



Ana Luísa
Miroto Lourenço

**Valorização Energética de Biomassa: Contributo
Energético e Ambiental.**



**Ana Luísa
Miroto Lourenço**

Valorização Energética de Biomassa: Contributo Energético e Ambiental

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

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto PTDC/AAC-AMB/098112/2008, (Bias-to-soil) Cinzas de biomassa: Características em relação à sua origem, tratamento e aplicação no solo”, financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

“Dedico este trabalho à minha família e amigos que sempre me encorajaram e apoiaram ”

o júri

presidente

Profa. Doutora Ana Paula Duarte Gomes

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

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

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

Profa. Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes

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

agradecimentos

Um agradecimento muito especial ao Professor Luís Tarelho e à Professora Myriam por todo o conhecimento partilhado.

Ao Eng. João Rebola e Eng. Pedro Jordão que tornaram possível a realização deste trabalho.

À Elisabete e ao Zé, pela ajuda no trabalho de laboratório.

Ao Eduardo, pela compreensão e ajuda nos momentos mais difíceis.

À minha Beli, pela boa disposição e encorajamento.

Aos meus queridos amigos, Pipas, Carla, Rubi, Juaninha, Joãozinho, Catarina e João Rezingão, pela amizade e pelo incentivo na realização do trabalho.

Por fim, não menos especial, ao Indalécio e à Deolinda, e ao David, por tudo.

palavras-chave

Biomassa, Electricidade, Emissões de CO₂

resumo

A combustão de biomassa em centrais termoeléctricas é uma forma de aumentar a produção nacional de energia com base em recursos renováveis e reduzir as emissões de CO₂ de origem fóssil. A combustão de biomassa é considerada neutra do ponto de vista de balanço ao CO₂.

O presente trabalho teve como objectivo avaliar o desempenho energético e ambiental de uma central termoeléctrica a biomassa. Para o efeito foi estudada uma central termoeléctrica a biomassa localizada na região centro de Portugal.

O objectivo proposto foi atingido, e incluiu a análise dos seguintes itens: 1) disponibilidade de biomassa na zona de influência da central termoeléctrica, 2) caracterização das condições de operação da central, onde se incluiu a análise das propriedades da biomassa utilizada na combustão, conversão energética e eficiência do sistema, 3) contributo energético e ambiental da central.

A disponibilidade de biomassa florestal na zona envolvente à central foi estimada em de 212 mil ton·ano⁻¹, representando 62% das necessidades de combustível da central termoeléctrica em estudo.

A biomassa analisada durante o período de estudo apresentou um teor de humidade de 30 a 66%, percentagem de inertes de 1 a 24%, e poder calorífico de 17,3 a 17,9 MJ·kg⁻¹. Da análise da conversão energética, para as condições de operação avaliadas, observou-se que entre 7,3 a 8,9% da energia total fornecida é perdida nos produtos de combustão, 85,4 a 91,8% da energia térmica útil produzida é fornecida pela biomassa, sendo a restante proveniente do reaproveitamento de calor disponível no circuito interno água/vapor da central. Relativamente à eficiência térmica da instalação verificaram-se valores na gama 81,3 a 86,3%, e 31 a 32% de eficiência eléctrica, calculada com base na energia fornecida pela biomassa.

Quanto ao contributo energético e ambiental da central para o sector electroprodutor português, relativamente às condições de operação analisadas, a central pode produzir anualmente de 183 a 222 GWh, evitando a emissão de 38.241 ton de CO₂ de origem fóssil.

keywords

Biomass, Electricity, CO₂ Emissions

abstract

Biomass combustion in thermoelectric power plants is a one way to increase domestic production of energy based on renewable resources and reduce CO₂ emissions. Combustion of biomass is part of a carbon neutral balance.

The objective of this study regards the assessment of the energetic and environmental contribution of a thermoelectric biomass power plant. For this purpose, a study performed for a thermoelectric power plant located in the center region of Portugal was taken.

The proposed objective was achieved by the following point's analysis: 1) assessment of biomass availability in the surrounding influence area of the power plant, 2) characterization of the power plant operating conditions, which included the analysis of properties of biomass used in combustion, energy conversion and system efficiency, 3) energetic and environmental contribution of the thermoelectric power plant.

The availability of forest biomass in the surrounding area of the thermoelectric power plant was estimated at around 212 thousand ton·year⁻¹, representing 62% of its fuel needs.

During the study period, analyzed biomass had a moisture content of 30 to 66%, 1 to 24% of inorganic content and low calorific value from 17.3 to 17.9 MJ·kg⁻¹. The analysis of energy conversion revealed that, for the considered operating conditions, 7,3 to 8,9% of the total supplied energy is lost through combustion products, 85,5 to 91,8% of usable thermal energy comes from biomass, and the rest from reused heat coming from a water/steam internal circuit. As for the overall thermal efficiency, results were comprehended between 81,3 and 86,3%, and regarding electrical efficiency 31 to 32%, with calculations being based on the amount of energy supplied by biomass.

Regarding energy and environmental contributions for the Portuguese sector of electricity production, for the analyzed operating conditions, the thermoelectric power plant can annually produce 183 to 222 GWh, avoiding the emission of 38.241 tons of fossil CO₂.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Lista de abreviaturas	vii
Nomenclatura	viii
1 Introdução	1
1.1 Objectivos	3
1.2 Metodologia.....	3
2 Energia e Ambiente	4
2.1 Caracterização do Sector Eléctrico Português	6
2.1.1 Evolução Histórica	6
2.1.2 Consumos.....	7
2.1.3 Produção de Electricidade.....	8
2.1.4 Importação e fontes de energia	11
2.2 Estratégias no Âmbito das Alterações Climáticas	12
2.2.1 Internacionais	12
2.2.2 Comunitárias.....	16
2.2.3 Nacionais	18
2.3 Energias Renováveis no Contexto das Estratégias Energéticas	20
2.3.1 Instrumentos Políticos para a Promoção de Energias Renováveis na UE	21
2.3.2 Instrumentos Políticos para a Promoção de Energias Renováveis em Portugal.....	28
2.3.3 Produção de Calor e electricidade a Partir de Biomassa em Portugal	34
3 Biomassa	38
3.1 Processos de Conversão de Biomassa	39
3.2 Processos de Combustão de Biomassa.....	42
3.2.1 Combustão de Biomassa em Sistema de Grelha	43
3.2.2 Combustão de Biomassa em Sistema de Leito fluidizado	44
3.3 Biomassa Susceptível de ser Utilizada para a Produção de Energia Eléctrica	45
3.3.1 Resíduos Florestais	46
3.3.2 Resíduos Agrícolas.....	48
3.3.3 Resíduos Agro-pecuários	48
3.4 Caracterização das Disponibilidades de Biomassa.....	49
3.4.1 Disponibilidade Nacional	49
3.4.2 Disponibilidade Local.....	53
4 Caso de Estudo	54
4.1 Características da Central Termoeléctrica	55
4.1.1 Operações na Unidade de Co-Geração	56

4.1.2	Utilização de Recursos	58
4.1.3	Produção de Efluentes	59
4.2	Conversão Energética da Biomassa.....	60
4.2.1	Caracterização da Biomassa.....	60
4.2.1.1	Recolha e Nomenclatura das Amostras	60
4.2.1.2	Teor de Humidade Total	64
4.2.1.3	Teor de Inertes na Biomassa.....	73
4.2.1.3.1	Fracção Mássica de Inertes	73
4.2.1.3.2	Granulometria dos Inertes	76
4.2.1.4	Teor de Cinzas a 550 °C.....	79
4.2.1.5	Composição Elementar.....	83
4.2.1.6	Poder Calorífico	84
4.2.2	Caracterização dos Produtos de Combustão.....	85
4.2.2.1	Granulometria	86
4.2.2.2	Teor de Inqueimados	87
4.2.3	Balanço Mássico.....	88
4.2.4	Balanço Energético.....	100
4.2.5	Eficiência energética da instalação	105
4.2.6	Emissões de CO ₂	106
5	Conclusão	111
6	Bibliografia	113
7	Webgrafia	117

Índice de Figuras

Figura 2.1: Evolução do consumo final de energia por sector em Portugal (EUROSTAT, 2010).	7
Figura 2.2: Evolução do consumo de energia primária em Portugal (URL01).	8
Figura 2.3: Evolução de geração de energia eléctrica em Portugal (adaptado de EUROSTAT, 2010).	9
Figura 2.4: Mapa da distribuição da produção termoeléctrica em Portugal (EDP, 2010).....	10
Figura 2.5: Produção bruta de energia eléctrica, em Portugal Continental (APA, 2010).	10
Figura 2.6: Produção doméstica, importação e energia primária em Portugal (APA, 2010).	11
Figura 2.7: Produção de electricidade renovável (não-hidroeléctrica) na UE-25 (1990-2005) (COM, 2006b).	26
Figura 2.8: Desenvolvimento histórico da geração de electricidade a partir de biomassa sólida, biogás e resíduos urbanos sólidos (biodegradáveis) na UE-25 para o período de 1990 até 2004 e extrapolação para 2010 assumindo uma taxa de crescimento de 19% (adaptado de COM, 2006c).	27
Figura 2.9: Produção de energia renovável a partir de FER por distritos em 2009 (GWh) para Portugal continental (DGEG, 2010).....	33
Figura 2.10: Locais seleccionados para o concurso de centrais a biomassa florestal (Mateus, 2007).	35
Figura 2.11: Indústrias portuguesas com unidades de co-geração (DGRF, 2005).	36
Figura 2.12: Centrais termoeléctricas a biomassa florestal da EDP Bioeléctrica (URL10).	36
Figura 3.1: Ciclo do carbono da biomassa vegetal.	38
Figura 3.2: Classificação das tecnologias de conversão da biomassa.....	40
Figura 3.3: Tecnologias de conversão termoquímica de biomassa, produtos e uso final (Loo, 2008).	42
Figura 3.4: Sistema de combustão de grelha (grelha recíproca) (Yin, 2008).	43
Figura 3.5: Sistema de leito fluidizado (adaptado de Tarelho, 2008)	45
Figura 3.6: Uso/ocupação do solo em Portugal Continental (adaptado de AFN, 2010).	50
Figura 3.7: Área de abastecimento da central termoeléctrica a biomassa (IFN5 (2005/06) da autoria da Autoridade Florestal Nacional e processamento CELPA).	53
Figura 4.1: Diagrama da configuração das instalações da central termoeléctrica.	55
Figura 4.2: Diagrama do sistema de recepção, preparação e armazenamento de biomassa.	56
Figura 4.3: Diagrama do processo de produção de calor e electricidade na central termoeléctrica a biomassa.	58
Figura 4.4: Fossa de descarga da biomassa externa.	62
Figura 4.5: Casca de eucalipto (A), casca de pinheiro (B), bicadas de pinheiro (C), bicadas de eucalipto (D), estilha de eucalipto (E), estilha de pinheiro (F).	64
Figura 4.6: Quadripartição de uma amostra de biomassa.	65

Figura 4.7: Humidade total, em base tal e qual, para a biomassa mistura.....	67
Figura 4.8: Secagem ao ar para a biomassa interna e mistura.....	68
Figura 4.9: Percentagem de humidade total, em base tal e qual.....	69
Figura 4.10: Secagem ao ar, expressa através da razão mássica de humidade, $W_{wR,i}$ [kg H ₂ O/kg _{biomassa} bs].....	70
Figura 4.11: Teor de inertes nas amostras de biomassa mistura, [%m/m].....	74
Figura 4.12: Teor de inertes nas amostras de biomassa interna, [%m/m].....	75
Figura 4.13: Teor de inertes na biomassa, expresso em percentagem [% m/m].....	75
Figura 4.14: (Continuação).....	76
Figura 4.15: Granulometria dos inertes da biomassa interna, [%m/m].....	77
Figura 4.16: Granulometria dos inertes da biomassa externa, [%m/m].....	77
Figura 4.17: Granulometria dos inertes da biomassa mistura, [%m/m].....	78
Figura 4.18: Granulometria dos inertes da biomassa mistura e areia do leito, [%m/m].....	78
Figura 4.19: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa interna.....	80
Figura 4.20: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa mistura.....	81
Figura 4.21: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa amostrada.....	82
Figura 4.22: Representação gráfica da distribuição dimensional das escórias.....	86
Figura 4.23: Teor de inqueimados nas cinzas volantes [% m/m].....	88
Figura 4.24: <i>Mix</i> de produção total da energia eléctrica comercializada em 2010 (EDP, 2011)...	107
Figura 4.25: Evolução mensal da energia eléctrica consumida, tendo por base o recurso energético utilizado para produção da energia eléctrica, em 2010 (EDP, 2011.....	108
Figura 4.26: Evolução mensal das emissões específicas em 2010 (EDP, 2011).	108

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Impactes ambientais associados às actividades de produção de eléctrica a partir de recursos naturais (adaptado de Antunes, 2003).	5
Tabela 2.2: Principais acontecimentos internacionais sobre alterações climáticas (adaptado de Lopes, 2004).	14
Tabela 2.3: Principais políticas e medidas para a redução de emissões de GEE na área da energia na UE (adaptado de CE, 2006).	17
Tabela 2.4: Contribuições por tipo de energia renovável na EU, cenário para 2010 (adaptado de COM, 1997).	23
Tabela 2.5: Metas indicativas para a produção de energia eléctrica a partir das fontes de energia renovável (RCM, 2003).	29
Tabela 2.6: Evolução do peso da produção de cada tecnologia no total da produção de energia renovável para Portugal Continental (DGEG, 2010).	33
Tabela 3.1: Rendimentos típicos (em base de madeira seca) obtidos a partir de diferentes tipos de pirólise da madeira (adaptado de Brigdwater, 2003).	41
Tabela 3.2: Origem da biomassa florestal (adaptado de CBE, 2009).	47
Tabela 3.3: Potencial energético real em biomassa animal (DGRF, 2005).	49
Tabela 3.4: Área de ocupação florestal por espécies (em 10 ³ ha), em Portugal continental (adaptado de AFN, 2010).	51
Tabela 3.5: Biomassa total produzida no coberto florestal nacional (kton) (adaptado de AFN, 2010).	51
Tabela 3.6: Potencial disponível de resíduos da floresta e da transformação da madeira, para produção energética (adaptado de ADENE & INET, 2001).	52
Tabela 4.1: Tipos de biomassa recolhidos no período de estudo.	63
Tabela 4.2: Teor de cinzas para os diferentes componentes no pinheiro e eucalipto, em base seca (adaptado de Silva, 2009).	80
Tabela 4.3: Composição elementar em percentagem mássica, [%m/m] (CBE, 2009).	83
Tabela 4.4: Composição elementar da amostra Ref (Silva, 2009).	84
Tabela 4.5: Composição elementar, [%m/m], para as amostras seleccionadas.	84
Tabela 4.6: Poder calorífico [MJ·kg ⁻¹] para as amostras seleccionadas.	85
Tabela 4.7: Parâmetros relativos à biomassa para as condições de operação consideradas.	88
Tabela 4.8: Caudal mássico de biomassa, em base seca e sem inertes.	89
Tabela 4.9: Caudal mássico de ar de combustão.	93
Tabela 4.10: Eficiência de conversão de carbono [%] e produtos sólidos gerados [ton.dia ⁻¹].	96
Tabela 4.11: Gases húmidos produzidos no processo de combustão (PTN) [kmol·kg ⁻¹ R bs].	97
Tabela 4.12: Razão de gases húmidos e caudal.	98
Tabela 4.13: Razão de gases secos e caudal.	99

Tabela 4.14: Caudal mássico de recursos utilizados e produtos gerados em ton.hora^{-1}	100
Tabela 4.15: Potência térmica na água comprimida para a geração de vapor [MJ.s^{-1}].	103
Tabela 4.16: Potência térmica no vapor [MJ.s^{-1}].	103
Tabela 4.17: Balanço energético a sistema de combustão [MJ.s^{-1}].	104
Tabela 4.18: Eficiência energética da instalação para as condições de operação consideradas.	106

Lista de abreviaturas

CdP	Conferência das Partes
CNUAD	Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento
Ext	Biomassa externa
ECCP	Plano Europeu para as Alterações Climáticas
FER	Fontes de Energia Renovável
Int	Biomassa interna
IPPC	Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas
GEE	Gases com efeito de estufa
GWp	Giga watt fotovoltaico
GWth	Giga watt térmico
Mix	Biomassa de mistura
PRE	Produção em regime especial
PQ	Protocolo de Quioto
TEP	Toneladas equivalentes de petróleo
UE	União Europeia
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas
WMO	Organização Meteorológica Internacional

Nomenclatura

η	Eficiência térmica	[%]
ε	Eficiência eléctrica	[%]
ΔH	Entalpia	[J.kg ⁻¹ R,bs]
γ_i	Composição molar do gás i	[kmol i.kmol ⁻¹ mistura de gases]
<i>bs</i>	Base seca	
<i>btq</i>	Base tal e qual	
$\bar{c}_{p,j}$	Calor específico médio	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
\dot{m}	Caudal mássico	[kg R.s ⁻¹]
M_j	Fracção molar do elemento químico j	[kg _j .kmol ⁻¹],bs]
N_j	Número de moles de j no combustível R	[kmol _j .kg ⁻¹ R,bs]
G_t	Razão mássica de gases de combustão	[kg gases.kg ⁻¹ R]
H_{Total}	Teor de Humidade Total	[% , m/m]
H_{Vapor}	Entalpia específica do vapor	[MJ.kg ⁻¹]
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior	[MJ.kg ⁻¹]
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior	[MJ.kg ⁻¹]
Q_A	Potência fornecida pela água comprimida	[MJ.s ⁻¹]
Q_{AC}	Potência fornecida pelo ar de combustão	[MJ.ks ⁻¹]
Q_{Ent}	Potência à entrada do sistema de combustão	[MJ.s ⁻¹]
Q_I	Potência fornecida pelo material inerte	[MJ.s ⁻¹]
Q_{GE}	Potência perdida pelos gases de exaustão	[MJ.s ⁻¹]
$Q_{Saída}$	Potência à saída do sistema de combustão	[MJ.s ⁻¹]
Q_V	Potência perdida pelas cinzas volantes	[MJ.s ⁻¹]
Q_{Vapor}	Potência no vapor de alta pressão	[MJ.s ⁻¹]
<i>R</i>	Resíduo combustível (biomassa)	
T^0	Temperatura de referência	[K]

W_{aA}	Necessidades de ar total	[kg ar actual.kg ⁻¹ R,bs]
W_{jR}	Razão ponderal do combustível R, no elemento j	[kg _j .kg ⁻¹ R,bs]
w_{jR}	Composição ponderal do combustível R, no elemento j	[kg _j .kg ⁻¹ R,bs]
W_S	Necessidades estequiométricas de oxigénio	[kg O ₂ estequimétrico. Kg ⁻¹ R,bs]
W_{SA}	Necessidades estequiométricas de ar de combustão	[kg O ₂ estequimétrico. Kg ⁻¹ R,bs]
W_{VA}	Razão mássica de água no ar de combustão	[kg H ₂ O.kg ⁻¹ ar seco]
W_{WR}	Razão mássica da humidade	[kg H ₂ O. Kg ⁻¹ R,bs]
$Y_{S,j}$	Consumo estequiométrico de O ₂	[kmol O ₂ .kmol ⁻¹ j,bs]
Z	Excesso de ar	[%]

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de electricidade a partir de recursos energéticos renováveis tem sido uma prioridade comunitária, não só por razões económicas mas também ambientais.

“Está a aumentar a procura global de energia. Prevê-se que a procura mundial – e as emissões de CO₂ - aumentem cerca de 60 % até 2030. O consumo global de petróleo aumentou 20% desde 1994, e prevê-se que a procura global de petróleo cresça 1,6% ao ano”. O crescente aumento do preço dos combustíveis fósseis e a dependência energética da União Europeia (UE), que poderá atingir nos próximos 20 a 30 anos os 70%, levaram à elaboração de estratégias para a redução da dependência energética Comunitária (COM, 2006a).

A 27 de Setembro de 2001, o Parlamento Europeu e o Conselho da UE aprovaram a Directiva 2001/77/CE decretando como mediada prioritária a exploração das fontes de energia renovável, estabelecendo uma quota indicativa de 22,1% de electricidade produzida a partir de fontes renováveis no consumo total de electricidade da UE.

Aliada à problemática da dependência energética, em Janeiro de 2007, a Comissão lançou uma nova “Política Energética para a Europa” que surge da necessidade de integrar as políticas energéticas e ambientais, visto o sector energético representar 80% do total das emissões de gases com efeito de estufa na UE. A nova “Política Energética para a Europa”, legislada através da Directiva 2009/28/CE, de 23 de Abril, estabeleceu uma meta vinculativa de 20% para as energias renováveis em 2020 (CE, 2009).

Durante a presidência portuguesa da UE foi lançado um Plano Tecnológico para a Energia e a Estratégia de Lisboa – Novo Ciclo passou a integrar objectivos ambiciosos de desenvolvimento das energias renováveis, promoção da eficiência energética e redução de emissões de gases com efeito de estufa. Tendo em conta os novos objectivos para a política energética nacional e a necessidade de criar um novo enquadramento global do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, o Governo estabelece uma Estratégia Nacional para a Energia com o horizonte de 2020 (MEID, 2010).

Esta nova estratégia nacional para a energia, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros nº 29/2010, de 15 de Abril, adapta e actualiza a estratégia definida pela Resolução do Conselho de Ministros nº 169/2005, de 24 de Outubro, definindo uma agenda para a competitividade, o crescimento e a dependência energética e financeira do

país através da aposta nas energias renováveis, assegurando a segurança do abastecimento e a sustentabilidade económica e ambiental, contribuindo para a redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

No sector das energias renováveis e de acordo com os objectivos definidos na nova estratégia para a energia, Portugal estabeleceu metas para que em 2020, 60% da electricidade produzida, e 31% do consumo final tenha origem em fontes renováveis. As metas previstas concentram-se sobretudo nos recursos hídrico, eólico, solar e biomassa (MEID, 2010).

A utilização de biomassa para a produção de energia térmica e eléctrica constitui uma solução interessante para o aumento da produção nacional de energia com base em recursos endógenos. A “Estratégia Nacional para a Energia” previu um aumento de 67% da capacidade instalada em 2010 (RCM, 2005).

Neste âmbito, o presente trabalho pretende analisar a contribuição de uma central termoeléctrica a biomassa para o sector electroprodutor português, não só em termos da electricidade produzida como também na emissão de GEE.

1.1 OBJECTIVOS

O objectivo principal do trabalho consiste na avaliação do desempenho energético e ambiental de uma central termoelétrica a biomassa. Este objectivo geral será atingido mediante concretização de um conjunto de objectivos específicos e que incluem:

- Avaliação da disponibilidade de biomassa na zona envolvente à central termoelétrica em causa;
- Caracterização das condições de operação na central termoelétrica a biomassa;
- Contributo energético e ambiental da eléctrica produzida no contexto do sector electroprodutor nacional.

Para o efeito, o trabalho teve como caso de estudo uma Central Termoelétrica a Biomassa localizada na região centro do país.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para atingir os objectivos propostos apresenta-se seguidamente em vários passos:

- Pesquisa e análise bibliográfica sobre as estratégias e instrumentos políticos no contexto das energias renováveis no sector eléctrico;
- Pesquisa e análise bibliográfica sobre a utilização da biomassa para a produção de energia eléctrica;
- Caracterização e análise das disponibilidades de biomassa a nível nacional e local;
- Análise do processo de funcionamento de uma central termoelétrica, contemplando os recursos utilizados, a produção de efluentes e conversão energética da biomassa.
- Contributo da energia eléctrica produzida e as emissões associadas no contexto do sector electroprodutor nacional.

2 ENERGIA E AMBIENTE

A análise integrada energia e ambiente é um campo em evolução constante, tendo em conta que o sector energético é responsável por diversos e significativos impactes ambientais. Se pensarmos em temas como a depleção de recursos naturais, a poluição atmosférica, a acidificação dos solos e do meio aquático ou as alterações climáticas, o sector energético é de extrema importância. Por um lado temos os sectores produtores de calor e electricidade e por outro o sector utilizador final de energia útil, como os transportes, sector residencial e serviços, e industrial. As actividades do sector de produção de calor e electricidade susceptíveis de causar impactes incluem o transporte de combustíveis, a conversão energética e o transporte e distribuição de energia térmica ou eléctrica (Antunes, 2003).

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos impactes ambientais associados às actividades de produção eléctrica a partir de diferentes recursos naturais.

No âmbito da produção de calor e electricidade, as centrais termoeléctricas convencionais (carvão, fuelóleo, gás natural e gasóleo) são responsáveis pelos impactes ambientais mais significativos no que diz respeito à emissão de gases com efeito de estufa (CO_2), acidificação dos solos e do meio aquático (SO_2 , NO_x), e poluição atmosférica local (SO_2 , NO_x e partículas).

Alternativamente à produção de energia eléctrica e calor a partir de combustíveis fósseis, a utilização de recursos energéticos renováveis tem suscitado o interesse das sociedades modernas. Entre esses recursos encontra-se a energia eólica, solar, hídrica, das ondas e biomassa. No entanto, a exploração destes recursos não está isenta de efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Pela análise da Tabela 2.1, a energia eólica é de todos os recursos renováveis o que produz menor impacte ambiental, salientando-se apenas um impacte significativo na intrusão visual. No caso da energia solar podem ser identificados como impactes significativos a produção de resíduos sólidos e perigosos, riscos químicos e intrusão visual.

Tabela 2.1: Impactes ambientais associados às actividades de produção de eléctrica a partir de recursos naturais (adaptado de Antunes, 2003).

Impactes Ambientais	Produção											Transporte e Distribuição	
	Termo-elétrica	Nuclear	Incineração de RSU	Mini-hídricas	Grandes aproveitamentos		Solar		Eólica	Biomassa	Geotérmica		
					Fio de água	Albufeiras	Fotovoltaica	Térmica Elétrica					
Alterações Climáticas	■		■				■				■	■	■
Acidificação	■		■								■	■	
Poluição Atmosférica Local	■		■								■	■	
Ozono Troposférico	■		■								■		
Fluxos Hidrológicos				■	■	■					■	■	
Poluição Localizada de Águas Superficiais e Subterrâneas	■	■	■		■	■		■			■	■	■
Perda de Biodiversidade		■		■	■	■			■	■			■
Degradação do Solo	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■
Degradação das Zonas Costeiras e Ecossistemas Marinhos	■	■			■	■					■		
Depleção de Recursos Abióticos	■	■					■	■					
Resíduos Sólidos e Perigosos	■	■	■				■	■					
Saúde Humana		■	■								■		
Acidentes Graves	■	■					■				■	■	■
Riscos Químicos							■	■			■		
Intrusão Visual	■	■	■	■	■	■	■	■			■	■	■
Ruído	■										■	■	■
Impactes Socio-económicos					■	■							

Sem significado	Pouco Significativo	■	Significativo	■	Muito Significativo	■
-----------------	---------------------	---	---------------	---	---------------------	---

Os aproveitamentos hidroeléctricos apresentam um impacto negativo significativo tanto ao nível dos ecossistemas aquáticos, por efeito de barreira, como na degradação da qualidade da água, devido à diminuição do oxigénio dissolvido e ao enriquecimento em nutrientes. Os grandes aproveitamentos hidroeléctricos, apresentam ainda como consequência a inundação de elevadas áreas, afectando significativamente a ocupação de solo e a perda de biodiversidade.

Os impactes associados à utilização de biomassa na produção de energia reflectem-se, maioritariamente, na perda de biodiversidade associada à destruição de vegetação para culturas de energia.

Associadas às actividades de transporte e distribuição de electricidade podem ser identificados efeitos nocivos sobre o ambiente, como por exemplo, ocupação de solo, intrusão visual e ruído associados à instalação de linhas aéreas (Antunes, 2003).

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SECTOR ELÉCTRICO PORTUGUÊS

2.1.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Portugal é um dos países europeus com menor consumo de energia per capita - 1,72 tep/hab em 2008 (Eurostat, 2010), tal não acontece por se tratar de um país particularmente eficiente do ponto de vista energético, mas sobretudo devido à ausência de equipamentos específicos que só estão ao alcance dos países mais desenvolvidos.

Trata-se de um país com uma elevada dependência energética externa, como resultado da escassez de recursos energéticos próprios, nomeadamente daqueles que, nos modelos actuais, asseguram a grande parte das necessidades energéticas nacionais (petróleo, carvão e o gás natural). No entanto, este grau de dependência tem sofrido oscilações, e actualmente apresenta uma tendência decrescente (passando dos 89% verificados em 1995, para os 83,0% em 2008) (EUROSTAT 2010), e que se deve, sobretudo à Estratégia Nacional para a Energia, que prevê a redução do consumo de fontes primárias de origem fóssil e o incremento na incorporação de energias renováveis endógenas no sector primário, com destaque para a energia solar, eólica, hídrica e da biomassa.

2.1.2 CONSUMOS

A factura energética nacional apresenta-se essencialmente distribuída por quatro grandes sectores: Indústria, Transportes, Doméstica e Serviços, incluindo-se nos restantes a Agricultura, Pescas, Construção e Obras Públicas. O gráfico da Figura 2.1 representa a evolução do consumo energético sectorial em Portugal, onde se constata a predominância dos sectores da Indústria, assim como dos Transportes que juntamente com os serviços, foram responsáveis pelo crescimento global verificado ao longo da última década.

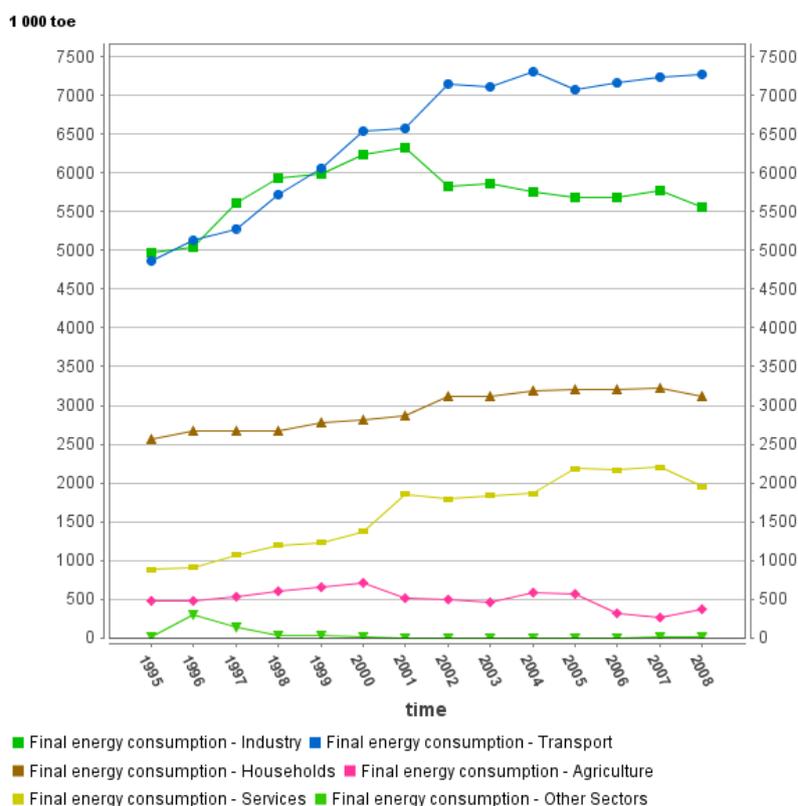


Figura 2.1: Evolução do consumo final de energia por sector em Portugal (EUROSTAT, 2010).

Se tomarmos como exemplo o período compreendido entre os anos de 2000 e 2008, temos por um lado sectores como a indústria ou agricultura que deram sinais de redução da despesa energética, 10,9% e 49,0% respectivamente, e por outro aumentos de 11,4% no sector doméstico e 11,3% nos transportes, os principais responsáveis pelo aumento total nacional de 3,4%. Esta evolução, representa uma imagem da realidade do país nos últimos anos e, quer seja um reflexo do crescimento económico, sinónimo de uma melhoria da eficiência de alguns sectores, ou da evolução da própria demografia do país,

o certo é que o consumo total de energia per capita em Portugal sofreu um aumento de 43% ao longo da década de noventa, voltando a estabilizar no ano 2008, onde registou um valor quase idêntico ao do ano 2000 (1,73 tep/hab) (EUROSTAT 2010) e que se manteve bastante abaixo da média europeia (2,37 tep/hab em 2007 para EU-27).

2.1.3 PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE

O panorama da produção de electricidade em Portugal tem sofrido constantes mudanças ao longo da sua história, desde a nacionalização do Sistema Eléctrico Nacional em 1975, passando pela sua liberalização (DL 182/1995 a 188/1995, de 27 de Julho), a criação de um mercado interno de electricidade (Directiva 96/92/CE, de 19 de Dezembro), o lançamento das bases para um mercado ibérico de electricidade (DL 184/2003 e 185/2003, de 20 de Agosto), até à definição de um enquadramento legal que em 2006 permitiu a introdução do sistema de produtores em regime especial (DL 29/2006 e DL 172/2006, de 15 de Fevereiro) (Alves, R. 2008).

Em termos globais, a introdução de gás natural em Portugal em 1996, teve um grande impacto no mercado eléctrico e veio ao encontro das estratégias comunitárias que previam uma gradual redução da dependência energética em relação ao petróleo.

Se compararmos o gráfico da Figura 2.2, que exprime a evolução do consumo de energia primária em Portugal, com o gráfico da Figura 2.3, que representa a evolução da produção eléctrica por fonte, é possível verificar a tendência para a redução gradual do uso de petróleo e a respectiva substituição pelo gás natural e energias renováveis para produção eléctrica. Este facto tem ajudado no cumprimento das metas e compromissos estabelecidos nos principais eventos internacionais sobre as alterações climáticas.

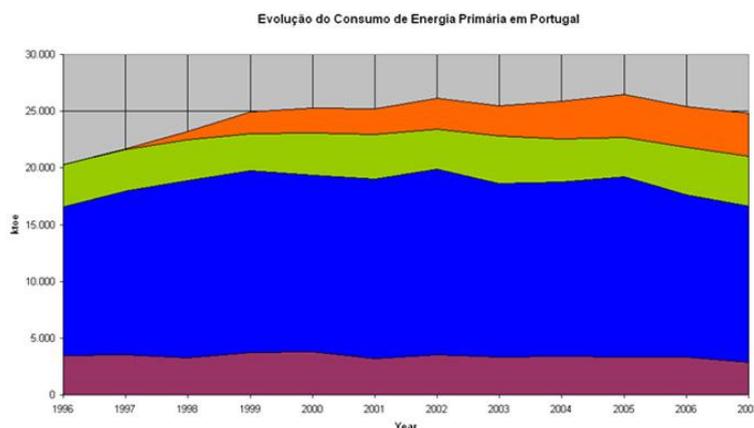


Figura 2.2: Evolução do consumo de energia primária em Portugal (URL01).

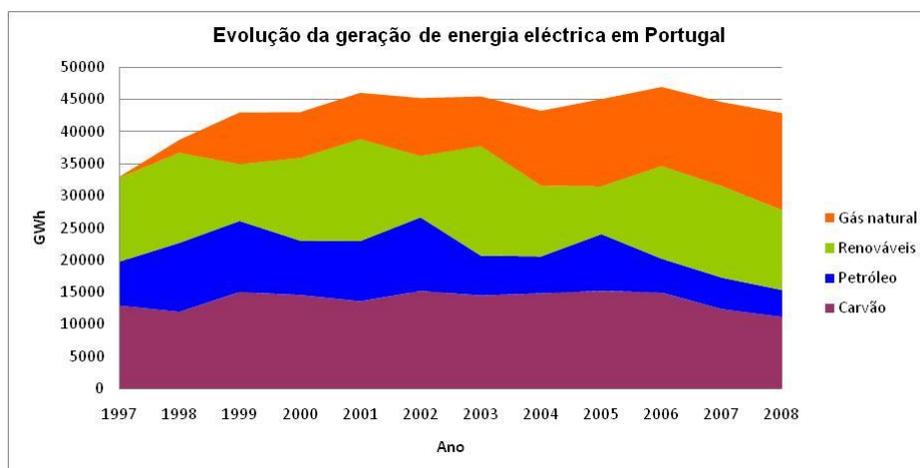


Figura 2.3: Evolução de geração de energia eléctrica em Portugal (adaptado de EUROSTAT, 2010).

