO_2 , e conseqüentemente não se verifica a reposição da molécula de O_3 consumida. Face a este aspeto, a variação negativa observada para este poluente, em ambos os meses, é fundamentada.

É ainda de salientar que a relação entre a luz solar e a formação de O_3 determina a não linearidade do processo, verificando-se que as concentrações variam consoante a estação do ano e ao longo do dia, sendo usualmente aceite que no período de Verão a amplitude dos valores de concentração de O_3 são mais elevadas em comparação à época de inverno. Este facto pode resultar da ação da temperatura na eficácia dos processos de produção fotoquímica, uma vez que elevadas temperaturas e uma radiação solar intensa, fomentam a reatividade entre as diferentes espécies presentes na atmosfera, bem como um incremento das emissões de COVs, particularmente através das perdas por evaporação e das emissões biogénicas, situações que podem também justificar os resultados obtidos. Além disso, outro processo que concorre para a fotoquímica local é o transporte (advecção) de poluentes, nomeadamente o ozono, de outras fontes do domínio.

Relativamente à amplitude das variações, verifica-se que é para o NO_2 que esta é mais acentuada, seguindo-se o SO_2 , as PM_{10} e as $PM_{2,5}$ (Tabela 23), sendo coincidente com a hierarquia dos seus fatores de emissão (subcapítulo 4.2.2), isto é, quanto maior o FE, maior se revelou a diferença entre os cenários simulados para o poluente em questão.

No que diz respeito à análise dos perfis horários das concentrações máximas locais dos poluentes, verificou-se que para ambos os meses e para os diferentes poluentes, o comportamento entre o cenário de referência e o cenário CB seguiu a mesma tendência, apresentando valores semelhantes. Por outro lado, avaliando o comportamento por poluente para o período em análise, verificou-se que este foi similar em ambos os meses para poluentes como o NO_2 , SO_2 , O_3 e $PM_{2,5}$. No entanto, no caso das PM_{10} , observou-se um comportamento relativamente regular das concentrações máximas locais no mês de julho, enquanto que no mês de janeiro os níveis mais elevados foram obtidos nas primeiras duas semanas do mês, apresentando os restantes dias valores significativamente mais reduzidos. Esta diferença pode ser justificada pelas condições climáticas da região no mês de inverno, nomeadamente a sua contribuição na deposição por via húmida do material particulado.

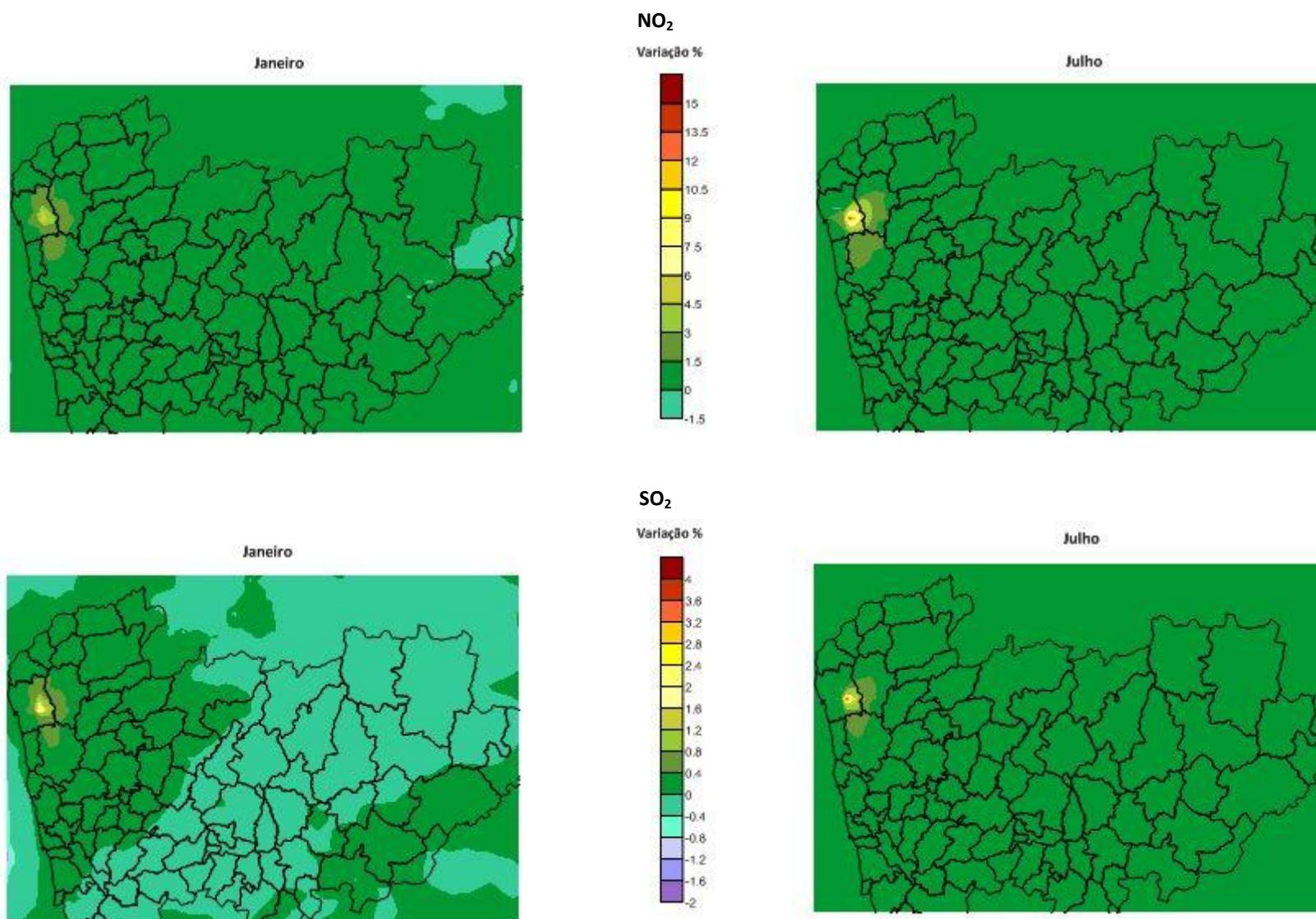


Figura 36 – Variação das concentrações médias mensais de NO₂ e SO₂, em termos percentuais, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.

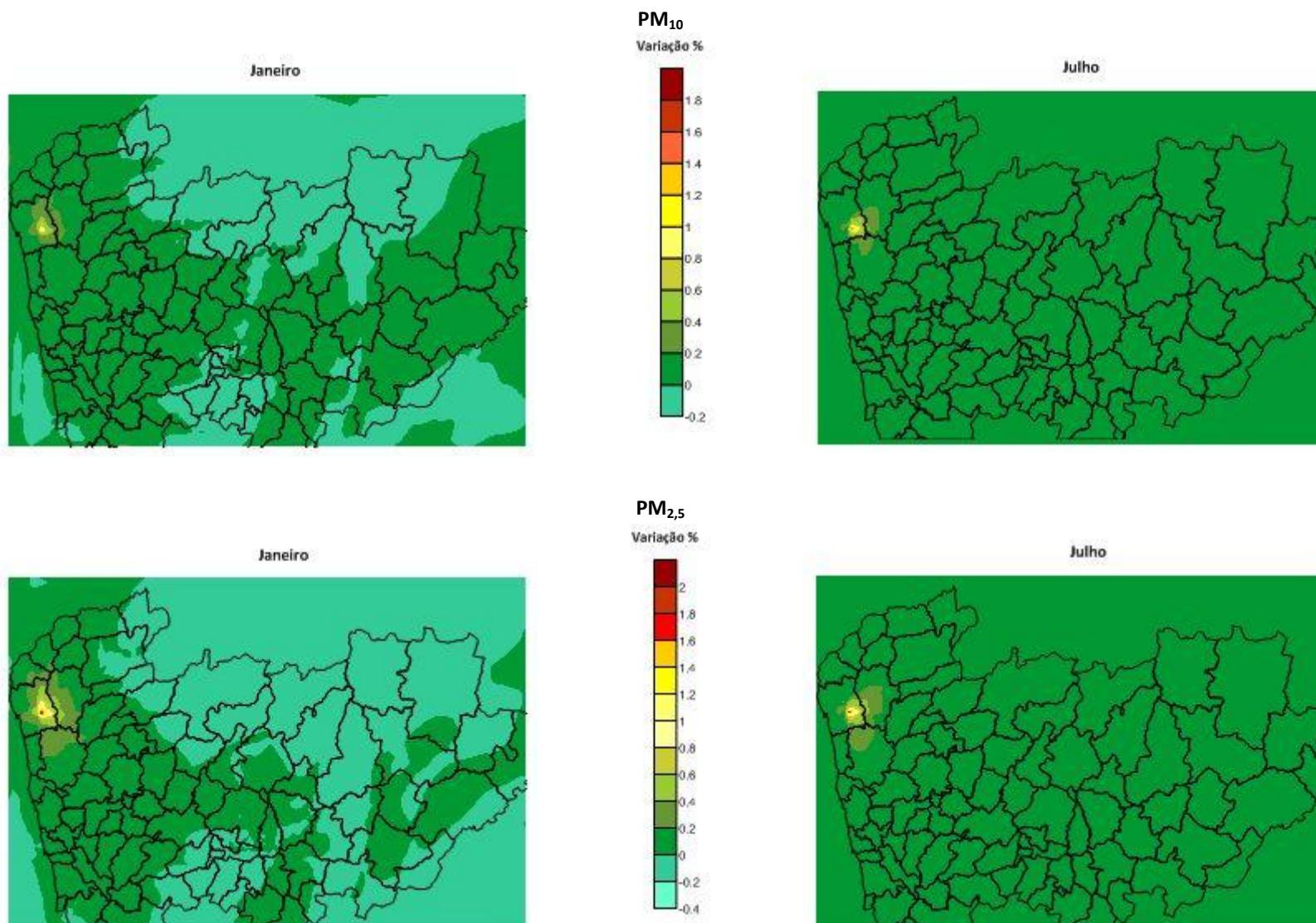


Figura 37 – Variação das concentrações médias mensais de PM_{10} e $PM_{2,5}$, em termos percentuais, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.

