



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Miguel Abílio Gomes
de Paiva Pinho**

**Emissões de Poluentes Atmosféricos da Cadeia de
Biomassa para Pellets**



**Miguel Abílio Gomes
de Paiva Pinho**

**Emissões de Poluentes Atmosféricos da Cadeia de
Biomassa para Pellets**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Apoio Financeiro do FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade (COMPETE) e por Fundos Nacionais através da FCT do PTDC no âmbito do Projeto BIOGAIR (PTDC/AAC-AMB/103866/2008)

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha família e amigos pelo incansável apoio.

o júri

presidente

Prof. Doutora Teresa Filomena Vieira Nunes
Professor Associada, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Doutor Miguel Sala Coutinho
Secretário-Geral, Instituto do Ambiente e Desenvolvimento

Prof. Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes
Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Reservo este espaço e estas palavras para dedicar a todos aqueles que deram o seu contributo para a realização desta dissertação e que com este apoio tornou-se possível alcançar o final desta jornada.

À Professora Doutora Myriam Alexandra dos Santos Batalha Dias Nunes Lopes e ao Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, orientadores da presente dissertação, quero agradecer pela disponibilidade e apoio prestado ao longo da orientação.

Um agradecimento ao Engenheiro Joaquim C. e aos técnicos da unidade de produção de pellets, que serviu como caso de estudo, pela oportunidade de proporcionarem uma visita às instalações desta entidade e por disponibilizarem informações necessárias e importantes para a elaboração desta dissertação.

A todos os amigos universitários agradeço por me acompanharem e apoiarem durante estes anos de grandes vivências, onde foram partilhados muitos momentos de aprendizagem conjunta, permitindo criar amizades para a vida.

Um agradecimento especial aos meus pais e família por me formarem, pelo apoio prestado e compreensão constante nesta etapa importante da vida, pois com eles tudo isto se tornou possível.

A todos aqueles que não foram mencionados, que pela sua colaboração, apoio, motivação e amizade contribuíram, igualmente, para a conclusão da presente dissertação.

A todos, o meu profundo agradecimento.

palavras-chave

Biomassa, Pellets, Emissão de poluentes atmosféricos

resumo

Ao longo das últimas décadas a União Europeia concebeu um conjunto de estratégias climáticas e energéticas promovendo a diminuição das emissões de poluentes atmosféricos e GEE, bem como a diversificação de fontes de energia renováveis. No âmbito da Diretiva 2009/28/CE, Portugal elaborou o seu Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, fixando os objetivos nacionais para a biomassa florestal e as medidas para o seu cumprimento.

Diversos estudos sustentam que a combustão da biomassa para produção de energia e calor é neutra do ponto de vista de balanço de CO₂, contribuindo para a redução das emissões de origem fóssil deste poluente, podendo, no entanto, contribuir para o incremento das emissões de CO, NO_x e PTS. Neste sentido, e face à evolução tecnológica, surgem os pellets como um biocombustível sólido, composto essencialmente por biomassa densificada, com uma qualidade consistente, apresentando um baixo teor de humidade, densidade energética elevada, tamanho e forma homogéneos, associada a uma menor emissão de poluentes atmosféricos no processo de combustão.

O presente trabalho teve como objetivo fundamental avaliar o impacto das unidades de produção de pellets de biomassa florestal na qualidade do ar, tendo como caso de estudo uma unidade industrial típica a laborar na região Norte de Portugal Continental. Para o efeito sucedeu-se à descrição detalhada da cadeia logística de biomassa associada à unidade industrial em estudo, sendo posteriormente introduzidos os dados na metodologia de cálculo adotada de modo a determinar as emissões de poluentes atmosféricos provenientes desta atividade industrial e permitir a realização da avaliação ambiental do uso de pellets para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em detrimento de outras fontes de energia.

Os resultados obtidos das emissões alusivas à cadeia de valorização de biomassa para a produção de 73 kt de pellets, por ordem decrescente de importância, em termos de emissão em tonelada, correspondem a 14831,2 t CO_{2e}, 148,4 t CO, 130,0 t NO_x, 27,7 t SO_x, 25,4 t PTS e 20,4 t COVNM. Do balanço de CO_{2e} constatou-se uma tendência geral de diminuição de GEE, sensivelmente na ordem dos 84%, respeitante ao uso de pellets no aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em detrimento de fontes de energia não renováveis.

keywords

Biomass, Pellets, Emission of air pollutants

abstract

Over the past decades the European Union conceived a set of climate and energy strategies promoting the reduction of air pollutants emissions as well as the diversification of renewable energy sources. Under Directive 2009/28 / EC, Portugal drew up its National Action Plan for Renewable Energy, setting national objectives for forest biomass and measures for their fulfillment.