A maior parte da energia eléctrica continua a ter origem térmica, em centrais dedicadas e de cogeração, constituindo a rede de centrais termoeléctricas nacionais (ver Figura 2.4).

A restante contribuição resulta da incorporação de fontes renováveis, que apontam para uma importância prevista de 39% na produção bruta de energia eléctrica em Portugal para o ano de 2010 (EUROSTAT, 2010). Além das centrais térmicas, o restante da produção nacional é colmatado com a produção de electricidade de origem hídrica, que apresenta grande variedade inter-anual, e de forma mais marginal, a produção de energia eólica, geotérmica e fotovoltaica. É por isso importante referir que *“para efeitos do cumprimento da meta estabelecida pela Diretiva 2001/77/CE, Portugal tem em conta a hidraulicidade (Índice de Produtibilidade Hidroelétrica - IPH) de cada ano, definida mediante a hidraulicidade do ano base (1997). Deste modo, em anos cuja hidraulicidade é inferior à registada em 1997, e unicamente para efeitos do cumprimento da referida Diretiva, os valores de eletricidade produzidos são superiores aos efetivos.”* (APA, 2010).



Figura 2.4: Mapa da distribuição da produção termoelétrica em Portugal (EDP, 2010).

O gráfico da Figura 2.5 mostra a respectiva contribuição das fontes renováveis na produção de energia eléctrica nacional entre 1998 e 2008, sendo visível a preponderância dos 4857 MW de potência hídrica instalada no ano de 2008, seguindo-se a energia eólica com 3030 MW, a biomassa com 492 MW, e por fim, a geotérmica com 30 MW e a fotovoltaica com 59 MW (APA, 2010).

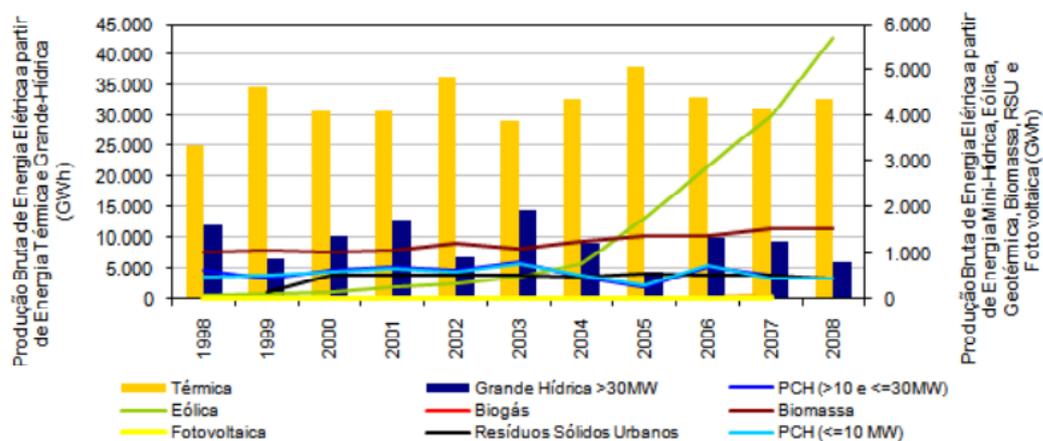


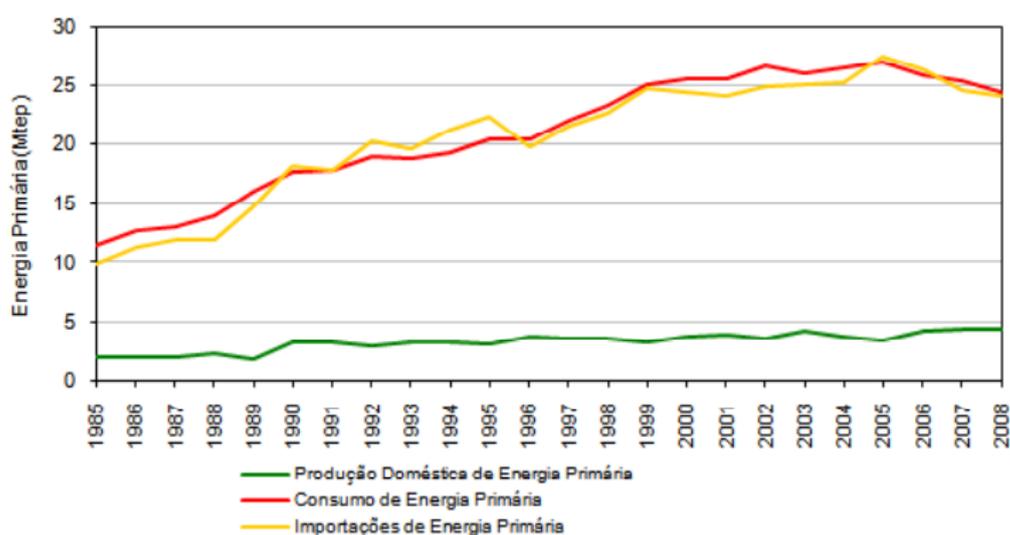
Figura 2.5: Produção bruta de energia eléctrica, em Portugal Continental (APA, 2010).

Os objectivos europeus prevêem que a electricidade renovável poderá triplicar entre 2004 e 2020, assumindo-se estas como formas alternativas de produção de energia cada vez mais limpas e mais eficientes, que contribuirão para a criação de novos empregos, aumento de competitividade e promoção do crescimento económico descentralizado. (APA, 2009)

2.1.4 IMPORTAÇÃO E FONTES DE ENERGIA

Tendo em conta o crescimento do sector dos transportes e a prevalência que os combustíveis fósseis apresentam ao nível do consumo de energia primária (Figura 2.2), a inexistência de recursos fósseis nacionais é responsável por uma ainda clara dominância que as importações têm ao nível do abastecimento de energia primária em Portugal (Figura 2.3). Neste sentido, e tendo em conta o potencial dos recursos renováveis nacionais, os esforços produzidos para intensificar a sua exploração, produzem também no universo das importações um efeito positivo.

O gráfico da Figura 2.6, permite verificar precisamente a redução que o nível de importação de energia primária registou a partir do ano de 2005, correspondendo, não só a uma redução no consumo de energia primária total, mas também a um aumento na incorporação das renováveis em Portugal.



Fonte: DGEG, 2010

Figura 2.6: Produção doméstica, importação e energia primária em Portugal (APA, 2010).

2.2 ESTRATÉGIAS NO ÂMBITO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

2.2.1 INTERNACIONAIS

A interdependência das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) de origem antropogénica com as alterações climáticas tem vindo a ser reconhecida pela comunidade científica internacional. Neste contexto é fundamental fazer referência à primeira Conferência sobre o Clima, realizada em 1979, com a instituição do programa Mundial para o Clima, que interligou pela primeira vez as alterações climáticas com as emissões de GEE de origem antropogénica e consequentes impactes ambientais.

Em 1988, é criado pela Organização Meteorológica Internacional (WMO) e pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP) o Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC), tendo como principal objectivo a avaliação da informação científica e técnica existente relacionada com as alterações climáticas. O primeiro relatório do IPCC foi divulgado em 1990, durante a 2ª Conferência Mundial do Clima dando origem ao desenvolvimento de negociações para a realização de uma Convenção sobre Alterações Climáticas.

O grande passo para a criação de um plano de acção internacional para as alterações climáticas ocorreu no Rio de Janeiro, no ano de 1992, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento (CNUAD) que deu origem à Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC). Esta é a primeira medida internacional que pretende resolver o problema das alterações climáticas, tendo entrado em vigor em Março de 1994 e tendo sido assinada por mais de 150 países. O seu objectivo centra-se na tentativa de diminuir as concentrações na atmosfera de GEE, permitindo assim mitigar a interferência destes gases no sistema climático. Para cumprir o seu objectivo, esta convenção submete todos os seus signatários a estabelecer programas nacionais de redução das emissões de GEE, bem como a apresentação de relatórios regulares sobre esta matéria, exigindo também, de forma não vinculativa, a estabilização até 2000, das emissões de GEE aos níveis de 1990.

O órgão supremo da UNFCCC é a conferência das partes (CdP), representando todas as Partes à convenção, tendo esta periodicidade anual, onde se discute as evoluções científicas e o estado de implementação efectiva dos programas nacionais para a redução das emissões de GEE.

Em 1997, durante a CdP-3, em Quioto, foi dado mais um passo para a definição da

estratégia internacional de controlo das emissões de GEE, com a criação do Protocolo de Quioto (PQ).

No âmbito do PQ, os países desenvolvidos juntam-se para um esforço de redução global das emissões de GEE de pelo menos 5 % até 2012, relativamente aos valores de 1990 (Lopes, 2004).

Este protocolo estabelece limites juridicamente vinculativos, para os países que assinaram o protocolo, em relação às emissões de GEE e prevê o desenvolvimento de estratégias que permitam a redução das emissões de forma eficiente e económica. Para o cumprimento das estratégias estabelecidas no PQ foram criados mecanismos de mercado, designados por mecanismos de Quioto, que facilitem a concretização dos compromissos estabelecidos por cada país perante o PQ. Os principais mecanismos de Quioto são a Implementação Conjunta, o Comércio de Emissões e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Implementação Conjunta:

Os mecanismos de Implementação Conjunta, definidos pelo Artigo nº6 do PQ, permitem, exclusivamente às Partes do (Anexo B) do PQ, ou seja, aos países desenvolvidos com objectivos de redução de emissões, financiar projectos de eficiência energética e/ou de retenção de GEE em florestas de outro país, gerando deste modo, “unidades de redução de emissões” (UREs), sendo estas, acrescentadas à quota de emissões do país investidor e deduzidas à quota de emissões do país onde foi feito o investimento (URL02).

Comércio de Emissões:

O Comércio de Emissões, estabelecido no Artigo nº 17 do PQ, permite a conversão da quota de emissões de cada Parte em licenças de emissão transaccionáveis. Assim, é possível a gestão de um mercado que autoriza a transacção de licenças das Partes que não tenham excedido as suas emissões mediante o PQ, com as Partes que ultrapassaram as metas de redução perante o PQ, possibilitando assim a redução da sua quota de emissões. No entanto, o Comércio de Emissões não permite que seja ultrapassado o limite de emissões global por todas as Partes (URL03).

Desenvolvimento Limpo:

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, estabelecido pelo Artigo nº 12 do PQ, consiste na possibilidade de implementação, por parte dos países desenvolvidos (Anexo B), de projectos de redução de emissões em países em desenvolvimento. Esses projectos, sendo certificados, geram certificados de redução de emissões (CREs), correspondendo a unidades transaccionáveis que permitem a redução da quota de emissões do país investidor (URL04).

A última revisão do PQ, foi realizada em 2010, durante a CdP-16, em Cancún, México, onde ao invés de se estabelecerem novas metas vinculativas Pós-Quioto, se ficou apenas pela declaração de intenções políticas que adiam resoluções mais concretas para a CdP-17, a realizar em Durban, África do Sul no final de 2011. Na Tabela 2.2 são apresentados os principais acontecimentos internacionais sobre alterações climáticas.

Tabela 2.2: Principais acontecimentos internacionais sobre alterações climáticas (adaptado de Lopes, 2004).

Ano	Evento	Aspectos Relevantes
1979	1ª Conferência Mundial sobre o Clima	Estabelecimento do Programa Mundial do Clima.
1988		Criação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas.
1990	2ª Conferência Mundial sobre o Clima	Disponibilizado 1º Relatório de Avaliação pelo IPCC.
1992	Conferência Nacional das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento – “Cimeira do Rio”	Assinatura da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC).
1994		Entrada em vigor da UNFCCC em 21 Março.
1995	1ª Conferência das Partes (CdP) da CQNUAC	Disponibilizado o 2º Relatório de Avaliação pelo IPCC. “Mandato de Berlim” – Início de negociações para um instrumento legal, que possibilite um compromisso mais exigente para os países industrializados.
1996	CdP2 – Genebra, Suíça	Reconhecimento da influência humana sobre o clima. Declaração Ministerial de Genebra – impulsiona as negociações de um protocolo.
1997	CdP3 – Quioto, Japão	Adopção do Protocolo de Quioto (PQ)
1998	CdP4 – Buenos Aires, Argentina	Adopção do Plano de Acção de Buenos Aires – programa de trabalho para operacionalizar o PQ e a implementação da Convenção.

1999	CdP5 – Bona, Alemanha	Clarificação da metodologia de desenvolvimento dos inventários nacionais de GEE.
2000	CdP6 – Haia, Holanda	Não foi alcançado nenhum acordo.
2001		EUA declaram a não ratificação do PQ
	CdP6 parte 2 – Bona, Alemanha	“Acordos Bona” – Definidas regras de aplicação dos mecanismos de mercado previstos no PQ, do papel dos sumidouros, ajuda financeira aos países em desenvolvimento e multas em caso de incumprimento.
	CdP7 – Marraquexe, Marrocos	“Acordos de Marraquexe” – Acordadas definições, regras e modalidades de decisões que efectivam os “Acordos de Bona”
2002	Cimeira da Terra sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+10) – Joanesburgo, África do Sul	Aprovação do Protocolo de Quioto
	CdP8 – Nova Deli, Índia	Declaração Ministerial de Deli sobre desenvolvimento sustentável e alterações climáticas.
2003	CdP9 – Milão, Itália	Aprovação do 3º Relatório de Avaliação do IPCC, acordos sobre projectos de florestação considerados sumidouros de carbono.
2004	CdP10 – Buenos Aires, Argentina	Definido Programa de Trabalho sobre adaptação e medidas de resposta. Guia de boas práticas para actividades no sector de uso da terra e florestas no âmbito do PQ.
2005	CdP11 – Montreal, Canadá	Revisão do PQ (pós 2012).
2006	CdP12 – Nairobi, Quénia	Desenvolvimento do Fundo de Adaptação. Disponibilizado o Relatório Stern
2007	CdP13 – Bali, Indonésia	Plano de Bali – negociações, com vista a um novo tratado para conter o aquecimento global, a concluir até 2009 e incluindo os EUA. Implementação do Fundo de Adaptação das Nações Unidas Disponibilizado 4º Relatório de Avaliação do IPCC.
2008	CdP 14 – Poznan, Polónia	Adopção do calendário e conteúdo das negociações que devem resultar num acordo internacional ambicioso em Dezembro de 2009 em Copenhaga.
2009	CdP 15 – Copenhaga, Dinamarca	Não foi alcançado nenhum acordo para o estabelecimento de metas para o período Pós-Quioto.
2010	CdP 16 – Cancún, México	Criação do Fundo Verde Climático, com o objectivo de auxiliar os países em vias de desenvolvimento a implementarem medias de combate às alterações climáticas.

2.2.2 COMUNITÁRIAS

A União Europeia (UE) assinou o PQ em Dezembro de 1997, comprometendo-se a reduzir as emissões dos GEE em 8% até 2012, face aos valores de 1990 (CE, 2006). Três anos mais tarde, a Comissão Europeia elabora o primeiro Plano Europeu para as Alterações Climáticas (ECCP I, do inglês *European Climate Change Programme*). Este plano define estratégias comunitárias para o cumprimento do PQ, tendo como ponto de partida a criação de um conjunto de políticas e medidas, ambientalmente eficazes e com a melhor relação custo-eficácia para a redução das emissões europeias de GEE. Neste contexto, foram identificados diversos sectores, designados de grupos de trabalho com potencial na redução das emissões de GEE. Assim, foram criados 11 grupos de trabalho, abrangendo áreas como a energia, indústria, doméstico e serviços, transportes e resíduos.

Enquanto a primeira fase do ECCP, focada no desenvolvimento de medidas para garantir que a UE e os Estados-Membros cumpram as suas metas de emissão Protocolo de Quioto para 2008-2012, uma segunda fase do ECCP foi lançada em Outubro de 2005 para identificar outras medidas de baixo custo para reduzir as emissões até 2012 e para desenvolver estratégias de adaptação às alterações climáticas. Este trabalho levou, nomeadamente, às propostas da Comissão no sentido de incluir a Aviação no Sistema de Negociação de Emissões da UE a partir de 2011 e para reforçar a estratégia da UE para reduzir as emissões de CO₂ dos automóveis novos.

Como o âmbito deste trabalho está centrado na geração de electricidade a partir de recursos renováveis, na Tabela 2.3 apresentam-se as principais políticas e medidas referidas no ECCP I, para a redução de emissões de GEE para a área da energia na UE (CE, 2006).

Tabela 2.3: Principais políticas e medidas para a redução de emissões de GEE na área da energia na UE (adaptado de CE, 2006).

Medidas e Políticas	Descrição/Potencial de redução para EU-15 até 2010	Estado de implementação
Promover a geração de electricidade a partir de recursos renováveis (Directiva 2001/77/CE)	Os estados membros devem utilizar combustíveis não fósseis para gerar electricidade (eólica, solar, hídrica, geotérmica, ondas, biomassa, biogás), com uma meta indicativa de 21% para 2010. <u>Potencial de redução de emissões em 2010:</u> 100-125 Mt CO ₂ eq.	Implementada pelos Estados Membros a 23 de Outubro de 2003.
Promover a cogeração na produção de calor e electricidade (Directiva 2004/8/CE)	Os estados membros devem promover a cogeração de alta eficiência com base na procura de calor útil no mercado da energia. <u>Potencial de redução de emissões em 2010:</u> 22-42 Mt CO ₂ eq.	Implementada pelos Estados Membros a 21 de Fevereiro de 2006.
Plano para a Biomassa COM (2005) 628	O Plano para a Biomassa tem como objectivo aumentar a utilização da Biomassa nos sectores da electricidade, calor e transportes de 69 milhões de TEP, em 2003, para 150 milhões de TEP em 2010. <u>Potencial de redução de emissões em 2010:</u> 36-49 Mt CO ₂ eq.	Em processo de adaptação, sendo que algumas medidas já estão a ser implementadas

Em Janeiro de 2007, a Comissão apresentou um pacote integrado de medidas para estabelecer uma nova política energética para a Europa, focado em reforçar a luta contra as alterações climáticas, reforçando a segurança energética da UE e da competitividade colocando assim a Europa no caminho de se tornar uma economia de baixo carbono. O pacote fixa objectivos ambiciosos para as emissões de gases de efeito estufa e uso de energia, a serem cumpridas até 2020, que foram aprovadas pelos líderes da UE na reunião do Conselho Europeu em Março de 2007.

Sobre as emissões, a UE propõe que os países desenvolvidos se comprometam, ao abrigo de um acordo global sobre alterações climáticas, a reduzir as suas emissões colectivas para 30% abaixo dos níveis de 1990 até 2020. A UE está disposta a fazê-lo se outros países desenvolvidos concordarem em fazer um esforço comparável. Enquanto se aguardam as negociações sobre um novo acordo sobre as alterações climáticas, a UE sublinhou a sua determinação neste sentido, fazendo um compromisso independente de reduzir as suas emissões em pelo menos 20% em relação ao mesmo período. Esta redução seria obtida através de uma combinação das medidas em vigor, bem como novos alvos relacionados com a energia a serem cumpridas até 2020: uma redução de 20% no consumo de energia através de grandes melhorias na eficiência energética, um aumento de fontes de energia renováveis com uma quota de mercado de energia para

20% e uma quota de pelo menos 10% de sustentabilidade para os biocombustíveis de segunda geração na gasolina e no gasóleo.

Actualmente, as emissões de gases de efeito estufa da UE estão em queda devido ao impacto combinado de políticas e medidas resultantes do Programa Europeu para as Alterações Climáticas, medidas internas tomadas pelos Estados-Membros e à reestruturação da indústria europeia, particularmente na Europa Central e Oriental. Estes factores permitiram à UE “separar” as emissões de GEE do crescimento económico.

Os Estados-Membros UE-15, reduziram as suas emissões colectivas de 2% entre o ano base (1990 na maioria dos casos) e 2005, enquanto a economia cresceu mais de 35% no mesmo período. Na UE-25, as emissões caíram 11% durante o mesmo período. No âmbito do Protocolo de Quioto, e tal como referido anteriormente, os estados-membros da UE-15 comprometeram-se a reduzir suas emissões colectivas no período 2008-2012 para 8% abaixo dos níveis do ano base. As projecções mais recentes dos Estados-Membros indicam que as medidas já tomadas, conjuntamente com a compra de créditos de emissões provenientes de países terceiros e as actividades de silvicultura que absorvem carbono da atmosfera, permitirão atingir uma redução de 7,4% em 2010. Políticas e medidas complementares em discussão na UE, assim como a nível nacional permitirá que a meta dos 8% seja atingida, podendo até levar a uma redução de 11,4% em 2010, se aplicadas pronta e integralmente (URL05).

2.2.3 NACIONAIS

No âmbito dos compromissos internacionais, Portugal assinou o Protocolo de Quioto a 29 de Abril de 1998, tendo sido promulgado a 31 de Maio de 2002, através do Decreto-Lei nº 7/2002 de 25 de Março. Como objectivo, Portugal deve limitar o aumento das emissões dos GEE em 27% para o período de 2008-2012, face aos valores de 1990 (URL06).

Para cumprir este objectivo foi criada, através da Resolução do Conselho de Ministros nº 72/98, de 29 de Junho, a Comissão para as Alterações Climáticas (CAC), constituída por representantes dos diversos ministérios tendo como principais funções elaborar e propor ao Governo a implementação de uma estratégia nacional para as Alterações Climáticas, o acompanhamento na constituição de medias, programas e acções que vierem a ser adoptadas pelo Governo e a elaboração de relatórios nacionais sobre as Alterações Climáticas.

Em 2001, através da Resolução do Conselho de Ministros nº 59/2001, de 30 de Maio, foi aprovada a Estratégia para as Alterações Climáticas, sendo em sequência elaborado o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) que constitui o primeiro instrumento nacional no domínio do combate às alterações climáticas, onde são definidas as políticas e medidas nacionais que visam a redução das emissões dos GEE por parte dos diversos sectores de actividade. No entanto, foram precisos mais três anos para a legislar o primeiro PNAC, designado de PNAC 2004, aprovado através da Resolução do Conselho de Ministros nº 119/2004, de 31 de Julho.

Em 2006, o PNAC 2004 sofre um processo de revisão, que abrange não só o conjunto das políticas e medidas existentes, como também levou à constituição de novas políticas e medidas aplicáveis aos diversos sectores de actividade. Surgiu assim, o PNAC 2006, aprovado através da Resolução do Conselho de Ministros nº 104/2006, de 23 de Agosto.

Em 2007, o Governo revê algumas das metas associadas às medidas e políticas existentes no PNAC 2006. É através do documento “Programa Nacional para as Alterações Climáticas, Avaliação das novas Políticas e Medidas Sectoriais para o Cumprimento do Protocolo de Quioto”, em Abril de 2007, que surgem as chamadas “novas metas 2007”, aprovadas através da Resolução do Conselho de Ministros nº 1/2008, de 4 de Janeiro, referentes a políticas e medidas do sector de oferta de energia e dos transportes.

Relativamente ao sector de oferta de energia, as novas metas pretendem um aumento da contribuição das energias renováveis e do gás natural, e a instituição de políticas promotoras da eficiência energética no consumo de electricidade.

Para além do PNAC 2006, actualmente, Portugal possui como instrumentos fundamentais para o cumprimento dos objectivos nacionais relativos às alterações climáticas, o Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão e o Fundo Português do Carbono.

Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE)

Elaborado de acordo com o artigo nº 9 da Directiva 2003/87/CE, de 13 de Outubro e revisto pela Directiva 2004/101/CE, tendo sido aprovado através da Resolução do Conselho de Ministros nº 53/2005, de 3 de Março, para o período de 2005-2007. O PNALE é aplicável às grandes instalações industriais responsáveis pela maioria das emissões de GEE, e como tal abrangidas pelo Comercio Europeu de Licenças de

Emissão (CELE), que limita as emissões de GEE atribuindo um montante fixo de licenças de emissão. Em consequência das “novas metas 2007” surge o PNALE II, aprovado através da Resolução do Conselho de Ministros nº 1/2008, de 4 de Janeiro, que vigorará de 2008 a 2012.

Fundo Português do Carbono

Criado pelo Decreto-Lei nº 71/2006, de 24 de Março, tem como finalidade o «[...] desenvolvimento de actividades para a obtenção de créditos de emissão de GEE, designadamente através do investimento em mecanismo de flexibilidade do P.Q.» (RCM, 2008).

Acompanhando o que se vai fazendo a nível comunitário, Portugal adoptou em Abril de 2010 a ENAAC - Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas. Com esta Estratégia pretende-se dotar o País de um instrumento que promova a identificação de um conjunto de linhas de acção e de medidas de adaptação a aplicar, designadamente através de instrumentos de carácter sectorial, tendo em conta que a adaptação às alterações climáticas é um desafio eminentemente transversal, que requer o envolvimento de um vasto conjunto de sectores e uma abordagem integrada (RCM, 2010).

2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CONTEXTO DAS ESTRATÉGIAS ENERGÉTICAS

As alterações climáticas, a crescente dependência da importação de combustíveis fósseis, o consumo excessivo de energia e o aumento dos preços da mesma, levaram a UE a definir uma estratégia política que permita << [...] efectuar uma nova revolução industrial e criar uma economia de elevada eficiência energética e de baixa taxa de emissão de CO₂ . >> (URL07).

As energias renováveis são um elemento-chave para um futuro energético sustentável, sendo incontornável a sua contribuição para a aplicação de uma política energética europeia, não só por reduzirem as emissões dos GEE, como também, devido ao seu carácter endógeno, permitirem diminuir a dependência das importações de energia, garantindo a segurança do aprovisionamento energético. Na continuação desta análise,

seguidamente serão enunciados alguns instrumentos políticos para promoção das energias renováveis na União Europeia e em Portugal.

2.3.1 INSTRUMENTOS POLÍTICOS PARA A PROMOÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NA UE

Tendo em conta o panorama global do final do século XX, as fontes de energia renováveis apresentavam-se como uma importante alternativa uma vez que podem ser continuamente utilizadas sem perigo de se esgotarem, não são poluentes, e os custos são estáveis e previsíveis correspondendo apenas ao investimento inicial (uma vez que não há custos com combustíveis nem as flutuações associadas). No entanto as energias renováveis apresentavam ainda importantes barreiras a superar principalmente o facto de serem tecnologias pouco desenvolvidas e terem elevados custos de investimento. Para ultrapassar estes desafios a solução será um investimento em massa no desenvolvimento da energia renovável.

Em termos de passos mais marcantes na política europeia de energias renováveis destacam-se: em 1997 o Livro Branco sobre Fontes de Energia Renováveis (FER) que aumentou a quota de energias renováveis de 6 para 12% do total de consumo de energia até 2010; a Directiva 2001/77/CE que estabeleceu uma meta de 21% de electricidade produzida a partir de fontes de energias renováveis no consumo total de electricidade da Comunidade em 2010; a Directiva 2003/30/CE relativa aos biocombustíveis que determinou uma quota de 2% de incorporação destes combustíveis para transportes na Europa em 2005 e de 5,75% em 2010. Finalmente o Roteiro das Energias Renováveis COM(2006)848 preparou o caminho para a nova directiva relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, salientando a importância da liderança da UE em matéria de energias renováveis, propondo e justificando uma nova meta de energias renováveis no consumo energético da UE em 2020. A nova Directiva 2009/28/CE estabelece então o objectivo de se atingir os 20% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final de energia na UE em 2020, estabelecendo quotas individuais nacionais para cada um dos Estados Membros, e um objectivo mínimo obrigatório de 10% da incorporação de biocombustíveis no consumo de gasolina e gásóleo pelos transportes até 2020. Além destas principais directrizes existe também legislação sectorial como por exemplo o Plano de Acção da Biomassa (COM(2005) 628) (URL08).

Neste subcapítulo, serão evidenciados alguns destes documentos e directivas mais relevantes, desenvolvidas no seio da UE, que reflectem a consciencialização comunitária para a necessidade de desenvolver estratégias no sentido de aumentar o contributo das energias renováveis na matriz energética europeia.

Livro Branco – “Energia para o Futuro”

Lançado após a emissão do Livro Verde sobre as Energias Renováveis, a 20 de Novembro de 1996, que veio iniciar o debate sobre as várias medidas urgentes e importantes relativas às energias renováveis, fixando os objectivos e de terminando os obstáculos existentes e os meios a implementar. O Livro Branco surge assim da Comunicação da Comissão, de 26 de Novembro de 1997, mês que antecedeu a CdP 3 sobre as Alterações Climáticas, que culminou com a assinatura do PQ, onde a UE se comprometeu a reduzir as suas emissões de GEE em 20% face aos valores de 1990. Assim, o referido Livro Branco traduz a necessidade de «[...] conseguir uma penetração de 12% das FER na União até 2010[...]» (COM, 1997), representando uma duplicação da contribuição das energias renováveis, face a valores registados em 1997.

Para o cumprimento deste objectivo, o Livro Branco apresenta um Plano de Acção que tem como principal característica, a elaboração de medidas dinâmicas de forma coordenada em toda a União, que extingam os existentes nichos de mercado para as FER, possibilitando a criação de um mercado global, liberalizado, e sem encargos financeiros excessivos. Para além das medidas referidas no Plano de Acção, o Livro Branco apresenta a avaliação de um cenário para 2010, referente ao contributo de cada sector de energia renovável (ver Tabela 2.4), com vista ao cumprimento do objectivo indicativo de 12% para as FER até 2010 no mercado energético.

Pela análise da referida tabela, é de salientar o contributo da biomassa, vinda maioritariamente dos resíduos agrícolas, silviculturas, indústrias florestais e culturas energéticas, que deverá chegar aos 90 Mtep em 2010, implicando a triplicação da sua contribuição face aos valores de 1995 (COM, 1997).

Tabela 2.4: Contribuições por tipo de energia renovável na EU, cenário para 2010 (adaptado de COM, 1997).

Tipo de Energia Renovável	Contribuição em 1995	Contribuição em 2010
Eólica	25 GW	40 GW
Hidráulica	92 GW	105 GW
Grandes instalações	82,5 GW	91 GW
Pequenas instalações	9,5 GW	14 GW
Fotovoltaica	0,003 GWf	3 GWf
Biomassa	44,8 Mtep	90 Mtep
Geotérmica		
Eléctrica	0,5 GW	1 GW
Térmica (inclui bombas de calor)	1,36 GWt	5 GWt
Painéis Solares	6,5 Mm ²	100 Mm ²

A aplicação das novas políticas e medidas resultaram num aumento de 55% da contribuição das energias renováveis em termos energéticos absolutos. No entanto, apesar dos esforços efectuados, prevê-se que a meta de 12% de energias renováveis em 2010 não será alcançada pelos Estados-Membros, parecendo «[...] improvável que a UE consiga atingir uma quota de fontes de energia renovável superior a 10% até 2010 [...]»(COM, 2006b).

O incumprimento dessas metas explicam-se por:

- Custo elevado das energias renováveis em termos de investimentos;
- Problemas administrativos ligados aos procedimentos de instalação e à natureza descentralizada da maioria das aplicações das energias renováveis.
- Regras pouco claras e/ou discriminatórias para o acesso à rede.
- Informação insuficiente dos fornecedores, dos clientes e dos instaladores.
- O facto de a meta de 12% ser expressa em percentagem de energia primária, o que penaliza a contribuição da energia eólica (sector em que se observou um forte crescimento no período em questão) (COM, 2006b).

Directiva 2001/77/CE

A promoção da electricidade produzida a partir de FER é uma alta prioridade comunitária, tal como foi destacado no Livro Branco sobre FER, por razões de segurança e diversificação do abastecimento de energia, de protecção ambiental, bem como de

coesão social e económica. O aumento da utilização de electricidade produzida a partir de FER constitui uma parte substancial do pacote de medidas necessário ao cumprimento do Protocolo de Quioto. Neste sentido, foi redigida a Directiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de Setembro de 2001 relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energias renováveis no mercado interno da electricidade.

De acordo com o referido na Directiva, cujo prazo de transposição terminou a 27 de Outubro de 2003, os Estados-Membros comprometeram-se a:

- Definir e publicar em relatório, até 27 de Outubro de 2002 e posteriormente de cinco em cinco anos, as metas indicativas nacionais relativas ao consumo de electricidade verde em termos de percentagem do consumo total de electricidade para os dez anos seguintes. Na definição dessas metas devem ser tomadas como referência os valores definidos pela Comissão Europeia e que se basearam na meta indicativa global de 22,1% de electricidade verde no consumo total de energia eléctrica da UE-15 em 2010. Este relatório deve destacar ainda as medidas tomadas e/ou projectadas para alcançar essas mesmas metas nacionais.
- Publicar, até 27 de Outubro de 2003 e posteriormente de dois em dois anos, um relatório de análise da realização das metas indicativas nacionais e que «[...] tenha em conta os factores climáticos susceptíveis de prejudicar o cumprimento dessas metas e indique em que medida as disposições tomadas são compatíveis com os compromissos nacionais relativos às alterações climáticas [...]» aceites pela Comunidade a título do Protocolo de Quioto;
- Assegurar, a partir de 27 de Outubro de 2003, que «[...] a origem da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis possa ser garantida como tal, [...] de acordo com critérios objectivos, transparentes e não discriminatórios, estabelecidos por cada Estado-Membro». A garantia de origem deve «[...] especificar a fonte de energia a partir da qual foi produzida a electricidade, indicando as datas e locais de produção e, para as instalações hidroeléctricas, a capacidade»;
- Avaliar «[...] o quadro legislativo e regulamentar existente relativamente aos processos de autorização [...] aplicáveis a centrais produtoras de electricidade a partir de fontes de energia renováveis [...]», a fim de reduzir as barreiras

regulamentares ao aumento da produção de electricidade verde, simplificando e acelerando os procedimentos a nível administrativo;

- Assegurar que os operadores das redes de transporte e os operadores da rede de distribuição garantam o transporte e a distribuição da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis.

Por fim salienta-se que, no âmbito da aplicação da Directiva, a Comissão Europeia publicou em Maio de 2004, o primeiro relatório de progresso da implementação da Directiva (COM (2004) 366final), com base na análise dos relatórios de cada Estado-Membro, a fim de verificar até que ponto progrediram na realização das metas indicativas nacionais e se essas mesmas vão ao encontro das metas indicativas globais, designadamente 22% de electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis e também da meta definida pelo Livro Branco sobre as Energias Renováveis, designadamente uma quota de 12% das energias renováveis no consumo energético total. Em Dezembro de 2005, a Comissão publicou o primeiro relatório síntese dos progressos alcançados no que respeita à promoção da electricidade verde a nível europeu (COM (2005)627 final).

Roteiro das Energias Renováveis

Parte integrante da Análise Estratégica da Política Europeia da Energia, o Roteiro das Energias Renováveis ocorre da necessidade da renovação do quadro legislativo para a promoção das energias renováveis.

É através Comunicação da Comissão, de 10 de Janeiro de 2007, que surge o designado «Roteiro das Energias Renováveis. Energias Renováveis no Século XXI: construir um futuro mais sustentável», com a finalidade de atingir uma quota de 20% de energias renováveis na quantidade total de energia consumida na União Europeia até 2020 (COM, 2006b).