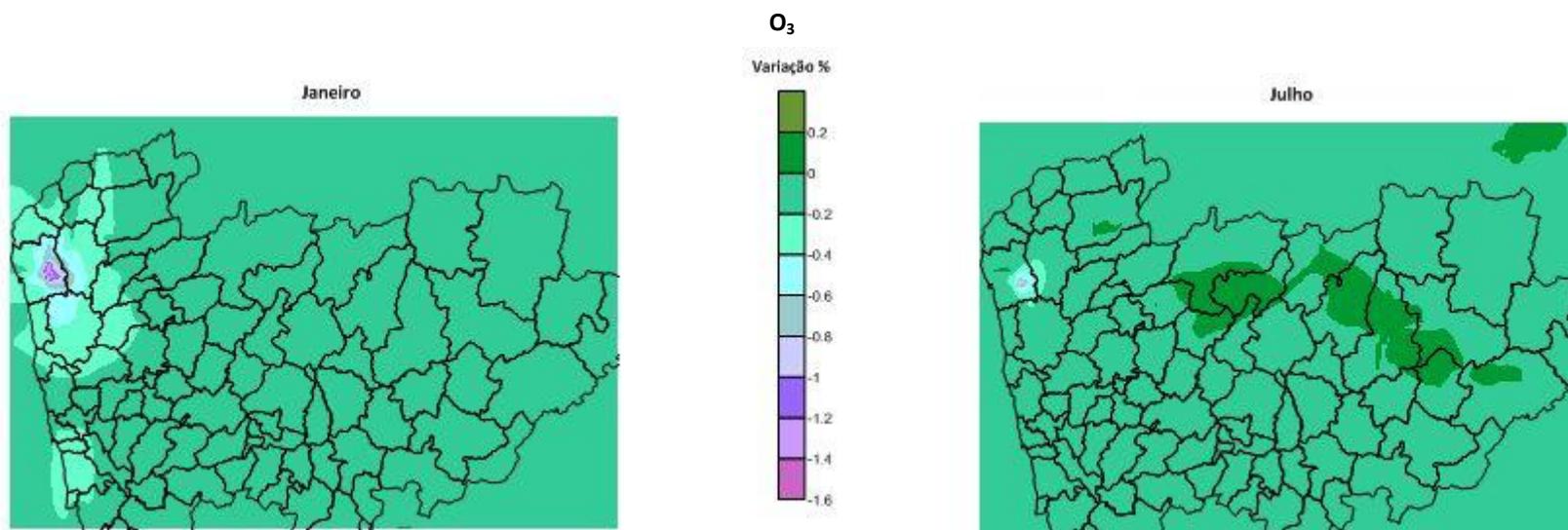


Figura 38 – Variação das concentrações médias mensais de O₃, em termos percentuais, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.

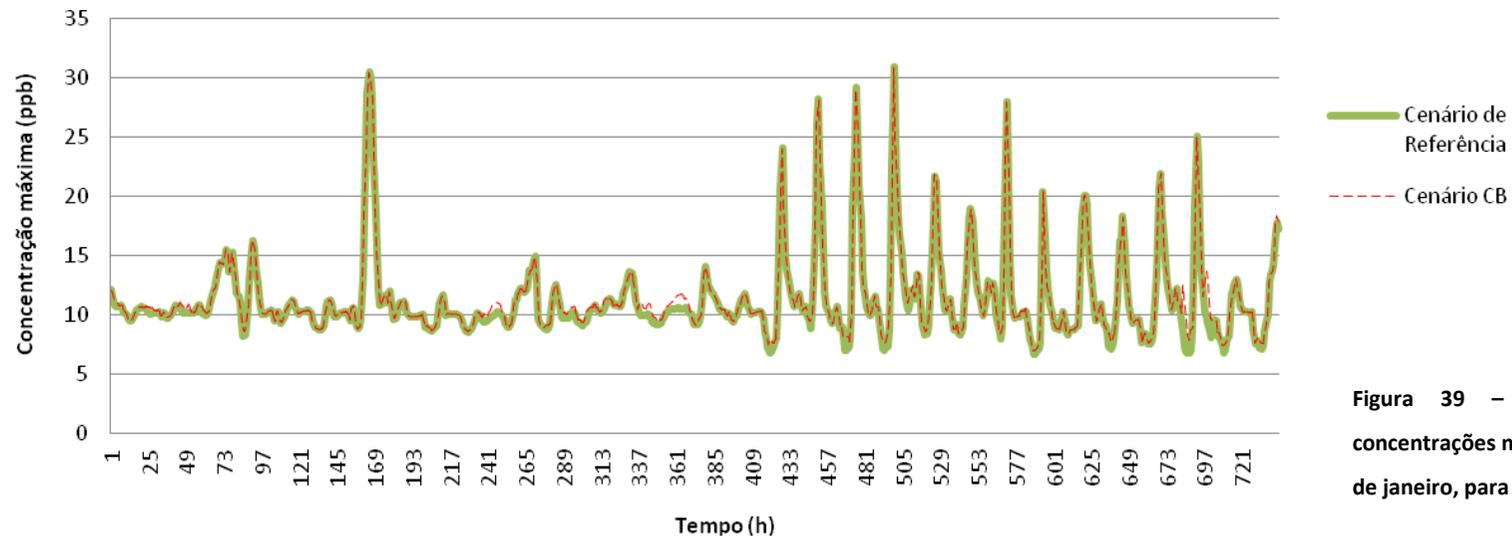


Figura 39 – Perfil horário das concentrações máximas de NO₂ no mês de janeiro, para um ponto do domínio

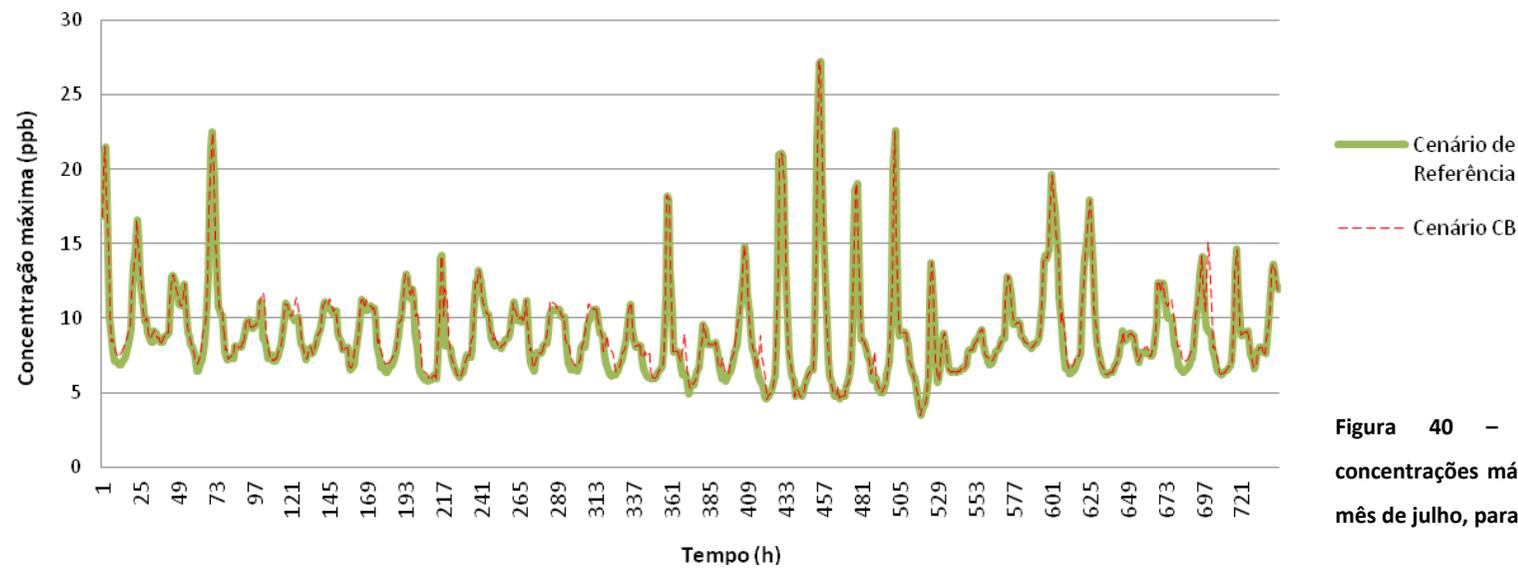
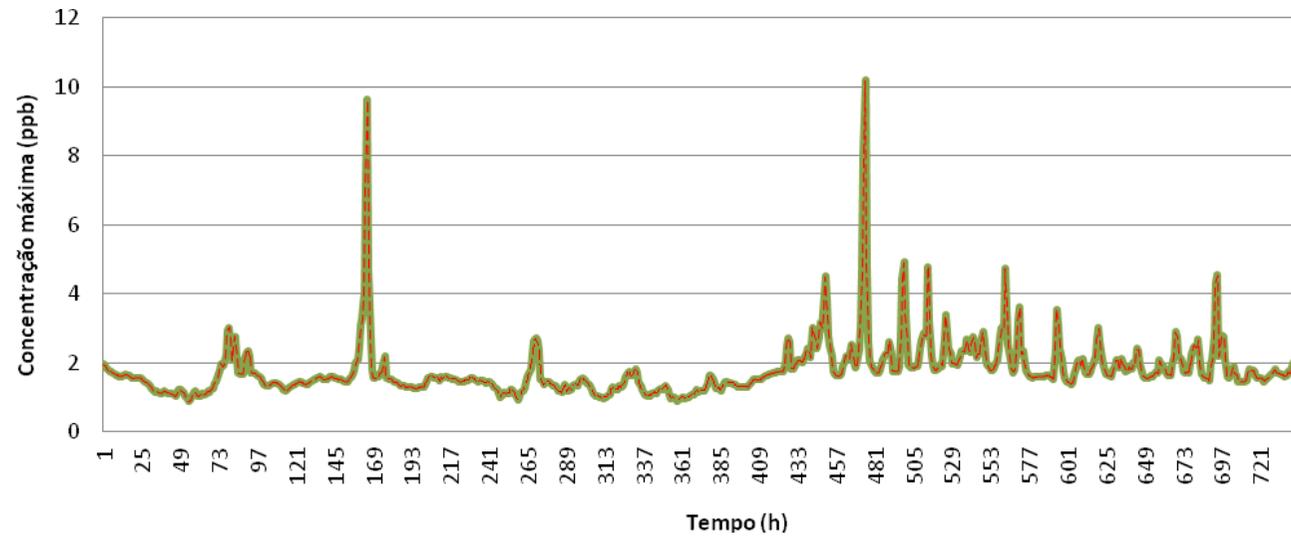
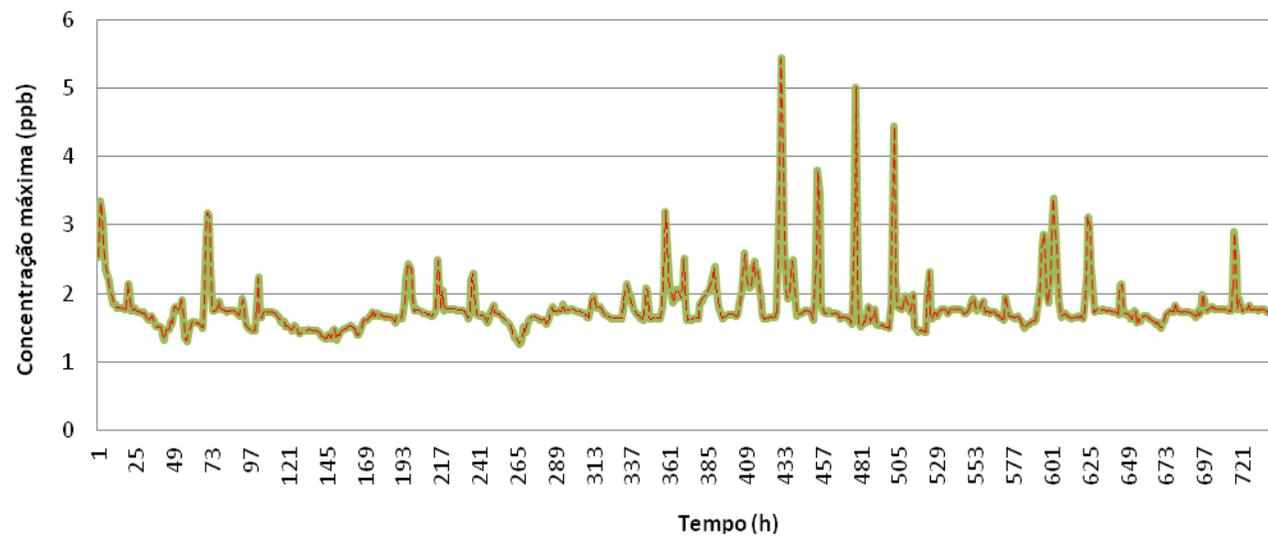