Several studies support the combustion of biomass for power and heat is neutral from the point of view of CO₂ balance, contributing to the reduction of emissions from fossil fuels, however, increasing the CO, NO_x and TSP emissions. In this sense, and due to the technological developments emerge the pellets as a solid biofuel, composed essentially of densified biomass, with consistent quality, with a low moisture content, high energy density, size and homogeneous form, associated with a lower emission pollutants in the combustion process.

This present dissertation had the objective to evaluate the impact of forest biomass pellet production plants on air quality, taking as a case study a typical plant operating in the North of Portugal. For this purpose it was made a detail description of the logistics chain of biomass associated with the plant under study, and the data was later introduced in the adopted calculation methodology to determine the emissions of air pollutants from this industrial activity and to allow assessment environmental pellet use for heating the environment and waters in the domestic sector at the expense of other energy sources.

The results of the emissions of the biomass value chain for the production of 73 kt of pellets, in descending order of importance, in terms of emissions in tonnes, were 14,831.2 t CO_{2e}, 148.4 t CO, 130, 0 t NO_x, 27.7 t SO_x, 25.4 t NMVOC and 20.4 t PTS. Of the balance of CO_{2e} was found a general downward trend in GHG substantially in the order of 84%, relating to the pellet use in space heating and water in the domestic sector at the expense of non-renewable energy sources.

1. Introdução	1
1.1 <i>Enquadramento</i>	1
1.2 <i>Relevância do Estudo</i>	3
1.3 <i>Objetivos e Metodologia</i>	4
1.4 <i>Estrutura da Dissertação</i>	4
2. A Energia e a Poluição Atmosférica.....	7
2.1 <i>Consumo de Energia</i>	8
2.2 <i>Poluição Atmosférica</i>	13
2.3 <i>Estratégias Climáticas e Energéticas</i>	18
3. Bioenergia.....	23
3.1 <i>Biomassa para Fins Energéticos</i>	24
3.2 <i>Conversão Energética de Biomassa Florestal</i>	27
3.3 <i>Panorama Nacional da Biomassa Florestal</i>	32
3.4 <i>Emissões e Remoções de GEE no Setor Florestal</i>	36
4. Pellets.....	41
4.1 <i>Normas das Pellets</i>	42
4.2 <i>Caraterização Físico-química da Matéria-prima e das Pellets</i>	46
4.3 <i>Cadeia Logística de Biomassa para Pellets</i>	49
4.4 <i>Tecnologias de Combustão de Pellets – Aquecimento Doméstico</i>	88
4.5 <i>Panorama e Projeções do Mercado Internacional e Nacional</i>	91
4.5.1 <i>Mercado Internacional</i>	91
4.5.2 <i>Mercado Nacional</i>	98
5. Caso de Estudo.....	103
5.1 <i>Caraterização da Unidade de Produção de Pellets</i>	103
5.2 <i>Avaliação das Emissões Atmosféricas da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets</i>	117
5.2.1 <i>Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Exploração de Matérias-primas e no Destroçamento Intermédio</i>	118
5.2.2 <i>Estimativa de Poluentes Atmosféricos no Transporte</i>	123
5.2.3 <i>Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Unidade de Produção</i>	127