Para além de estabelecer a nova meta juridicamente vinculativa, uma quota de 20% de energias renováveis no consumo energético da UE até 2020, o referido Roteiro apresenta uma análise da evolução da contribuição das energias renováveis no sector energético para o período de 1995-2005, verificando-se um aumento de 55% em termos energéticos absolutos desde 1997.

No âmbito da evolução da contribuição das energias renováveis, para o sector da electricidade produzida a partir de FER, em 2001, de acordo com a Directiva 2001/77/CE, os Estados-Membros fixaram metas nacionais para que em 2010, 21 % do consumo global de electricidade na UE fosse produzido a partir de FER. Segundo o relatório da Comissão (COM (2004) 336), em dois anos (2004-2006), verificou-se um aumento de 50 % na produção de electricidade renovável (não-hidroeléctrica), permitindo estimar que provavelmente a UE atingirá uma quota de 19 % em 2010.

A Figura 2.7 apresenta a produção de electricidade renovável (não-hidroeléctrica) na UE-25 para o período entre 1990 e 2005. Os progressos verificaram-se sobretudo na energia eólica, que antecipou em cinco anos a meta fixada no Livro Branco, de 40 GW para 2010 (COM, 2006b).

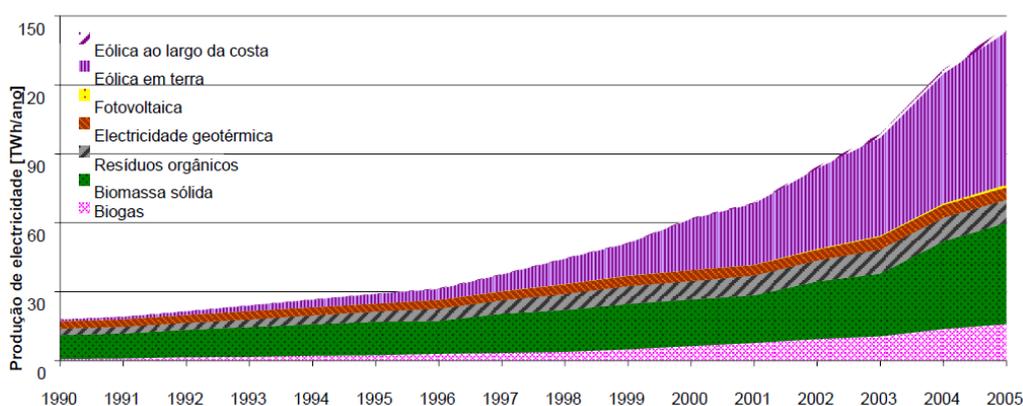


Figura 2.7: Produção de electricidade renovável (não-hidroeléctrica) na UE-25 (1990-2005) (COM, 2006b).

É também relevante o progresso da produção de electricidade a partir da biomassa, verificando-se um aumento do crescimento anual de 13% em 2003 para 19 % em 2004. Se a taxa de crescimento em 2004 for extrapolada para 2010, a contribuição da biomassa poderá atingir os 167 TWt, que corresponde à fracção de biomassa necessária para cumprir a meta de 21 % da electricidade a partir de energias renováveis (ver Figura 2.8) (COM, 2006c).

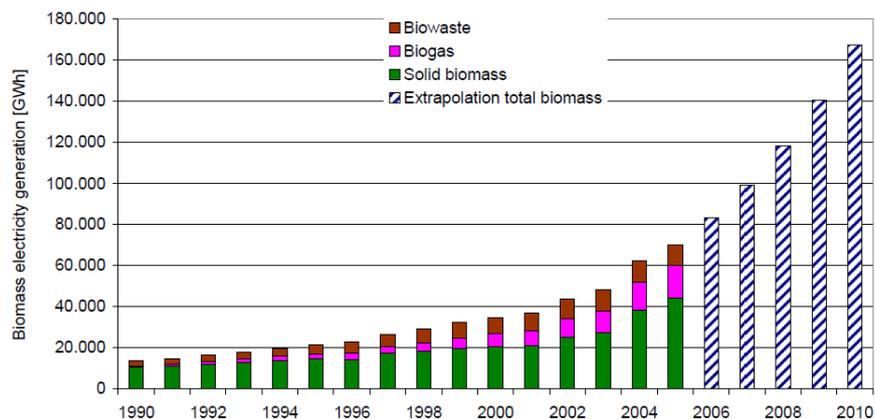


Figura 2.8: Desenvolvimento histórico da geração de electricidade a partir de biomassa sólida, biogás e resíduos urbanos sólidos (biodegradáveis) na UE-25 para o período de 1990 até 2004 e extrapolação para 2010 assumindo uma taxa de crescimento de 19% (adaptado de COM, 2006c).

Perante a evolução da contribuição das energias renováveis e analisando o potencial técnico e económico, a Comissão chegou à conclusão que <<...o *objectivo global de uma contribuição de 20% de energias renováveis para o cabaz energético da UE é possível e necessário*.>>. Assim, para o sector da electricidade renovável a Comissão propõe um aumento do nível de 2006, 15 %, para aproximadamente 36 % em 2020 (COM, 2006b).

Directiva 2009/28/CE

De acordo com esta directiva, «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 gases com efeito de estufa e cumprir o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, bem como outros compromissos, assumidos a nível comunitário e internacional, de redução das emissões de gases com efeito de estufa para além de 2012». Assim, a 23 de Abril de 2009 saiu a Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE.

Estabelece assim um quadro comum para a promoção de energia proveniente das fontes renováveis. Fixa objectivos nacionais obrigatórios para a quota global de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia e para a quota de energia proveniente de fontes renováveis consumida pelos transportes. Estabelece

regras em matéria de transferências estatísticas entre Estados-Membros, projectos conjuntos entre Estados-Membros e com países terceiros, garantias de origem, procedimentos administrativos, informação e formação e acesso à rede de electricidade no que se refere à energia produzida a partir de fontes renováveis. Estabelece critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis. Esta directiva deverá ser transposta até 05 de Dezembro de 2010.

Em termos de metas, esta directiva estabelece então o objectivo de se alcançar uma quota de 20% de energias provenientes de fontes renováveis no consumo final bruto de energia na UE em 2020, definindo quotas individuais nacionais para cada um dos Estados Membros, no caso de Portugal, uma quota de 31 %, e um objectivo mínimo obrigatório de 10% da incorporação de biocombustíveis no consumo de gasolina e gasóleo pelos transportes até 2020.

Obriga ainda a elaboração de um plano de acção nacional para as energias renováveis que fixam os objectivos nacionais dos Estados-Membros para as quotas de energia proveniente de fontes renováveis consumida pelos sectores dos transportes, da electricidade e do aquecimento e arrefecimento em 2020, tendo em conta os efeitos de outras medidas políticas relacionadas com a eficiência energética no consumo final de energia, bem como medidas adequadas para alcançar os objectivos globais nacionais, nomeadamente a cooperação entre autoridades locais, regionais e nacionais, transferências estatísticas ou projectos conjuntos previstos, políticas nacionais para desenvolver os recursos de biomassa existentes e mobilizar novos recursos de biomassa para diferentes utilizações.

2.3.2 INSTRUMENTOS POLÍTICOS PARA A PROMOÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL

A produção de energia a partir de FER adquiriu especial importância no quadro da política energética da UE em resultado da elevada dependência externa relativamente ao petróleo e ao gás natural, e da instabilidade dos respectivos mercados.

Seguindo a política energética europeia, Portugal implementou um conjunto de estratégias e medidas no sector da energia, nomeadamente na promoção das FER.

Em 2003 surge a Política Energética Nacional, regulamentada através da RCM nº 63/2003, de 28 de Abril, assente em três eixos estratégicos: assegurar a segurança do

abastecimento nacional; fomentar o desenvolvimento sustentável; promover a competitividade nacional.

Com o intuito de assegurar o abastecimento nacional e diminuir a dependência externa de energia primária, a Política Estratégica Nacional estabeleceu metas indicativas para a promoção dos aproveitamentos hidroeléctricos e diversificação das fontes endógenas (ver Tabela 2.5).

Tabela 2.5: Metas indicativas para a produção de energia eléctrica a partir das fontes de energia renovável (RCM, 2003).

Recursos Endógenos	Capacidade instalada em 2001 (MW)	Capacidade instalada até 2010 (MW)
Eólicos	101	3750
Pequenos aproveitamentos hídricos	215	400
Biomassa	10	150
Biogás	1	50
Resíduos sólidos urbanos	66	130
Ondas	0	50
Fotovoltaico	1	150
Hídricos	4209	5000
Total	4603	9680

Aliada à rápida evolução do sector energético, em 2005, através da RCM nº 169/2005 de 24 de Outubro, surge a Estratégia Nacional para a Energia, que define as linhas de orientação política e medidas de maior relevância para a área da energia, em particular para a energia eólica, elevando a sua meta de referência para 5100 MW e lançando um concurso público para a atribuição até 1800 MW de licenças para parques eólicos (RCM, 2005).

No quadro da Directiva 2001/77/CE, de 27 de Setembro, Portugal assumiu o compromisso de produzir, em 2010, 39% da sua electricidade final com origem em FER. Em 2005, Portugal, foi o país da EU que mais cresceu na capacidade de produção de energia eólica e no final de Março de 2007, Portugal, tinha no total 7092 MW de capacidade instalada para a produção de energia eléctrica a partir de FER (MEI, 2007), o que significou a passagem dos 16,8 % atingidos em 2005, para 31,1 % em 2007 (DGEG, 2010).

Dada a importância estratégica da aposta nas energias renováveis, em 2007, o Governo Português, definiu novas metas para 2010 com os seguintes objectivos:

- 45 % do consumo total de electricidade com base exclusivamente em energias renováveis;
- Incorporação de 10 % de biocombustíveis no consumo dos combustíveis rodoviários;
- 5 a 10 % do carvão utilizado nas centrais deveram ser substituídos por biomassa ou resíduos.

As medidas e políticas implementadas e os investimentos em energias renováveis nos últimos anos fizeram de Portugal uma referência mundial neste domínio. Dando continuidade a esta tendência, em Abril de 2010 foi estabelecida uma nova Estratégia Nacional para a Energia com o horizonte de 2020 (ENE 2020) definida na Resolução do Conselho de Ministros n.º29/2010 que vem substituir a RCM n.º 169/2005, e que apresenta como principais objectivos:

- i. Reduzir a dependência energética do País face ao exterior para 74% em 2020, produzindo, nesta data, a partir de recursos endógenos, o equivalente a 60 milhões de barris anuais de petróleo, com vista à progressiva independência do país face aos combustíveis fósseis;
- ii. Garantir o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020, 60% da electricidade produzida, e 31% do consumo de energia final, tenha origem em fontes renováveis e uma redução do 20% do consumo de energia final nos termos do Pacote Energia-Clima 20-20-20;
- iii. Reduzir em 25% o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas gerando uma redução de importações de 2000 milhões de Euros;
- iv. Criar riqueza e consolidar um cluster energético no sector das energias renováveis em Portugal, assegurando em 2020 um Valor Acrescentado Bruto de 3800 Milhões de Euros e criando mais 100.000 postos de trabalho a acrescer aos 35.000 já existentes no sector e que serão consolidados. Dos 135.000 postos de trabalho do sector, 45.000 serão directos e 90.000 indirectos. O impacto no PIB passará de 0,8% para 1,7% até 2020;
- v. Desenvolver um cluster industrial associado à promoção da eficiência energética assegurando a criação de 21.000 postos de trabalho anuais, gerando um

investimento previsível de 13.000 M€ até 2020 e proporcionando exportações equivalentes a 400 M€;

- vi. Promover o desenvolvimento sustentável criando condições para o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas por Portugal no quadro europeu.

Para o cumprimento das novas metas estabelecidas, o Governo prevê novos objectivos para as várias FER na produção de energia eléctrica, nomeadamente:

- **Hídrica:**

- Concretizar o aumento da potência hídrica até 8.600 MW
- Instalar maior capacidade reversível, integrada com o crescimento da eólica
- Aplicar um plano de acção para a promoção de mini-hídricas com o objectivo de licenciar de forma rápida 250 MW.

- **Eólica:**

- Apostar na instalação da potência já atribuída de 2.000 MW até 2012, na exploração do potencial de sobre-equipamento e no desenvolvimento de novos concursos que permitam atingir 8.500 MW em 2020, tendo em conta a evolução da procura de electricidade, da penetração dos veículos eléctricos e da viabilidade técnica e económica das tecnologias eólicas offshore.

- **Solar:**

- Instalar 1.500 MW até 2020, de acordo com a evolução das diferentes tecnologias;
- Actualizar o Programa de microgeração e introduzir um Programa de minigeração destinado a projectos com potências até 250 kW em função das tecnologias;
- Atribuir potência para projectos de demonstração em concentração solar, como base para a criação de um cluster industrial neste domínio;
- Prosseguir a aposta no solar térmico;

- **Biomassa:**
 - Dar prioridade à instalação efectiva da potência já atribuída de 250MW integrando mecanismos de flexibilidade na concretização dos projectos;
 - Aprovar medidas de promoção da produção da biomassa florestal, assegurando a satisfação das necessidades de consumo já instaladas e a instalar, nomeadamente através da agilização e o acesso aos apoios públicos, da promoção da certificação da gestão florestal sustentável e da avaliação da utilização e promoção de culturas energéticas, bem como da biomassa residual da actividade agrícola e agro-industrial para a produção de energia.
- **Biocombustíveis:**
 - Transpor e aplicar em Portugal as directivas e as melhores práticas relativas aos biocombustíveis, designadamente ao nível da definição dos critérios de sustentabilidade e dos melhores padrões de qualidade.
- **Biogás:**
 - Explorar o potencial associado ao biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos e efluentes.
- **Ondas, Geotermia e Hidrogénio:**
 - Disponibilizar uma zona piloto para as energias das ondas;
 - Atingir 250 MW de potência instalada até 2020 na energia das ondas;
 - Promover uma nova fileira na área da geotermia (250 MW);
 - Explorar o potencial do hidrogénio como vector energético.

As energias renováveis fundamentam o desenvolvimento económico, social e tecnológico, estando na base de importantes investimentos criadores, não só de emprego como também de desenvolvimento regional.

As novas políticas e medidas implementadas pelo Governo permitiram alcançar, em Março de 2010, 9229 MW de capacidade instalada para produção de energia eléctrica a partir de FER, atingindo uma quota de 42,2 %. Analisando a evolução da incorporação das FER na produção total de energia eléctrica em Portugal Continental (ver Tabela 2.6), o crescimento da potência instalada deveu-se fundamentalmente, ao aumento da

potência instalada eólica e biomassa sem cogeração, sendo também considerável o aumento da potência em fotovoltaico de microprodução (DGEG, 2010).

Tabela 2.6: Evolução do peso da produção de cada tecnologia no total da produção de energia renovável para Portugal Continental (DGEG, 2010).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Mar 2010
Hídrica Total	79,6	88,3	79,8	57,7	70,1	62,9	47,7	47,0	53,3
Hídrica (>10 MW)	73,9	84,0	75,9	54,4	65,6	60,3	44,8	44,0	50,3
Grande Hídrica (>30MW)	67,8	79,5	72,0	51,4	61,2	57,2	41,5	40,7	46,8
PCH (>10 e <=30 MW)	6,0	4,6	3,9	3,1	4,3	3,1	3,2	3,3	3,5
PCH (<= 10 MW)	5,8	4,3	4,0	3,2	4,5	2,7	2,9	3,0	3,0
Eólica	3,4	2,6	6,3	20,1	17,9	24,4	38,4	40,1	36,0
Biomassa + RSU + Biogás	17,0	9,1	13,9	22,2	12,0	12,5	13,7	12,1	10,0
Biomassa (c/ cogeração)	11,5	5,9	9,6	14,8	8,1	8,3	9,3	7,5	6,2
Biomassa (s/ cogeração)	0,4	0,2	0,4	0,7	0,5	0,9	1,0	1,7	1,4
Resíduos Sólidos Urbanos	5,1	2,9	3,8	6,3	3,3	3,0	3,0	2,5	2,1
Biogás	0,0	0,0	0,1	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3
Fotovoltaica	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9	0,7
Total de renováveis	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Em Portugal, a produção de energia eléctrica de origem renovável está concentrada maioritariamente no norte do país, principalmente nos distritos de Viana do Castelo, Bragança, Viseu, Coimbra, Vila Real, Castelo Branco e Braga (ver Figura 2.9).

Em termos de potência instalada (excluindo a grande hídrica), os principais distritos são Viseu (767 MW), Coimbra (721 MW), Castelo Branco (537 MW), Vila Real (432 MW), Viana do Castelo (415 MW), Lisboa (375 MW), Guarda (265 MW), Leiria (233 MW), Braga (206 MW) e Santarém (191 MW), correspondendo a potência destes dez distritos a 83 % do total, em Março de 2010 (DGEG, 2010).

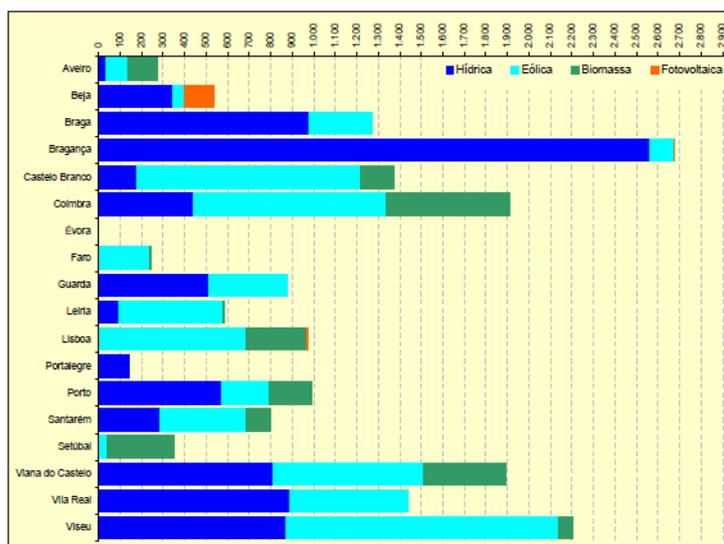


Figura 2.9: Produção de energia renovável a partir de FER por distritos em 2009 (GWh) para Portugal continental (DGEG, 2010).

2.3.3 PRODUÇÃO DE CALOR E ELECTRICIDADE A PARTIR DE BIOMASSA EM PORTUGAL

A biomassa constitui uma fonte renovável de produção de electricidade e calor, sendo muito variado o leque de produtos utilizáveis para este fim, provenientes sobretudo da actividade agrícola, silvícola e fileiras industriais.

Em Portugal, o aproveitamento energético da biomassa residual diz respeito principalmente à produção de energia eléctrica e/ou calor a partir de:

- Biogás produzido nos processos de gestão de efluentes da pecuária intensiva, matadouros e agro-industriais;
- Biomassa florestal resultante dos resíduos de explorações florestais (ramos e bicadas) e de medidas de silvicultura preventiva (podas, desrames e desbastes).

Em 2005, com a finalidade de valorizar a biomassa florestal para a produção de energia, a Estratégia Nacional para a Energia (RCM nº 169/2005), propõe a duplicação da potência instalada e a abertura de um concurso público para a instalação de 15 novas centrais termoeléctricas a biomassa florestal, com uma potência conjunta de 100 MW.

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). Esta tarifa é bastante superior à atribuída à da energia produzida em centrais hídricas, eólicas, de resíduos sólidos urbanos (RSU) ou biogás de aterro. Apenas à electricidade produzida em centrais fotovoltaicas é garantida uma tarifa superior à das centrais a biomassa (Enersilva, 2007).

Em Fevereiro de 2006 foi lançado o concurso para as 15 novas centrais de biomassa florestal, representando um adicional de 100 MW e um investimento total estimado em 225 milhões de euros. Foram privilegiadas duas tipologias de central: de 6 MW orientadas para as dinâmicas locais e 12 MW orientadas para grupos industriais.

A localização das futuras centrais foi pré-seleccionada tendo em conta a disponibilidade de biomassa florestal e o risco de incêndio (ver Figura 2.10). As novas centrais possibilitarão a retirada de 1 milhão de toneladas de resíduos das florestas nacionais e a criação de novas dinâmicas de inovação na gestão e exploração florestal (MEI, 2007).

A lista de concorrentes foi divulgada meses mais tarde, com os lotes de Bragança e Vila Real, de 2 MVA cada, sem proposta apresentada. Assim, com o resultado do concurso prevê-se um total de potência adjudicada de 96 MVA (URL09).

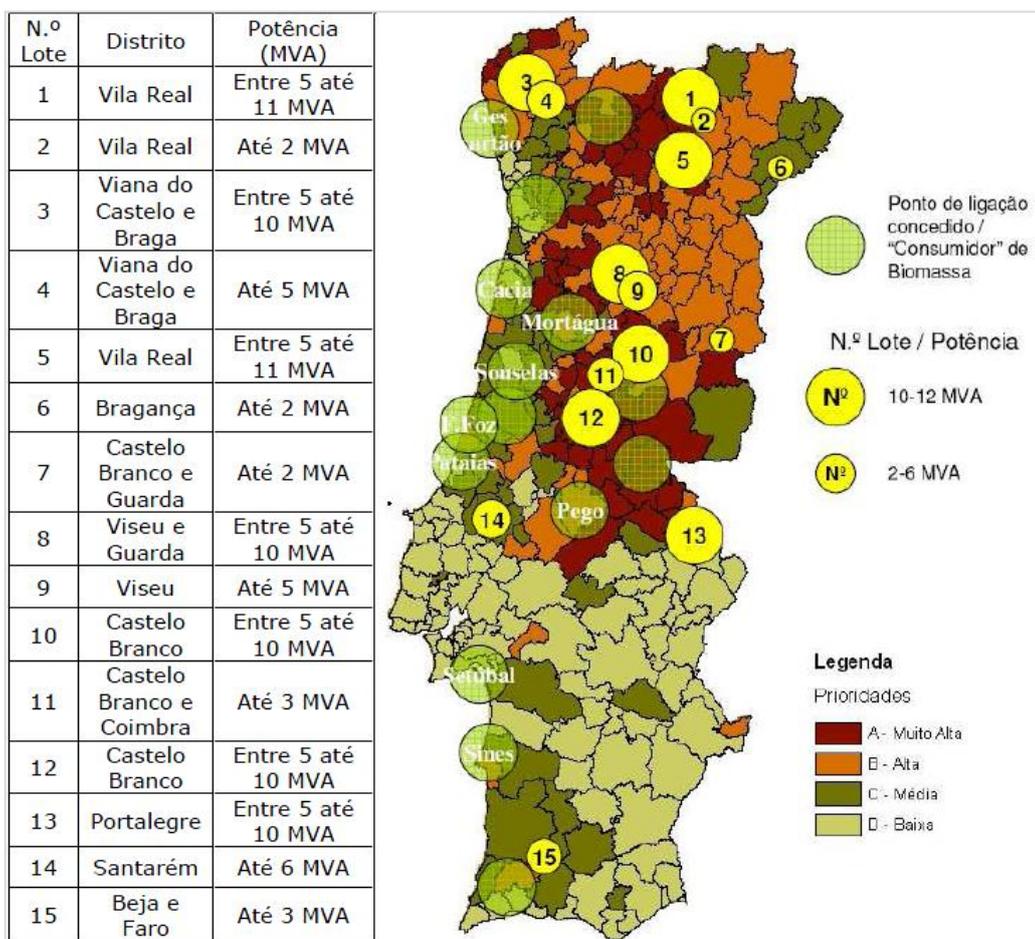


Figura 2.10: Locais seleccionados para o concurso de centrais a biomassa florestal (Mateus, 2007).

Em 2007, existiam em Portugal três centrais termoeléctricas ligadas à rede eléctrica que utilizam a biomassa florestal como combustível principal. Duas centrais da EDP, em Mortágua e Vila Velha de Ródão, e a Centroliva, também em Vila Velha de Ródão. Para além das centrais dedicadas, existiam nove centrais de cogeração instaladas nas indústrias do sector florestal (ver Figura 2.11), que aproveitam a biomassa florestal para a produção de calor (MEI, 2007).

Biomassa - Centrais com Cogeração	
Empresa	Combustível
Portucel Industrial, S.A.	Licores e Outros Resíduos
Amorim Revestimentos, S.A.	Resíduos (Pó de cortiça)
PortucelTejo, S.A.	Licores
Stora Celbi, S.A.	Licores e Outros Resíduos
Soporcel	Licores e Outros Resíduos
Comp.ª de Celulose do Caima, S.A.	Licores e Outros Resíduos
Portucel Industrial, S.A.(Setúbal)	Licores e Outros Resíduos
Portucel Viana, S.A.	Licores e Outros Resíduos
SIAF	Resíduos de Madeira

Figura 2.11: Indústrias portuguesas com unidades de co-geração (DGRF, 2005).

No âmbito da ampliação da potência já instalada, nomeadamente nas centrais existentes na indústria do sector florestal, em 2007, os novos projectos apresentados pela EDP Bioeléctrica estavam em fase de projecto ou adjudicação.

Actualmente, encontram-se em funcionamento mais duas novas centrais, a central na Figueira da Foz e em Constância, com uma potência instalada respectivamente de 27,9 MW e 12,8 MW (ver Figura 2.12). No total, a EDP Bioeléctrica tem uma potência instalada de 62,1 MW, pretendendo nos próximos anos atingir os 130 MW.

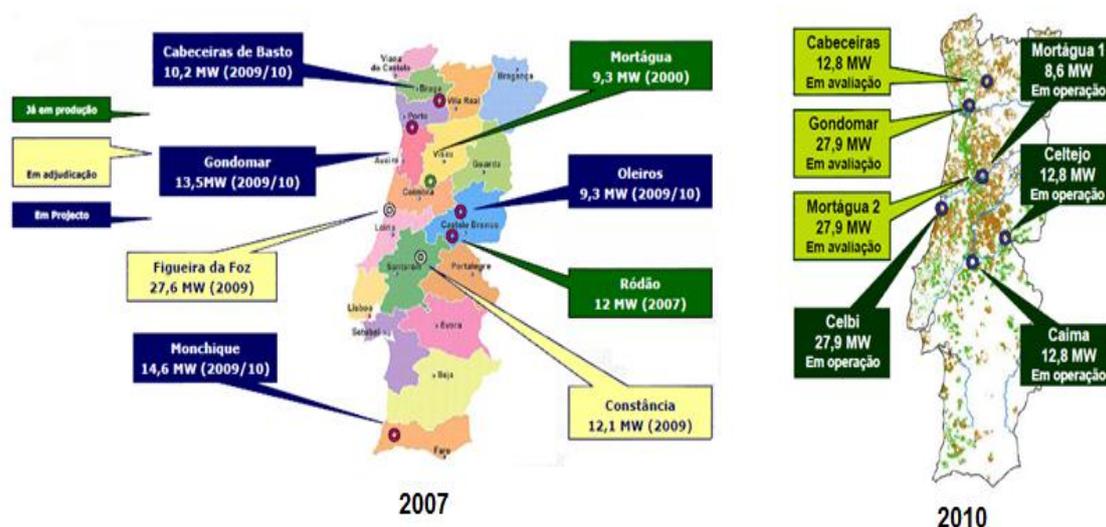


Figura 2.12: Centrais termoeléctricas a biomassa florestal da EDP Bioeléctrica (URL10).

De acordo com o planeamento apresentado, a potência a instalar, até 2010, permitirá atingir a meta de 250 MW para a produção de electricidade a partir de biomassa florestal. No entanto, apesar de todas as medidas tomadas, a potência instalada evoluiu muito pouco nos últimos anos, comprovando que na prática as metas propostas para 2010 podem estar longe de ser alcançadas. Esta dificuldade deve-se em parte, ao concurso para novas centrais dedicadas que não ter alcançado o sucesso esperado, das 15 propostas apresentadas somente 4 foram contratadas, correspondendo apenas a um acréscimo de 20 MVA.

3 BIOMASSA

Segundo a Directiva 2001/77/CE de 27 de Setembro de 2001, a biomassa é “a fracção biodegradável de produtos e resíduos de agrícolas (incluindo substâncias vegetais e animais), da floresta e das indústrias conexas, bem com a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”. (CE, 2001)

Toda a biomassa é susceptível de gerar energia, podendo ser utilizada directamente em sistemas de combustão ou convertida em biocombustíveis. Considerada como recurso endógeno em constante renovação, a biomassa tem como base um fluxo de energia solar, através do processo de fotossíntese. Este processo biológico confere às plantas a capacidade de produzirem material biológico (biomassa) a partir de CO₂ (existente na atmosfera), água e nutrientes. A existência de um pigmento verde nas plantas, designado de clorofila, é a chave de todo este processo, sendo responsável pela conversão de energia solar em energia química, uma vez que consegue converter o CO₂ absorvido em hidratos de carbono, armazenados nas diferentes partes da planta (raízes, caule e folhas).

A queima de biomassa para fins energéticos devolve à atmosfera o CO₂ retido pela biomassa vegetal. O crescimento de novas plantas e árvores mantém o ciclo do carbono atmosférico em equilíbrio, através da reabsorção deste CO₂ (ver Figura 3.1). É chamado o ciclo de carbono “Zero” ou neutro que pode repetir-se infinitamente. A gestão sustentável das fontes de biomassa vegetal é de extrema importância para garantir o bom funcionamento deste ciclo. Isto implica que a biomassa consumida seja reposta por reflorestação ou replantação.



Figura 3.1: Ciclo do carbono da biomassa vegetal.

No entanto, só pode ser considerado um ciclo de carbono neutro se forem excluídas as emissões adicionais de CO₂ fóssil libertadas na recolha, pré-tratamento e transporte da biomassa.

Dentro dos recursos energéticos renováveis, a biomassa pode ser considerada como sendo o mais abrangente, por ser o único recurso renovável que permite a produção de calor, electricidade e biocombustíveis. Este facto advém da possibilidade de converter a biomassa em diversos combustíveis, nomeadamente, combustíveis sólidos, líquidos e gasosos.

Biomassa Sólida – tem como fontes principais os produtos e resíduos sólidos provenientes das actividades agro-florestais e a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos;

Biomassa Líquida (biocombustíveis) – provém principalmente de culturas agrícolas, designadas de culturas energéticas. Os principais combustíveis são o biodiesel, o bioetanol e biometanol, utilizados no sector dos transportes como substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis.

Biomassa Gasosa (ou biogás) – tem origem nos efluentes agro-pecuários e urbanos.

Dado que o âmbito deste trabalho incide na produção de electricidade a partir de biomassa sólida, seguidamente serão descritos os principais processos de conversão e combustão de biomassa, fazendo-se também uma descrição da biomassa susceptível de ser utilizada na geração de energia, e como se encontra distribuída em Portugal, particularmente na zona envolvente à central em estudo.

3.1 PROCESSOS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA

O crescente interesse mundial no uso de biocombustíveis para fins energéticos tem vindo a aumentar nas últimas décadas. Associado a este crescente interesse estão os benefícios políticos e económicos que permitem a redução da dependência de importação de petróleo; os benefícios ambientais, tais como, a mitigação dos gases com efeito de estufa e acidificação; e a criação de novos postos de trabalho.

Os biocombustíveis podem satisfazer grande parte da necessidade energética se forem introduzidas as melhores tecnologias disponíveis. Por esta razão, muitos países estão envolvidos no desenvolvimento de novas tecnologias para a geração de energia a partir de biomassa.

A biomassa pode ser convertida através de diferentes tecnologias. A escolha do processo de conversão depende do tipo de biomassa e da sua utilização final. As tecnologias de

conversão de biomassa são geralmente divididas em dois principais processos de conversão: conversão termoquímica, adequada para tipos de biomassa com teores de humidade baixos (biomassa sólida) e conversão bioquímica, utilizada em biomassa com teores de humidade mais elevados (biomassa líquida) (McKendry, 2002a).

Quanto à conversão termoquímica existem quatro processos que podem converter a biomassa em energia útil: combustão, gasificação, pirólise e liquefacção. Para a conversão bioquímica de biomassa existem dois processos principais: digestão anaeróbia que tem como produto final o gás metano utilizado na produção de calor e electricidade e a fermentação para a produção de etanol, que poderá ser utilizado como biocombustível no sector dos transportes (ver Figura 3.2) (McKendry, 2002a).

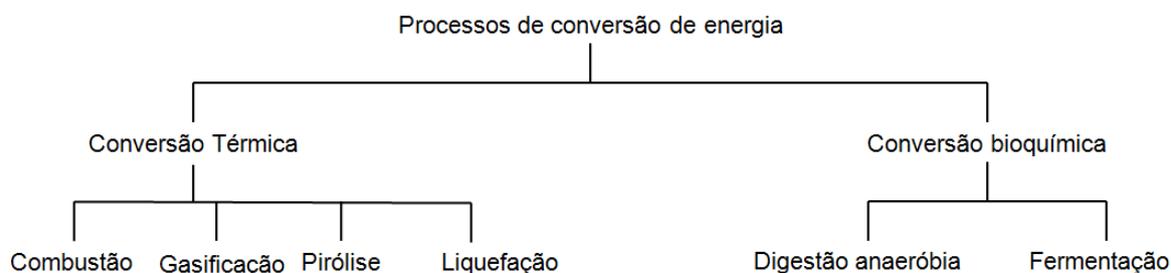


Figura 3.2: Classificação das tecnologias de conversão da biomassa.

Relativamente aos processos de conversão termoquímica, a combustão directa é o processo mais frequentemente utilizado para a produção de calor e electricidade a partir de biomassa, no entanto a gasificação, a pirólise e a liquefação são processos de conversão que geram cada vez mais interesse, uma vez que permitem ampliar o uso da biomassa como energia alternativa, nomeadamente a geração de gás combustível. Seguidamente apresenta-se um pequeno resumo da caracterização de cada um dos processos de conversão termoquímica, os seus produtos e utilização final.

Pirólise - é um processo de degradação térmica que decorre na ausência do fornecimento de oxigénio. É sempre o primeiro passo no processo de combustão e gasificação, sendo estes seguidos pela oxidação completa ou parcial dos produtos da pirólise. A baixas temperaturas e com longos tempos de residência é favorecida a

produção de carvão, por outro lado, elevadas temperaturas e longos tempos de residência possibilitam a conversão da biomassa a gás combustível, e temperaturas moderadas com tempos de residência baixos permitem a produção de combustível líquido (ver Tabela 3.1) (Brigdwat, 2003).

Tabela 3.1: Rendimentos típicos (em base de madeira seca) obtidos a partir de diferentes tipos de pirólise da madeira (adaptado de Brigdwat, 2003).

		Líquido (%)	Carvão (%)	Gás (%)
Pirólise rápida	Temperatura moderada, curto tempo de residência particularmente do vapor	75	12	13
Carbonização	Temperatura baixa, tempo de residência muito longo	30	35	35
Gasificação	Temperatura elevada, longos tempos de residência	5	10	85

O carvão pode ser valorizado na produção de carvão activo, usado na indústria metalúrgica ou para fins domésticos. O combustível gasoso, formado durante o processo de pirólise pode ser utilizado para a produção de calor e energia ou sintetizados para a produção de metanol ou amónia. O combustível líquido pode ser refinado para a produção de bio-óleo e biocombustíveis líquidos com alto teor de hidratos de carbono, ou utilizado directamente para a geração de calor e electricidade (Loo, 2008).

Gasificação - é um processo de degradação térmica que tem como princípio básico a oxidação parcial da biomassa produzindo um gás combustível, constituído essencialmente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogénio (H) e metano (CH₄). Este processo pode utilizar como agente oxidante ar, oxigénio ou CO₂, sendo o oxigénio, o agente oxidante que permite produzir gás combustível com maior poder calorífico. Através de processos de síntese, o gás combustível pode ser usado para a produção de metanol, queimado para a produção de água quente e vapor; utilizado em turbinas a gás para a produção de calor e electricidade. A utilização do gás combustível em turbinas a gás só deve ser feita após a remoção de contaminantes, tais como, partículas de carvão, cinzas e componentes alcalinos (Loo, 2008).