Figura 40 – Perfil horário das concentrações máximas locais de NO₂ no mês de julho, para um ponto do domínio.



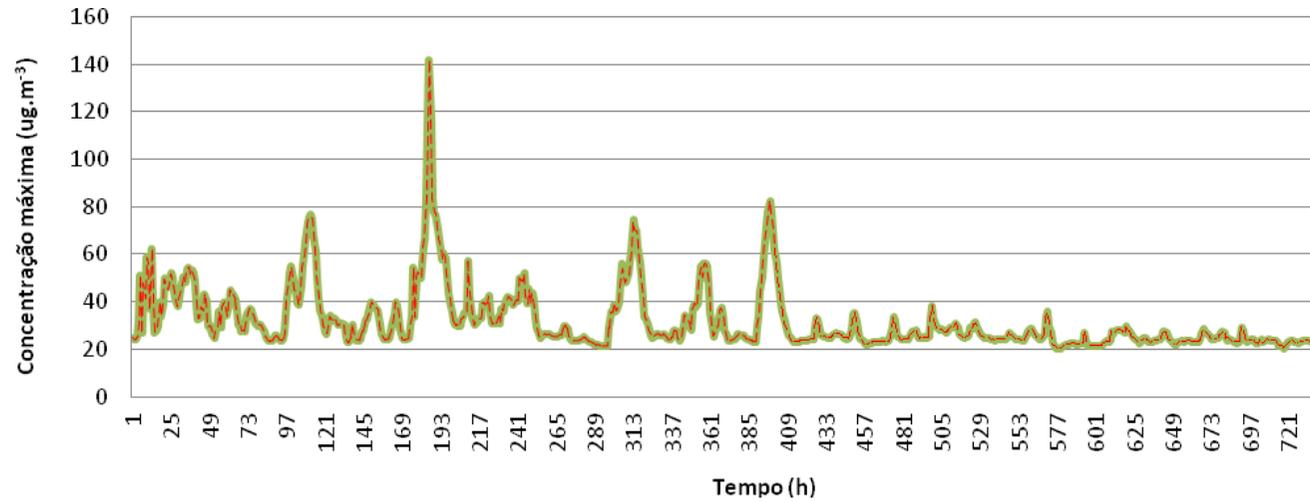
— Cenário de Referência
 - - - - - Cenário CB

Figura 41 – Perfil horário das concentrações máximas locais de SO₂ no mês de janeiro, para um ponto do domínio.



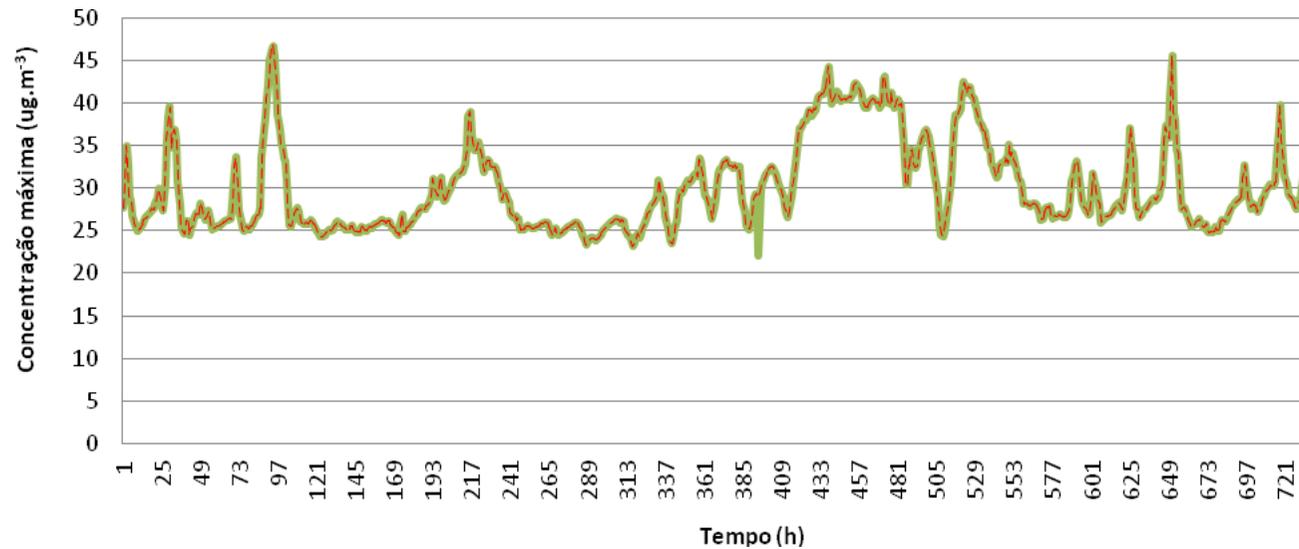
— Cenário de Referência
 - - - - - Cenário CB

Figura 42 – Perfil horário das concentrações máximas locais de SO₂ no mês de julho, para um ponto do domínio.



— Cenário de Referência
 - - - - - Cenário CB

Figura 43 – Perfil horário das concentrações máximas locais de PM_{10} no mês de janeiro, para um ponto do domínio.



— Cenário de Referência
 - - - - - Cenário CB

Figura 44 – Perfil horário das concentrações máximas locais de PM_{10} no mês de julho, para um ponto do domínio.

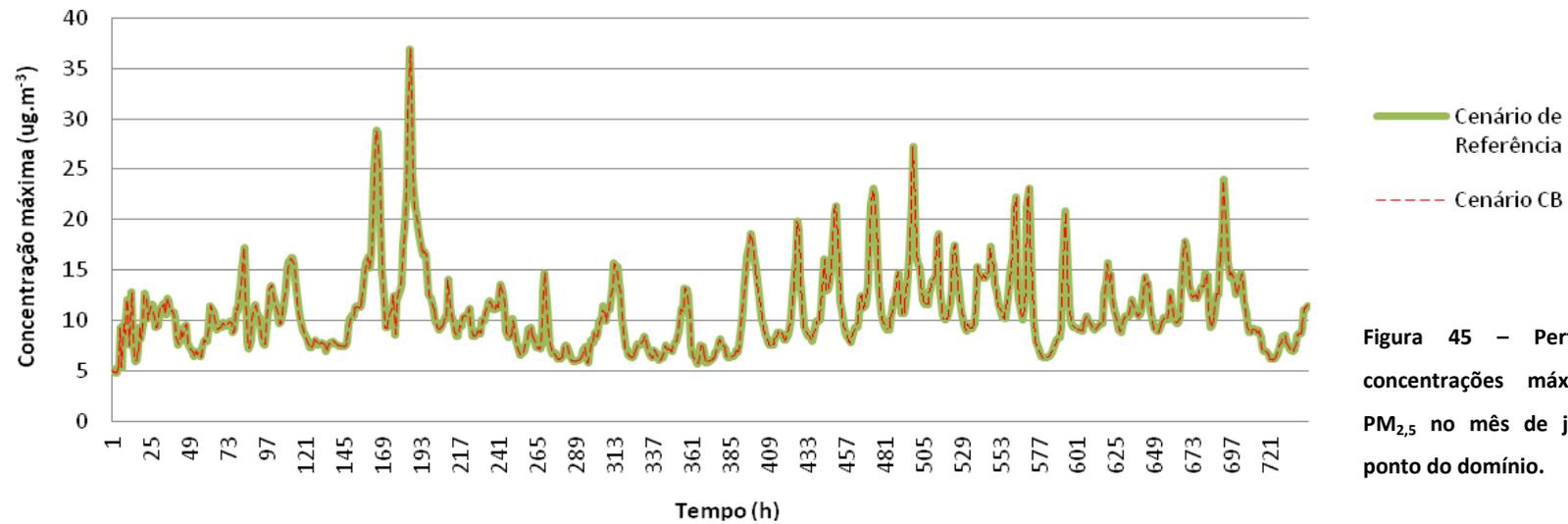


Figura 45 – Perfil horário das concentrações máximas locais de PM_{2,5} no mês de janeiro, para um ponto do domínio.