5.2.4	<i>Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Distribuição de Pellets.....</i>	135
5.2.5	<i>Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Utilização de Pellets como Combustível</i> <i>136</i>	
5.2.6	<i>Síntese.....</i>	137
5.3	<i>Balanço de CO₂ da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets.....</i>	140
5.4	<i>Balanço Energético da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets.....</i>	142
5.5	<i>Impacto nas Emissões de CO₂ da Utilização de Pellets no Setor Doméstico</i> <i>Nacional.....</i>	144
2.	<i>Conclusões.....</i>	147
	<i>Referências Bibliográficas</i>	151
	<i>Anexos.....</i>	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia final mundial, 2010. (Fonte: (REN21, 2012))	9
Figura 2 - Consumo total de energia primária por fontes de energia na UE-27, 2010. (Fonte:(Eurostat, 2012))	10
Figura 3 - Consumo total de energia primária por fontes de energia na Portugal, 2010. (Fonte: (DGEG, 2013))	11
Figura 4 - Consumo de energia final, por setor em 2010 (Fonte: (DGEG, 2013))	11
Figura 5 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de fonte - Portugal, 2010. (Fonte:(DGEG & INE, 2011)).....	12
Figura 6 - Distribuição do consumo de energia para aquecimento do ambiente por tipo de fonte – Portugal, 2010 (Fonte:(DGEG & INE, 2011)).....	13
Figura 7 - Emissões de GEE na UE-27, entre 1990-2011 (Fonte: (EEA, 2013)).....	14
Figura 8 - Emissões de GEE na UE-27, por setor de atividade, entre 1990-2011 e emissões totais de GEE, por setor de atividade, em 2011 (Fonte: (EEA, 2013)).	15
Figura 9 - Emissões de GEE em Portugal, por setor de atividade, em 2011 (Fonte: (APA, 2013)).	16
Figura 10 – Representação esquemática dos processos de conversão de biomassa (Fonte: Adaptado de (Enes, Valle, & Martínez, 2007)).....	29
Figura 11 - Processos, reservatórios de carbono e emissões de GEE no setor florestal. (Fonte: (Dias, 2005))	39
Figura 12 - Cadeia logística de biomassa para pellets (Fonte: Adaptado de (Bioenergy Portugal, n.d.)).....	49
Figura 13 - Sistema de exploração de biomassa florestal em natureza (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004)).	52
Figura 14 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no povoamento (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004)).	53
Figura 15 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no carregadouro, com recurso a um estilhador fixo (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004)).	54
Figura 16 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no carregadouro, com recurso a um estilhador acoplado ao camião (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004))......	55
Figura 17 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado numa unidade industrial (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004))......	56
Figura 18 - Diagrama sequencial das operações de uma linha de produção de pellets.....	57
Figura 19 - Receção e armazenamento da matéria-prima no parque de armazenamento (Fonte: (Fernando Fernandes & Irmão, 2012; Florestal, 2013)).	58
Figura 20 - Exemplo de um estilhador de martelos. (Fonte: (Enerpellets, 2013a))	59

Figura 21 - Esquema de um estilhador de facas. 1 – Tapete rolante de alimentação; 2 – Motor e engrenagem; 3 – Rolos superiores de alimentação; 4 – Rolos inferiores de alimentação; 5 – Tambor com dispositivos de corte; 6 – Sistema de segurança; 7 – Sistema de descarga. (fontes: (Wood Fisrt, 2013b)).....	59
Figura 22 - Esquema de um estilhador de martelos. 1 – Tapete rolante de alimentação; 2 – Rolo superior de alimentação; 3 – Tambor com dispositivos de destroçamento; 4 – Motor e engrenagem; 5 – Sistema de descarga. (Fonte: (Wood Fisrt, 2013b))	60
Figura 23 - Exemplo de um moinho de martelos (Fonte: (HAMMERMILL, n.d.)).....	60
Figura 24 - Esquema do funcionamento de um moinho de martelos. (Fonte: (HAMMERMILL, n.d.))	61
Figura 25 - Imagem representativa do secador rotativo (Fonte: (Fernandes, 2008)).	63
Figura 26 - Escoamento gasoso e trajeto efetuado pelas partículas num ciclone de entrada tangencial e de fluxo invertido (Fonte: Adaptado de (Soler & Palau, 2013))......	64
Figura 27 - Esquema representativo do fornecimento de ar e diferentes zonas resultantes na câmara de combustão primária (Fonte: (Chungen Yin, , Lasse A. Rosendahl, 2008))......	66
Figura 28 - Ilustração de uma fornalha com sistema de combustão em grelha para biomassa. 1 – Câmara de combustão primária; 2 – Câmara de combustão secundária; 3 – Grelhas; 4 – Sistema de alimentação de combustível; 5 – Estrutura metálica; 6 – Depósito de cinzas; 7 – sistema de descarga de cinzas. (Fonte : Adaptado de (Thermal, 2013)).....	67
Figura 29 - Exemplo das instalações técnicas da operação de secagem, à esquerda a fornalha e à direita o secador rotativo, os ciclones e o silo de armazenamento (Fonte: (Enerpellets, 2013b; Pinewells, 2013))	67
Figura 30 - Geometria das perfurações de uma matriz (Fonte: (Ecoheater, 2013))......	70
Figura 31 - Tipos de matrizes. 1 - Sem alívio; Alívio total uniforme; 3 – Alívio parcial uniforme; 4 – Alívio parcial variável; 5 – Alívio toral variável. (Fonte: (Ecoheater, 2013))	71
Figura 32 - Esquema de funcionamento de uma peletizadora de matriz plana. (Fonte: (KG, 2007))	73
Figura 33 - Esquema de funcionamento de uma peletizadora de matriz anelar (Fonte: Adaptado de (Stelte et al., 2012))......	74
Figura 34 - Exemplo de uma peletizadora de matriz anelar, à esquerda, e de uma peletizadora de matriz plana, à direita. (Fonte: (Blanch, 2013; KG, 2007)).....	75
Figura 35 - Diagrama de funcionamento de um arrefecedor vertical (Fonte: (Wood Fisrt, 2013a)). 1 – Válvula rotativa de alimentação; 2 – Dispositivo de rotação; 3 – Sistema de descarga de grelha com piso de grade fixa; 4 – controlador do ar de exaustão, 5 – Sensor de sobrecarga; 6 – sensores de nível; 7 – depósito de recolha.	77
Figura 36 - Diagrama de funcionamento da grelha de piso fixo (Fonte: Adaptado de (Bliss Industries, 2010)).	77
Figura 37 - Arrefecedor vertical com câmara retangular, à direita, e câmara circular à esquerda (Fonte: (Feelwarm, 2013; Bliss Industries, 2010)).	78