Liquefação - pode ser definida como um processo de conversão termoquímica de fase líquida a baixas temperaturas (523-623 K) e alta pressão (100-200 bar). Comparado com

a pirólise, o processo de liquefacção é mais eficiente na produção de bio-óleo, e o seu poder calorífico é mais elevado devido ao baixo teor de oxigénio (Loo, 2008).

Combustão - pode ser definida como a oxidação completa da biomassa. O produto resultante da combustão, calor, pode ser utilizado directamente para o aquecimento em pequenas unidades de combustão, como é exemplo, as lareiras ou queimadores de biomassa, ou para o aquecimento de água em caldeiras domésticas e aquecimento de água em caldeiras para geração de electricidade em centrais termoeléctricas (Loo, 2008).

Na Figura 3.3 apresentam-se as tecnologias de conversão termoquímica, os seus produtos e uso final.

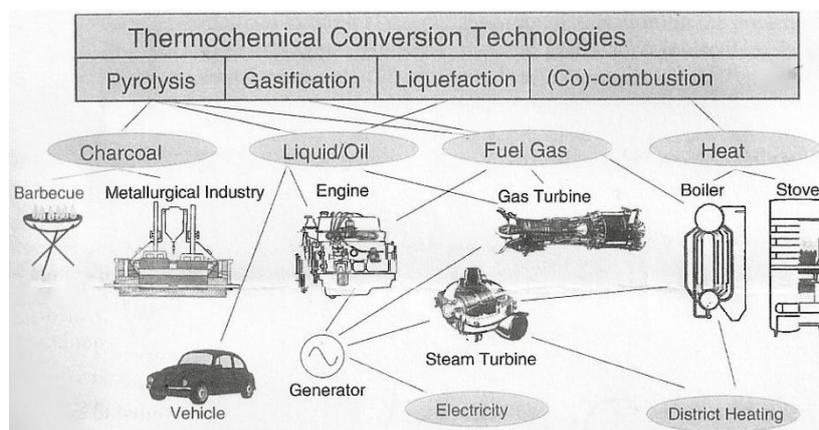


Figura 3.3: Tecnologias de conversão termoquímica de biomassa, produtos e uso final (Loo, 2008).

Tendo em conta que o tema deste trabalho está centrado na produção de electricidade por combustão directa de biomassa, seguidamente serão apresentados os principais processos de combustão.

3.2 PROCESSOS DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Actualmente são usadas várias tecnologias para a combustão de biomassa, desde reactores contínuos a descontínuos. Atendendo ao âmbito do presente trabalho, apenas serão enunciadas as principais tecnologias utilizadas na combustão de biomassa para fins energéticos em reactores contínuos, nomeadamente, em sistemas de combustão em leito fixo (grelha) e em leito fluidizado.

3.2.1 COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM SISTEMA DE GRELHA

A combustão em grelha é um sistema que na actualidade é essencialmente usado para a queima de biomassa e em fornalhas de carvão de pequenas dimensões. A capacidade das caldeiras de grelha usadas em centrais de biomassa com cogeração pode ir desde 4 a 300 MWe (geralmente entre 20 e 50 MWe) (Yin, 2008).

Existem vários tipos de grelhas, diferenciando-se por serem estacionárias ou mecânicas que operam por carga ou continuamente. Basicamente, o sistema de combustão em grelhas é constituído por quatro elementos: sistema de alimentação de biomassa, as grelhas, uma entrada de ar secundário e um sistema de descarga de cinzas. Como exemplo, na Figura 3.4 apresenta-se a configuração de um sistema de combustão de grelha recíproca. Neste caso a grelha tem como função o transporte da biomassa ao longo da câmara de combustão e distribuição do ar primário.

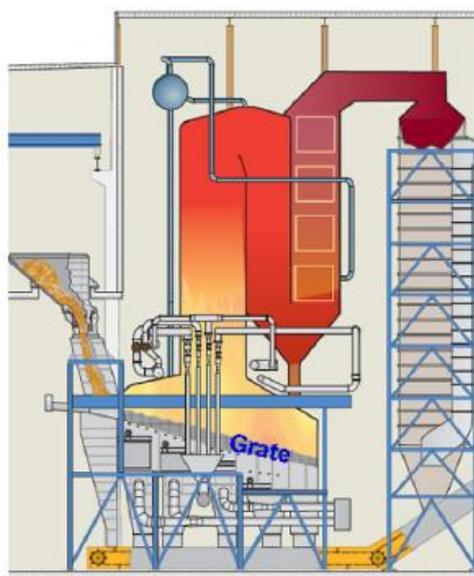


Figura 3.4: Sistema de combustão de grelha (grelha recíproca) (Yin, 2008).

As grelhas estacionárias não se deslocam, e como tal, a sua inclinação é das principais características 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 reactor e as dificuldades no controlo do processo de combustão.

Nas grelhas móveis, 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 colectador de cinzas.

Uma vez que neste tipo de grelha não há mistura entre a alimentação e o processo combustão, existe maior controlo do processo e um aumento na eficiência de conversão de carbono.

As grelhas recíprocas são também grelhas móveis que transportam a biomassa com movimentos ascendentes ou descendentes provocando a combustão do resíduo à medida que esta se vai deslocando até ao colector de cinzas.

A grelha vibratória é actualmente um sistema pouco usado. Esta grelha devido ao seu movimento espalha o combustível de forma uniforme. A sua única vantagem, em comparação com as outras grelhas mecânicas, é ter menos peças móveis diminuindo os custos associados à manutenção.

3.2.2 COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO

Actualmente, a combustão em leito fluidizado representa um dos sistemas mais usados para queima de biomassa. Esta tecnologia é muito flexível porque permite a queima de combustíveis com poder calorífico baixo e teor de humidade elevado, apresentando taxas de transferência de calor e de massa mais elevadas quando comparadas com outros sistemas. Para além de ser uma tecnologia eficiente, é também considerada limpa, pois permite a redução da emissão de alguns poluentes, como óxidos de Azoto (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2) (Koornneef *et al*, 2007).

No entanto existem restrições, nomeadamente no que diz respeito à utilização de combustíveis com elevado teor em cinzas, 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. Esses compostos poderão formar aglomerados no leito constituídos por cinza e areia ligados após fusão, podendo causar a sua desfluidização (Khan *et al*, 2009).

Um leito fluidizado consiste num leito de partículas mantidas em movimento vigoroso pelo ar que se escoia no sentido ascendente do leito (ver Figura 3.5). É composto por uma câmara de combustão, designada de *freeboard*, e por um leito de matéria inerte particulada. Normalmente o leito é constituído por areia, cinzas e um material adsorvente para a remoção de SO_2 , tal como dolomite ou calcário. Para além da remoção de SO_2 , o leito serve de reservatório de calor para que as reacções 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 dimensões reduzidas e, devido 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).

Para velocidades baixas do escoamento, o ar percola pelo leito e este permanece fixo, mas aumentando a velocidade, o leito expande-se e quando a força ascendente do ar iguala o peso do leito, atinge-se a situação mínima de fluidização.

Portanto, para valores superiores à velocidade mínima de fluidização, tipicamente 1-2 m/s, o ar além de percolar escoar-se sobre a forma de bolhas (Tarelho, 2001).

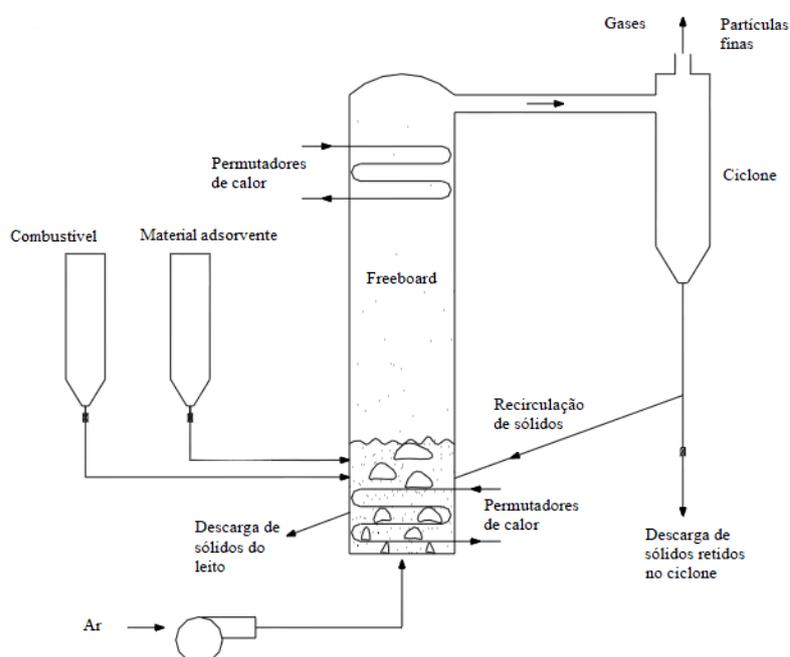


Figura 3.5: Sistema de leito fluidizado (adaptado de Tarelho, 2008)

3.3 BIOMASSA SUSCEPTÍVEL DE SER UTILIZADA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Actualmente existem diversos sectores de actividade que contribuem para a geração de biomassa susceptível de ser utilizada para a produção de electricidade. Actividades agrícolas, florestais e pecuárias, são algumas das principais fontes de biomassa utilizável para a produção energética. Seguidamente apresenta-se uma breve descrição da origem

de biomassa gerada em cada um dos referidos sectores, com especial ênfase para a biomassa de origem florestal.

3.3.1 RESÍDUOS FLORESTAIS

Desde sempre que a nossa sociedade aproveita a biomassa florestal como fonte de energia, nomeadamente para a utilização doméstica. Na última década, com o desenvolvimento industrial muitos dos resíduos provenientes das florestas foram encaminhados para o abastecimento de unidades industriais contribuindo para a geração de calor e/ou electricidade.

A biomassa florestal é a fracção biodegradável dos produtos resultantes de actividades silvícolas e desperdícios das unidades de transformação de madeira. O seu aproveitamento para fins energéticos é de grande importância, não só por se tratar de um recurso endógeno, mas também pela sua susceptibilidade óbvia em termos económicos. A limpeza das florestas e a luta contra os incêndios florestais fazem parte da actual política de defesa das florestas, o que impulsiona o mercado da biomassa florestal para fins energéticos (DGRF, 2005).

Estes produtos são gerados em operações de condução (ex: desbaste e desrama), e exploração dos povoamentos florestais, ou seja, ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes, cascas (Mateus, 2007).

Tendo em conta a origem da biomassa florestal, esta pode ser classificada como primária (BFP) ou secundária (BFS) (Enersilva, 2007).

BFP – fracção biodegradável dos produtos gerados na floresta e que são processados para fins energéticos, nomeadamente os materiais procedentes das operações silvícolas (podas, selecção de toijas, desbastes, cortes fitossanitários e controlo da vegetação espontânea). Também se incluem os resíduos provenientes de cortes finais ou de cortes intermédios, lenhas provenientes das podas e desramações, e material vegetal proveniente de culturas energéticas, lenhosas ou herbáceas.

BFS – matéria orgânica residual (serrins, licores negros, recortes, aparas, etc.) proveniente dos 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 desperdícios de madeira provenientes de outras actividades industriais (paletes e embalagens) e de resíduos urbanos.

A biomassa florestal, tendo em conta a sua origem, pode ser dividida em três grandes grupos: directa das operações florestais; derivada das actividades indústrias de primeira e segunda transformação de produtos florestais e da finalização do ciclo de vida. Na Tabela 3.2 apresentam-se os produtos gerados e a principal utilização final, para cada um dos grupos mencionados anteriormente.

Tabela 3.2: Origem da biomassa florestal (adaptado de CBE, 2009).

Actividades	Processo gerador	Resíduos gerados	Principal utilização final
Directos das operações florestais	Tratamentos silvícolas (limpezas, cortes sanitários, podas e limpeza de matos)	Árvores e toros sem valor comercial, ramos, matos, etc.	Combustível Biocombustíveis sólidos Compostagem Incorporação do solo
	Desbastes comerciais e cortes finais	Copas, ramos, troncos sem valor comercial, lenha, material contaminado	Combustível Biocombustíveis sólidos Indústria da madeira
Actividades Industriais de 1ª e 2ª transformação	Serrações	Serrim, costaneiras, restestos, casca, lenha, etc.	Combustível Biocombustíveis sólidos Indústria da madeira
	Produtos da cortiça	Placas de má qualidade, pó e aparas de cortiça	Combustíveis; Outras indústrias de cortiça; Indústria de madeira; Produção animal; Biocombustíveis sólidos
	Produtos semi-acabados de madeira	Fitas, serrim, costaneiras, restestos, casca, etc.	
	Fabrico mobiliário e carpintarias	Fitas, serrim, restestos	
	Outras indústrias de madeira	Fitas, serrim, restestos, casca, lenha etc	
	Fabrico de pasta de papel	Casca	Combustível
Finalização do ciclo de vida	Produtos lenhosos (embalagens, postes, vedações, ornamentação)	Madeiras contaminadas (tratamentos, tintas, vernizes, cimento, etc.)	Combustível (queima controlada)
	Material de demolição, construção civil (caixilharias, revestimentos, cofragens)		

3.3.2 RESÍDUOS AGRÍCOLAS

O aproveitamento da biomassa proveniente de actividades agrícolas apresenta um conjunto importante de vantagens como o aumento da diversidade de oferta de energia, a criação de oportunidades de emprego e o desenvolvimento económico do sector (DGRF, 2005).

Portugal possui um vasto conjunto de produtos residuais agrícolas que podem ser utilizados como combustível, nomeadamente vindos de culturas agrícolas e da indústria agro-alimentar.

No que se refere às culturas agrícolas, os produtos gerados advêm de podas de vinha, olival e outras culturas permanentes. As actividades da indústria agro-alimentar, como é exemplo a vinificação e olivicultura, originam um conjunto de resíduos orgânicos (bagaço de uva e azeitona) susceptíveis de serem aproveitados como combustíveis para a produção de calor e electricidade ou utilizados na produção de bioetanol para ser incorporado em biocombustíveis (DGRF, 2005).

3.3.3 RESÍDUOS AGRO-PECUÁRIOS

Os resíduos resultantes das actividades pecuárias são maioritariamente provenientes de suiniculturas, aviários, boviniculturas, matadouros e indústrias de lacticínios. Para além da sua utilização como fertilizantes agrícolas, o gás produzido através de digestão anaeróbia permite, em sistemas de cogeração, produzir calor satisfazendo as necessidades térmicas dos produtores e, simultaneamente produzir energia eléctrica para o consumo na própria instalação e/ou para a venda à rede nacional eléctrica (DGRF, 2005).

Segundo a estimativa apresentada, em 2005, no relatório sobre a Biomassa e Energias Renováveis na Agricultura, Pescas e Florestas, o potencial energético teórico real para a biomassa de origem animal era de 92 000 tep, resultantes do aproveitamento dos efluentes pecuários (suínos, aves, bovinos) bem como dos matadouros de suínos (ver Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Potencial energético real em biomassa animal (DGRF, 2005).

Espécie	Efectivo Pecuário (10³ cab.)	Biogás/ano (10³ m³)	10⁶ Kcal	10³ tep	10³ Kw
Suicultura (expl > 200 porcas reprodutoras)	1 650	76 755	399 125	36	2 358
Matadouros Suínos	1 000	6 000	31 200	3	184
Bovicultura (expl > 50 cab.)	118	34 310	178 412	16	1 054
Avicultura (carne e poedeiras)	37 908	78 433	407 850	37	2 410
Total		195 498	1 016 587	92	6 006

Segundo o mesmo estudo, face ao potencial estimado, a utilização da digestão anaeróbia deste tipo de biomassa para a produção de biogás é ainda muito reduzido. Entre finais dos anos 70 até ao início dos anos 90, em Portugal, verificou-se um aumento significativo na implementação desta tecnologia com mais de 80 unidades em explorações agropecuárias de grande dimensão. Actualmente estima-se que menos de metade destas instalações se encontre em funcionamento das quais apenas estarão em funcionamento (Berardino, 2008). No entanto, tendo em conta o desenvolvimento da tecnologia de digestão anaeróbia e os problemas ambientais associados a este tipo de resíduos é expectável que a sua aplicação se torne mais bem sucedida.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES DE BIOMASSA

Tendo em conta que no presente trabalho se pretende analisar o uso de biomassa numa central termoelétrica inserida numa unidade de fileira florestal, seguidamente será feito um estudo das disponibilidades de biomassa florestal a nível nacional e local.

3.4.1 DISPONIBILIDADE NACIONAL

Portugal continental, segundo a quinta Revisão do Inventário Florestal Nacional (IFN5) possui cerca de 3,5 milhões de hectares de florestas, correspondendo a 39 % do território nacional (ver Figura 3.6). Relativamente à distribuição das áreas de povoamentos florestais, actualmente o pinheiro bravo é a espécie mais abundante na área florestal

ocupando 885 mil hectares, seguida do eucalipto com 740 mil hectares, sendo o sobreiro a terceira espécie mais representativa em termos de área florestal ocupada com 647 mil hectares (AFN, 2010).

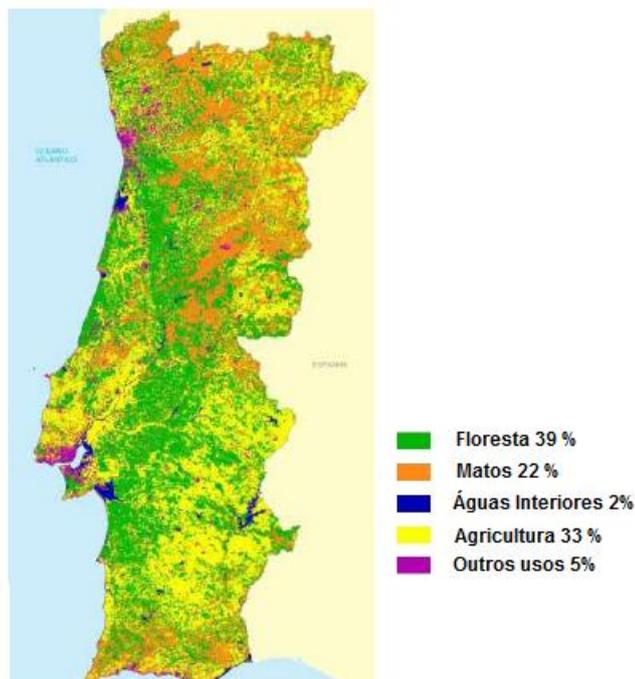


Figura 3.6: Uso/ocupação do solo em Portugal Continental (adaptado de AFN, 2010).

Quanto à evolução da ocupação da área florestal, o pinheiro bravo é a espécie florestal que tem sentido um maior decréscimo, tendo passado de 976 mil hectares, em 1995, para 885 mil hectares em 2006, maioritariamente devido aos incêndios e ao abandono dos povoamentos. Na liderança da evolução da ocupação florestal está o eucalipto, que relativamente ao mesmo período passou de 672 para 740 mil hectares (ver Tabela 3.4) (AFN, 2010).

Tabela 3.4: Área de ocupação florestal por espécies (em 10³ ha), em Portugal continental (adaptado de AFN, 2010).

Espécies	1995-1998	2005-2006
Pinheiro bravo	976	885
Eucalipto	672	740
Sobreiro	713	716
Azinheira	462	413
Pinheiro Manso	78	130
Outras resinosas	27	25
Carvalhos	131	150
Castanheiros	41	30
Outras folhosas	102	86

Através da ocupação e uso do solo, é possível quantificar a biomassa florestal resultante da sua exploração (limpezas de matos, cortes, podas, desbastes, raízes), de modo a conhecer o real recurso energético potencial existente (Silva, 2009).

Segundo o IFN5, a biomassa total produzida pelas principais espécies do coberto florestal nacional é de 152 465 kton, sendo cerca de 48 % proveniente da exploração do pinheiro bravo e 31 % do eucalipto (ver Tabela 3.5) (AFN, 2010).

Tabela 3.5: Biomassa total produzida no coberto florestal nacional (kton) (adaptado de AFN, 2010).

Espécies	Biomassa total (kton)
Pinheiro bravo	49 690
Eucalipto	36 252
Sobreiro	34 952
Azinheira	10 671
Carvalhos	6 427
Pinheiro Manso	5 325
Castanheiro	2 407
Acácias	716
Outras folhosas	4989
Outras resinosas	963
Total	152 4695

Os dados apresentados anteriormente são referentes à quantidade total de biomassa florestal que pode ser gerada nas florestas, ou seja, a estimativa da produção potencial de um determinado território florestal. Esta estimativa não permite determinar a biomassa realmente disponível, uma vez que esta está relacionada com uma série de factores que

condicionam a retirada da biomassa florestal primária, tais como, a geomorfologia do terreno (declives e altitude), o acesso às áreas florestais (densidade de rede viária), restrições de ordem legal (áreas proibidas, parques naturais, Rede Natura 2000, etc).

Para quantificar a disponibilidade de biomassa é necessário um conjunto de dados que nem sempre existe ou está indisponível. Neste sentido, torna-se necessário a realização de estudos com base em informação actual e com algum desenvolvimento científico.

Em 2001, no âmbito do “Fórum – Energias Renováveis em Portugal”, um estudo realizado pela ADENE e do INETI, estimou que a floresta portuguesa poderia fornecer anualmente cerca de 2 milhões de toneladas secas, e o contributo da indústria transformadora da madeira contribuiria com 200 mil toneladas de biomassa seca (ver Tabela 3.6). Nesta estimativa incluiu-se não só os ramos e bicas (1,0 Mton), mas também os matos (0,6 Mton) e a biomassa proveniente de áreas ardidadas (0,4 Mton) (ADENE & INET, 2001).

Tabela 3.6: Potencial disponível de resíduos da floresta e da transformação da madeira, para produção energética (adaptado de ADENE & INET, 2001)

Proveniência dos Resíduos	Quantidade (10 ⁶ Ton/ano)
Floresta	2,0
Industria Transformadora de Madeira	0,2
Total	2.2

Um estudo mais recente, realizado em 2006 por Campilho, apresenta uma estimativa da produção de biomassa florestal proveniente da exploração do pinheiro bravo e eucalipto, complementada com a estimativa da produção de biomassa dos matos do sub-coberto florestal. No total, foram estimas 5,1 milhões de toneladas de biomassa seca, das quais 1,4 e 1,1 milhões de toneladas provenientes dos povoamentos de pinheiro bravo e eucalipto, respectivamente (Netto, 2008).

Comparando os estudos referidos anteriormente, e considerando apenas os resíduos de biomassa provenientes dos povoamentos florestais, na estimativa de Campilho constata-se um aumento de 900 mil toneladas. Este aumento é significativo dado que nesta estimativa apenas foram considerados os povoamentos de eucalipto e pinheiro bravo.

3.4.2 DISPONIBILIDADE LOCAL

A área de abastecimento da Central termoelétrica em estudo é considerada até 70 km de distância, com uma área total de 565 mil hectares. Tendo como base os dados referidos no IFN5, metade desta área tem ocupação florestal, sendo composta por povoamentos dominados pelo eucalipto (30 %), pinheiro (60 %) e por outras espécies florestais (10%) (ver Figura 3.7).

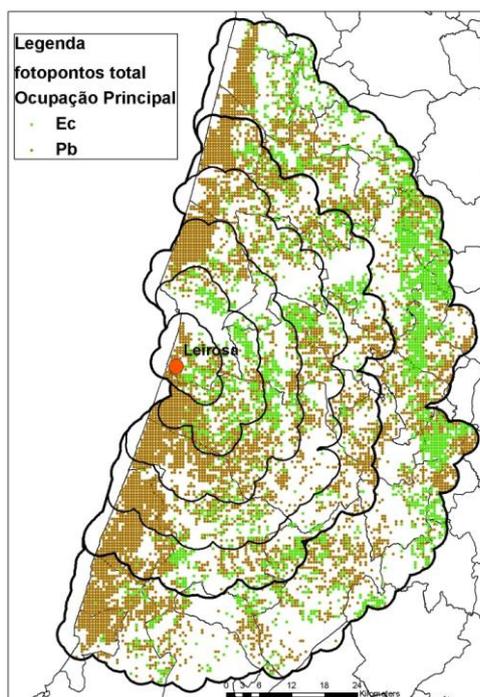


Figura 3.7: Área de abastecimento da central termoelétrica a biomassa (IFN5 (2005/06) da autoria da Autoridade Florestal Nacional e processamento CELPA).

Com base num estudo efectuado por uma entidade privada, estimou-se que a quantidade total de biomassa disponível para a área em causa seja de cerca de 212 mil toneladas por ano, considerando apenas a biomassa proveniente dos povoamentos de pinheiro bravo e eucalipto. A biomassa florestal disponível corresponde à biomassa presente na floresta após corte e é determinada com base em métodos que estimam a quantidade de biomassa dos diferentes componentes da árvore individual. Assim, a estimativa da biomassa disponível é resultante da biomassa potencial, tendo em conta a sua taxa de aproveitamento. Esta taxa de aproveitamento é diferente consoante a espécie em causa: 90% e 65% para o eucalipto e pinheiro respectivamente.

4 CASO DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado com o intuito de avaliar o processo de geração de calor e electricidade, e respectivas emissões de CO₂, para uma central termoelétrica a biomassa, para tal, o estudo teve como base uma central termoelétrica a biomassa localizada nas instalações fabris de uma fábrica de pasta de papel na Região Centro, concelho da Figueira da Foz.

A sua actividade teve início no final do segundo trimestre de 2009, inserindo-se na estratégia política nacional para a energia, pretendendo valorizar, não só os resíduos florestais gerados pelas linhas de preparação de madeiras para o fabrico de pasta de papel, mas também a biomassa residual proveniente da exploração das florestas da região.

A referida avaliação, foi realizada através da caracterização da biomassa, do balanço mássico e energético a todo o processo implícito à geração de calor e electricidade. Para tal, efectuou-se um estudo, por um período de seis meses onde se efectuaram as seguintes recolhas:

- Biomassa;
- Cinzas de fundo procedentes da caldeira de leito fluidizado;
- Cinzas volantes resultantes dos gases de exaustão.

No subcapítulo 4.1 apresenta-se a descrição das características gerais e etapas do processo de produção de calor e electricidade na referida central termoelétrica, com a identificação e quantificação dos recursos utilizados e respectivos efluentes. A metodologia e correspondentes cálculos dos parâmetros necessários à execução do balanço energético à central são apresentadas no subcapítulo 4.2.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA CENTRAL TERMOELÉCTRICA

A central termoelétrica funciona 24 horas por dia e 350 dias por ano, podendo produzir anualmente até 225 GWh de energia eléctrica com um consumo médio de 50 ton/h de biomassa, ao que corresponde, segundo o período de funcionamento, a 420.000 ton/ano de biomassa.

Cerca de 33% da biomassa provem do exterior, resultante da exploração florestal e os restantes 67% de resíduos fibrosos gerados pela fábrica de pasta de papel.

A central termoelétrica é constituída basicamente por uma estação de recepção, preparação, armazenagem e transferência de biomassa; caldeira que utiliza a tecnologia de leito fluidizado com dois electrofiltros; um turbogerador com condensador de vapor; uma torre de refrigeração e uma chaminé para o escoamento dos gases de exaustão.

Na Figura 4.1 apresenta-se o diagrama dos elementos constituintes da central termoelétrica.

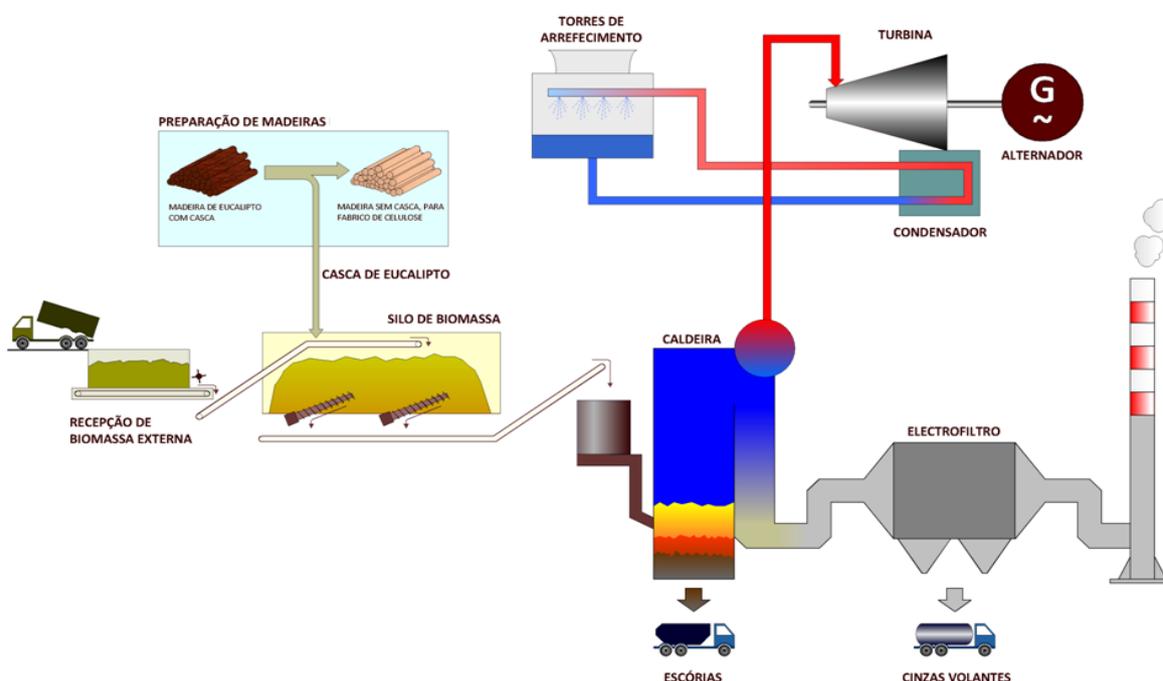


Figura 4.1: Diagrama da configuração das instalações da central termoelétrica.

4.1.1 OPERAÇÕES NA UNIDADE DE CO-GERAÇÃO

No processo de produção de calor e electricidade à que considerar as seguintes etapas:

1ª Etapa: Recepção, Preparação e Armazenamento de biomassa

A biomassa interna, proveniente da descasca do eucalipto utilizado para o fabrico de celulose, é armazenada num silo com capacidade de 15.000 m³. A biomassa externa, entregue na instalação já destrozada, excepção para o caso de toros ou raízes de grandes dimensões que são destrozados por um triturador de grossos nas próprias instalações, é descarregada numa fossa de recepção de betão com cerca de 240 m³ de capacidade. Antes de seguir para o silo de armazenagem, a biomassa externa passa um sistema de remoção de pedras e outros materiais indesejáveis. Do silo de armazenagem, a biomassa é transferida por transportadores de tapete para dois silos diários de armazenagem com uma capacidade unitária de 100 m³, que irão alimentar a caldeira.

A Figura 4.2 mostra um diagrama do sistema de recepção, preparação e armazenamento da biomassa utilizada para a produção de calor e electricidade na central termoeléctrica.

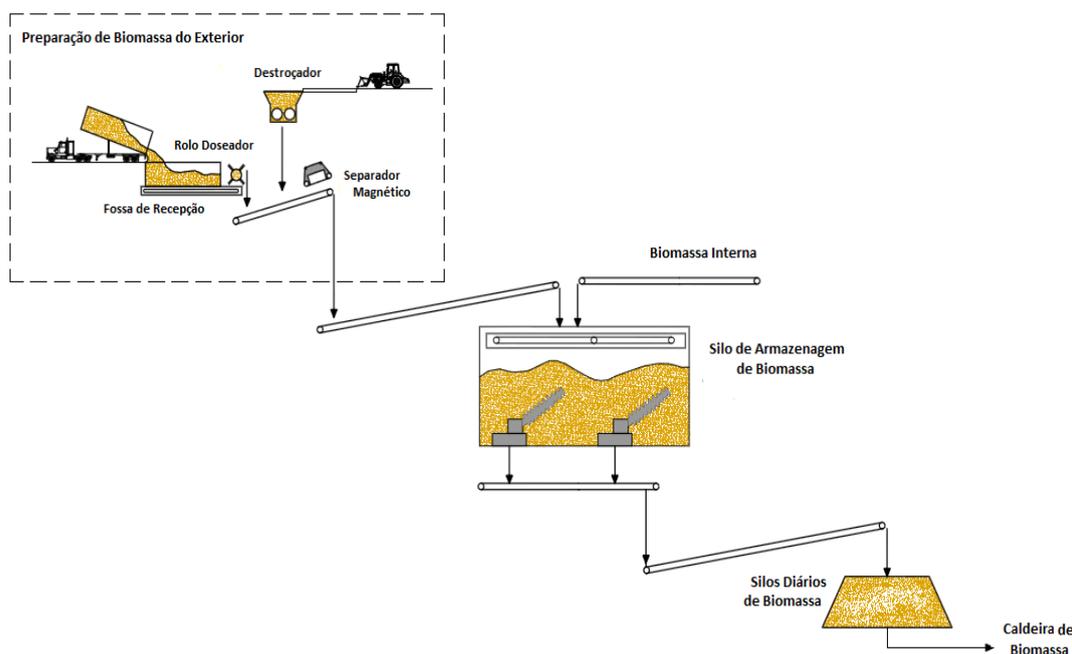


Figura 4.2: Diagrama do sistema de recepção, preparação e armazenamento de biomassa.

2ª Etapa: Queima de Biomassa e Produção de Vapor

A biomassa vinda dos silos de armazenamento é combustada na caldeira de leito fluidizado que possui uma potência térmica nominal de 95 MWt com uma eficiência térmica de 87,4 %, operando a temperaturas entre 750 e 950 °C. A caldeira possui ainda dois queimadores auxiliares a gás natural que podem funcionar exclusivamente a gás natural com uma potência máxima de 70 MWt e, em situações de arranque e paragem, sem alimentação de biomassa, com uma potência térmica máxima de 40 MWt.

O calor resultante da combustão da biomassa é utilizado para produzir vapor de alta pressão. As cinzas de fundo, constituídas por areia, escórias e inqueimados, são removidas da fornalha e armazenadas em contentores para posterior valorização. As cinzas volantes provenientes dos gases de exaustão são capturadas por dois electrofiltros de alta eficiência. Livres de partículas, os gases de exaustão, são descarregados para a atmosfera através de uma chaminé com 80 m de altura.

3ª Etapa: Produção de Electricidade e Sistema de Refrigeração

O calor proveniente da combustão da biomassa gera vapor de alta pressão (88 bar, 480 °C), que é encaminhado para a turbina de condensação com uma potência nominal de 31,2 MWe, à qual se encontra ligado um alternador com uma potência eléctrica instalada de 36,9 MVA, gerando um nível de energia eléctrica de tensão 10 kV. Depois de elevada a tensão em subestação própria, a energia eléctrica é fornecida à rede eléctrica nacional.

O vapor de alta pressão, depois de ser expandido na turbina de condensação é conduzido não só para o condensador, mas também aproveitado para o pré-aquecimento da água de alimentação à caldeira e pré-aquecimento do ar de combustão. O vapor que chega ao condensador, depois de condensado indirectamente é conduzido para o tanque de água de alimentação à caldeira.

A refrigeração da água utilizada no condensador da turbina é feita numa torre de refrigeração constituída por quatro células com ventilação forçada e dimensionada para um caudal de água de 4.500 m³/h.

Na Figura 4.3 apresenta-se um diagrama esquematizado do processo de produção de calor e electricidade na referida central termoeléctrica a biomassa.