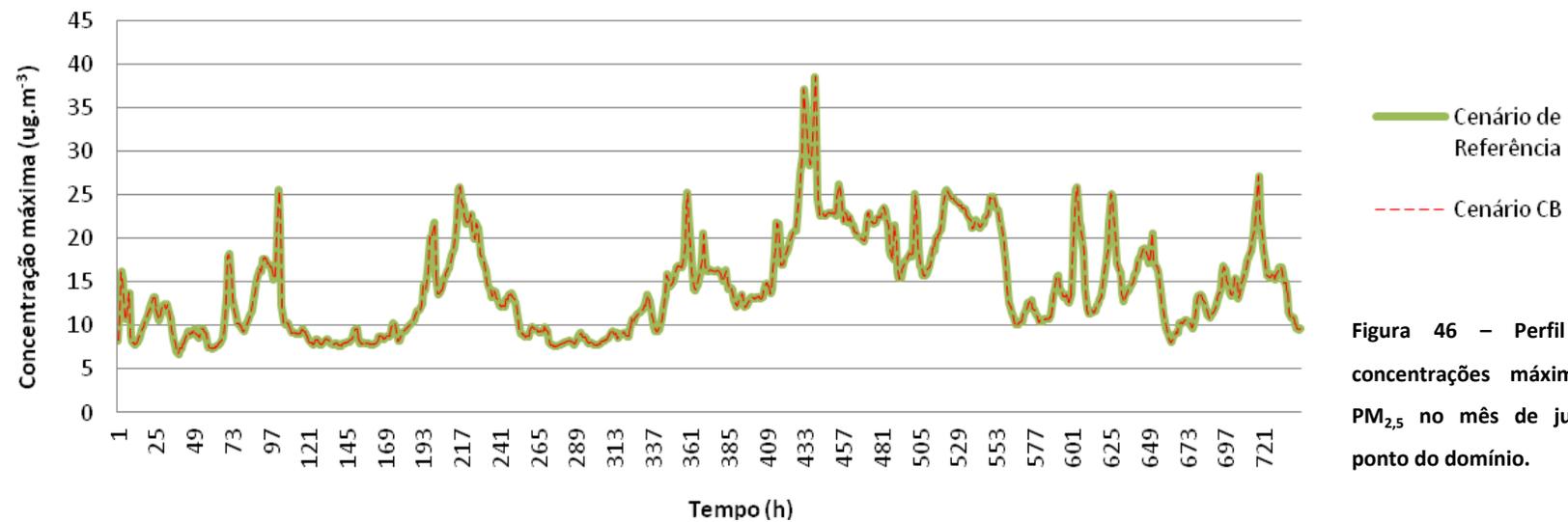


Figura 46 – Perfil horário das concentrações máximas locais de PM_{2,5} no mês de julho, para um ponto do domínio.

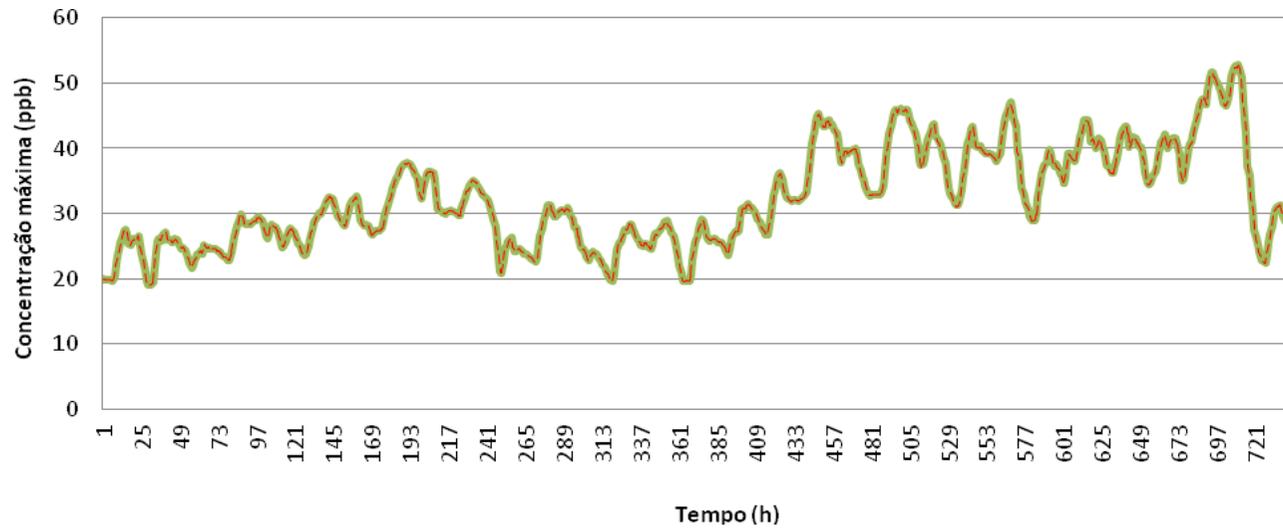


Figura 47 – Perfil horário das concentrações máximas locais de O₃ no mês de janeiro, para um ponto do domínio.

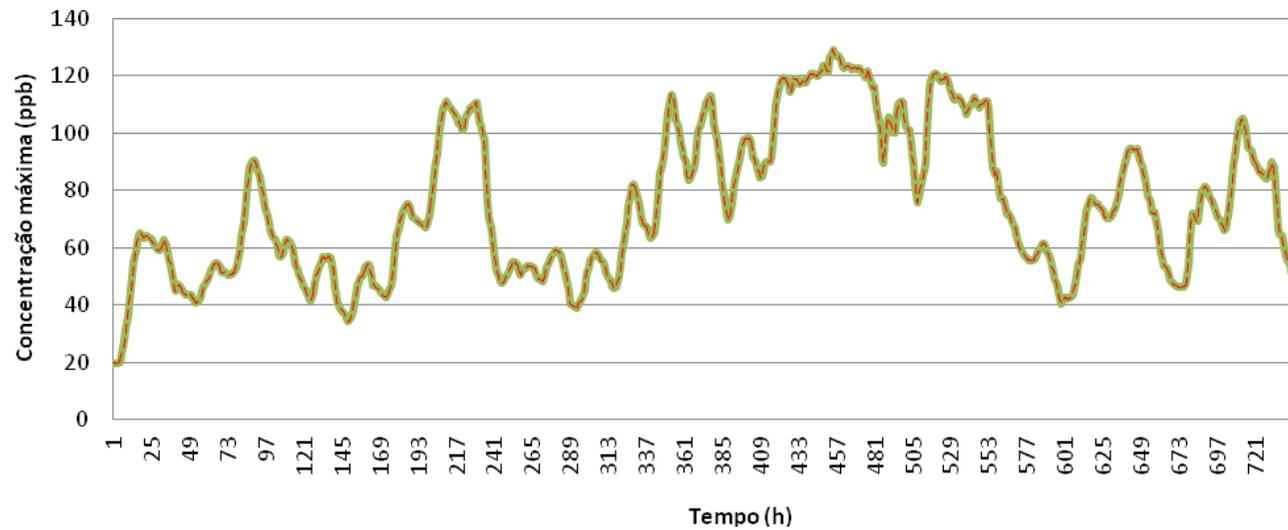


Figura 48 – Perfil horário das concentrações máximas locais de O₃ no mês de julho, para um ponto do domínio.

Capítulo VI – Considerações Finais

Nos últimos anos a temática das alterações climáticas e da qualidade do ar ambiente têm gerado um consenso generalizado sobre a necessidade premente de ação neste domínio. Cumulativamente, um conjunto de instrumentos de política, a nível nacional e internacional têm vindo a ser elaborados e aprovados, no sentido da mitigação e adaptação aos impactes (ambientais, económicos e sociais) resultantes das emissões de gases com efeito de estufa. A recente Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de abril, que aprovou a última Estratégia Nacional para a Energia, (ENE 2020), confere às energias renováveis um papel fulcral na estratégia energética e nos objetivos delineados para o setor – competitividade, sustentabilidade e segurança do abastecimento. É neste contexto mais alargado de uma política energética integrada e coerente, que a aplicação da biomassa florestal enquanto combustível destinado a valorização energética pode prosperar.

Assim, o presente estudo teve como objetivo primordial avaliar os impactes das centrais termoelétricas e de cogeração a biomassa florestal na qualidade do ar da região Norte de Portugal Continental, bem como constituir um pequeno contributo no desenvolvimento do Projeto BIOG AIR. A avaliação consistiu, numa primeira fase, na determinação das emissões resultantes do funcionamento das centrais, por aplicação de uma metodologia de cálculo, bem como na estimativa das emissões de CO₂ (um dos principais GEE) evitadas. Posteriormente procedeu-se à concretização do objetivo estabelecido através da previsão das concentrações de NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5} e O₃, por recurso ao modelo numérico TAPM. A aplicação do modelo exigiu a definição de dois cenários, onde o conjunto de emissões associadas aos diversos setores de atividade da região norte constituiu o Cenário de Referência (cenário para o ano de 2008), e onde o Cenário CB se caracterizou pela incorporação das emissões resultantes da operação das três centrais que se localizavam na região em estudo (Portucel Viana, Amorim Revestimentos e Terras de Santa Maria).

Relativamente à determinação das emissões evitadas, é de notar que apesar de o valor obtido ser importante [392 kt CO₂] quando comparado com o total das emissões associadas ao setor energético português, ao processo de conversão da biomassa florestal em energia encontra-se inerente todo um processo de logística, nomeadamente operações que envolvem o seu processamento, recolha e transporte. Assim, para proceder a um balanço das emissões de CO₂ é essencial avaliar as emissões associadas a estas atividades, uma vez que estas não integram o balanço global (no qual se inclui o ciclo de vida das árvores e a própria queima da biomassa), pelo que a premissa de que o aproveitamento de biomassa florestal para produção de energia representa um ciclo de carbono neutro não é realista. Este ciclo só se anula se a totalidade do carbono emitido for totalmente reabsorvido com o aumento da área florestada. Neste contexto, um estudo relevante será analisar as emissões de CO₂ de todo o sistema de exploração da BF (análise de ciclo de vida da biomassa), avaliando o real contributo desta FER na estratégia de mitigação das alterações climáticas. Devem ser contabilizados todos os fatores de produção e todas as operações florestais desde o início do ciclo de produção florestal, incluindo a preparação do solo, plantação, adubação, entre outros, bem como, contemplar outras tecnologias de transformação de biomassa para produção de energia, como por exemplo a densificação (*pellets*), e o próprio manuseamento da biomassa produzida nos centros fabris.

Os resultados obtidos pelo modelo TAPM apresentaram uma tendência geral de aumento, ainda que reduzido, das concentrações de NO₂, SO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} relativamente ao cenário de referência. Este incremento foi superior na época de Verão para poluentes como o NO₂ e o SO₂, verificando-se para o primeiro, um valor de [+5,97%] e [+14,9%] para os meses de janeiro e julho, respetivamente; e [+2,74%] e [+4,13%], para o segundo. No caso das partículas, os valores obtidos rondam os [+1,05%] e [+1,6%], para as PM₁₀; e [+1,96%] e [+1,95 %] para as PM_{2,5}, respetivamente para os meses de janeiro e julho. Por outro lado, as concentrações O₃ apresentam um ligeiro decréscimo da ordem de [-1,5%] e [-1,0%] para os meses de janeiro e julho, respetivamente, facto que pode ser justificado por diversos fatores, nomeadamente uma presença significativa de NO na envolvente da fonte emissora, que terá tendência para reagir com o ozono fomentando o seu consumo. É ainda de salientar que as variações observadas restringem-se à envolvente da central Portucel Viana (distrito de Viana do Castelo), situação que pode ser justificada por esta ser a central que apresenta um maior consumo de biomassa e consequentemente uma maior emissão de poluentes atmosféricos. As centrais Amorim Revestimentos e Terras de Santa Maria não apresentaram qualquer influência nas simulações realizadas, sendo por isso interessante avaliar se as mesmas terão expressão num modelo que apresente uma maior sensibilidade perante simulações de fontes pontuais.

É de realçar que as diferenças observadas nas variações percentuais de NO₂ e de SO₂ no período em análise, pode ser explicada por uma redução das emissões no cenário de referência para o mês de julho, associado à diminuição da intensidade do tráfego rodoviário e de alguma produção industrial, característicos de um mês tipicamente utilizado para férias. Além disso, sendo a região norte caracterizada

climaticamente por um inverno muito chuvoso, estão garantidas as condições para uma expressiva remoção de poluentes atmosféricos por via húmida, podendo constituir um fator relevante para a diferença verificada.

Face a estes dados é necessário ponderar o real impacte da utilização da biomassa florestal para a produção de energia elétrica, pois se por um lado é evidente a redução das emissões de CO₂, e, naturalmente, o seu papel na mitigação das alterações climáticas, o aumento das concentrações de NO₂ e SO₂, gases poluentes responsáveis pela acidificação, poderá constituir um incremento deste fenómeno e de todas as consequências que daí advêm, nomeadamente a deterioração dos sistemas de água doce, das florestas, dos solos e dos ecossistemas. Cumulativamente, o NO₂ é ainda um gás responsável pela eutrofização¹⁰, e consequentemente pela inibição da capacidade de manutenção da fauna e flora. Por outro lado, o aumento das concentrações de partículas é particularmente preocupante face aos seus efeitos na saúde humana, nomeadamente a sua relação com o aparecimento ou agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias, e cancro do pulmão, particularmente em populações sensíveis como as crianças e idosos. Além disso, as partículas constituem a maior fonte de incertezas na estimativa das alterações climáticas, uma vez que não é conhecida a sua capacidade para o aumento ou decréscimo da temperatura global terrestre.

Cumulativamente, este contributo torna-se ainda mais relevante numa altura em que apesar das ações que têm vindo a ser implementadas, decorrentes da introdução de instrumentos legais que visam não só limitar as emissões a nível nacional, como é o caso da Diretiva Tetos de Emissão Nacionais (Diretiva 2001/81/CE), mas também as emissões provenientes de setores específicos, como o dos transportes e o da indústria, ser notório que persistem problemas ao nível da qualidade do ar, nomeadamente no que se refere à concentração de partículas inaláveis, ozono troposférico e dióxido de azoto.

No entanto, o conhecimento de que os poluentes atmosféricos são o resultado da ausência de condições ideais, nomeadamente uma temperatura de combustão insuficiente, uma mistura ar/combustível deficiente ou de um tempo de residência do combustível, na zona de queima, demasiadamente curto, o que se traduz num processo de combustão incompleto, reforça a necessidade de otimizar a inter-relação do excesso de ar, rendimento térmico e emissão de poluentes e, consequentemente, do investimento em equipamentos que operem sob condições adequadas.

No caso dos óxidos de azoto, as suas emissões encontram-se dependentes do combustível utilizado, das condições de queima e de questões operacionais, podendo aumentar, diminuir ou manter-se em níveis

¹⁰ Processo caracterizado pelo enriquecimento excessivo das águas em elementos nutritivos, principalmente azoto (N) e fósforo (P), resultando num crescimento anormal das espécies vegetais para níveis que afetam a utilização normal e desejável da água (REA 2011, 2011).

estáveis à medida que se aumenta a percentagem ou se altera o tipo de biomassa utilizado no sistema. Além disso, existe uma relação típica entre o excesso de ar e a emissão de NO_x, onde pequenos excessos de ar geram altas temperaturas de chama e reduzidos teores de O₂ e N₂ (potenciais formadores de NO_x), verificando-se o oposto com altos teores de ar. No entanto, é necessário ter em conta que o excesso de ar apresenta também uma relação com a formação de CO, pelo que as emissões de NO_x e CO devem ser analisadas simultaneamente, pois a diminuição de um poluente pode significar o aumento de formação de outro. Deve ser lembrado que o teor de CO diminui rapidamente com o aumento do excesso de ar. Por sua vez, as partículas encontram-se associadas à emissão de compostos inqueimados, dependendo essencialmente do caudal de alimentação do combustível, do EA e da distribuição do ar de combustão, enquanto que a formação do SO₂ encontra-se diretamente relacionado com a presença de enxofre nas estruturas orgânicas da biomassa.

Assim, e apesar da proteção do ambiente atmosférico ser assegurada por um conjunto de instrumentos complementares que promovem a prevenção e o controlo das emissões de poluentes atmosféricos, nomeadamente através do incentivo à instalação das melhores técnicas disponíveis e de equipamentos que previnam ou reduzam a poluição atmosférica (sistemas de tratamento de efluentes gasosos), é imprescindível avaliar quais as melhores tecnologias de combustão da biomassa, bem como o combustível que permite uma maior redução das emissões atmosféricas e otimização dos parâmetros operacionais.

Em trabalhos futuros nesta área, recomenda-se ainda um estudo aprofundado sobre a biomassa utilizada em cada central, nomeadamente a sua caracterização por tipologia, massa e poder calorífico inferior, bem como alargar o âmbito de estudo às treze centrais termoelétricas que se encontram planeadas.

Referências Bibliográficas

Abelha P.; Gulyurtlu I.; Cabrita I. (2008). *Release Of Nitrogen Precursors From Coal And Biomass Residues*. Energy & Fuels. 22, p. 363–371.

Alto Representante/ Comissão Europeia. (14 de Março de 2008). *Alterações Climáticas e Segurança Internacional*.

APA. (2012). *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases 1990 – 2010. Submitted under the Unites Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora.

APA. (2011). *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases 1990 – 2009. Submitted under UNFCCC*. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora.

APA. (2010). *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990 – 2008. Submitted under the Unites Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*. Agência Portuguesa do Ambiente. Amadora.

APREN. (2010). *Roteiro Nacional das Energias Renováveis – Aplicação da Diretiva 2009/28/CE*. Associação de Energias Renováveis.

Araújo, D. S. S. (2008). *Co-combustão de biomassa e carvão em Leito fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, dioxinas e furanos e material particulado*. Tese de Mestrado em Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.

Associação para a competitividade da Indústria da Fileira Florestal (AIFF) (2010). *Relatório de Caracterização da Fileira Florestal 2010*. Portugal.

Azzi, M.; Johnson, G.M.; Cope, M. (1992). *An introduction to the generic reaction set photochemical smog mechanism*. Proceedings of the 11th International Clean Air and Environment Conference, Brisbane. Clean Air Society of Australia & New Zealand.

Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC Taylor & Francis. Pág. 59-100, 173-207, 359-380, 417-436.

Borrego, C., Miranda, A.I., Ferreira, J., Tchepel, O., Monteiro, A., Dias, D., Ribeiro, I., Tavares, R., Barbedo, P. (setembro 2009) *Melhoria do atual inventário de emissões de poluentes atmosféricos da Região Norte*. Universidade de Aveiro. AMB – QA, Aveiro, Portugal. 202 p.

Borrego, C., Monteiro, A., Ferreira, J., Miranda, A.I., Costa, A.M., Carvalho, A.C., Lopes, M. (2008). *Procedures for estimation of modelling uncertainty in air quality assessment*. Environment International 34 (2008) 613-620.

BP. (Junho 2011). *BP Statistical Review of World Energy*.

Bridgwater A. (2003). *Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass*. Chemical Engineering Journal. Vol. 91 (2003). 84-93 pp.