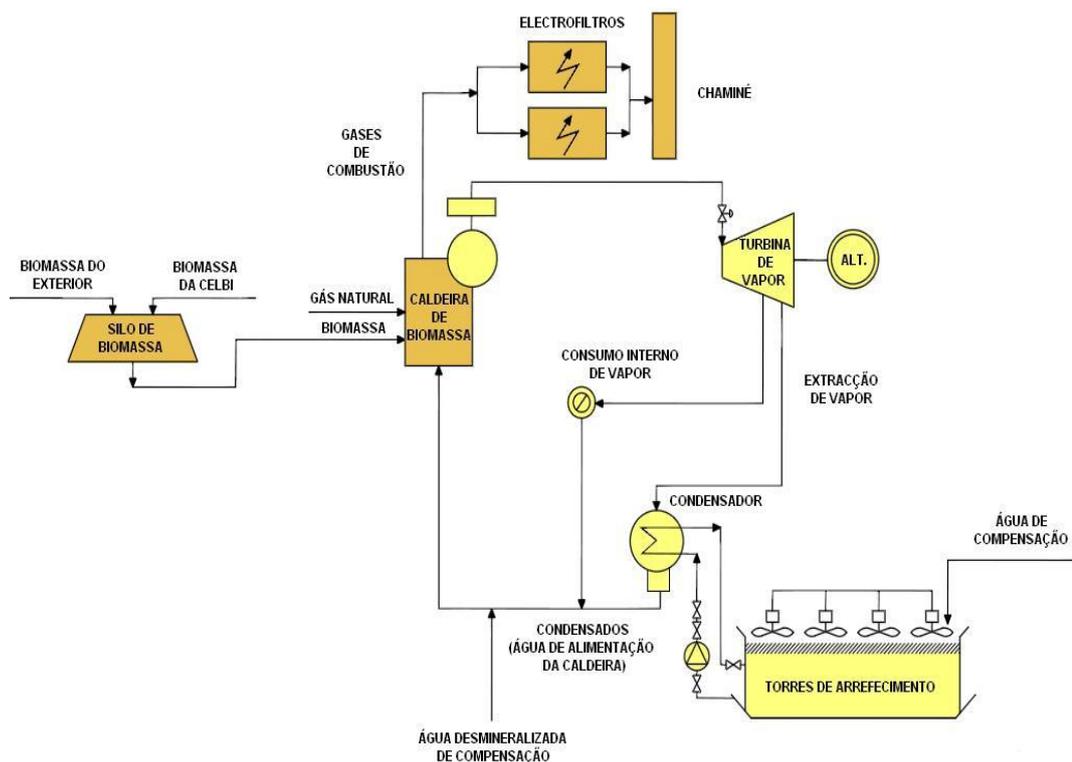


Figura 4.3: Diagrama do processo de produção de calor e electricidade na central termoelétrica a biomassa.

4.1.2 UTILIZAÇÃO DE RECURSOS

Biomassa

A central termoelétrica utiliza como matéria-prima biomassa proveniente do descasque de eucalipto para o fabrico de celulose (biomassa interna), e biomassa residual vinda da exploração florestal da zona envolvente à central (biomassa externa).

Para um consumo médio estimado de 50 ton.h^{-1} de biomassa, em base tal e qual, considerando o período de funcionamento da central, de 8.400 h.ano^{-1} , e sabendo que 67% do consumos total é biomassa interna, sendo os restantes 33% de biomassa externa, os consumos estimados de biomassa são, respectivamente $281.400 \text{ ton.ano}^{-1}$ e $138.600 \text{ ton.ano}^{-1}$, em base tal e qual.

Gás Natural

Usualmente a central não usa gás natural, apenas é utilizado em caso de inexistência temporária de biomassa ou em situações de arranque. O consumo médio estimado para tais situações é de $4.000.000 \text{ Nm}^3.\text{ano}^{-1}$.

Energia Eléctrica

O consumo médio anual estimado de energia eléctrica, considerando que a central funciona 8.400 h/ano é de 20.000 MWh, representando cerca de 9% dos 225.000 MWh de energia eléctrica total produzida anualmente pela central.

Água de Abastecimento

A central utiliza água desmineralizada para compensar as perdas na purga da caldeira, sendo o seu consumo estimado de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. A água é também utilizada para contrabalançar as perdas no sistema de refrigeração do condensador da turbina, sendo o seu consumo estimado de $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. No total, estima-se que a central termoeléctrica consuma um valor estimado de $756.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ de água, para um período de funcionamento de 8.400 horas.

Ar de Combustão

O consumo de ar de combustão foi estimado em $100.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, dos quais $61.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ são ar de combustão primário e a parte restante, $39.000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ar de combustão secundário.

Areia

Para o funcionamento do leito fluidizado, a central utiliza areia, com dimensão compreendida entre 0,5 – 1 mm. O seu consumo médio é de $5 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1}$.

4.1.3 PRODUÇÃO DE EFLUENTES

Efluentes Líquidos

No que diz respeito a efluentes líquidos, estes são resultantes das purgas da caldeira e das purgas da torre de refrigeração, correspondendo a um caudal de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ e $70 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivamente. Dado que a central não possui instalações sanitárias não é gerado efluente doméstico.

Resíduos Sólidos

Diariamente, em média, são escoadas 40 t de cinzas de fundo, constituídas essencialmente por areia, escórias e inqueimados, e 70 t/d de cinzas volantes provenientes dos gases de exaustão.

Efluentes Gasosos

As emissões de poluentes para a atmosfera geradas na central, são provenientes da caldeira a biomassa com uma potência nominal de 95 MWth. A descarga do efluente gasoso, com um caudal médio mensal de 152.000 Nm³/h, é efectuada através de uma chaminé com 80 m de altura.

4.2 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

O estudo da conversão energética da biomassa foi realizado não só com o objectivo de analisar o contributo da central termoeléctrica para o sector electroprodutor nacional, como também analisar, em termos de fluxos matérias, todo o processo implícito na geração de calor e electricidade. Assim, o estudo da conversão energética da biomassa foi dividido em quatro partes distintas:

1. Caracterização da biomassa, onde se inclui a recolha e nomenclatura das amostras, e a análise dos principais parâmetros (teor de humidade, teor de inertes, teor de cinzas e poder calorífico);
2. Caracterização dos produtos de combustão (cinzas e escórias);
3. Balaço mássico e energético à caldeira;
4. Eficiência energética da instalação.

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

4.2.1.1 RECOLHA E NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

O período do presente estudo teve início a 11 de Novembro de 2009 e fim a 1 de Abril de 2010. Inicialmente as recolhas eram feitas quinzenalmente, passando-se para uma única recolha em cada mês, por não se justificar em termos de diversidade de biomassa.

A biomassa amostrada advém das seguintes fontes:

1. Exploração das florestas da região envolvente à central, designada por biomassa externa, “Ext”;
2. Descasque de eucalipto utilizado pela fábrica de pasta de papel, designada de biomassa interna, “Int”;

3. Tapete de transporte para a caldeira, que inclui a mistura da biomassa externa e interna, designada de biomassa mistura, “Mix”.

Biomassa Externa

A descarga da biomassa externa efectua-se directamente na fossa de recepção (ver Figura 4.4), ou em caso de abundância e elevadas dimensões (cepos de eucalipto), é depositada em pilha na zona recepção de biomassa.

Com o intuito de caracterizar o maior número possível de tipos de biomassa externa, as recolhas foram feitas nas diferentes pilhas existentes na zona de recepção de biomassa.

Para diferenciar os tipos de biomassa Ext recolhida ao longo do período de estudo, para cada amostra foram utilizados algarismos, como exemplo, dois tipos de biomassa são diferenciados respectivamente por Ext 1 e Ext 2. Os meses de cada recolha foram distinguidos acrescentado o seu respectivo número. Como no primeiro mês se efectuaram duas recolhas, estas foram diferenciadas pelo número do mês e número de recolha. A título de exemplo, a primeira recolha de dois tipos de biomassa externa no mês de Novembro é designada respectivamente por “ 11.1Ext 1” e “11.1Ext 2”.

Biomassa Interna

A recolha da biomassa interna efectuou-se no início do tapete que transporta a biomassa interna, proveniente do descasque de eucalipto na fabrica de pasta de papel, para o silo de armazenamento de biomassa. Como neste caso o tipo de biomassa não varia, as amostras foram diferenciadas apenas pelo mês da recolha, como exemplo, a biomassa interna recolhida no mês de Dezembro foi designada por “12Int”.

Biomassa Mistura

A biomassa mistura, que segue dos silos de armazenamento diário para a caldeira, foi recolhida num ponto de amostragem existente no tapete de transporte final para a caldeira. De modo análogo à designação da biomassa interna, a recolha de uma amostra de biomassa mistura para o mesmo mês, é designada por “12Mix”.



Figura 4.4: Fossa de descarga da biomassa externa.

Uma vez que se pretende caracterizar a biomassa utilizada para combustão, é importante identificar os diferentes tipos de biomassa externa recolhida.

Na Tabela 4.1 apresentam-se, para o período de estudo, os diferentes tipos de biomassa analisados.

Tabela 4.1: Tipos de biomassa recolhidos no período de estudo.

Data da Recolha	Amostra	Massa de amostra recolhida (kg)	Tipo de Biomassa								Outro (1)
			Eucalipto				Pinheiro				
			Casca	Folhas	Ramos	Estilha	Casca	Folhas	Ramos	Estilha	
3-Nov-09	11.1Int	0,6518	X								
	11.1Ext 1	0,3290					X	X	X		
	11.1Ext 2	1,9540	X	X	X						
	11.1Ext 3	2,4770	X	X				X	X		
	11.1Ext 4	3,4345				X					
	11.1Mix	1,7335	X	X							
17-Nov-09	11.2Int	0,8285	X								
	11.1Ext 1	4,2175	X	X	X						
	11.2Ext 2		X	X		X					X
	11.2Mix	1,7805	X		X						
02-Dez-09	12Int		-								
	12Ext 1	1,8089	X	X	X						
	12Mix	1,7950	X	X				X	X		
18-Jan-10	01Int	1,4425	X								
	01Ext 1	2,9175	X	X							X
	01Ext 2	0,9950				X					
	01Mix	2,0355	X		X						
22-Fev-10	02Int	0,9455	X								
	02Ext 1	2,7535								X	
	02Ext 2	2,8515	X	X	X						
	02Mix	1,3675	X	X		X					
17-Mar-10	03Int	1,4635	X								
	03Ext 1	2,1335						X	X	X	
	03Ext 2	6,3395	X	X						X	
	03Mix	2,3355	X	X		X				X	
01-Abr-10	04Int	1,0525									
	04Ext 1	1,6765					X			X	
	04Ext 2	1,3930								X	
	04Mix	1,8225	X				X			X	

(1) Biomassa residual da manutenção de jardins (relva, arbustos, folhas e ramos).

Com base na análise da Tabela 4.1, verifica-se que a maioria da biomassa utilizada pela central termoelétrica é composta por casca de eucalipto proveniente do descasque efectuado na floresta e na central. No final do período de estudo há que salientar a predominância de estilha de pinheiro, devendo-se este facto ao abate deste tipo de

árvores por motivos de doença. Seguidamente apresentam-se algumas imagens dos principais tipos de biomassa analisada (ver Figura 4.5).

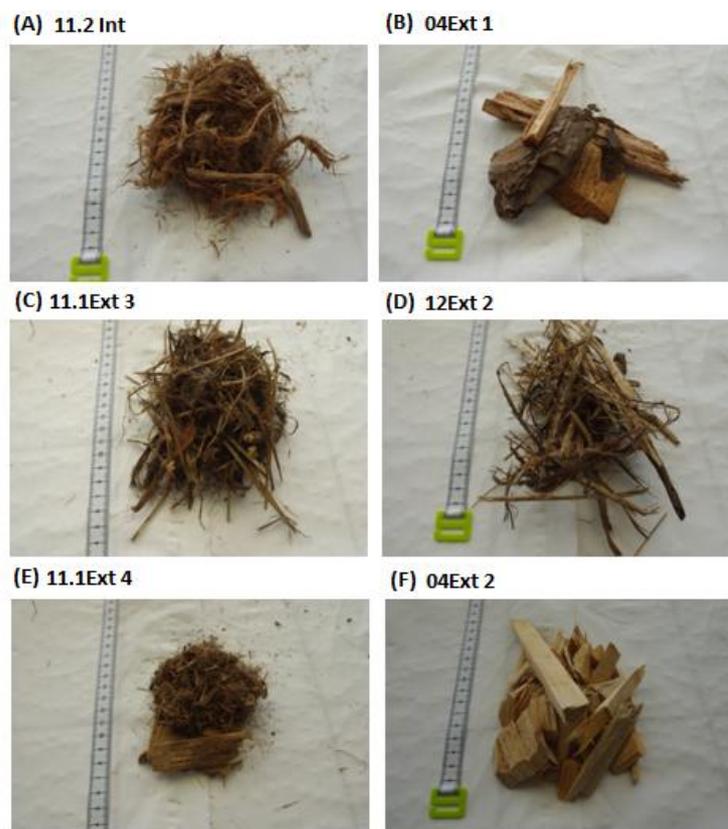


Figura 4.5: Casca de eucalipto (A), casca de pinheiro (B), bicadas de pinheiro (C), bicadas de eucalipto (D), estilha de eucalipto (E), estilha de pinheiro (F).

4.2.1.2 TEOR DE HUMIDADE TOTAL

Existe uma relação directa entre o teor de humidade extrínseca da biomassa e a eficiência do processo de combustão. Para sistemas térmicos de conversão energética o valor típico do teor de humidade no biocombustível não deve ser superior a 50 %, é possível utilizar biomassa com teores de humidade superiores contudo o balanço energético global será afectado negativamente (McKendry, 2002b). Para sistemas de combustão de madeira se o teor de humidade for superior a 60 % (em massa, btq), o processo de combustão não se consegue auto-sustentar (Tarelho, 2008).

Como na referida central termoeléctrica, a biomassa utilizada no processo térmico de conversão energética não passa por nenhum sistema de pré-secagem, é importante determinar o teor de humidade total com que a biomassa é combustada. Para tal, após a

recolha na central termoelétrica, as amostras de biomassa foram levadas para o laboratório, onde se procedeu à sua secagem ao ar e remoção da humidade residual através da secagem em estufa a 105 °C.

Tendo em conta a impossibilidade de colocar a totalidade da massa das amostradas na estufa, e na tentativa de não se perder representatividade, seleccionou-se uma fracção de cada amostra inicial utilizando o método que se designou de quadripartição (ver Figura 4.6). Posteriormente foram colocadas em tabuleiros de alumínio onde se iniciou o processo de secagem ao ar. As amostras permaneceram destapadas e abrigadas da luz solar directa, o tempo necessário até que se deixasse de observar variação no seu peso.

A pesagem das amostras foi feita de dois em dois dias, durante aproximadamente uma semana utilizando uma balança com uma sensibilidade até 0,1g.



Figura 4.6: Quadripartição de uma amostra de biomassa.

A determinação do teor de humidade total, em base tal e qual, teve como referência o procedimento descrito na norma CEN/TS 14774-1, com excepção da trituração das amostras e utilização de apenas 1,0 g, este procedimento não foi efectuado devido ao facto de se pretender determinar o teor de humidade na massa total da fracção seleccionada inicialmente.

Para a determinação da massa seca ao ar, $M_{\text{seca ao ar}} [\%, \text{m/m}]$, foi utilizada a equação 1.

$$M_{\text{seca ao ar}} [\%, \text{m/m}] = \frac{m_{\text{btq}} - m_{\text{seca ao ar}}}{m_{\text{btq}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

$m_{\text{btq}} [\text{g}]$ = massa da amostra antes de seca ao ar

$m_{\text{seca ao ar}} [\text{g}]$ = massa da amostra depois da secagem ao ar

Após a estabilização do peso as amostras foram secas na estufa a 105 °C para a remoção da restante humidade, permitindo calcular o teor de humidade total. Para ter certeza que toda a humidade era removida, repetiram-se os períodos de secagem na estufa até se obter um peso constante.

O cálculo da massa seca a 105 °C, $M_{seca,105\text{ °C}}[\%, m/m]$, foi determinado através da equação 2.

$$M_{seca,105\text{ °C}}[\%, m/m] = \frac{m_{seca\ ao\ ar} - m_{105\text{ °C}}}{m_{ao\ ar}} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$m_{105\text{ °C}}[\text{kg}]$ = massa da amostra depois da secagem a 105 °C

O teor de humidade total, $H_{Total}[\%, m/m]$, expresso em percentagem, foi determinado pela equação 3.

$$H_{Total}[\%, m/m] = M_{seca\ ao\ ar} + M_{seca,105\text{ °C}} \times \left(1 - \frac{M_{seca\ ao\ ar}}{100}\right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Sabendo o teor de humidade total das amostras foi possível determinar a quantidade de água perdida durante o período de secagem ao ar. Para tal, em cada momento de pesagem, i , foi calculada a razão mássica da humidade, $W_{WR,i}$, expressa em kg de água por kg de biomassa seca, a partir da qual foi construída a curva de secagem para cada amostra permitindo observar a evolução do processo de secagem ao ar.

A razão mássica da humidade, $W_{WR,i}$, foi calculada através da razão entre a massa de água obtida em cada momento de pesagem, $m_{H_2O,i}$, e a massa de matéria seca, M_{seca} , obtida em função do teor de humidade total, H_{total} , seguindo o seguinte procedimento de cálculo:

$$\text{Teor}_{matéria\ seca} = 1 - H_{Total} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$M_{seca}[\text{kg}] = \text{Teor}_{matéria\ seca} \times m_{amostra,1} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$m_{H_2O,i}[\text{kg}] = m_{amostra,i} - M_{seca} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$W_{WR,i}[\text{kg}_{H_2O} \cdot \text{kg}^{-1}R, \text{bs}] = \left(\frac{m_{H_2O,i}}{M_{seca}}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Como já foi referido anteriormente, o teor de humidade na biomassa tem influência na eficiência do processo de combustão. A presença de água (humidade) contribui para a diminuição da temperatura uma vez que a vaporização consome energia, tendo como consequência a diminuição da eficiência do processo de conversão energética.

Relativamente aos resultados obtidos é preciso salientar que o teor de humidade extrínseca da biomassa está interligado com as estações do ano, aumentando nas épocas mais chuvosas. Neste estudo não foi possível avaliar a variação do teor de humidade ao longo de todas as estações, porém, é notável o aumento com chegada do Inverno e diminuição com a aproximação das estações quentes. Na Figura 4.9 apresentam-se os gráficos relativos aos valores de humidade total obtidos, em base tal e qual, para cada uma das amostras.

Observando os referidos resultados verificou-se que o teor de humidade total de todas as amostras se encontra compreendido entre os 30 e 66 %, atingindo o seu valor máximo durante o mês de Fevereiro. Para esse mês, a biomassa interna atingiu 66 %, externa-1 60 %, externa-2 65 % e a mistura 61 %.

Tendo em consideração o tipo de biomassa analisada, verificou-se que o teor de humidade total para as amostras que continham apenas pinheiro, 11.1Ext 1 (30 %), 03Ext 1 (51 %), e 04Ext 2 (37 %), apresentaram valores de humidade total mais baixos em comparação com as amostras de eucalipto.

Analisando a Figura 4.7, referente ao teor de humidade total para a biomassa combustada na caldeira (biomassa mistura), verificou-se que tem valores muito próximos, e em alguns casos, acima do valor típico recomendado (< 50 %) para a conversão térmica de biocombustíveis sólidos (McKendry, 2002).

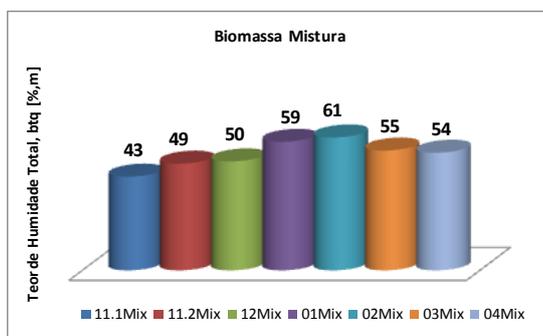


Figura 4.7: Humidade total, em base tal e qual, para a biomassa mistura.

Os resultados obtidos no processo de secagem ao ar para as amostras de biomassa interna e mistura (ver Figura 4.8), expressos em kg de água por kg de biomassa seca, referentes aos meses de estudo, revelaram que embora com valores de razão mássica de humidade diferentes em cada mês, a perda de água é mais significativa nos primeiros cinco dias de secagem.

Para uma análise mais detalhada do processo de secagem ao ar na Figura 4.10 apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das amostras.

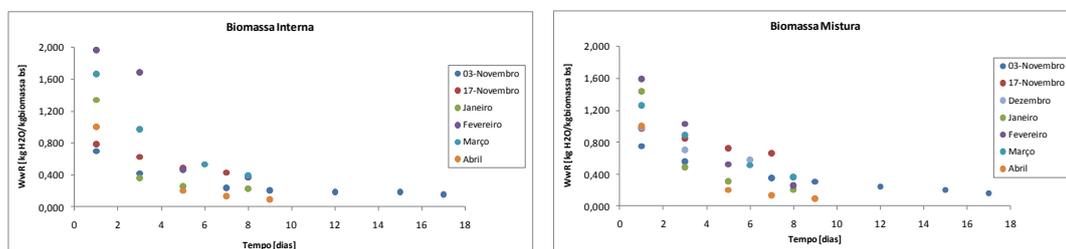


Figura 4.8: Secagem ao ar para a biomassa interna e mistura.

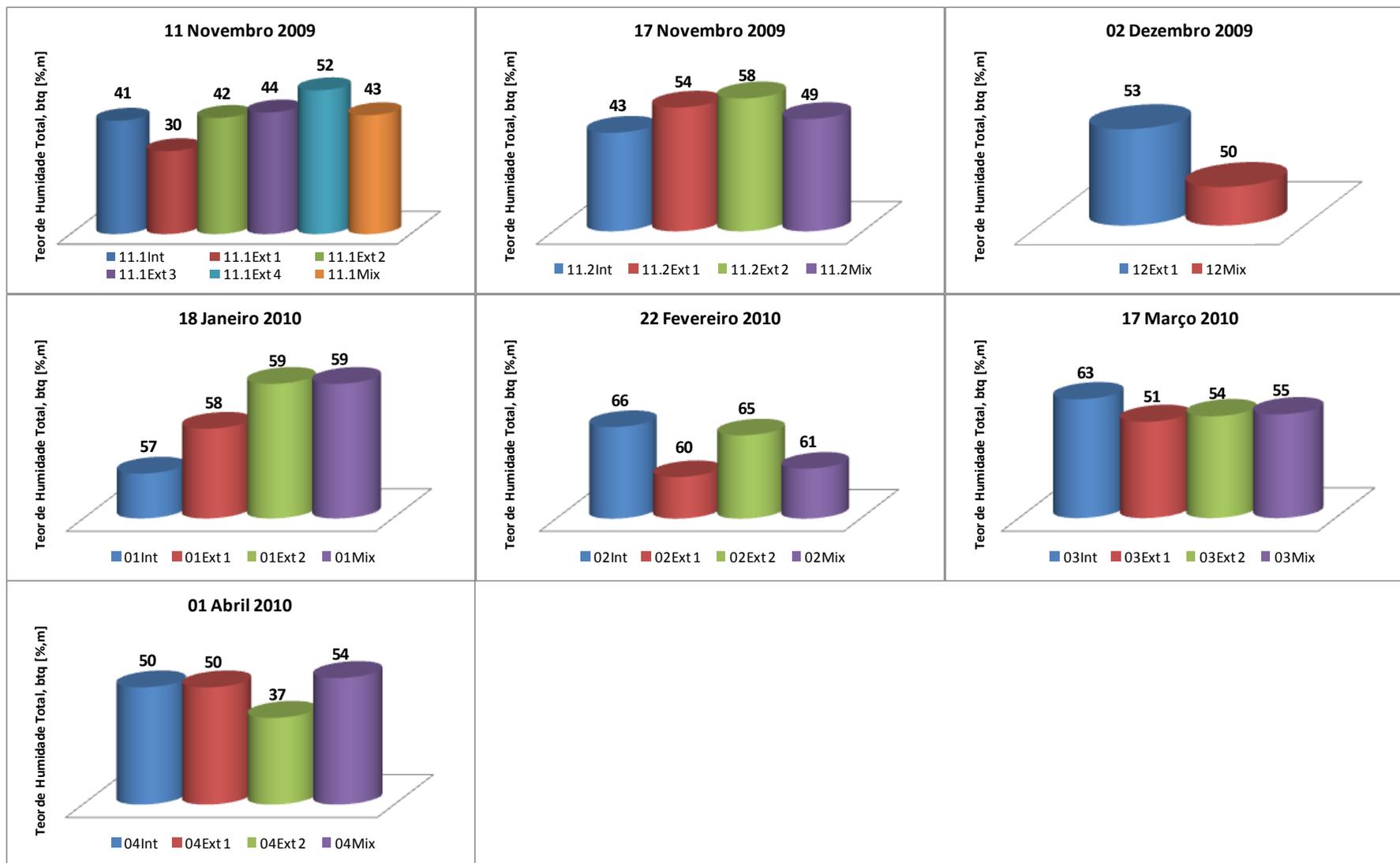


Figura 4.9: Percentagem de humidade total, em base tal e qual.

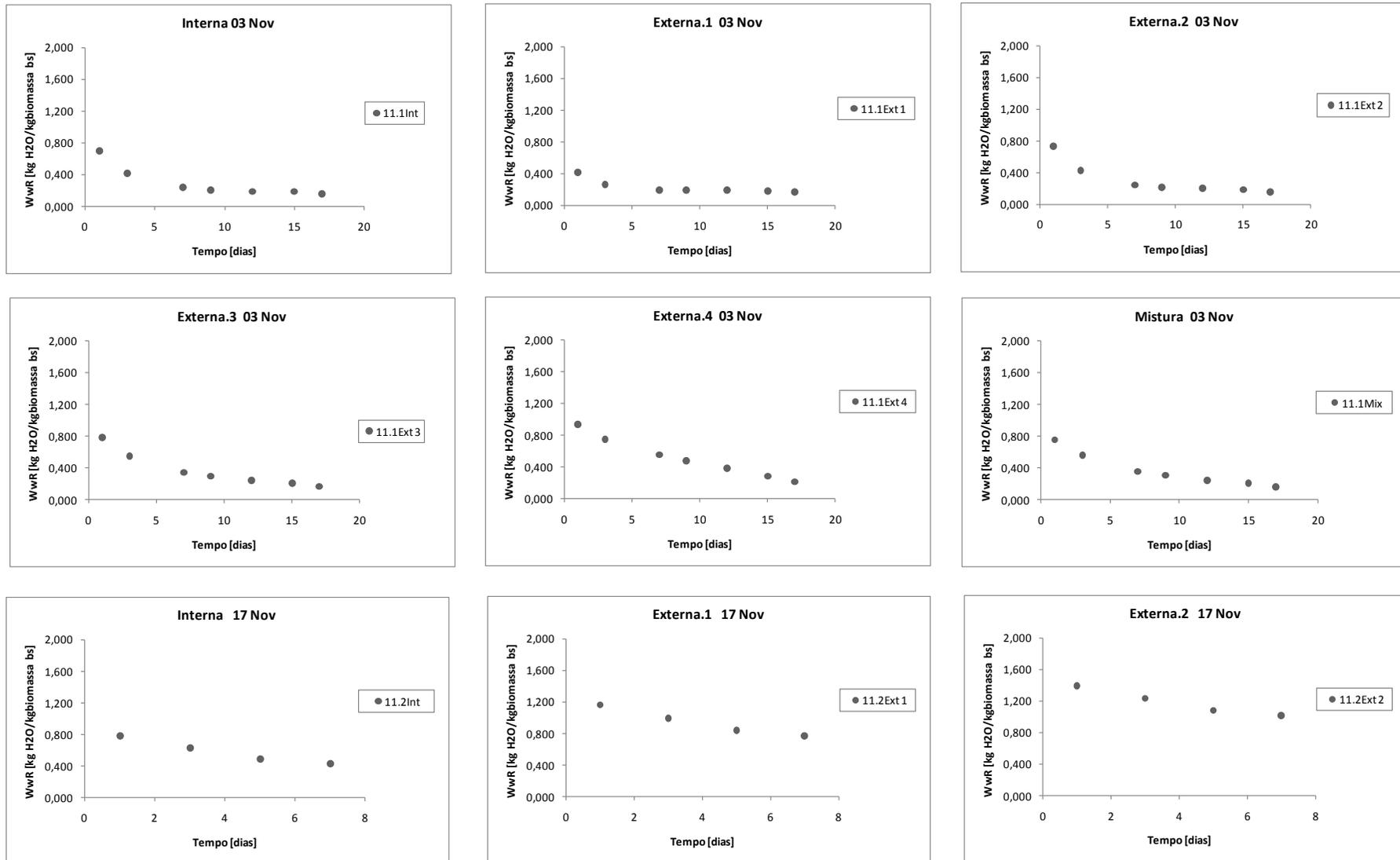


Figura 4.10: Secagem ao ar, expressa através da razão mássica de humidade, $W_{wR,i}$ [$\text{kg H}_2\text{O/kg biomassa bs}$].

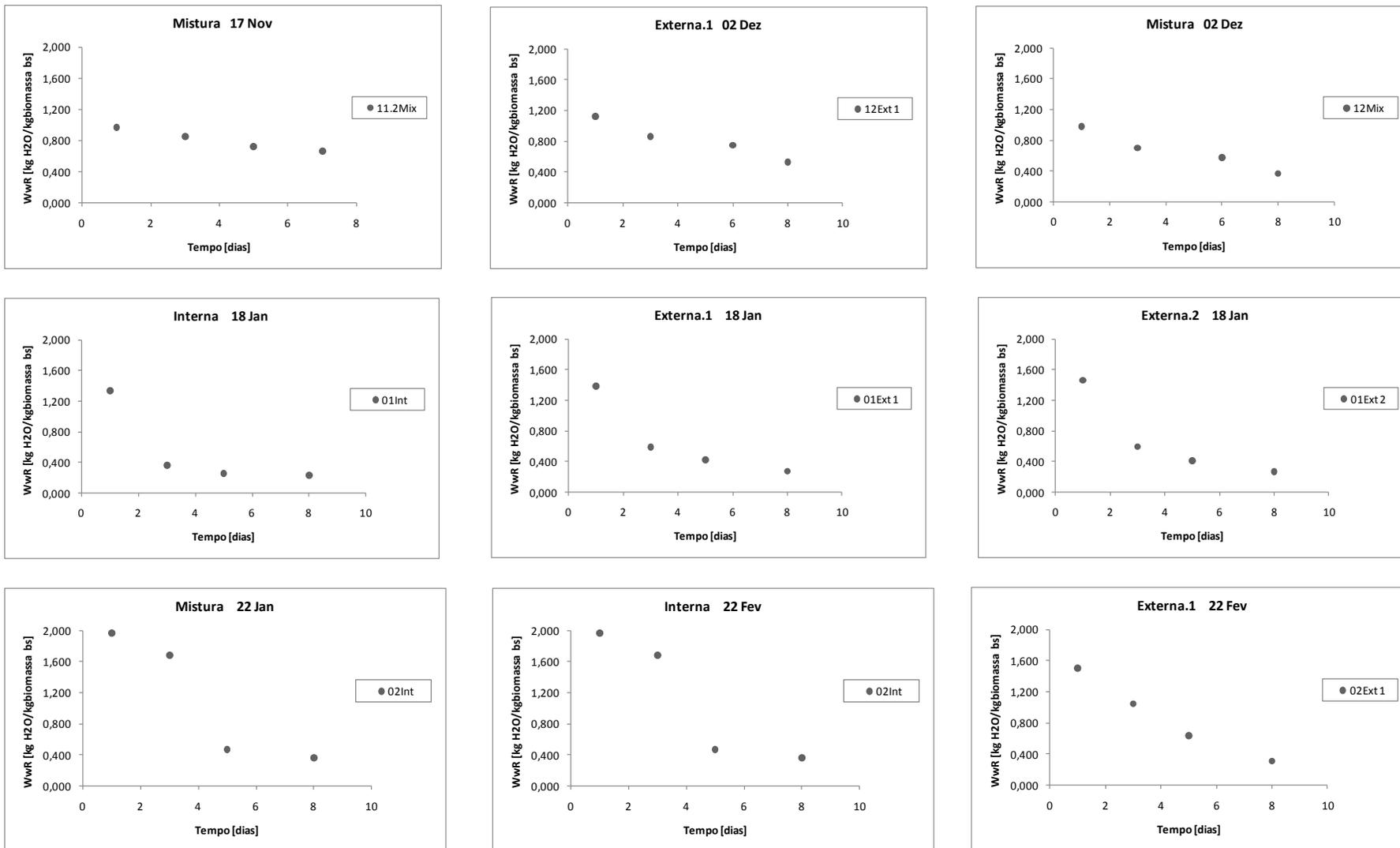


Figura 4.10: (continuação)

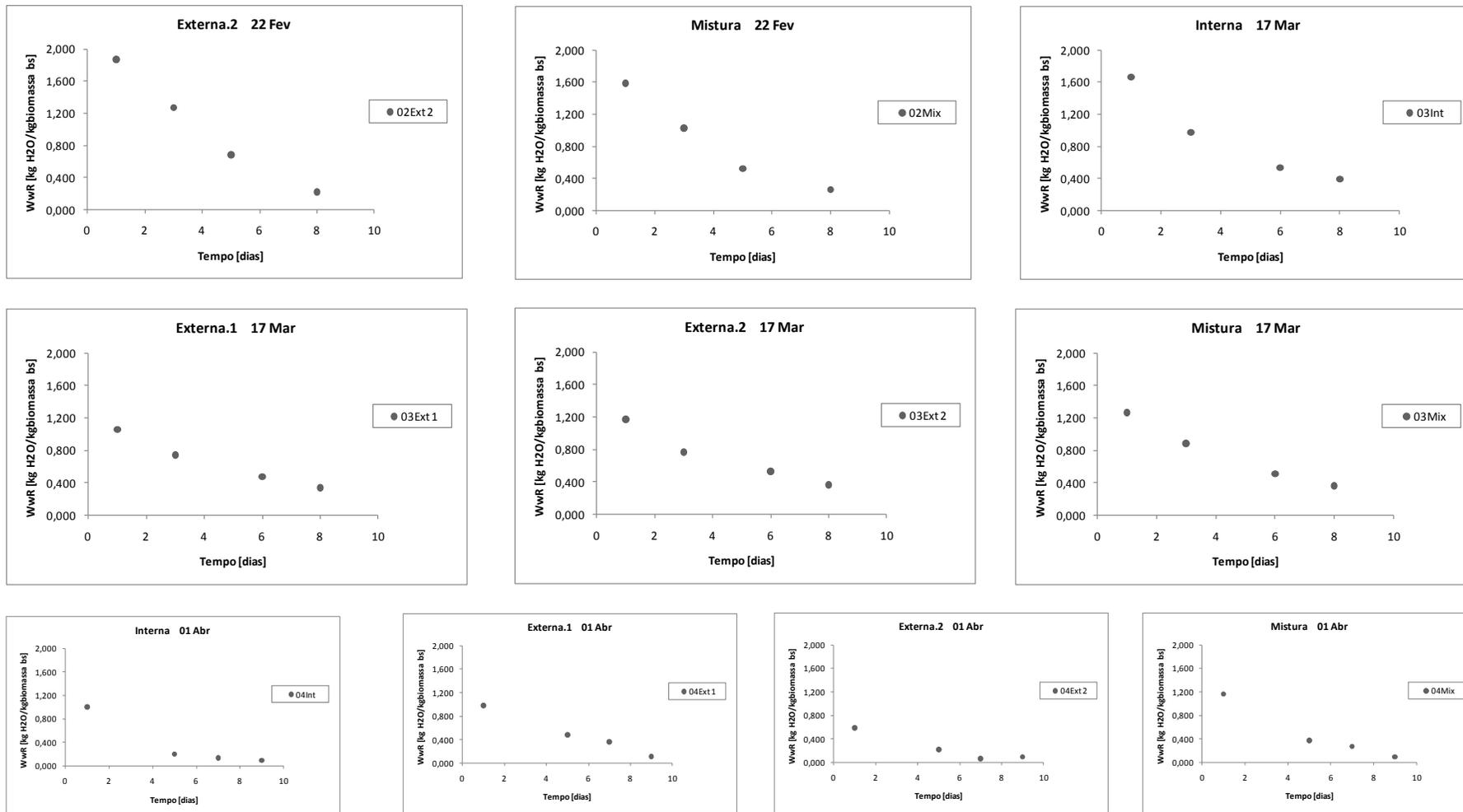


Figura 4.10: (continuação)

4.2.1.3 TEOR DE INERTES NA BIOMASSA

Para garantir a eficiência energética é importante controlar o teor de inertes presentes na biomassa utilizada pela central. Elevados teores de inertes podem trazer consequências graves para o sistema de combustão, como danos no revestimento da caldeira que conseqüentemente obrigam à paragem da central. As características da biomassa influenciam de forma decisiva o seu comportamento nos sistemas de combustão. Para garantir a eficiência energética é necessário que sejam cumpridos os requisitos que definem a qualidade da biomassa, que no caso do teor de inertes não deve ultrapassar os 10 % (Silva, 2009).