CBE. (2008). *Utilização da biomassa florestal residual para o aproveitamento energético*. Centro da Biomassa para a Energia. 28 de outubro de 2008.

CCE. (26 de fevereiro de 2004). *Decisão da Comissão das Comunidades Europeias 130*. Jornal Oficial da União Europeia.

CCE. (2005). Comunicação da Comissão das Comunidades Europeias. *Plano de Acção Biomassa*. Bruxelas.

CCE. (2007a). Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu. *An Energy Policy for Europe*. COM (2007) 1 final. Bruxelas.

CCE. (2007b). *LIVRO VERDE: Adaptação às alterações climáticas na Europa – possibilidades de ação da União Europeia*. COM (2007) 354 final. Bruxelas.

CCE. (2008). Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. *As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa*. COM (2008). Bruxelas.

CCE. (2009). *LIVRO BRANCO: Adaptação às alterações climáticas: para um quadro de ação europeu*. COM (2009) 147 final. Bruxelas.

Comité Executivo da Comissão para as Alterações Climáticas (CECAC). (2010). *Nota Técnica Avaliação do estado de cumprimento com o Protocolo de Quioto*. Lisboa, Portugal.

Costa, J. (2006) *Caracterização de Resíduos Resultantes da Co-combustão de Biomassa e Carvão*, Dissertação de Mestrado, FCT/UNL.

Decreto-lei nº. 5/2011, de 10 de janeiro - estabelece as medidas destinadas a promover a produção e o aproveitamento de biomassa, para garantir o abastecimento das centrais dedicadas de biomassa florestal, fixando o incentivo à venda da eletricidade associado ao cumprimento dessas medidas.

Decreto-lei nº. 178/2006, de 5 de setembro – transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/12/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril, e a Directiva n.º 91/689/CEE, do Conselho, de 12 de dezembro, relativo ao regime geral de gestão de resíduos.

Decreto-Lei n.º 33-A/2005, de 16 de fevereiro – altera o Decreto-Lei n.º 189/88, de 27 de maio, revendo os fatores para cálculo do valor da remuneração pelo fornecimento da energia produzida em centrais renováveis entregue à rede do Sistema Elétrico Português (SEP).

Demirbas, A. (2004). *Combustion characteristics of different biomass fuels*. Progress in Energy and Combustion Science. 30 (2): 219-230.

Demirbas, A. (2005). *Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues*. Progress in Energy and Combustion Science. 31 (2): 171-192.

Diretiva 2009/28/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009 – Promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno de eletricidade.

DGRF. (2003). *Princípios de Boas Práticas Florestais*. Lisboa: Direção-Geral dos Recursos Florestais.

EDP (2012) *Rotulagem de Energia Elétrica*. EDP Serviço Universal, abril de 2012.

EDP – Produção Bioelétrica, SA. (2007). *Central Termoelétrica a Biomassa da Figueira da Foz*. Estudo de Impacte Ambiental. Resumo Não Técnico.

EEA. (2011f). *Air quality in Europe — 2011 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. ISBN: 978-92-9213-232-3

EEA. (2008a). *Energy and environment report 2008*. Copenhaga: Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

EEA. (2008b). *Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2008. ISBN 978-92-9167-372-8. 23-24 pp.

EEA. (2006). *Energy and Environmental in the European Union - Tracking progress towards integration*. Copenhaga: EEA Report nº.8/2006.

Ferreira, S.; Moreira, N.; Monteiro, E. (agosto de 2009). *Bioenergy overview for Portugal*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal. *Biomass & Bioenergy*. 33 (11): 1567-1576.

Figo, S. (2006). *EUBIONET II – Efficient trading of biomass fuels and analysis of fuel supply chains and business models for market actors by networking*. WP1: Current situation and future trends in biomass fuel trade in Europe – Country report of PORTUGAL, CBE.

Figueiredo, C. (outubro 2011). Relatório de Análise Estatística dos Dados de Qualidade do Ar, da Região Norte, em 2010. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N).

Franco, C.; Pinto, F.; Gulyurtlu, L.; Cabrita, L. (2003). *The study of reactions influencing the biomass steam gasification process*. *Fuel Processing Technology* 82: 835-842.

GREENPRO. (Janeiro de 2004). *Bioenergia – Manual sobre tecnologias, projeto e instalações*.

Gupta, C.K. & Sathiyamoorthy, D. (1999). *Fluid Bed Technology in Materials Processing*. New York: CRC Press LLC, cop. 512 p.

Hanna, S.R., Chang, J.C. (1993). *Hazardous gas model evaluation with field observations*. *Atmospheric Environment*, 27A, 2265-2285.

Hurley, P. (2008). *TAPM V4 – User Manual*. CSIRO – Marine and Atmospheric Research Internal Report nº 5. ISBN: 978-1-921424-73-1.

Hurley, P.; Physick, W.L.; Luhar, A.K.; Edwards, M. (2005a). *The Air Pollution Model (TAPM) Version 3. Part 2: Summary of Some Verification Studies*. CSIRO – Marine and Atmospheric Research. 39 pp.

Hurley, P. J.; Physick, W. L.; Luhar, A. K. (2005b). *TAPM: a practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling*. *Environmental Modelling & Software* 20, 737-752.

International Energy Agency. (2007). *World Energy Outlook 2004*. OECD/IEA. Paris, France.

- International Energy Agency. (2011). *Key World Energy Statistics*. OECD/IEA. France.
- Jenkins, B.M.; Bakker, R.R.; Wei, J.B. (1996). *On the Properties of Washed Straw*. *Biomass & Bioenergy*. 10: 177-200.
- Jenkins, B. M.; Baxter, L. L.; Miles, T. R.. (1998). *Combustion properties of biomass*. *Fuel Processing Technology*. 54 (1-3): 17-46.
- Khan, A.; Jong, W.; Jansens, P.; Spliethoff, H. (2009). *Biomass combustion in fluidized bed boilers - Potential problems and remedies*. *Fuel Processing Technology*. 90: 21-50.
- Knoef H.A.M. & Stassen H.E.M. (1995). *Energy generation from biomass and waste in the Netherlands: a brief overview and perspective*. *Renewable Energy*. 6, pp. 329-334.
- Lameiras, H. (2009). *Relatório da Qualidade do Ar na Região Centro 2009*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro.
- Loo, S. & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and Co-firing*. Earthscan. 23-55 pp.
- Lopes, M.; Tarelho, L.; Monteiro, A.; Cascão, P. (2012). *Exploração da biomassa florestal para fins energéticos em Aveiro*. Relatório Saída de Campo. Aveiro.
- Lourenço, A. (2011). *Valorização Energética de Biomassa: Contributo Energético e Ambiental*. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Matos, M.A.A. (1988). *Cinética da redução do óxido nítrico (NO) pelo coque em Leito Fluidizado*. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico.
- Make It Be (2010) *Decision Making and Implementation Tools for Delivery of Local & Regional Bio-energy Chains*. Report on Good Practices on Integrated Bioenergy Planning. Make It Be Project. 10-13 pp.
- McKendry, P. (Julho 2001). *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies*. Bioresource Technology. Elsevier.
- McKendry, P. (2002). *Energy production from biomass (part 1): overview of Biomass*. *Bioresource Technology*. 83: 37-46.
- Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional/ Instituto do Ambiente (MAOTDR/ IA). (março de 2006). *Estratégia Temática Sobre Poluição Atmosférica*. Instituto do Ambiente. Amadora.

Ministério da Economia da Inovação e do Desenvolvimento (MEID). (2010). *Plano Novas Energias ENE 2020*. Lisboa, Portugal.

MEE. (2008). *National Long-Term Programme to Encourage the Use of Biomass for the Period 2008-2020*. Sofia: Ministry of Economy and Energy.

Monteiro, A; *et al.* (2011). *Forest Biomass Resources For Industrial Energy Conversion In Portugal*. 19th European Biomass Conference and Exhibition. Berlim, Alemanha.

Monteiro, A. (2007). *Desenvolvimento de um sistema de avaliação e previsão da qualidade do ar para Portugal*. Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro.

Moreira, N. (2007). *Caracterização da combustão de carvões vegetais em leito fluidizado*. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.

Obernberger, I., Brunner, T., Barnthaler, G. (2006). *Chemical properties of solid biofuels - significance and impact*. Biomass & Bioenergy. 30 (11): 973-982.

Onay, O; Kockar, O. (2003). *Slow, fast and flashpyrolysis of rapeseed*. Renewable Energy (28). 2417 – 2433 pp.

Pereira, R. (2006). *Viabilidade Económica e Ambiental da Utilização de Biomassa em Centrais Térmicas em Portugal*. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Gestão e Políticas Ambientais.

Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis ao abrigo da Diretiva 2009/28/CE. (2010).

PORTUCEL VIANA ENERGIA – Empresa de Cogeração Energética, SA. (2003). *Central de Cogeração 2*. Estudo de Impacte Ambiental. Resumo Não Técnico.

Projeto Enersilva. (2007). *Enersilva – Promoção do uso da Biomassa Florestal para fins energéticos no sudoeste da Europa (2004-2007)*. Opal Publicidade S. A. ISBN: 978-972-96003-7-1.

Quaak, P.; Knoef, H.; Stassem, H. (1999). *Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies*. Washington D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, cop. 422.

REHES. (Março de 2007). *Renewable Energy for Heat Supply in Dwellings with Individual and Local Heating Systems. D6 – Report on the biomass and solar energy potential: Bulgaria, China, Romania, Turkey*.

- Rede Elétrica Nacional (REN). (2011). *Dados Técnicos 2011*. Valores Provisórios, REN, S.A. Lisboa. 1-3 pp.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 68/2005, de 17 de março – Aprova a criação do Sistema Nacional de Inventário de Emissões por Fontes e Remoções por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos (SNIERPA).
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 114/2005, de 15 de setembro – Aprova a Estratégia Nacional para as Florestas, anexa à presente resolução, da qual faz parte integrante.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 104/2006, de 23 de agosto – Aprova o Programa Nacional para as Alterações Climáticas de 2006 (PNAC 2006) e revoga a Resolução do Conselho de Ministros n.º 119/2004, de 31 de Julho.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 24/2010, de 1 de abril – Aprova a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas de 2010 (EN AAC).
- Rezaiyan, J.; Cheremisinoff, N. (2005). *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*. Taylor & Francis Group LCC.
- Ribeiro, I., Tavares, A.M., Sá, E., Lopes, M. (2011). *Impacts of Biofuels on Air Quality: Northern Portugal Case Study*. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Ribeiro, I. (2008). *Análise da Previsão da Qualidade do Ar em Portugal Continental durante 2007 – 2008*. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Seinfeld, J.; Pandis, S. (1998). *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, Inc. 1326 pp.
- Seixas, J, et al. (Novembro 2008). *Avaliação do Impacto da Proposta Energia-Clima da Comissão Europeia para Portugal*. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, D. F. R. (2009). *Efeito do envelhecimento da biomassa sobre as características do biocombustível*. Tese de Mestrado. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- SPCG – Sociedade Portuguesa de Cogeração Elétrica, SA. (2003). *Nova Central de Cogeração nas Instalações da Portucel em Setúbal*. Estudo de Impacte Ambiental. Resumo Não Técnico.
- Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Karlton, E., Lunnan, A., Mizaraite, D., et al. (2007). *Sustainable utilization of forest biomass for energy – Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries*. Biomass & Bioenergy 31, pp. 666-684.

Tarelho, L. (2001). *Controlo de emissões gasosas poluentes resultantes da combustão de carvão em Leito Fluidizado*. Tese de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.

Tarelho, L. (2008). *Tratamento Termoquímico de Resíduos*. Apontamentos de operações de tratamento de resíduos, Capítulo 2 - Módulo C-2, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

Tavares, A. (2011). *Impacte do biodiesel nas emissões e qualidade do ar da Região Norte*. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

Tejo Energia. (2010). *Sumário – Segurança e Ambiente 2010*.

Vilão, R; *et al.* (dezembro 2011). *Relatório de Estado do Ambiente 2011*. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento. Agência Portuguesa do Ambiente. ISBN: 978-972-8577-59-9.

Vilão, R; Venâncio, C; Sousa, A; Gervásio, I; Liberal, P; Carvalho, T. (dezembro 2010). *Relatório de Estado do Ambiente 2009*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Agência Portuguesa do Ambiente. ISBN: 978-972-8577-57-5.

Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E.; Ogada, T.; Siagi, Z. (2000). *Combustion of agricultural residues*. Progress in Energy and Combustion Science. 26: 1-27.

Yin, C.; Rosendahl, L.; Kaer, K. (2008). *Grate-firing of Biomass for Heat and Power Production*. Progress in Energy and Combustion Science. 34: 725-754.

Bibliografia informatizada

Autoridade Florestal Nacional (AFN), Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas (MADRP). (setembro de 2010). *5º Inventário Florestal Nacional*. [Consult. 15-02-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/ifn/florestat>>

APA. (s.d). *Alterações Climáticas*. [Consult. 15-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.apambiente.pt/politicasambiente/AlteracoesClimaticas/Paginas/default.aspx>>

Direção Geral de Energia e Geologia (julho de 2011). *Renováveis, estatísticas rápidas*. [Consult. 28-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.dgge.pt/aaaDefault.aspx?f=1&back=1&codigono=77387764AAAAAAAAAAAAAAAAAAAA>>

Direção Geral de Energia e Geologia (maio de 2006). *Estratégia Nacional para a Energia. As energias renováveis e a eficiência energética*. [Consult. 03-01-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.renae.com.pt/fich/22/060630DGGE.pdf>>

EEA. (2011a). *Total primary energy consumption by energy source in 2008, EU-27*. [Consult. 30-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/total-primary-energy-consumption-by-1>>

EEA. (2011b). *About Energy*. [Consult. 19-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/about-energy>>

EEA. (2011c). *Greenhouse gas emissions as tonnes CO₂-equivalent per person by country in 2008*. [Consult. 02-12-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/greenhouse-gas-emissions-as-tonnes>>

EEA. (2011d). *Greenhouse gas emissions in the EU-27 by sector in 2008*. [Consult. 23-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/greenhouse-gas-emissions-in-the>>

EEA. (2011e). *Policy Context*. [Consult. 23-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/air/policy-context>>

EEA. (2011g). *Climate Change Policies*. [Consult. 18-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/themes/climate/policy-context>>

EEA. (2011h). *Energy Policy Context*. [Consult. 16-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/energy-policy-context>>

EEA. (2002). *Global concentration and temperature change 2000-2100 (over the pre-industrial level)*. [Consult. 03-12-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/global-concentration-and-temperature-change-2000-2100-over-the-pre-industrial-level>>

EEA. (s.d). *Environmental Terminology and Discovery Service*. [Consult. 30-01-2012]. Disponível em: WWW: <URL: http://glossary.pt.eea.europa.eu/terminology/concept_html?term=biomassa>

Energias Endógenas de Portugal (EEP). (s.d). *Base de dados de fontes renováveis de energia*. [Consult. 20-04-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://e2p.inegi.up.pt/index.asp>>

European Monitoring and Evaluation Programme/European Environmental Agency. (2009). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009*. Technical report No 9/2009. [Consult. 15-05-2012].

Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>>

Eurostat. (2011a). *Gross inland energy consumption, by fuel*. [Consult. 03-12-2011]. Disponível em: WWW:<URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdcc320&plugin=1>>

Eurostat. (2011b). *Total Greenhouse Gas Emissions*. [Consult. 01-12-2011]. Disponível em: WWW:<URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00072&plugin=1>>

Eurostat. (2012). *Renewable energy primary production: biomass, hydro, geothermal, wind and solar energy*. [Consult. 29-01-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=ten00082>>

LPDAAC. (s.d). [Consult. 12-05-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/>>

Ministério da Energia e Inovação (MEI). (s.d.). *Energia*. [Consult. 16-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.min-economia.pt/innerPage.aspx?idCat=51&idMasterCat=13&idLang=1>>

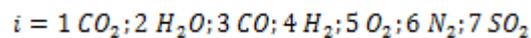
UCAR. (s.d). *Global Warming and Climate Change*. [Consult. 21-11-2011]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www2.ucar.edu/climate/faq>>

UCAR. (s.d). [Consult. 12-05-2012]. Disponível em: WWW: <URL: <http://dss.ucar.edu/catalogs/oceanlists/ocean.html>>

Anexos

(I) Balanço mássico elementar (n_i)

Os gases de combustão são essencialmente CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 , mas podem ainda possuir HC, H_2 , CO (estes motivados essencialmente por combustão incompleta), NO_x , SO_2 , HCl, HF e certos micropoluentes orgânicos (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos, entre outros). Para o balanço mássico global estes últimos componentes apresentam pouco interesse, face à sua importância poluente. Para efeito do balanço mássico, adotou-se as seguintes referências para cada produto gasoso i :



Indicando-se a sua abundância por unidade de biomassa, em base seca:

$$n_i = \left[\frac{\text{kmol de gás } i \text{ produzido}}{\text{kg}_{\text{biomassa}}} \right]$$

A base de cálculo do balanço mássico elementar, em kmol de elemento i por kg de biomassa seca, teve como base o seguinte cálculo (Tarelho, 2008):

Para o carbono (C):

$$\frac{w_{CR}}{12} = n_{1R} + n_{3R} + \left[\frac{w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER}}{12} \right]$$

(Equação 18)

Para o hidrogénio (H₂):

$$\frac{w_{HR}}{2} + \frac{w_{WR}}{18} + \frac{w_a \times w_{VA} \times 7,66}{32} = n_{2R} + n_{4R}$$

(Equação 19)

Para o oxigénio (O₂):

$$\frac{w_{OR}}{32} + \frac{0,5 \times w_{WR}}{18} + \frac{w_a \times [1 + 0,5 \times w_{VA} \times 7,66]}{32} = n_{1R} + \frac{n_{2R}}{2} + \frac{n_{3R}}{2} + n_{5R} + n_{7R}$$

(Equação 20)

Para o azoto (N₂):

$$\frac{w_{NR}}{28} + \frac{w_a \times 3,76}{32} = n_{6R}$$

(Equação 21)

Para o enxofre (SO₂):

$$\frac{w_{SR}}{32} = n_{7R}$$

(Equação 22)

E ainda para a parte inorgânica, ou seja, a cinza, em kg cinzas por kg de biomassa seca:

$$w_{ZR} = w_{ZV} \times W_{VR} + w_{ZE} \times W_{ER}$$

(Equação 23)

Resolvendo o sistema de equações anteriormente apresentado obteve-se a abundância dos componentes maioritários (n_i) para o processo de combustão, cujos resultados se apresentam na Tabela 24. É ainda de salientar que uma vez que os cálculos tiveram como base o pressuposto da oxidação completa dos elementos químicos que compõem a biomassa, tal significa que n_{CO} , n_{H_2} e w_{CE} não apresentam qualquer quantificação. Cumulativamente admitiu-se que o ar de combustão se apresenta seco, isto é, que a razão mássica da humidade no ar de combustão (W_{VA}) é inexistente, bem como, a inexistência de material volante ($W_{VR} = 0$). Além disso, considerou-se um valor de razão mássica de humidade da biomassa em base seca, W_{WR} , de $0,5 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{B}}$.