4.2.1.3.1 Fração Mássica de Inertes

Com o intuito de analisar o teor de inertes presentes na biomassa em estudo e para prevenir danos nos instrumentos de trituração utilizados na redução do seu tamanho para análise posterior do teor de cinzas, procedeu-se à sua lavagem. Como já foi referido anteriormente, uma fracção das amostras recolhidas foi utilizada para a determinação do teor de humidade total, a restante foi lavada para a determinação de inertes e teor de cinzas.

A lavagem efectuou-se considerando o facto da densidade dos inertes ser superior à densidade da biomassa, que em meio de suspensão aquosa permitiu separar a fracção suspensa (biomassa) da fracção sedimentada (inertes). Seguidamente apresenta-se o procedimento utilizado para a lavagem das amostras recolhidas:

- Pesagem da biomassa num recipiente de massa conhecida utilizando uma balança com uma sensibilidade 0,0001 kg;
- Lavagem da biomassa utilizando um recipiente com altura suficiente para permitir a sedimentação dos inertes;
- Passagem da água de lavagem por um crivo que permitiu recolher material inerte com dimensões superiores a 0,250 mm;
- Lavagem dos inertes recolhidos para a remoção de resíduos de biomassa;
- Secagem dos inertes numa estufa a 105 °C para determinar a sua massa seca.

Este procedimento foi realizado de forma relativamente rápida para evitar a sedimentação de pequenas partículas de matéria orgânica.

Sabendo a massa da amostra de biomassa antes da lavagem e a massa de inertes recolhida, através da equação 8, foi possível calcular o teor de inertes.

$$\text{Teor}_{\text{inertes}}[\%, \text{m/m}] = \frac{m_{\text{inertes}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

Na Figura 4.14 apresentam-se graficamente os resultados obtidos para todas as amostras durante os meses de estudo, verificando-se que a percentagem de inertes varia claramente consoante o período de amostragem, aumentando com o aproximar do Inverno tendendo a diminuir nas estações mais secas, e com o tipo de biomassa recolhida. A introdução de estilha de pinheiro nos últimos três meses do período de estudo causou uma descida significativa no teor de inertes em relação aos meses anteriores.

Analisando a Figura 4.11, relativa à biomassa Mix, constatou-se que o teor de inertes atingiu o seu valor máximo no mês de Janeiro, 24,0 %, e valor mínimo de 4,4% no mês de Março, correspondendo a um valor médio de 12%.

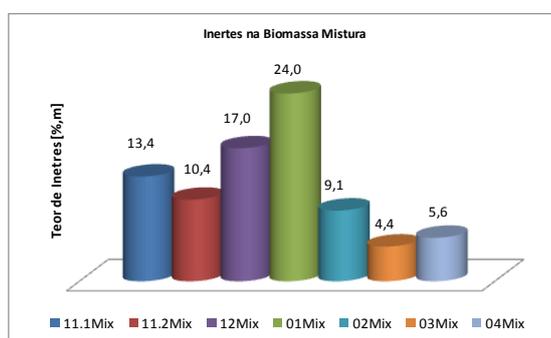


Figura 4.11: Teor de inertes nas amostras de biomassa mistura, [%m/m].

Em termos gerais, os valores mais baixos foram obtidos para as amostras de biomassa interna (ver Figura 4.12). A biomassa interna é proveniente do descasque de eucalipto efectuado nas instalações da fábrica de pasta de papel, demonstrando a influência dos métodos de exploração e recolha no teor de inertes da biomassa. Em Fevereiro, a biomassa interna atingiu o seu valor máximo, 20,8 %, passando a quantidades insignificantes no mês de Abril, em média cerca de 9%.

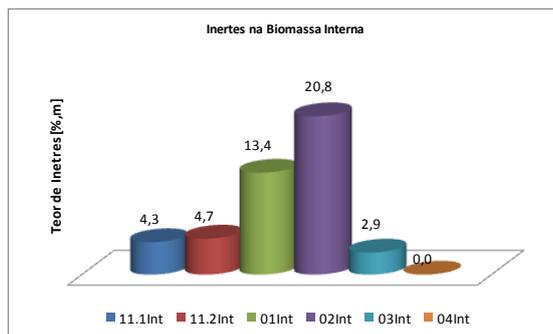


Figura 4.12: Teor de inertes nas amostras de biomassa interna, [%m/m].

Tendo em consideração que o valor recomendado para o teor de inertes na biomassa, inferior a 10 % (Silva, 2009), verificou-se que, em média, a biomassa que entra na caldeira (Mix), apresentou valores de 2% acima do recomendado.

Na Figura 4.13 apresenta-se a percentagem de inertes de todas as amostras analisadas durante o período de estudo.

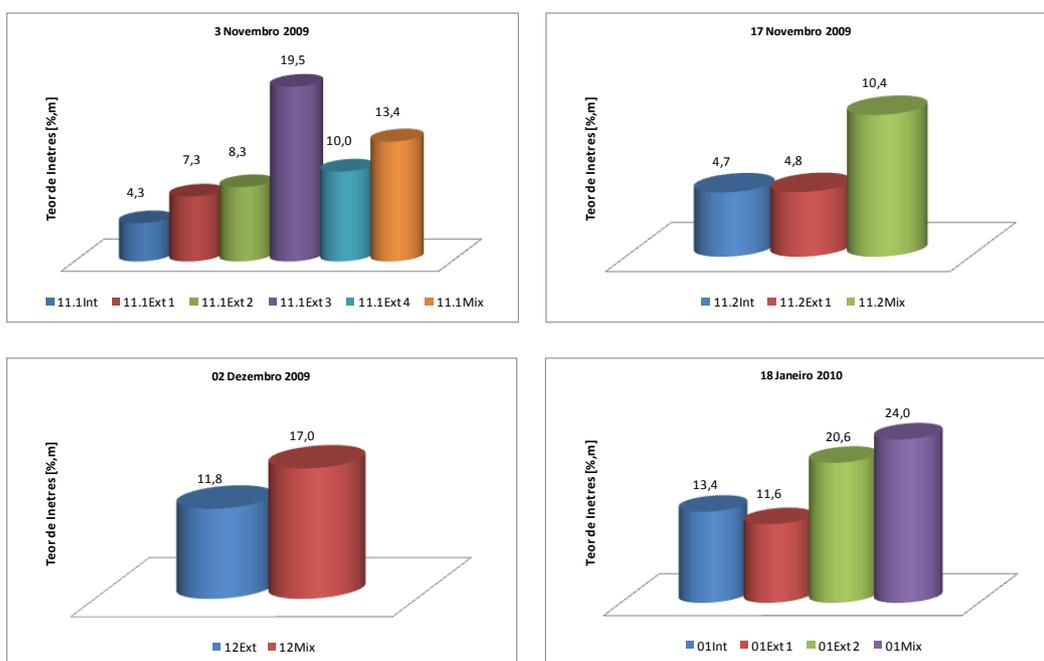


Figura 4.13: Teor de inertes na biomassa, expresso em percentagem [% m/m].

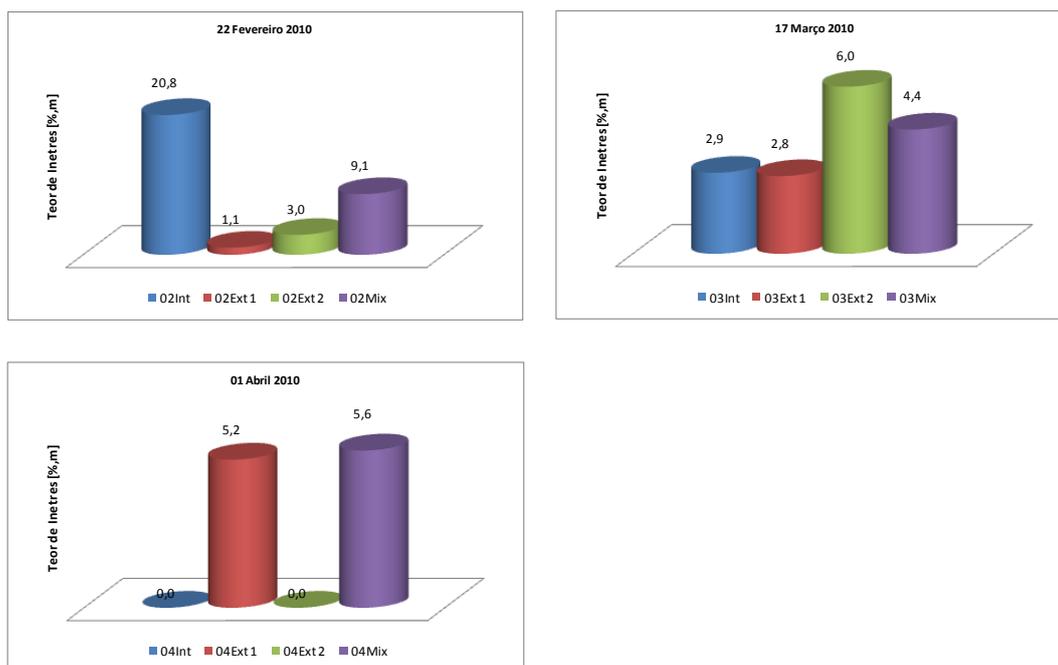


Figura 4.14: (Continuação).

4.2.1.3.2 Granulometria dos Inertes

Para além da caracterização do teor de inertes na biomassa, efectuou-se um estudo para o conhecimento da composição granulométrica, não só com o intuito de analisar a suas dimensões, mas também para uma análise comparativa com a composição granulométrica da areia do leite.

Para a referida análise utilizou-se uma série de seis peneiros com malhas de dimensões compreendidas ente 4,00 e 0,250 mm, onde se procedeu à determinação das massas retidas em cada peneiro, utilizando uma balança com sensibilidade até 0,01 g. Uma vez determinada a massa retida em cada peneiro, calculou-se o valor da sua percentagem relativa, obtendo-se a representação gráfica da distribuição das partículas inertes por calibres.

Para conhecer a composição granulométrica da areia do leite, recolheu-se uma amostra da referida areia fazendo-se passar pela mesma serie de peneiros e utilizando o mesmo procedimento para a obtenção da distribuição por diferentes tamanhos.

A análise granulométrica aos inertes na biomassa efectuou-se como se descreveu anteriormente, utilizando a seguinte sequência de peneiros: 4,00; 2,80; 1,00; 0,500; 0,250 (mm).

No que diz respeito à biomassa interna (ver Figura 4.15), proveniente do descasque de eucalipto na central termoelétrica, verificou-se que a maior parte dos inertes recolhidos se encontra na gama de dimensões entre 0,250 e 1,00 mm.

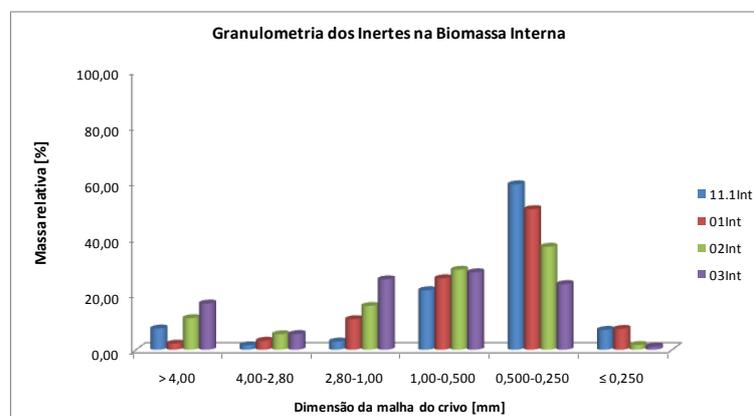


Figura 4.15: Granulometria dos inertes da biomassa interna, [%, m/m]

Em relação à biomassa proveniente do exterior (ver Figura 4.16), a distribuição dimensional dos inertes é bastante mais heterogénea em comparação com biomassa interna, verificando-se maior frequência de inertes com dimensões superiores a 4,00 m. Fazendo uma análise por tipos de biomassa externa, constata-se que não foi possível relacionar o tipo de biomassa recolhida com a granulometria dos inertes, uma vez que para o mesmo tipo de biomassa verificaram-se diferentes distribuições dimensionais de inertes.

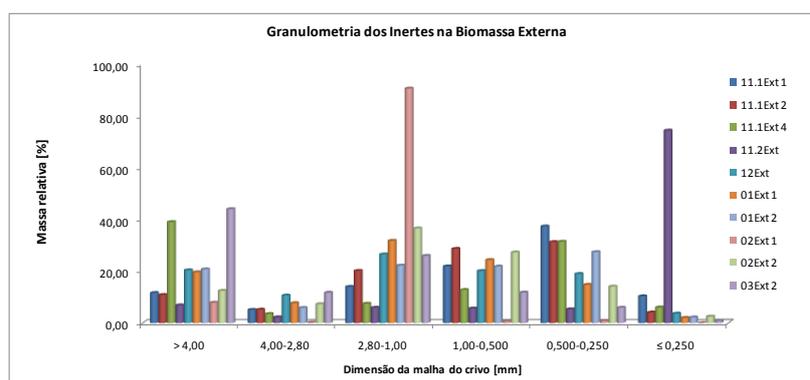


Figura 4.16: Granulometria dos inertes da biomassa externa, [%, m/m].

Da análise granulométrica à biomassa mistura (ver Figura 4.17), constata-se que, tal como a biomassa interna, a distribuição dimensional dos inertes se encontra

maioritariamente compreendida entre 0,250 e 1,00 mm. Tendo em consideração que da biomassa mistura faz parte a biomassa proveniente do exterior, que contem inertes de maiores dimensões, era de esperar que a biomassa mistura também contivesse maior percentagem de inertes com dimensões superiores a 4,00 mm, tal não acontece devido há existência de um sistema de remoção de pedras e outros materiais indesejáveis que antecede a entrada da biomassa externa no silo de armazenagem de biomassa.

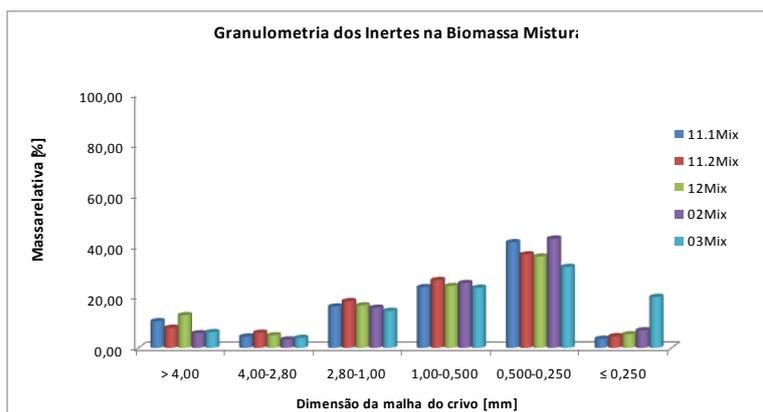


Figura 4.17: Granulometria dos inertes da biomassa mistura, [%, m/m].

Através de uma análise comparativa da distribuição dimensional de inertes na biomassa mistura e areia utilizada no leito fluidizado (ver Figura 4.18), verificou-se que a fracção maioritária, 83,1 %, dos inertes na areia do leito encontra-se compreendida na gama de 0,500 a 1,00 mm, enquanto para a biomassa mistura os inertes encontram-se distribuídos maioritariamente na gama de 2,80 a 0,250 mm.

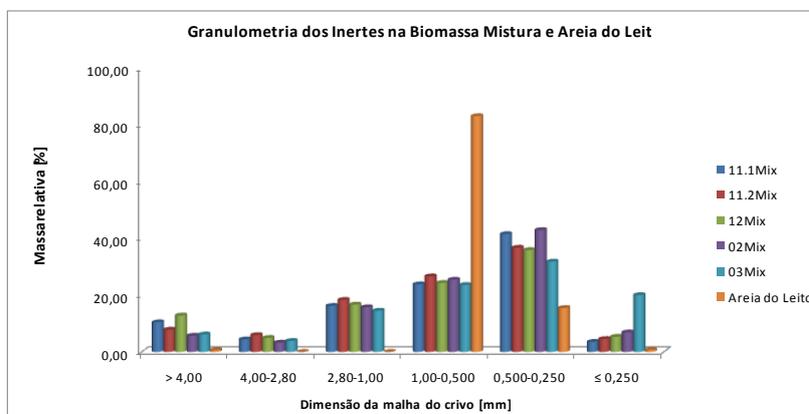


Figura 4.18: Granulometria dos inertes da biomassa mistura e areia do leito, [%, m/m]

4.2.1.4 TEOR DE CINZAS A 550 °C

Os biocombustíveis sólidos contêm na sua composição matéria inerte que não é destruída durante o processo de combustão. A esses resíduos dá-se o nome de cinzas.

A presença de cinzas pode trazer problemas ao nível do funcionamento dos sistemas de combustão, especialmente cinzas com elevado teor de compostos alcalinos, que durante a combustão poderão formar compostos com baixo teor de fusão. Esses compostos poderão formar aglomerados no leito constituídos por cinza e areia ligados após fusão, podendo causar a desfluidização do leito (Khan *et al*, 2009).

Tendo em conta que o teor de cinzas é uma das principais propriedades a considerar durante o processo da transformação da biomassa em fonte de energia, no presente estudo realizou-se a determinação do teor de cinzas da biomassa recolhida através do procedimento normativo CEN/TS 14775. Para o cumprimento do referido procedimento, as amostras de biomassa foram previamente trituradas ($d < 1\text{mm}$) e secas a 105° C.

O cálculo do teor de humidade a 105 °C efectuou-se através da equação 9, utilizando como base o procedimento referido na norma CEN/TS 14774-1.

$$\text{Teor}_{\text{Humidade},105\text{ }^{\circ}\text{C}} = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

m_1 : massa, em gramas, do cadinho

m_2 : massa, em gramas, do cadinho + amostra

m_3 : massa, em gramas, do cadinho + amostra seca

O teor de cinzas em base seca, $\text{Teor}_{\text{cinza,bs}}$, expresso em percentagem, foi calculado através da Equação 10.

$$\text{Teor}_{\text{cinza,bs}} = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \times 100 \times \left(\frac{100}{100 - \text{Teor}_{\text{humidade},105\text{ }^{\circ}\text{C}}} \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

m_1 : massa, em gramas, do cadinho

m_2 : massa, em gramas, do cadinho + amostra

m_3 : massa, em gramas, do cadinho + cinzas

A quantidade de cinzas presentes na biomassa influencia proporcionalmente a energia disponível no biocombustível. Apesar de a biomassa apresentar um teor de cinzas inferior

aos combustíveis fósseis, este é variável consoante o tipo de biomassa. O estudo de Silva (2009) refere que o teor de cinzas difere, não só consoante o tipo de biomassa (pinheiro, eucalipto), mas também consoante os diferentes componentes da árvore (estilha, casca, ramos e bicadas). Na Tabela 4.2 apresentam-se valores obtidos no referido estudo, relativos ao teor de cinzas a 550 °C para os diferentes componentes no pinheiro e eucalipto.

Tabela 4.2: Teor de cinzas para os diferentes componentes no pinheiro e eucalipto, em base seca (adaptado de Silva, 2009)

Tipo de Biomassa	Casca pinho	Casca eucalipto	Bicadas pinho	Bicadas eucalipto	Estilha pinho	Estilha eucalipto
Teor de Cinzas (550±10 °C) %	1,70	7,30	4,50	3,90	1,10	1,10

Relativamente às amostras analisadas, os resultados referentes à biomassa interna (ver Figura 4.19), constituída essencialmente por casca de eucalipto, apresentaram variação no teor de cinzas ao longo do período de estudo. O valor mais elevado registou-se para a biomassa interna recolhida no mês de Fevereiro, 6,21 %, e o valor mais baixo, 3,54 %, na primeira recolha do mês de Novembro. Os referidos resultados não são coincidentes com o valor apresentado na Tabela 4.2, referente ao teor de cinza para a casca de eucalipto. Tal pode estar relacionado com o processo de descasque do eucalipto, que para além da camada superficial pode também remover a madeira da árvore, incorporando estilha de eucalipto, que tem um teor de cinza bastante inferior.

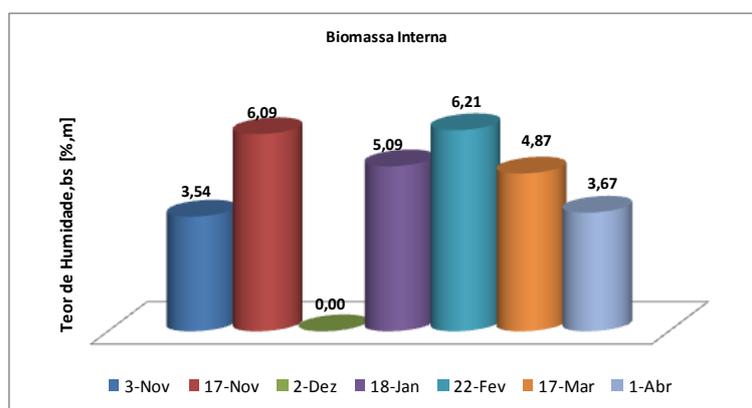


Figura 4.19: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa interna.

Da análise dos valores obtidos para a biomassa externa (ver Figura 4.21), verificou-se que a estilha de pinheiro apresenta o valor mais baixo em teor de cinzas, 1,53 % para a amostra “02Ext 1” e 1,38 % para a “04Ext 2”.

Fazendo uma análise à biomassa mistura (ver Figura 4.20), os resultados obtidos mostram valores de cinzas compreendidos entre 2,47 e 7,97 %.

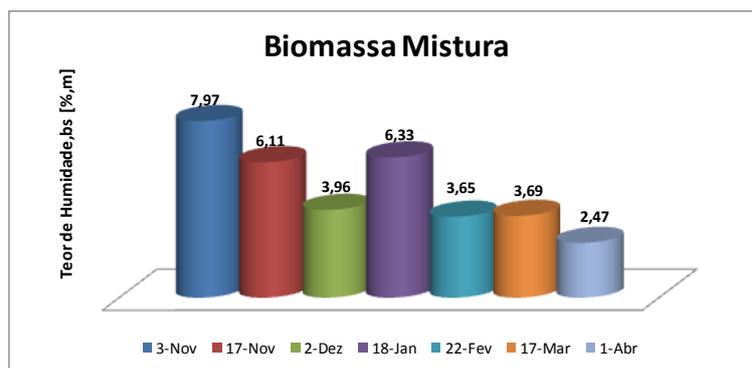


Figura 4.20: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa mistura.

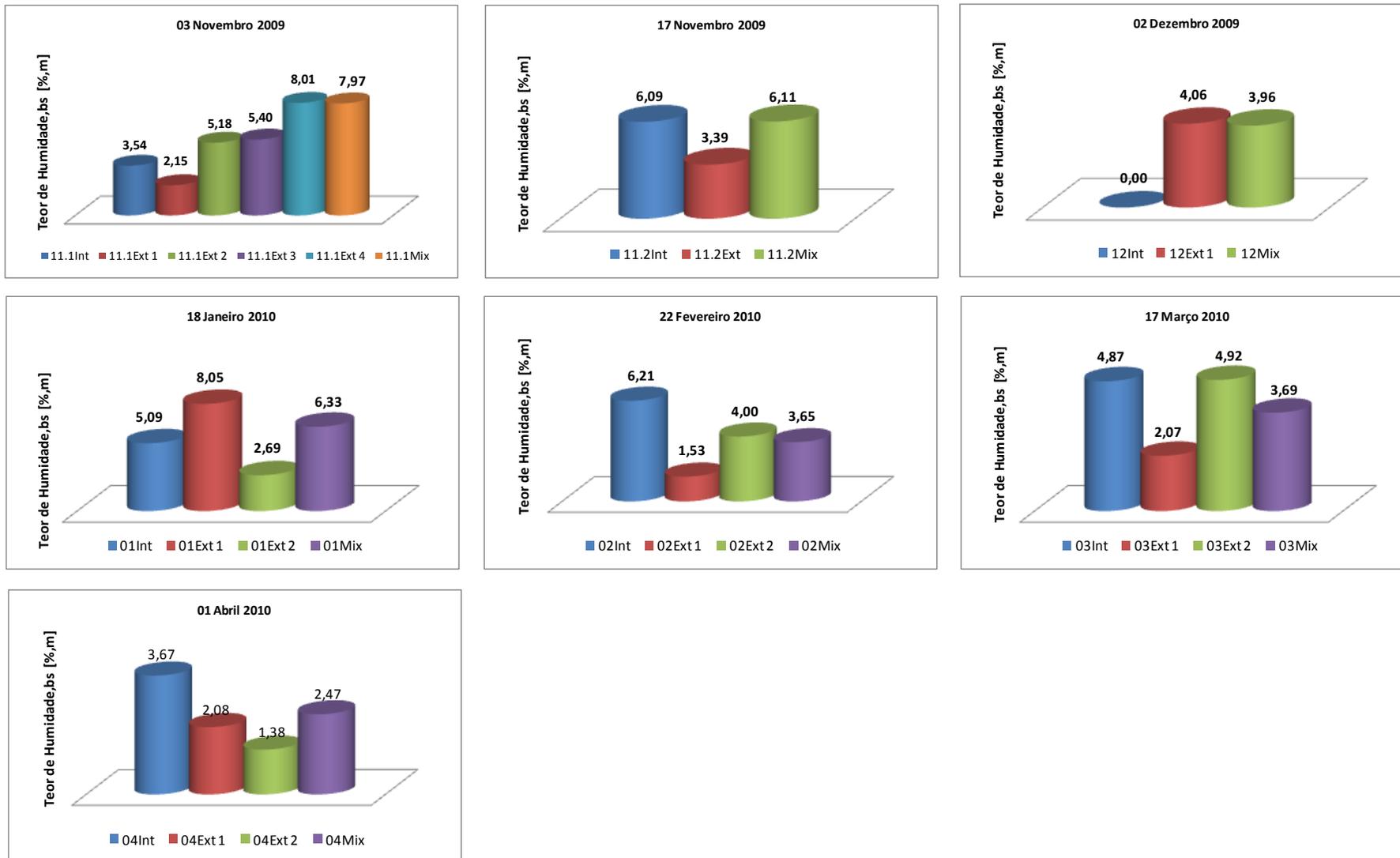


Figura 4.21: Teor de cinzas a 550 °C [%m/m], base seca, para a biomassa amostrada.

4.2.1.5 COMPOSIÇÃO ELEMENTAR

Para quantificar a energia armazenada na biomassa foi necessário conhecer quais os elementos constituintes e a sua proporção, nomeadamente a percentagem mássica de Carbono (C), Hidrogénio (H), Azoto (N), Enxofre (S), Oxigénio (O) e cinza (Z), sendo o oxigénio determinado por diferença. Segundo um estudo realizado por Berggren 2000, a composição elementar da biomassa florestal é composta por 40-50% de C, 40-45 % de O, 4,5-6 % de H e 0,3-3,5 % de azoto (Silva, 2009).

Na Tabela 4.3 é possível observar uma composição elementar típica para partes das duas espécies de biomassa mais utilizadas como combustível em Portugal (CBE, 2008).

Tabela 4.3: Composição elementar, [%, m/m], em base seca sem cinzas (CBE, 2008).

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

Devido ao elevado custo associado a este tipo de análises, neste trabalho foram seleccionadas amostras representativas dos diferentes tipos de biomassa recolhida na central termoeléctrica, especificamente: estilha de eucalipto (01Ext 2), estilha de pinheiro (04Ext 2), casca, folhas e ramos de eucalipto (11.2Ext 2), casca, folhas e ramos de pinheiro (11.1Ext 1), e amostras de mistura (11.2Mix). A análise da composição da biomassa interna, casca de eucalipto, foi excluída por existirem várias referências bibliográficas à sua composição. Neste trabalho, a composição elementar e poder calorífico da casca de eucalipto foi considerada igual à referida por Silva (2009), sendo aqui designada de amostra Ref., e a sua composição apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Composição elementar e poder calorífico inferior da casca de eucalipto, em base seca (amostra Ref.) (Silva, 2009).

Amostra	Ref
Tipo de biomassa	Casca de eucalipto
Carbono _{bs} %	44,7
Hidrogénio _{bs} %	6,4
Azoto _{bs} %	0,3
Enxofre _{bs} ppm	≤100
Oxigénio _{bs} %	41,3
Cinzas _{bs}	7,3
PCl _{bs} MJ·kg ⁻¹	17,11

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da composição elementar para as amostras seleccionadas, revelando que a biomassa florestal amostrada é constituída por 47,88-49,70% (C), 39,06-41,96% (O), 6,34-6,95% (H) e 0,216-0,562% (N), indo de encontro aos valores apresentados nos estudos referidos anteriormente.

Tabela 4.5: Composição elementar, [%, m/m], para as amostras seleccionadas, em base seca.

Amostras	01Ext 2	04Ext 2	11.2Ext 2	11.1Ext 1	11.2Mix
Tipo de biomassa	Estilha de eucalipto	Estilha de pinheiro	Casca, bicadas e estilha de eucalipto	Casca e bicadas de pinheiro	Casca e ramos de eucalipto
Carbono _{bs} %	48,37	49,70	48,64	48,84	47,88
Hidrogénio _{bs} %	6,53	6,95	6,66	6,84	6,34
Azoto _{bs} %	0,45	0,22	0,46	0,56	0,45
Oxigénio _{bs} %	41,96	41,75	39,06	41,26	39,22
Enxofre _{bs} ppm	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100
Cinzas _{bs} %	2,69	1,38	5,18	2,50	6,11

4.2.1.6 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico de um combustível designa-se pela quantidade de energia química libertada durante a sua combustão, dada em unidades de energia por quantidade de massa (MJ.kg⁻¹) para combustíveis sólidos. Este pode ser expresso de duas formas, poder calorífico superior (PCS), correspondente à energia total libertada na combustão, incluindo a energia despendida na vaporização da água, ou poder calorífico inferior (PCI),

que apenas corresponde à energia libertada na oxidação do combustível (McKendry, 2002).

Tal como na análise da composição elementar, a determinação do poder calorífico foi realizado com recurso à mesma entidade exterior (CBE), e para as amostras referidas anteriormente. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.6, mostrando que o valor do poder calorífico não varia muito consoante o tipo de biomassa amostrada (18,70-19,50 %), no entanto é ligeiramente superior no caso das amostras que contêm pinheiro.

Tabela 4.6: Poder calorífico [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] para as amostras seleccionadas, em base seca e em base tal e qual sem cinzas.

Amostras	01Ext 2	04Ext 2	11.2Ext 2	11.1Ext 2	11.2Mix
Tipo de biomassa	Estilha de eucalipto	Estilha de pinheiro	Casca, bicadas e estilha de eucalipto	Casca e bicadas de pinheiro	Casca e ramos de eucalipto
H_{btq} [%]	59	37	58	30	49
PCS_{bs} [MJ/kg]	19,10	19,50	19,20	19,40	18,70
PCI_{bs} [MJ/kg]	17,70	17,90	17,80	17,90	17,30
PCS_{btq} [MJ/kg]	7,83	12,29	8,06	13,58	9,54
PCI_{btq} [MJ/kg]	7,26	11,28	7,48	12,53	8,82

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO

Considerando que no presente trabalho se pretendeu fazer um balanço mássico e energético ao sistema de conversão de energia na caldeira, foi necessário analisar os produtos sólidos de combustão (escórias e cinzas volantes), nomeadamente o teor de inqueimados. Para ambos os produtos de combustão foi feita a determinação de inqueimados. No caso das escórias, foi também efectuada uma análise granulométrica, não só para caracterizar as suas dimensões, mas também para verificar a percentagem de inqueimados em cada fracção granulométrica.

4.2.2.1 GRANULOMETRIA

A caracterização granulométrica foi efectuada de modo idêntico à caracterização dos inertes na biomassa, usando a mesma série de peneiros, com malhas de dimensões compreendidas ente 4,00 e 0,250 mm.

Recorrendo a uma balança com sensibilidade até 0,01 g procedeu-se à determinação das massas retidas em cada peneiro, m_i , permitindo, através da equação 11, calcular o valor da percentagem relativa para cada calibre, $m_{relativa,i}$ [%, m/m].

$$m_{relativa,i}[\%] = \frac{m_i}{m_{total}} \times 100 \quad (\text{Eq. 11})$$

i = gama de dimensão do peneiro

m_i = massa retida em cada peneiro

m_{total} = massa total de escória

A análise granulométrica das escórias efectuou-se como se descreveu anteriormente, utilizando a seguinte sequência de peneiros: 4,00; 2,80; 1,00; 0,500; 0,250 (mm). Na Figura 4.22 apresentam-se graficamente os resultados obtidos, verificando-se que a maior parte das cinzas de fundo recolhidas se encontra na gama de dimensões entre 0,250 e 1,00 mm, coincidindo com a areia do leito.

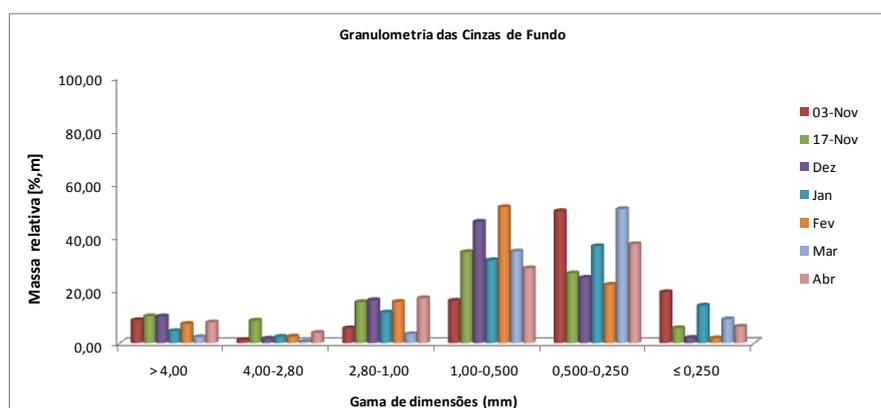


Figura 4.22: Representação gráfica da distribuição dimensional das escórias.