Tabela 24 – Gases secos produzidos no processo de combustão da biomassa ($\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ B bs}$).

	n_{CO_2}	n_{H_2O}	n_{CO}	n_{H_2}	n_{O_2}	n_{N_2}	n_{SO_2}
Casca e Ramos de Eucalipto	0,0399	0,0595	0,00	0,00	0,0218	0,2455	0,00

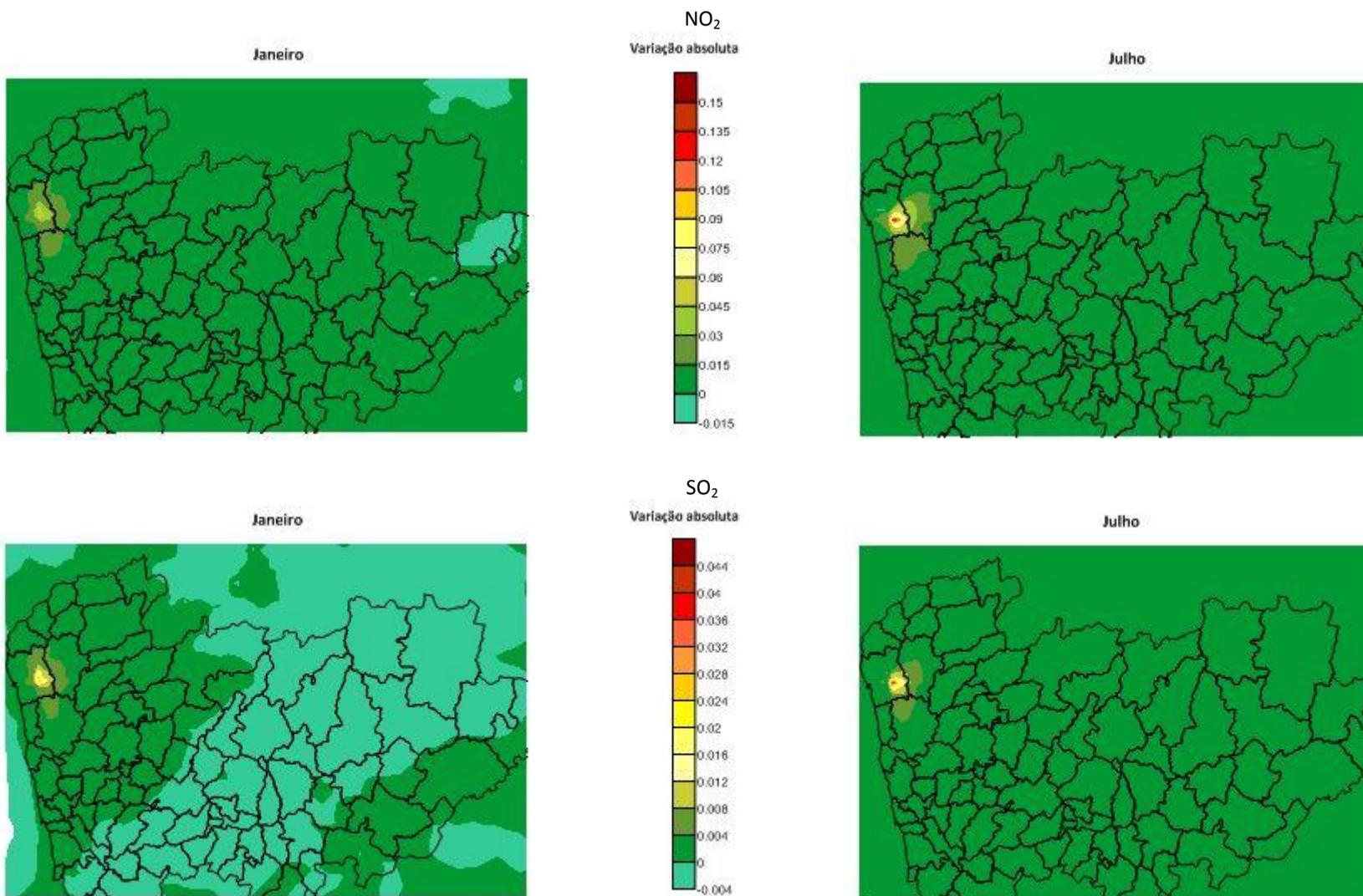
(II) Variação das concentrações médias mensais em termos absolutos

Figura 49 – Variação das concentrações médias mensais de NO_2 e SO_2 , em termos absolutos, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.

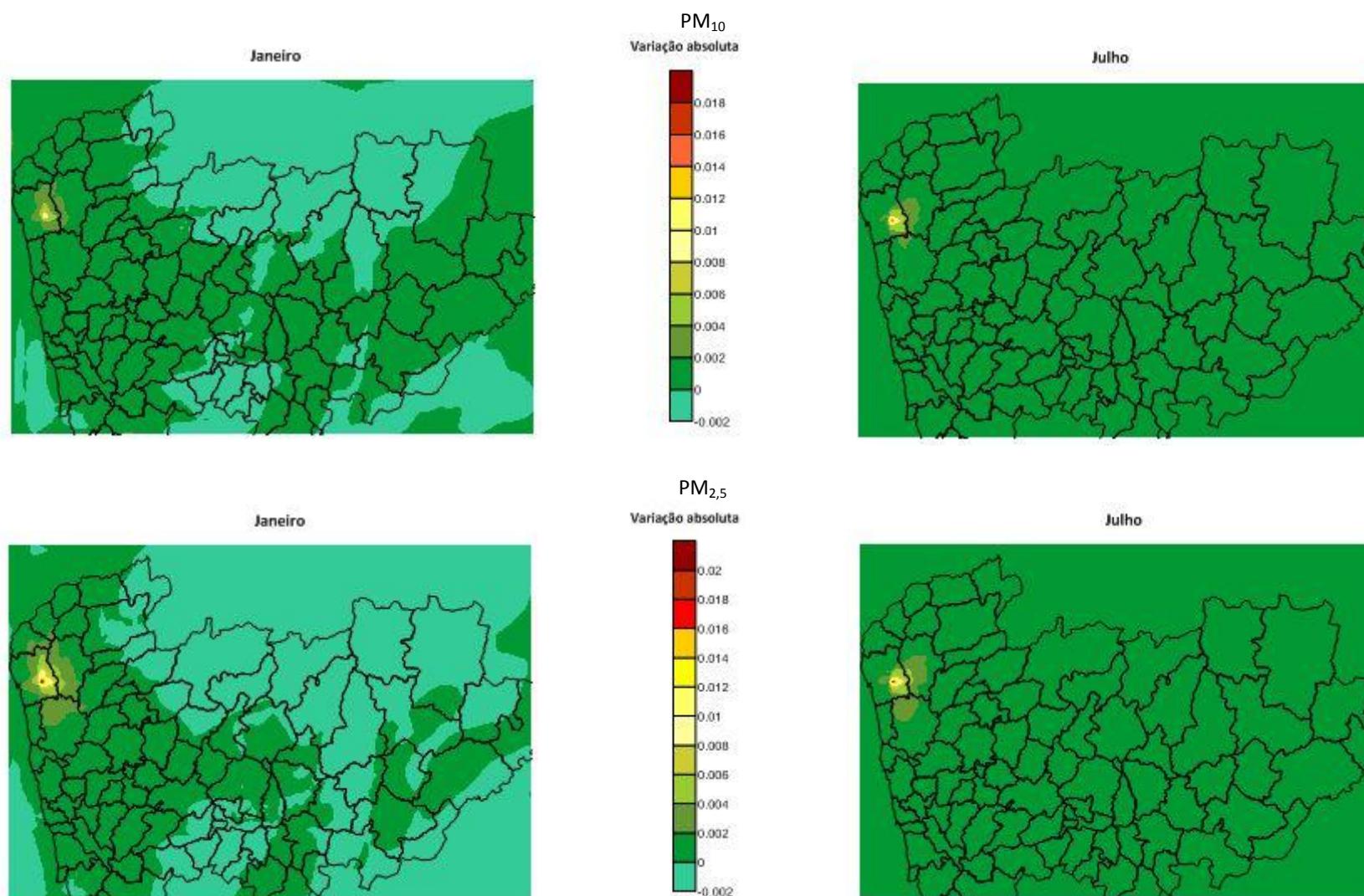


Figura 50 – Variação das concentrações médias mensais de PM_{10} e $PM_{2,5}$, em termos absolutos, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.

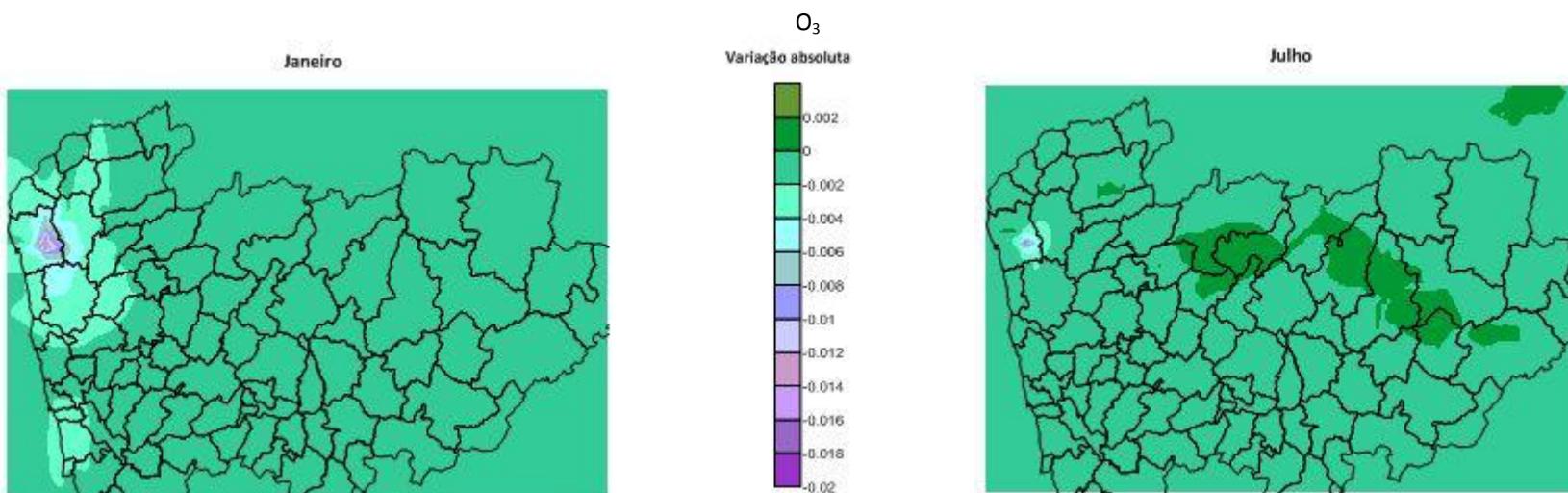


Figura 51 - Variação das concentrações médias mensais de O_3 , em termos absolutos, entre os cenários definidos, para os meses de janeiro e julho.