4.2.2.2 TEOR DE INQUEIMADOS

O processo de combustão da biomassa não se processa de modo ideal, não existindo uma distribuição uniforme entre o combustível e o comburente, originando resistências à transferência de calor e de massa que fazem com que a combustão se processe de forma incompleta, produzindo compostos de ineficiência, tais como monóxido de carbono, hidrocarbonetos inqueimados ou parcialmente oxidados e partículas de combustível. (Tarelho, 2008).

Para conhecer a eficiência térmica do processo de combustão é essencial determinar o teor de inqueimados nos produtos sólidos de combustão. Assim, procedeu-se à determinação dos inqueimados nas cinzas volantes provenientes dos electrofiltos e das escórias recolhidas no cinzeiro do leito fluidizado. No caso das escórias apenas foram analisadas as fracções granulométricas de menor dimensão, ou seja, com tamanho compreendido entre 1,00- 0,250 mm.

Esta análise foi feita através da incineração dos produtos sólidos a 550 °C, tendo como base o procedimento referido na norma CENT/14775. Para o cumprimento do referido procedimento, as amostras foram previamente secas a 105° C.

O cálculo do teor de humidade a 105 °C efectuou-se através da equação 9, utilizando como base o procedimento referido na norma CENT/TS 14774-1. O teor de cinzas em base seca, $Teor_{cinza,bs}$, expresso em percentagem mássica, foi calculado através da equação 10, e o teor de inqueimados, que representa a fracção de massa incinerada, calculou-se através da Eq. 12.

$$Teor_{inqueimados,bs} = 100 - Teor_{cinza,bs} \quad (Eq. 12)$$

Da análise dos resultados obtidos para as cinzas volantes (ver Figura 4.23), verifica-se que a percentagem do teor de inqueimados varia entre os 5,17 % e 7,48 %. Relativamente às escórias não foram encontrados inqueimados nas fracções granulométricas analisadas.

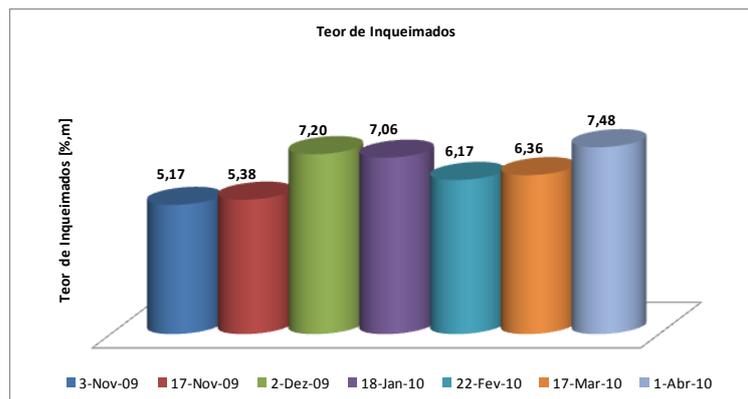


Figura 4.23: Teor de inqueimados nas cinzas volantes [%, m/m].

4.2.3 BALANÇO MÁSSICO

Com o objectivo de avaliar o fluxo material na geração de calor e electricidade, neste subcapítulo apresenta-se o balanço mássico quantitativo, entre os recursos utilizados e os produtos gerados, para o período de funcionamento da central, 24 horas por dia e 350 dias por ano.

Tendo em conta que no presente estudo foram avaliadas as características de vários tipos de biomassa, o balanço mássico foi efectuado considerando três condições de operação, que diferem no tipo de biomassa, no seu consumo e teor de humidade. Na Tabela 4.7 apresenta-se resumidamente os parâmetros considerados para cada condição de operação.

Tabela 4.7: Parâmetros relativos à biomassa para as condições de operação consideradas.

Condição de operação	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
Amostra	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
Tipo de biomassa	Casca e ramos de eucalipto	Casca de eucalipto	Estilha de pinheiro
Consumo [ton R·hora ⁻¹]btq	50,00	58,00	35,00
Consumo [kg R·s ⁻¹]btq	13,89	16,11	9,72
Humidade total [%m/m]	49	57	37
Inertes [%m/m]	10,40	13,4	-
Cinzas [%m/m]	6,11	7,30	1,38
Inqueimados nas cinzas volantes [%m/m]	5,38	7,06	7,48

Os cálculos efectuados tiveram em consideração que o balanço mássico, num processo de combustão de biomassa, ocorre do seguinte modo:

[Biomassa (incluindo inertes e água) + Ar de combustão + Areia do leite] = [Gases de exaustão + Cinzas volantes + Escórias]

Todos os cálculos de balanço mássico foram efectuados com base no consumo de biomassa em base seca e sem inertes.

Recursos utilizados

Combustível sólido:

Sabendo o consumo médio diário de biomassa em base tal e qual, $\dot{m}_{R(btq)}$, a fracção mássica da humidade, w_{WR} , e inertes, w_{IR} , através da equação 13 e 14, foi possível determinar o caudal mássico de biomassa em base seca e sem inertes, $\dot{m}_{R(bs,sem\ inertes)}$. A Tabela 4.8 apresenta os resultados para as definidas condições de operação.

$$\dot{m}_{R(bs)} = \dot{m}_{R(btq)} \times (1 - w_{WR}) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\dot{m}_{R(bs,sem\ inertes)} = \dot{m}_{R(bs)} \times (1 - w_{WR}) \quad (\text{Eq. 14})$$

Tabela 4.8: Caudal mássico de biomassa, em base seca e sem inertes.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
$\dot{m}_{R(bs)} \text{ [kg R}\cdot\text{s}^{-1}]$	7,08	6,93	6,13
$\dot{m}_{R(bs,sem\ inertes)} \text{ [kg R}\cdot\text{s}^{-1}]bs$	6,35	5,50	6,13
$\dot{m}_{H_2O} \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}] bs$	6,10	7,95	3,60
$\dot{m}_I \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}] bs$	0,66	0,80	0,00

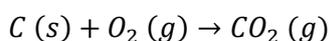
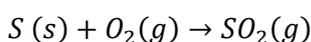
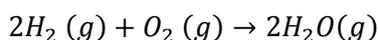
Ar de combustão:

Com o intuito de determinar as necessidades estequiométricas de ar de combustão (W_{sA}), foi imprescindível conhecer as necessidades estequiométricas de Oxigénio (W_s) para efectuar a oxidação completa da biomassa. Estes cálculos foram efectuados com base no pressuposto da oxidação completa de todos os elementos químicos que os compõem. No entanto foram feitas algumas aproximações, nomeadamente:

- O Azoto presente no combustível apresenta fracções mássicas relativamente baixas, e mesmo a sua oxidação dá origem a uma quantidade negligenciável de NOx (em termos de balanço mássico), pelo que a sua oxidação não é considerada nos cálculos.

- Considerando que às temperaturas de operação típicas a oxidação do Azoto do ar de combustão também origina uma baixa formação de NO_x , a sua oxidação não foi considerada nos cálculos.
- Outros elementos orgânicos, tais como o Cloro e Flúor, não foram considerados nos cálculos devido às suas fracções mássicas serem relativamente baixas no combustível.

Considerando as aproximações referidas anteriormente e tendo em conta as equações de oxidação completa para o Hidrogénio (H_2), Enxofre (S), e Carbono (C):



A massa de oxigénio necessária para oxidar completamente a unidade de massa de Hidrogénio (H), Enxofre (S), e Carbono (C), será respectivamente:

$$0,5 \text{ kmolO}_2 \cdot \text{kmol}^{-1}\text{H}_2;$$

$$1 \text{ kmolO}_2 \cdot \text{kmol}^{-1}\text{S} ;$$

$$1 \text{ kmolO}_2 \cdot \text{kmol}^{-1}\text{C}.$$

As necessidades estequiométricas de Oxigénio (W_s) foram determinadas a partir da equação 15, tendo em consideração a composição elemental das amostras seleccionadas para o estudo do balanço mássico (Tarelho, 2008):

$$W_s = 32 \times \left(\sum \left(Y_{s,j} \times \frac{w_{jR}}{M_j} \right) - \frac{w_{OR}}{M_{O_2}} \right) \quad [\text{kg}_{O_2}\text{estequiométrico} \cdot \text{kg}^{-1}\text{R bs}] \quad (\text{Eq.15})$$

w_{jR} – fracção mássica do elemento j em R

M_j – fracção molar de j [$\text{kg } j \cdot \text{kmol}^{-1}j$]

$Y_{s,j}$ – consumo estequiométrico de O_2 [$\text{kmol } \text{O}_2 \cdot \text{kmol}^{-1}j$], dado pela seguinte expressão:

$$Y_{s,j} = \frac{\text{kmole estequiométrico de } \text{O}_2}{\text{K mole elemento } j} = 1 (\text{para o C}) = 0,25 (\text{para o H}) = 1 (\text{para o S})$$

A título de exemplo, seguidamente apresentam-se os cálculos efectuados para a primeira condição de operação (11.2 Mix).

$$W_s = 32 \times \left(\left(Y_{s,C} \times \frac{w_{CR}}{M_C} + Y_{s,H} \times \frac{w_{HR}}{M_H} + Y_{s,N} \times \frac{w_{NR}}{M_N} + Y_{s,S} \times \frac{w_{SR}}{M_S} \right) - \frac{w_{OR}}{M_{O_2}} \right)$$

$$W_s = 1,392 \text{ kg}_{O_2}\text{estequiométrico} \cdot \text{kg}^{-1}\text{R bs} = 0,043 \text{ kmol } \text{O}_2 \cdot \text{kg}^{-1}\text{R bs}$$

Conhecidas as necessidades estequiométricas de Oxigénio (W_s), foi possível, através da equação 16, determinar as necessidades estequiométricas para o ar de combustão (W_{SA}).

$$W_{SA} = W_s \times \left(1 + 3,76 \times \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}} + 7,63 \times W_{VA} \times \frac{M_{H_2O}}{M_{O_2}} \right) \quad (\text{Eq.16})$$

$$W_{SA} = 6,060 \text{ kg ar estequiométrico} \cdot \text{kg}^{-1} R \text{ bs}$$

Sendo W_{VA} , a razão mássica de água no ar de combustão, calculada através do diagrama psicrométrico, considerando a temperatura ambiente de 20° C e um teor de humidade relativa de 45%.

$$W_{VA} = f(T, HR)$$

$$W_{VA} = f(20^\circ\text{C}, 45\%) = 0,0148 \text{ kgH}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$$

Sabendo a razão mássica de vapor de água no ar de combustão (W_{VA}) e massa molar do ar seco ($M_{ar \text{ seco}}$), foi possível determinar a composição do ar húmido e respectiva massa molar que permitiram determinar as necessidades estequiométricas de ar de combustão para as condições de normalização (PTN).

$$W_{VA} = 0,0148 \text{ kgH}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$$

$$M_{ar \text{ seco}} = 28,84 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

$$y_{H_2O} = \frac{\frac{W_{VA}}{M_{H_2O}}}{\frac{W_{VA}}{M_{H_2O}} + \frac{1}{M_{ar \text{ seco}}}} = 0,023$$

$$y_{O_2} = y_{O_2A} \times (1 - y_{H_2O}) = 0,21 \times (1 - 0,023) = 0,205$$

$$y_{N_2} = y_{N_2A} \times (1 - y_{H_2O}) = 0,79 \times (1 - 0,023) = 0,772$$

$$\begin{aligned} M_{ar \text{ húmido}} &= y_{O_2} \times M_{O_2} + y_2 \times M_{N_2} + y_{H_2O} \times M_{H_2O} \\ &= 28,589 \text{ kg ar húmido} \cdot \text{kmol}^{-1} \text{ ar húmido} \end{aligned}$$

$$W_{SA} = \frac{W_{SA} [\text{kg ar} \cdot \text{kg}^{-1} R]}{M_{ar \text{ húmido}}} = \frac{6,060}{28,589} = 0,212 \text{ kmol ar estequiométrico} \cdot \text{kg}^{-1} R$$

Deste modo, e considerando a equação dos gases perfeitos para as condições PTN, as necessidades estequiométricas de ar para a combustão da biomassa foram dadas por:

$$W_{SA} = W_{SA} [kmol\ ar \cdot kg^{-1}R\ bs] \times 1000 \times R \times \frac{T}{P} = 4,750\ Nm^3\ de\ ar \cdot kg^{-1}R\ bs$$

Com,

$$T = 273\ K; P = 101300\ Pa; R = 8,314\ m^3 \cdot Pa \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$$

Com o intuito de minimizar a ocorrência de inqueimados, a relação comburente/combustível, designada por excesso de ar (z), foi aumentada em 31 % para além das necessidades estequiométricas. A quantidade de ar total necessária para a combustão da biomassa (W_{aA}), em condições PTN foi calculada através da equação 17 (Tarelho, 2008):

$$Z = \left(\frac{W_{aA}}{W_{SA}} - 1 \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 17})$$

$$Z = 31\ \%$$

$$W_{SA} = 6,059\ kg\ ar\ estequiométrico \cdot kg^{-1}R$$

$$W_{aA} = 7,939\ kg\ ar\ actual \cdot kg^{-1}R = 0,278\ kmol \cdot kg^{-1}Rb = 6,223\ Nm^3\ de\ ar \cdot kg^{-1}R\ bs$$

Considerando o consumo médio diário de biomassa, para a referida amostra, $6,35\ kg\ R \cdot s^{-1}$, em base seca, o caudal de ar de combustão (\dot{m}_{AC}) é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AC} &= 7,939 \frac{kg_{ar}}{kg_{Rbs}} \times 6,35 \frac{kg_{Rbs}}{s} = 50,41\ kg\ ar \cdot s^{-1} \\ &= 6,223 \frac{Nm^3}{kg_{Rbs}} \times 6,35 \frac{kg_{Rbs}}{s} = 39,52\ Nm^3\ ar \cdot s^{-1} = 142.258\ Nm^3 \cdot h^{-1} \end{aligned}$$

Na Tabela 4.9 apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes condições de operação. Comparando com o valor estimado para as necessidades de ar de combustão, de $100.000\ Nm^3 \cdot h^{-1}$, verificou-se que para a média das condições de operação o valor obtido é ligeiramente superior, necessitando em média de mais $36.562\ Nm^3 \cdot h^{-1}$ de ar de combustão. Esta diferença poderá estar relacionada com a composição elementar e poder calorífico da biomassa utilizada para o cálculo da estimativa, provavelmente com um ter de carbono e poder calorífico mais baixos.

Tabela 4.9: Caudal mássico de ar de combustão.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
\dot{m}_{AC} [Nm ³ ar·h ⁻¹]	142.258	122.534	144.312
$\dot{m}_{H_2O,AC}$ [kg H ₂ O·s ⁻¹]	0,746	0,64	0,757

Areia do Leito:

O consumo médio mensal de areia utilizado para o funcionamento do leito fluidizado foi de 2 ton.dia⁻¹, equivalente a um caudal mássico (\dot{m}_{areia}) de 0,023 kg.s⁻¹, valor utilizado para todas as condições de operação

Produtos gerados

Produtos sólidos:

Os produtos sólidos resultantes do processo de combustão de biomassa incluem uma parte inerte à combustão e uma parte orgânica, essencialmente composta por carbono, podendo sair do sistema de combustão como cinzas de fundo, escória (E), ou como material volante (V) que acompanha o efluente gasoso. Para o balanço mássico admitiu-se que os produtos sólidos de combustão são apenas constituídos por cinzas e carbono, ou seja:

$$w_{ZV} \text{ [kg cinza/kg de produto de combustão volante]}$$

$$w_{ZE} \text{ [kg cinza/kg de produto de combustão escória]}$$

$$w_{CV} = 1 - w_{ZV} \text{ [kg Carbono/kg de produto de combustão volante]}$$

$$w_{CE} = 1 - w_{ZE} \text{ [kg Carbono/kg de produto de combustão escória].}$$

A abundância dos produtos de combustão em relação ao combustível foi expressa em termos de razões ponderais W_{VR} , W_{ER} respeitantes ao resíduo volante e escória, respectivamente:

$$W_{VR} \text{ [kg de produto volante V bs/kg de R]}$$

$$W_{ER} \text{ [kg de produto escória V bs/kg de R]}$$

Com base na fracção mássica de Carbono de cada amostra (w_{CR}) e na análise efectuada ao teor de inqueimados, que foram apenas encontrados nas cinzas volantes, foi possível, através da Equação 18, determinar a eficiência do processo de conversão de Carbono para cada condição de operação (Tarelho, 2008).

$$\text{Eficiência de conversão Carbono \%} = \left(1 - \frac{\dot{m}_{CV}}{\dot{m}_{CR}}\right) \times 100 \quad (\text{Eq. 18})$$

Tendo como exemplo a amostra 11.2Mix:

$$\dot{m}_R = 548,35 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1} \text{ bs}$$

$$w_{CR} = 0,479 \text{ kg C} \cdot \text{kgR}^{-1} \text{ bs}$$

$$\dot{m}_{CR} = 262,66 \text{ ton C} \cdot \text{dia}^{-1} \text{ bs}$$

Assumindo que o valor médio mensal estimado de cinzas volantes, \dot{m}_V , corresponde a 70 toneladas por dia, e sabendo o teor de inqueimados nas cinza volantes, w_{CV} , foi possível determinar o caudal de inqueimados.

$$\dot{m}_V = 70 \text{ ton V} \cdot \text{dia}^{-1}$$

$$w_{CV} = 0,05 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ produto de combustão volante}$$

$$\dot{m}_{CV} = 70 \times 0,05 = 3,50 \text{ ton CV} \cdot \text{dia}^{-1}$$

Assim, a eficiência de conversão do Carbono foi dada por:

$$\text{Eficiência de conversão Carbono} = \left(1 - \frac{3,50}{262,66}\right) \times 100 = 98,7\%$$

Sabendo a eficiência de conversão foi possível determinar a fracção mássica de inqueimados por unidade de combustível:

$$w_{C \text{ inq} R} [\text{kg C inqueimado/kg R bs}] = 0,479 \times (1 - 0,987) = 0,0062$$

Tendo em conta as fracções mássicas de cinza, w_{ZR} , e de inqueimados na biomassa, $w_{C \text{ inq} R}$, e considerando o consumo de biomassa, em base seca, de 548,35 ton.dia⁻¹, o caudal mássico de produtos sólidos de combustão é dado por:

$$\dot{m}_{(E+V)R} = (\dot{m}_{R,bs} \times w_{ZR}) + (\dot{m}_{R,bs} \times w_{C \text{ inq} R}) = 36,92 \text{ ton (E + V)} \cdot \text{dia}^{-1}$$

Como foi referido no subcapítulo 4.1.3, diariamente estima-se que serão escoadas 40 ton.dia⁻¹ de escórias e 70 ton.dia⁻¹ de cinzas volantes, correspondendo a um total de 110 ton.dia⁻¹ de resíduos sólidos produzidos, ou seja, para efeitos de balanço mássico considerou-se que W_{VR} corresponde a 64% (em massa) do total ponderal de produtos

sólidos e por diferença, W_{ER} , corresponde a 36%. Assim, o caudal mássico de produtos sólidos como volantes e escórias foi dado respectivamente por:

$$\dot{m}_{VR} = 36,92 \times 0,64 = 23,63 \text{ ton } V \cdot \text{dia}^{-1}$$

$$\dot{m}_{VE} = 36,92 \times 0,36 = 13,29 \text{ ton } E \cdot \text{dia}^{-1}$$

Ao caudal de escórias calculado anteriormente adicionou-se o caudal de inertes provenientes da biomassa, assumindo como nula a fracção de inertes presentes nas cinzas volantes. Na Tabela 4.10 apresenta-se os resultados relativos à eficiência de conversão de carbono e à produção de produtos sólidos para as condições de operação consideradas. Os resultados obtidos com base no balanço mássico à instalação de combustão, indicam que a quantidade de cinzas volantes calculada foi inferior à quantidade de cinzas de fundo (escórias), o que difere dos valores sugeridos pelo que tem sido a prática corrente na instalação relativamente à produção de cinzas volantes e cinzas de fundo, $70 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $40 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ respectivamente. Este resultado poderá estar associado à quantidade de inertes alimentados com a biomassa, e a sua distribuição entre as cinzas volantes e as cinzas de fundo. De facto assumiu-se que esses inertes seriam recolhidos como cinzas de fundo, o que poderá não suceder, tendo em consideração o arrastamento desses inertes em função da velocidade de escoamento gasoso na fornalha e a velocidade terminal dessas partículas de inertes. Verificou-se ainda que, o total de produtos sólidos (cinzas de fundo e volantes) produzidos durante o processo de combustão não ultrapassou as $100 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1}$, para as condições de operação analisadas, e que é inferior a alguns valores nominais indicados pela prática na instalação. Este resultado pode estar também relacionado com a contabilização da quantidade de inertes alimentados com a biomassa (calculado com base nas amostras recolhidas), e a quantidade efectivamente alimentada, nomeadamente no que diz respeito à fracção granulométrica inferior a $0,250 \text{ mm}$; esta fracção de inertes é de difícil contabilização com base no procedimento experimental utilizado (lavagem da biomassa).

Tabela 4.10: Eficiência de conversão de carbono [%] e produtos sólidos gerados [ton.dia⁻¹].

	C.O 1	C.O 2	C.O 3
	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
Eficiência de conversão do Carbono %	98,7	97,9	98,0
ṁ produto sólido V [ton·dia⁻¹]	23,93	19,26	8,21
ṁ produto sólido E [ton·dia⁻¹]	13,29	10,83	4,64
ṁ inertes na biomassa [ton·dia⁻¹]	57,03	69,46	-
ṁ produto sólido (E+inertes) [ton·dia⁻¹]	70,32	80,29	4,64

Produtos gasosos:

Os produtos de combustão gasosos são constituídos por um conjunto de substâncias, que para efeito do balanço mássico global considerou-se apenas os seus componentes maioritários, adoptando-se a seguinte referência para cada produto gasoso i:

$$i = 1 \text{ CO}_2 ; 2 \text{ H}_2\text{O} ; 3 \text{ CO} ; 4 \text{ H}_2 ; 5 \text{ O}_2 ; 6 \text{ N}_2 ; 7 \text{ NO} ; 8 \text{ SO}_2$$

Indicando-se a sua abundância por unidade de biomassa (R), em base seca.

$$n_i \text{ [kmol de gás } i \text{ produzido/kg R bs]}$$

Considerando a expressão estequiométrica que traduz a reacção de combustão com o ar atmosférico (Tarelho, 2008):

$$\left(\frac{W_{CR}}{12} ; \frac{W_{HR}}{2} ; \frac{W_{OR}}{32} ; \frac{W_{NR}}{28} ; \frac{W_{SR}}{32} ; W_{ZR} ; \frac{W_{WR}}{18} \right) + \left(\frac{W_a}{32} \times (1 \times \text{O}_2 + 3,76 \times \text{N}_2 + 7,66 \times W_{VA} \times \text{H}_2\text{O}) \right)$$



$$(n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R})$$

+

$$(w_{ZV} \times W_{VR} + w_{ZE} \times W_{ER}) + \frac{(w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER})}{12}$$

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

Para o carbono (C)

$$\frac{w_{CR}}{12} = n_{1R} + n_{3R} + \frac{(w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER})}{12} \quad (\text{Eq.19})$$

Para o hidrogénio (H₂)

$$\frac{w_{HR}}{2} + \frac{w_{WR}}{18} + \frac{w_a \times w_{VA} \times 7,66}{32} = n_{2R} + n_{4R} \quad (\text{Eq. 20})$$

Para o oxigénio (O₂)

$$\frac{w_{OR}}{32} + \frac{0,5 \times w_{WR}}{18} + \frac{w_a}{32} \times (1 + 0,5 \times w_{VA} \times 7,66) = n_{1R} + \frac{n_{2R}}{2} + \frac{n_{3R}}{2} + n_{5R} + \frac{n_{7R}}{2} + n_{8R} \quad (\text{Eq. 21})$$

Para o azoto (N)

$$\frac{w_{NR}}{14} + 2 \times \frac{w_a}{32} \times 3,76 = 2 \times n_{6R} + n_{7R} \quad (\text{Eq. 22})$$

E para o enxofre (S)

$$\frac{w_{SR}}{32} = n_{8R} \quad (\text{Eq. 23})$$

Para a cinza (Z)

$$w_{ZR} = w_{ZV} \times w_{VR} + w_{ZE} \times w_{ER} \quad (\text{Eq. 24})$$

Resolvendo o sistema de equações anteriormente apresentado obteve-se a abundância dos componentes maioritários (n_i) para o processo de combustão. Os resultados obtidos em cada condição de operação apresentam-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Gases húmidos produzidos no processo de combustão (PTN) [kmol·kg⁻¹ R bs].

Condição de operação	Amostra	n _{CO2}	n _{H2O}	n _{CO}	n _{H2}	n _{O2}	n _{N2}	n _{NO}	n _{SO2}
C.O. 1	11.2Mix	0,0394	0,0916	0,00	0,00	0,0140	0,2144	0,00	0,00
C.O. 2	Ref (01Int)	0,0367	0,1116	0,00	0,00	0,0129	0,1954	0,00	0,00
C.O. 3	04Ext2	0,0405	0,0742	0,00	0,00	0,0151	0,2254	0,00	0,00

A razão de gases húmidos de combustão produzidos por unidade de massa de combustível (G_t) foi obtida através da seguinte expressão:

$$G_t = n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R} \quad (\text{Eq. 25})$$

Sendo a composição molar dos gases húmidos de combustão (y_i) dada por:

$$y_i = \frac{\text{kmol componente } i}{\text{kmol mistura de gase húmidos}} \quad \text{com } i = 1, \dots, 8 \quad (\text{Eq. 26})$$

Para os componentes considerados:

$$y_{CO2} = y_1 = \frac{n_{1R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{1R}}{G_t}$$

$$y_{H2O} = y_2 = \frac{n_{2R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{2R}}{G_t}$$

$$y_{CO} = y_3 = \frac{n_{3R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{3R}}{G_t}$$

$$y_{H_2} = y_4 = \frac{n_{4R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{4R}}{G_t}$$

$$y_{O_2} = y_5 = \frac{n_{5R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{5R}}{G_t}$$

$$y_{N_2} = y_6 = \frac{n_{6R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{6R}}{G_t}$$

$$y_{NO} = y_7 = \frac{n_{7R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{7R}}{G_t}$$

$$y_{SO_2} = y_8 = \frac{n_{8R}}{n_{1R} + n_{2R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{8R}}{G_t}$$

Na Tabela 4.12 apresentam-se os resultados obtidos relativamente à razão de gases húmidos de combustão produzidos (G_t), a composição molar (y_i), em percentagem, e respectivo caudal mássico para cada condição de operação.

Tabela 4.12: Razão de gases húmidos e caudal.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	Ref(01Int)	04Ext2
Gt [kg gases húmidos·kg ⁻¹ R bs]	0,359	0,357	0,355
CO ₂ %	10,96	10,28	11,41
H ₂ O %	25,49	31,30	20,90
CO %	0,00	0,00	0,00
H ₂ %	0,00	0,00	0,00
O ₂ %	3,90	3,45	3,91
N ₂ %	59,66	59,66	59,66
NO %	0,00	0,00	0,00
SO ₂ %	0,00	0,00	0,00
Gt [kg gases húmidos·kg ⁻¹ R bs]	9,833	9,506	9,913
\dot{m} gases húmidos [kg·s ⁻¹]	62,404	57,029	60,716
\dot{m} gases húmidos [ton·dia⁻¹]	5391,734	4927,273	5245,899

A razão de gases secos de combustão produzidos por unidade de massa de combustível ($G_{t,s}$) foi obtida através da seguinte expressão:

$$G_t = n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R} \quad (\text{Eq. 27})$$

Sendo a composição molar dos gases húmidos de combustão (y_i , $i \neq 2$) dada por:

$$y_i = \frac{\text{kmol componente } i}{\text{kmol mistura de gase secos}} \quad \text{com } i = 1, \dots, 8 \text{ e } i \neq 2 \quad (\text{Eq. 28})$$

Para os componentes considerados:

$$y_{CO_2,s} = y_{1,s} = \frac{n_{1R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{1R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{CO,s} = y_{3,s} = \frac{n_{3R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{3R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{H_2,s} = y_{4,s} = \frac{n_{4R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{4R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{O_2,s} = y_{5,s} = \frac{n_{5R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{5R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{N_2,s} = y_{6,s} = \frac{n_{6R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{6R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{NO,s} = y_{7,s} = \frac{n_{7R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{7R}}{G_{t,s}}$$

$$y_{SO_2,s} = y_{8,s} = \frac{n_{8R}}{n_{1R} + n_{3R} + n_{4R} + n_{5R} + n_{6R} + n_{7R} + n_{8R}} = \frac{n_{8R}}{G_{t,s}}$$

Na Tabela 4.13 apresentam-se os resultados obtidos relativamente à razão de gases secos de combustão produzidos ($G_{t,s}$), composição molar (y_i , $i \neq 2$), em percentagem, e respectivo caudal mássico para as diferentes condições de operação.

Tabela 4.13: Razão de gases secos e caudal.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	Ref(01Int)	04Ext2
Gt [kmol secos·kg ⁻¹ R bs]	0,268	0,245	0,281
CO ₂ %	14,71	14,96	14,43
CO %	0,00	0,00	0,00
H ₂ %	0,00	0,00	0,00
O ₂ %	5,23	5,26	6,14
N ₂ %	80,06	79,78	80,21
NO %	0,00	0,00	0,00
SO ₂ %	0,00	0,00	0,00
Gt [kg gases secos·kg ⁻¹ R bs]	8,184	7,497	8,577
m gases secos [kg·s ⁻¹]	51,940	44,978	52,532
m gases secos [ton·dia⁻¹]	4487,632	3886,112	4538,755

Na Tabela 4.14 apresenta-se resumidamente os resultados do balanço mássico relativos aos recursos utilizados e respectivos produtos gerados para as condições de operação consideradas, em ton·dia⁻¹.

Tabela 4.14: Caudal mássico de recursos utilizados e produtos gerados em ton·hora⁻¹.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3	
	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext1	
Recursos utilizados	$\dot{m}_{\text{biomassa}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	548,35	529,20	529,20
	$\dot{m}_{\text{água na biomassa}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	526,85	687,12	310,80
	\dot{m}_{inertes} [ton·dia ⁻¹]bs	57,03	69,46	0,00
	$\dot{m}_{\text{ar de combustão}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	4353,45	3751,89	4418,73
	$\dot{m}_{\text{água no ar de combustão}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	64,43	55,53	65,40
	$\dot{m}_{\text{areia do leito}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	2,00	2,00	2,00
	Total	5552,11	5095,20	5326,12
Produtos gerados	$\dot{m}_{\text{areia do leito}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	2,00	2,00	2,00
	$\dot{m}_{\text{cinzas volantes}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	23,63	19,26	8,21
	$\dot{m}_{\text{escórias}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	70,32	80,29	4,62
	$\dot{m}_{\text{gases de exaustão}}$ [ton·dia ⁻¹]bs	5391,73	4927,27	5245,90
	Total	5487,68	5028,82	5260,73

4.2.4 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético aplicado à unidade de combustão foi realizado tendo em consideração o princípio de conservação de energia, a pressão constante, onde foram desprezados os termos relativos à variação de energia cinética, potencial e de mistura. Assim, em estado estacionário e pressão constante, a variação de energia foi expressa através da função termodinâmica de estado entalpia (J.kg⁻¹ R bs), sendo o seu balanço dado por:

$$\Delta H_{\text{reagentes}} = \Delta H_{\text{produtos}} + \Delta H_{\text{útil}} + \Delta H_{\text{perdido}} \quad (\text{Eq. 29})$$

As formas de energias ou componentes no balanço energético para os reagentes e produtos incluem o calor sensível, o calor latente de vaporização e o calor de reacção de combustão dos vários componentes combustíveis.

$$\Delta H_{\text{reagentes}} = [\Delta H_S + \Delta H_L + \Delta H_R]_{\text{reagentes}} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$\Delta H_{\text{produtos}} = [\Delta H_S + \Delta H_L + \Delta H_R]_{\text{produtos}} \quad (\text{Eq. 31})$$

A energia térmica acumulada numa massa material designa-se por calor sensível (ΔH_S), sendo proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura de referência é dado por:

$$\Delta H_S = \sum_j n_j \times M_j \times \bar{c}_{pj} \times (T - T^0) \quad (\text{Eq. 32})$$

Com,

$$\Delta H_S - [MJ \cdot kg^{-1}bs]$$

$$\bar{c}_{pj} - [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \text{ calor específico médio referente à espécie } j, \text{ definido entre } T^0 \text{ e } T$$

$$n_j - [kmol \cdot kg^{-1}Rbs] \text{ determinado a partir do balanço mássico}$$

$$M_j - [kg_j \cdot kmol_j^{-1}] \text{ massa molar da espécie } j$$

Sendo \bar{c}_{pj} o valor médio para a capacidade calorífica entre a temperatura de entrada ou saída, no caso dos produtos (T), e a temperatura de referência (T^0). O cálculo da \bar{c}_{pj} foi efectuado com base na seguinte equação:

$$\bar{c}_{pj}(T) = \frac{1}{T - T^0} \int_{T^0}^T c_{pj} dT \quad (\text{Eq. 33})$$

Aplicando a Equação 32 aos recursos utilizados, nomeadamente, biomassa, inertes e ar de combustão, o calor sensível dos reagentes é dado por:

$$\begin{aligned} \Delta H_{S, \text{Reagentes}} = & [1 \times \bar{c}_{pR} + W_{WR} \times c_{PW}] \times (T_R - T^0) + [1 \times \bar{c}_{pI} + W_{WI} \times c_{PW}] + W_a \\ & \times [1 \times \bar{c}_{pO_2} + 3,31 \times \bar{c}_{pN_2} + 4,31 \times W_{VA} \times \bar{c}_{pH_2O(g)}] \times (T_A - T^0) \end{aligned}$$

A pressão constante, a capacidade calorífica da biomassa (c_{pR}) é dependente da temperatura. A estimativa desta propriedade, em base seca, teve como base a equação 34 (Thunman, 2001), dada pela seguinte expressão:

$$c_{pR} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] = 4,206T - 37,7 \quad (\text{Eq.34})$$

Para a temperatura de entrada da biomassa, 293 K, e considerando 298 K a temperatura de referência, a capacidade calorífica média referente à biomassa foi obtida por:

$$\bar{c}_{pj}(T) = \frac{1}{T - T^0} \int_{T^0}^T 4,206T - 37,7 dT = 1205,17 J \cdot kg^{-1}$$

A capacidade calorífica dos gases presentes no ar de combustão e nos gases de exaustão foi calculada através de um polinómio de terceiro grau, deduzido a partir das tabelas de JANNAF (Matos, 2005), considerando que a pressão constante um gás real puro depende da temperatura a que o gás se encontra. Assim, a capacidade calorífica dos gases foi calculada através da seguinte equação.

$$c_{p^0_j} [cal \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}] = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3(1/T)^2 \quad (\text{Eq. 35})$$

Considerando que $1 \text{ cal} = 4,187 J$

Sendo a capacidade calorífica média referente aos gases dada pela integração do polinómio apresentado anteriormente, entre a temperatura de entrada, no caso dos gases

no ar de combustão, ou saída nos gases de exaustão e a temperatura de referência, 298 K.

$$\bar{c}_{pj}(T) = \frac{1}{T - T^0} \int_{T^0}^T a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3(1/T)^2 dT$$

Aplicando a Equação 32 e com base nos componentes finais de uma reacção de combustão completa de biomassa (CO_2 , H_2O , N_2 , cinzas volantes e escórias) o $\Delta H_{s,produtos}$ foi calculado por:

$$\begin{aligned} \Delta H_{s,produtos} = & \left[\sum n_{iR} \times M_i \times \bar{c}_{pi} \right] \times (T_G - T^0) + [(w_{ZV} \times W_{VR} + w_{ZE} \times W_{ER}) \times \bar{c}_{pz}] \\ & \times (T_G - T^0) + [(w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER}) \times \bar{c}_{pC}] \times (T_G - T^0) \end{aligned}$$

O calor latente (ΔH_L), referente à energia térmica posta em jogo na mudança de fase de uma substância quando esta muda de fase, torna-se particularmente importante no caso da água, que constitui a humidade presente na biomassa, considerada apenas no caso dos reagentes, uma vez que não ocorre condensação dos produtos na instalação de combustão, sendo o calor latente nulo, $\Delta H_{L,produtos} = 0$. Assim, o $\Delta H_{L,reagentes}$ foi calculado com base na Equação 35.

$$\Delta H_L = \sum n_j \times M_j \times h_{j,WV,T^0} \quad (\text{Eq. 36})$$

h_{j,WV,T^0} - Calor latente de vaporização de cada substância j à temperatura de referência (25°C)

$$\Delta H_{L,reagentes} = W_{WR} \times h_{WV,298K}$$

O calor de reacção de combustão ou entalpia de reacção de combustão (ΔH_R) a pressão constante (1 atm) e à temperatura de referência (25°C) é equivalente ao poder calorífico do combustível e o seu cálculo teve como base a Equação 37.

$$\Delta H_r = \sum n_j \times M_j \times PCI_{j,T^0} \quad (\text{Eq. 37})$$

PCI_{j,T^0} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] - Calor de combustão à temperatura de referência em que a água formada como produto de combustão ocorre na forma gasosa (poder calorífico inferior)

No caso dos reagentes, $\Delta H_{r,reagentes} = PCI_R$;

Para os produtos, $\Delta H_{r,produtos} = (w_{CV} \times W_{VR} + w_{CE} \times W_{ER}) \times PCI_C$.

$$PCI_C = 32,79 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

A potência térmica fornecida ao sistema de combustão, Q_{Ent} , foi determinada através da Equação 38, correspondendo à soma da potência térmica presente na biomassa, Q_R , ar de combustão, Q_{AC} , material inerte, Q_I , e na água comprimida para a geração de vapor, Q_A , em $\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$Q_{Ent} = Q_R + Q_{AC} + Q_I + Q_A = \dot{m}_R \times \Delta H_R + \dot{m}_{AC} \times \Delta H_{AC} + \dot{m}_I \times \Delta H_I + \dot{m}_A \times \Delta H_A \quad (\text{Eq. 38})$$

Sendo a potência térmica transferida ao sistema de combustão pela água comprimida na geração do vapor, Q_A , determinada através da Equação 39, à temperatura e pressão referentes a cada condição de operação considerada (Ver Tabela 4.15).

$$Q_A = \dot{m}_A \times h_A \quad (\text{Eq. 39})$$

Tabela 4.15: Potência térmica na água comprimida para a geração de vapor [$\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$].

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	01Int	04Ext2
Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	190	182	190
Pressão [bar]	118	118	118
\dot{m}_A [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]	30	27	33
h [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	0,8186	0,7784	0,8125
Q_A [$\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$]	24,56	21,02	26,81

À saída do sistema, a potência térmica presente nos produtos, $Q_{Saída}$, foi calculada somando a potência térmica nos gases de exaustão, Q_{GE} , nas cinzas volantes, Q_V , e nas escórias, Q_E , em $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

$$Q_{Saída} = Q_{GE} + Q_V + Q_E + Q_{Vapor} = \dot{m}_{GE} \times \Delta H_{GE} + \dot{m}_{CV} \times \Delta H_{CV} + \dot{m}_E \times \Delta H_E \quad (\text{Eq. 40})$$

A potência térmica útil, considerada como a potência presente no vapor sobreaquecido, Q_{vapor} , foi calculada com base na Equação 41.

$$Q_{vapor} = \dot{m}_{vapor} \times h_{vapor} \quad (\text{Eq. 41})$$

Sendo a entalpia específica do vapor, h_{vapor} , determinada à temperatura e pressão referente a cada condição de operação, como se apresenta na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Potência térmica no vapor [$\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$].

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	01Int	04Ext2
Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	485	485	485
Pressão [bar]	91	91	91

$\dot{m}_{\text{vapor}} [\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	33	27	33
$h [\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$	3,3348	3,3479	3,3479
$Q_{\text{vapor}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	110,05	90,39	110,48

A potência térmica perdida, Q_{perdida} , ou seja, dissipada pelo próprio sistema de combustão na caldeira, foi determinada através da Equação 42.

$$Q_{\text{perdida}} = Q_{\text{entrada}} - (Q_{\text{vapor}} + Q_{\text{saída}}) \quad (\text{Eq. 42})$$

Na Tabela 4.17 apresentam-se os resultados do balanço energético para o processo de geração de energia térmica entre a entrada e a saída da caldeira, para as condições de operação consideradas.

Tabela 4.17: Balanço energético a sistema de combustão [$\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$].

		C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
		11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
Potência à entrada	$Q_{\text{biomassa}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	94,70	82,97	94,47
	$Q_{\text{inertes}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,00	0,00	0,00
	$Q_{\text{ar de combustão}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	8,30	7,14	8,44
	$Q_{\text{areia do leito}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,00	0,00	0,00
	$Q_{\text{água comprimida}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	24,56	21,02	26,81
	$Q_{\text{entrada}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	127,56	111,12	129,72
Potência à saída	$Q_{\text{gases de exaustão}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	9,75	9,20	9,25
	$Q_{\text{cinzas volantes}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,48	0,48	0,24
	$Q_{\text{escórias}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,09	0,07	0,02
	$Q_{\text{inertes}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,04	0,10	0
	$Q_{\text{Areia do leito}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,01	0,01	0,01
	$Q_{\text{saída}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	10,36	9,85	9,53
	$Q_{\text{vapor}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	110,05	90,39	110,48
$Q_{\text{perdida}} [\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}]$	7,14	10,88	9,72	

Os resultados apresentados na Tabela 4.17 mostram que, da potência térmica total fornecida, entre 7,3 e 8,9% é perdida através dos produtos de combustão (cinzas volantes, escórias, e areia do leito). Relativamente ao valor de potência térmica fornecida pela biomassa, verificou-se que representa entre 85,5 e 91,8% da potência útil produzida, sendo a restante potência térmica fornecida pelo ar de combustão e água comprimida para geração do vapor. Apesar de não terem sido calculadas as perdas de potência por radiação e convecção através do sistema de conversão de energia na caldeira, com base na diferença entre os valores de potência conhecidos para os vários fluxos, estima-se

que tenha sido dissipada por esses processos entre 5,6 a 9,8% da potência total fornecida.

4.2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA INSTALAÇÃO

A eficiência térmica da caldeira com fornalha de leito fluidizado, (η), foi determinada pelo quociente da diferença entre a potência fornecida ao sistema (com a biomassa, com o ar de combustão e com a água para a caldeira), (Q), e a potência perdida pelo sistema (com os produtos de combustão e dissipada pelas paredes do sistema), (P), e a potência fornecida ao sistema, de acordo com a Eq. 43 (Tarelho, 2008). A potência perdida pelo sistema (com os produtos de combustão e dissipada pelas paredes do sistema) foi calculada através da diferença entre a potência fornecida ao sistema e a potência térmica no vapor.

$$\eta = \frac{Q-P}{Q} \times 100 \quad (\text{Eq. 43})$$

Com base na potência eléctrica produzida para cada condição de operação considerada, foi calculada a eficiência eléctrica, (ε), definida como a razão entre a potência eléctrica produzida (E) e a potência fornecida no combustível (C), de acordo com a Eq. 44 (Sá, 2009).

$$\varepsilon = \frac{E}{C} \quad (\text{Eq. 44})$$

Em forma de resumo, na Tabela 4.18 apresentam-se os valores da eficiência térmica e eléctrica da instalação estudada, o consumo de biomassa, e o respectivo teor de humidade e poder calorífico inferior; a potência fornecida à caldeira; a potência perdida nos produtos de combustão e dissipada na caldeira, a potência térmica no vapor e a potência eléctrica produzida.

Da análise dos resultados apresentados na referida tabela, verificou-se uma eficiência térmica da caldeira na gama 81,3 e 86,3%, valor máximo atingido para a primeira condição de operação. Em relação à eficiência eléctrica, calculada com base na potência energética fornecida na biomassa, obtiveram-se valores entre os 29,3 e os 31,0%. A relação entre os resultados das eficiências obtidas com os parâmetros que caracterizam a biomassa, nomeadamente o seu consumo, teor de humidade e poder calorífico inferior, mostram que o teor de humidade do combustível é uma variável bastante importante. Observou-se que quando o teor de humidade do combustível é mais baixo (37% em

massa), o caso da C.O.3, um menor consumo de biomassa ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) permite uma mesma produção de electricidade comparativamente à C.O.1.

Tabela 4.18: Eficiência energética da instalação para as condições de operação consideradas.

	C.O. 1	C.O. 2	C.O. 3
	11.2Mix	Ref (01Int)	04Ext2
$\dot{m}_{\text{biomassa}} [\text{ton}\cdot\text{h}^{-1}]\text{btq}$	50,00	58,00	35,00
Humidade [%]	49	57	37
PCI [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{R}$] bs	17,3	17,11	17,9
Potência fornecida com o combustível (C) [MWt]	94,70	82,97	94,47
Potência introduzida na caldeira (Q) [MW _t]	127,56	111,12	129,72
Potência no vapor (V) [MWt]	110,05	90,39	110,48
Potência perdida (P) [MWt]	17,51	20,73	19,24
Potência eléctrica produzida (E) [MWe]	29,36	24,33	29,24
Eficiência Térmica da Caldeira (η) [%]	86,3	81,3	85,2
Eficiência Eléctrica da Instalação (ϵ) [%]	31,0	29,3	31,0

Considerando o período de funcionamento da central de 24 horas por dia e 350 dias por ano, a energia eléctrica produzida, para cada condição de operação foi respectivamente de 247, 204 e 246 GWh \cdot ano⁻¹.

O consumo médio anual estimado de energia eléctrica da central termoeléctrica, representa 9% da energia eléctrica produzida, significando um contributo para o sector electroprodutor português de 222, 183 e 221 GWh \cdot ano⁻¹, respectivo a cada condição de operação.

4.2.6 EMISSÕES DE CO₂

Em termos económicos e ambientais, os sistemas de produção de electricidade e calor a partir de biomassa são mais sustentáveis dos que utilizam carvão, fuelóleo ou gás natural como combustível. A biomassa, para além de ser considerada um produto primário, implicando menor custo de exploração quando comparado com combustíveis fósseis, permite a produção energética inserida num ciclo neutro de carbono, onde consequentemente as emissões de CO₂ são nulas (Maket It Be, 2010). No entanto, não se devem esquecer as emissões de CO₂ associadas a todas as operações que envolvem o processamento, recolha e transporte da biomassa residual florestal até à central termoeléctrica, já que estas não fazem parte do balanço global, no qual se inclui o ciclo de vida das árvores e a própria queima da biomassa.

Neste sentido, e com o intuito de avaliar se a central termoeléctrica em estudo contribui de forma neutra em termos de emissões de CO₂, efectuou-se um balanço entre as emissões evitadas, tendo como base a emissão específica de CO₂, em g \cdot kWh⁻¹, por parte

das centrais termoeléctricas inseridas no *mix* energético nacional, para o ano de 2010, e as emissões geradas nas operações de processamento, transporte e conversão da biomassa. Assim, o balanço foi calculado através da seguinte equação:

$$\text{Balanço de } CO_2 = \text{Emissões evitadas} - \text{Emissões geradas} \quad (\text{Eq. 45})$$

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 eléctrica da rede nacional”.

Na Figura 4.24 apresenta-se o mix de produção total da energia eléctrica comercializada em 2010, observando-se que a contribuição da produção de electricidade em regime especial (PRE), onde se incluem as fontes de energia renovável, atingiu os 53,1%, sendo a restante energia produzida em centrais termoeléctricas convencionais (carvão, gás natural e fuelóleo), 27,2%, em grandes hídricas, 15,6%, e em centrais nucleares, 4%. Numa perspectiva evolutiva para o referido ano, como se mostra na Figura 4.25, é possível observar a variação mensal da contribuição das várias fontes, de onde se destacam as fontes PRE no mês de Novembro. Tal facto deve-se ao aumento do contributo da energia eólica nos meses de inverno, já que esta representa uma quota de 55,8% no total das fontes PRE (EDP, 2011).

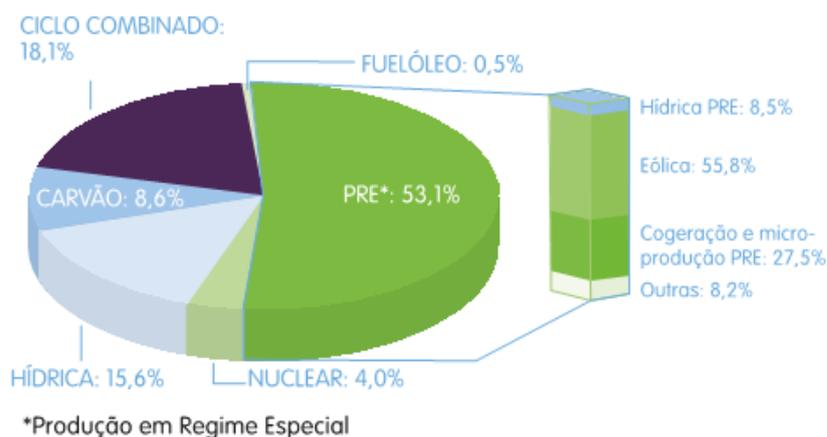


Figura 4.24: Mix de produção total da energia eléctrica comercializada em 2010 (EDP, 2011).

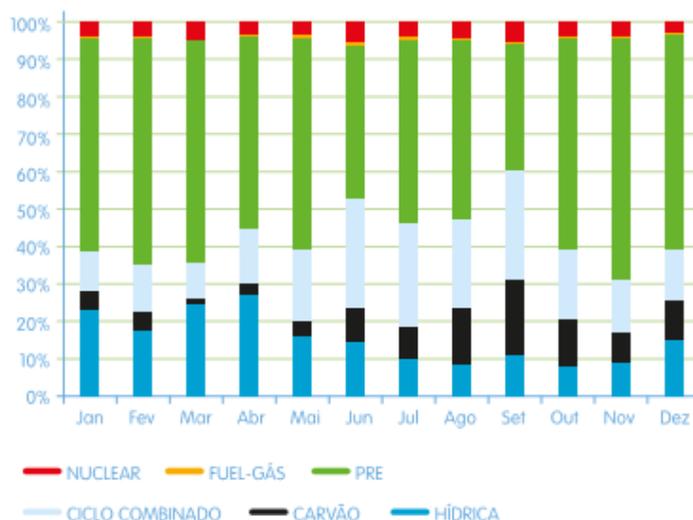


Figura 4.25: Evolução mensal da energia eléctrica consumida, tendo por base o recurso energético utilizado para produção da energia eléctrica, em 2010 (EDP, 2011)

Relativamente às emissões específicas dos principais poluentes libertados pelas centrais termoeléctricas, em 2010, foram registadas: 226,74 g de CO₂·kWh⁻¹, 1,08 g de NO_x·kWh⁻¹, 0,66 g de SO₂·kWh⁻¹ e 111,76 µg de resíduos radioactivos·kWh⁻¹ (URL11). A Figura 4.26 apresenta a evolução mensal das emissões específicas para o referido ano, observando-se que o valor máximo é atingido no mês de Setembro, correspondente ao mês de menor contribuição das energias renováveis (EDP, 2011).

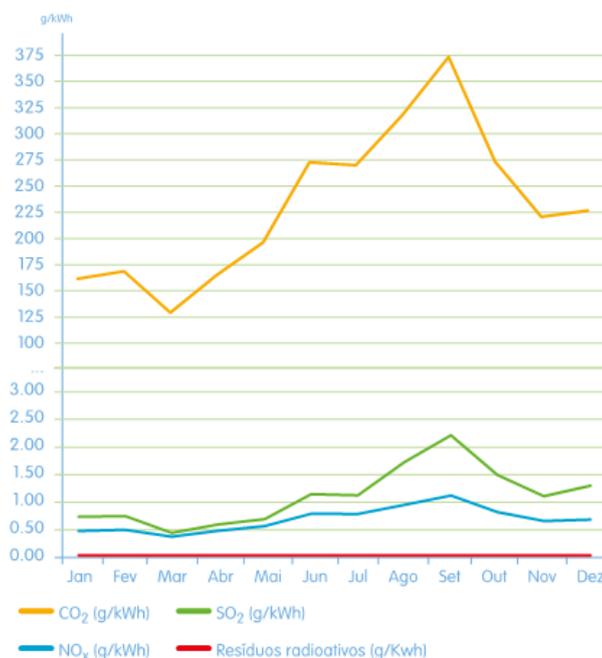


Figura 4.26: Evolução mensal das emissões específicas em 2010 (EDP, 2011).

Deste modo, conhecido o valor da emissão específica de CO₂, 226,74 g por kWh produzido, e considerando o valor médio anual de produção de energia eléctrica para as condições de operação analisadas, 208,8 GWh, o valor das emissões evitadas corresponde a 47.343 ton CO₂.

Por outro lado, as emissões associadas ao processamento da biomassa no terreno, ao transporte até à central e ao uso de gás natural, como combustível de arranque da fornalha de leito fluidizado e auxiliar na insuficiência de biomassa, constituem as emissões de CO₂ geradas pelo funcionamento da central.

Em relação ao processamento no terreno, incluem-se as operações de corte, trituração, recolha e carga, contudo, dada a dificuldade em obter os dados relativos aos consumos de combustíveis e níveis de actividade dos respectivos equipamentos, excluiu-se esta parcela do balanço acima referido.

No cálculo referente às emissões associadas ao transporte de biomassa, apenas foi tida em conta a biomassa proveniente do exterior, que corresponde a 33% do valor médio anual de biomassa consumida na central, 420.000 ton·ano⁻¹, uma vez que a restante é proveniente da unidade anexa de produção de pasta de papel. Considerou-se para o cálculo, o número de viagens (ida e volta) necessárias para transportar 138.600 ton por ano de biomassa, uma distância média de viagem de 100km (tendo em conta que o raio de influência da central é 70km e que apenas dois terço dessa área é explorável em termos de biomassa residual florestal) e o consumo médio de gasóleo do veículo pesado (40 L/100 km) (URL12). Assumiu-se que por cada viagem, em média, cada veículo pesado transporta 30 ton de biomassa. Assim, para um ano de funcionamento da central é necessária a recepção de 4620 veículos pesados que ao percorrerem 100km em cada viagem consomem por ano 184.800 litros de gasóleo.

Sabendo que o factor de emissão (*FE*) e o poder calorífico deste combustível é respectivamente 74,1 kg CO₂·GJ⁻¹ e 43,3 GJ·ton⁻¹ (APA, 2008), e considerando segundo o disposto no Decreto-Lei nº 89/2008, de 30 de Maio, o valor médio para a massa volúmica do gasóleo, a 15°C, de 833 kg·m⁻³, equivalente ao poder calorífico líquido (*PCL*) de 0,0361 GJ·dm⁻³, foi possível, com base na equação 46 obter a emissão anual associada ao transporte de biomassa, correspondendo a 494,3 ton de CO₂ por ano.

$$Emissões_{transp} = FE [kgCO_2 \cdot GJ^{-1}] \times PCL [GJ \cdot dm^{-3}] \times Consumo [dm^3 \cdot ano^{-1}] \quad (Eq. 46)$$

$$= 74,1 \times 0,0361 \times 184.800 = 494.342 \text{ kg } CO_2 \cdot ano^{-1}$$

Relativamente ao uso de gás natural, utilizado na fase de arranque da fornalha de leito fluidizado e como combustível auxiliar na falta de biomassa, a central regista um consumo de cerca de 4.000.000 Nm³.ano⁻¹. Considerando o factor de emissão deste combustível, 56,1 kg de CO₂.GJ⁻¹ e o poder calorífico de 0,03846 GJ.Nm⁻³ (APA, 2008), as respectivas emissões anuais, segundo a equação 47, corresponderam a 8.630,4 ton de CO₂.

$$Emissões_{GN} = FE [kgCO_2 \cdot GJ^{-1}] \times PC [GJ \cdot Nm^{-3}] \times Consumo [Nm^3 \cdot ano^{-1}] \quad (\text{Eq. 47})$$

$$= 56,1 \times 0,03846 \times 4.000.000 = 8.630.424 \text{ kg } CO_2 \cdot ano^{-1}$$

Desta forma, o total de emissões geradas pela central para produzir anualmente 208,8 GWh de energia eléctrica, correspondente à soma das emissões associadas ao transporte e conversão energética da biomassa, sendo de 9.124,7 ton de CO₂.

Aplicando a equação 45, referente ao balanço do CO₂, verificou-se que o saldo das emissões de CO₂ é positivo, ou seja, embora existam emissões geradas pela central, o que na realidade não confirma o seu contributo neutro, a central possibilita a redução efectiva da emissão de 38.218,3 ton de CO₂ de origem fóssil por ano, que resultaria da produção dos 208,8 GWh em centrais termoeléctricas inseridas no *mix* nacional, que utilizam combustíveis fósseis, correspondendo a uma redução efectiva de 76,1%.

$$Balanço \text{ de } CO_2 = 47.343 - 9.101,7 = 38.241,3 \text{ ton de } CO_2 \cdot ano^{-1}$$

5 CONCLUSÃO

A segurança no abastecimento é um factor fundamental para que a biomassa possa ter sucesso enquanto combustível destinado a valorização energética. Analisando a disponibilidade de biomassa florestal na zona de influência da central termoeléctrica em estudo, concluiu-se que a quantidade estimada, proveniente apenas dos povoamentos de pinheiro e eucalipto, é suficiente para satisfazer os 33% de biomassa que a central termoeléctrica necessita adquirir ao exterior, sendo que a restante provem de resíduos fibrosos gerados pela fábrica de pasta de papel anexa à central.

Foi realizada a caracterização dos diferentes tipos de biomassa que são recebidos e utilizados como combustível na central termoeléctrica em estudo, e quantificadas as principais propriedades que determinam a qualidade da biomassa como combustível. A análise ao tipo de biomassa recebida e utilizada como combustível permitiu concluir que maioritariamente se trata de biomassa residual proveniente das operações de exploração de eucalipto e de pinheiro, por parte da indústria da madeira.

Relativamente às principais propriedades da biomassa, o teor de humidade é um dos parâmetros que influencia de forma significativa o seu desempenho como combustível, uma vez que a evaporação da água presente durante o processo de combustão pode consumir uma parte significativa da energia disponível. Da avaliação realizada ao teor de humidade da biomassa ao longo do período de amostragem, verificou-se que existe alguma variabilidade para um mesmo tipo de biomassa, sendo que existe uma tendência para os valores de humidade serem superiores nos meses de inverno. Verificou-se que no processo de secagem ao ar, efectuado em laboratório, a perda de água por parte da biomassa é mais significativa nos primeiros cinco dias de secagem, independentemente da diversidade de valores de razão mássica de humidade inicial presente nas amostras em cada mês. Neste contexto, a criação de um espaço coberto dedicado à secagem da biomassa recebida na central certamente que permitiria melhorar as características da biomassa recebida e utilizada como combustível.

Outra das propriedades principais da biomassa na conversão de energia é o teor de inertes. Da análise efectuada concluiu-se que existe uma relação entre os métodos de exploração, recolha e processamento da biomassa e a quantidade de inertes presente na biomassa. Os valores mais baixos de quantidade de inertes foram obtidos para as amostras de biomassa provenientes do descasque de eucalipto efectuado nas instalações da fábrica de papel anexa à central, demonstrando a influência dos métodos

de exploração e recolha. Associado ao estudo do teor de inertes presentes na biomassa, foi realizada a caracterização da distribuição granulométrica das partículas que os compõem, e concluiu-se que o tamanho das partículas de inertes se encontra maioritariamente compreendido entre 0,25 e 1,00 mm.

O poder calorífico inferior (PCI) da biomassa caracterizada variou na gama 17 a 18 MJ/kg (bs), e analisando os resultados do balanço energético à instalação, conclui-se que um aspecto importante no desempenho da conversão energética da biomassa é o seu teor de humidade. De facto, observa-se que para a produção da mesma quantidade de energia eléctrica, um elevado valor do teor de humidade do combustível implica a compensação com um aumento do consumo de biomassa.

Na perspectiva da eficiência térmica da instalação, e com base na potência térmica fornecida pela biomassa, concluiu-se que os valores obtidos são possíveis devido ao reaproveitamento de parte do calor presente no vapor após a sua expansão na turbina, o qual é utilizado para o pré aquecimento do ar de combustão e da água comprimida alimentada à caldeira para a geração do vapor. Para as condições operatórias consideradas, os resultados mostram que a instalação tem uma caldeira com uma eficiência térmica com valores na gama 81% a 86%, e apresenta uma eficiência eléctrica na gama 31% a 32%.

Quanto à premissa de que o aproveitamento de biomassa florestal para a produção de energia térmica e eléctrica apresenta um balanço de carbono neutro, conclui-se que nesse conceito não estão consideradas as emissões de CO₂ associadas a todas as operações que envolvem a recolha, processamento e transporte da biomassa residual florestal até à central termoeléctrica; de facto o conjunto dessas operações baseia-se no consumo de combustíveis fósseis, como por exemplo a gasolina e o gasóleo dos transportes. No entanto, quando comparada com outros combustíveis fósseis incluídos no *mix* nacional de produção de energia eléctrica, estima-se que para a mesma quantidade de energia eléctrica produzida numa base anual, nas condições consideradas, a instalação analisada permite uma redução das emissões de CO₂ de origem fóssil em 76,2%.

Em trabalhos futuros nesta área, sugere-se um estudo aprofundado sobre a disponibilidade de biomassa proveniente de outras fontes, tomando como exemplo a biomassa resultante da indústria transformadora de madeira ou da indústria agro-alimentar. Outro estudo relevante seria uma análise às emissões de CO₂ associadas às operações de processamento e recolha da biomassa residual.

6 BIBLIOGRAFIA

- ADNE/INET, (2001). “FORUM - Energias Renováveis em Portugal”. Relatório Síntese. Agência para a Energia e Instituto de Educação e Tecnologia. Lisboa, Novembro 2001.
- AFN (2010) “5º Inventário Florestal Nacional”. Apresentação do relatório final. Direcção Nacional de Gestão Florestal, 7 de Setembro de 2010. Autoridade Florestal Nacional.
- Alves, R.J.C (2008) “Mudança do Paradigma Energético: Microgeração em Portugal”. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Antunes P., Santos R., Martinho S., Lobo G. (2003) “Estudo sobre o Sector Eléctrico e Ambiente – Relatório Síntese”. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. pp. 1-34
- APA (2008) “Comércio de Licenças de Emissão”. Tabela de valores de Poder Calorífico Inferior, de Factor de Emissão e Factor de Oxidação de CO₂ utilizados no Inventário Nacional de Gases com Efeito de Estufa em 2008”. Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional. Agosto de 2008.
- APA (2009) “Relatório do Estado do Ambiente 2008”. Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. 2009.
- APA (2010) “Relatório do Estado do Ambiente 2009”. Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Outubro de 2010.
- Berardino, Santino Di (2008). “Implementação de Sistemas de Biogás em Portugal: Barreiras existentes e necessidades futuras, comunicação apresentada no Seminário “Biogás: Oportunidades e Desafios Para Portugal”, CCB Lisboa, 29 de Maio de 2008
- Berggren, H., Savolainen, V. (2000). “Wood Fuels Basic Information Pack”. Swedish National Energy Administration, Jyväskylä. Pp. 33-80.
- Bridgwater A. V. (2003) “Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass”. Chemical Engineering Journal Vol. 91 (2003). 84-93 pp.
- Campilho, P. (2006) “Quantificação da biomassa proveniente do sector florestal com potencial aproveitamento para o sector bioenergético”. Relatório do trabalho de fim de curso de Engenharia Florestal e dos Recursos Florestais. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa.
- CBE (2008) “Utilização da biomassa florestal residual para o aproveitamento energético”. Centro da Biomassa para a Energia, 28 de Outubro de 2008.

- CE (2001) “Promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade”. Directiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu, de 27 de Setembro de 2001. Jornal Oficial da União Europeia. Comunidade Europeia. L283/35 pp.
- CE (2006) “UE Actions against Climate Change”, The European Climate Change Programme. European Commission. pp. 9-17
- CE (2009) “Promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis”. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu, de 23 de Abril de 2009. Jornal Oficial da União Europeia. Comunidade Europeia. L140/17 pp.
- COM (1997) “Livro Branco para uma Estratégia e um Plano de Acção Comunitários. Energia para o Futuro. Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu (COM (1997) 599 final) de 26 de Novembro. Comissão Europeia. pp. 4-30
- COM (2006a) “Livro Verde – Estratégia europeia para uma energia sustentável, competitiva e segura”. Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu (COM (2006) 105 final) de 8 de Março. Comissão das Comunidades Europeias 3 pp.
- COM (2006b) “Roteiro das Energias Renováveis - Energias Renováveis no Século XXI: construir um futuro mais sustentável”. Comunicação da Comissão ao Conselho e ao Parlamento Europeu (COM (2006) 848 final) de 10 de Janeiro. Comissão das Comunidades Europeias. pp. 3-13.
- COM (2006c) “Green Paper follow-up action – Report on progress in renewable electricity”. Communication from the Commission to the Council and European Parliament (COM (2006) 849 final) de 1 de Janeiro. Commission of the European Communities. 12 pp.
- DGEG (2010) “Renováveis – Estatísticas Rápidas, Março 2010”. Direcção Geral de Energia e Geologia. 4-10 pp.
- DGRF (2005) “Biomassa e Energias Renováveis, na Agricultura, Pescas e Florestas. Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, Lisboa. 31 pp.
- EDP (2011) “Rotulagem de Energia Eléctrica”. EDP Serviço Universal, Abril de 2011.
- Enersilva (2007) “Enersilva - Promoção do uso da biomassa florestal para fins energéticos no sudoeste da Europa (2004-2007). Projecto Enersilva. 8 pp.
- Loo, S., Koppejan, J., (2008). “The handbook of biomass combustion and Co-firing”. Earthscan. 23-55 pp.
- Lopes, M., (2004) “Alterações Climáticas: Avaliação Económica no Apoio à Decisão Política”. Dissertação de Doutoramento. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Aveiro. pp. 1-122.

- Khan, A.A., Jong, W., Jansens, P.J., Spliethoff, H., 2009. "Biomass combustion in fluidized bed boilers - Potential problems and remedies". Fuel Processing Technology, Vol.90: 21-50.
- 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.
- Mateus (2007) "O Potencial Energético da Floresta Portuguesa: Análise do Potencial Energético Disponível para as Centrais Termoelétricas a Biomassa Florestal Lançadas a Concurso". Relatório do Mestrado em Energias Renováveis. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 1-15 pp.
- Matos, A.; Pereira, A., (2005). Apontamentos da disciplina de Técnicas de Tratamento de Efluentes Gasosos. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- McKendry, P., (2002a). "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". Bioresource Technology Vol. 83: 37-46.
- McKendry, P., (2002b). "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies". Bioresource Technology Vol. 83: 47-54.
- MEI (2007) "Energias Renováveis em Portugal". Ministério da Economia e Inovação, Julho de 2007. 5-23 pp.
- MEID (2010) "Estratégia Nacional para a Energia – ENE 2020". Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento.
- Netto, C. P. C. A, (2008). "Potencial da biomassa florestal residual para fins energéticos de três conselhos do distrito de Santarém. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, perfil de gestão de Sistemas Ambientais. Faculdade de Ciências e Engenharia do Ambiente. Universidade Nova de Lisboa
- RCM (2003) "Política Energética Nacional", Resolução do Conselho de Ministros nº 63/2003, de 28 de Abril. Diário da República – I Série B. 2723 pp.
- RCM (2005) "Estratégia Nacional para a Energia", Resolução do Conselho de Ministros nº 169/2005, de 24 de Outubro. Diário da República – I Série B. 6168 pp.
- RCM (2008) Resolução do Conselho de Ministros nº 1/2008, de 4 de Janeiro. Diário da República – 1.ª Série – nº3. 107 pp.
- RCM (2010) "Estratégia Nacional de Adaptação para às Alterações Climáticas". Resolução do Conselho de Ministros nº 24/2010, de 1 de Abril. Diário da República – 1.ª Série – nº62. 1090 pp.
- Sá, A. F. R., (2009). "Sistemas de Cogeração". Indústria e Ambiente, Julho/Agosto 2009, nº 54, p. 18-22.

- Silva, M.T.C, (2009). “Análise do balanço entre o sequestro e emissão de CO₂ resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de cogeração”. Tese de Mestrado em Bioenergia, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 13-41 pp.
- Tarelho, L.A.C., (2001). “Controlo de emissões gasosas poluentes resultantes da combustão em leito fluidizado”. Tese de Doutoramento, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- Tarelho L. A., (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.
- Thunman H., Niklasson F., Johnsson F., (2001). “Composition of Volatile Gases and Thermochemical Properties of Wood for Modeling of Fixed or Fluidized Beds”. *Energy & Fuels* 2001, 15.1488-1497
- Yin, C., Rosendahl, L., Kaer, R., (2008). “Grate-firing of biomass for heat and power production”. *Progress in Energy and Combustion SCIENCE* vol.34: 725-754.

7 WEBGRAFIA

- URL01 “Caracterização Energética Nacional”. Direcção Geral da Energia e Geologia. Página Consultada a 3 de Setembro de 2010. <http://www.dgge.pt/>
- URL02 UNFCCC “Joint Implementation, Kyoto Protocol Mechanisms”. United Nations Framework Convention on Climate Change. Página consultada a 24 de Novembro de 2009. http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/joint_implementation/items/1674.php
- URL03 UNFCCC “Emissions Trading, Kyoto Protocol Mechanisms”. United Nations Framework Convention on Climate Change. Página consultada a 24 de Novembro de 2009. http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/emissions_trading/items/2731.php
- URL04 UNFCCC “Clean Development, Kyoto Protocol Mechanisms”. United Nations Framework Convention on Climate Change. Página consultada a 24 de Novembro de 2009. http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/clean_development_mechanism/items/2718.php
- URL05 “Climate change and the EU’s response”. Press releases. Europa. Página consultada a 14 de Novembro 2010. <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/07/515&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>
- ULR06 “Políticas Ambientais - Alterações Climáticas”. Agência Portuguesa do Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território. Página consultada a 12 de Janeiro de 2010. <http://www.apambiente.pt/POLITICASAMBIENTE/ALTERACOESCLIMATICAS/Paginas/default.aspx>
- URL07 “Uma Política de Energia para a Europa – Energia”. Sínteses da Legislação da União Europeia. Página Consultada a 6 de Dezembro de 2009. http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/l27067_pt.htm
- URL08 “Roteiro das Energias Renováveis”. Associação de Energias Renováveis. <http://www.apren.pt/gca/?id=166>
- URL09 “Pesquisa - Lista dos concorrentes aos concursos para as centrais a biomassa florestal”. Direcção Geral da Energia e Geologia. Página consultada a 3 de Março de 2010. <http://www.dgge.pt/>
- URL10 “Rede de centrais de biomassa florestal – EDP Bioeléctrica”. Apresentações, Altri. Página consultada a 2 de Janeiro de 2010. <http://www.altri.pt/investidores/Apresentacoes/>

URL11 “Origens da Electricidade”. EDP Serviço Universal. Página consultada a 15 de Novembro de 2011.

<http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>

URL12 “Road tests: Volvo FH 12-460”. Road Transport. Página consultada a 15 de Novembro de 2011.

<http://www.roadtransport.com/ROADTESTSRESULTS/143/5/volvo-fh12-460.html>