Figura 38 - Exemplos de dois tipos de crivos, à esquerda crivo com movimento circular centrífugo e à direita crivo com movimento oscilante vibratório (Fonte: (Promill-stolz, 2013)).	79
Figura 39 - Diagrama do funcionamento de um crivo com movimento centrífugo. 1 - Dispositivo de distribuição; 2 - Rotor com dispositivo de raspagem; 3 - Defletor; 4 - Tela de centrifugação; 5 - Eixo vertical (engrenagem e motor) (Fonte: (Promill-stolz, 2013)).	80
Figura 40 - Exemplos de máquinas de ensacar, à direita aplicável a sacos de pequenas dimensões e à esquerda a sacos de grandes dimensões (Fonte: (JFT, 2013; Payper, 2013)).	81
Figura 41 - Sistema de paletização (Fonte: (JFT, 2013)).	82
Figura 42 - Silos de armazenamento e dispositivo acoplado de acondicionamento de sacos de grandes dimensões (Fonte: (Aveiro, 2013; Pelletspower1, 2013)).	83
Figura 43 - Transportador de arrasto horizontal (Fonte: (Projeto, 2013)).	84
Figura 44 - Transportador de tela com declive (Fonte: (Indústria, 2013)).	84
Figura 45 – Transportador de rolos (Fonte: (SPG, 2013)).	85
Figura 46 - Transportador de hélice horizontal (Fonte: (Ibis-Int, 2013)).	85
Figura 47 - Elevador de alcatruzes (Fonte: (HRV, 2013)).	86
Figura 48 - Silos de armazenamento de pellets situados no Porto de Aveiro. (Fonte: (Aveiro, 2013)).	87
Figura 49 - Formas de distribuição de pellets, parte superior por via terrestre e parte inferior por via marítima. (Fonte: (Aveiro, 2013)).	88
Figura 50 - Equipamentos de combustão a pellets – recuperador de calor (esquerda), caldeira (centro) e salamandra (direita).	89
Figura 51 – Esquema de funcionamento de uma salamandra a pellets (Fonte: (EnergiaBiomassa, 2013)).	90
Figura 52 - Produção mundial de pellets, 2000-2011 (Fonte: (REN21, 2012)).	91
Figura 53 - Produção mundial de pellets (Fonte: (Poyry, 2011)).	92
Figura 54 - Consumo mundial de pellets (Fonte: (Poyry, 2011)).	93
Figura 55 - Mapa dos fluxos comerciais a nível mundial de pellets de biomassa relativamente ao ano de 2011 (Fonte: Adaptado de (Poyry, 2011)).	95
Figura 56 - Consumo de pellets por setor, volume e país (UE-27), em 2010 (Fonte: (Poyry, 2011)).	98
Figura 57 – Distribuição das unidades de produção de pellets em funcionamento em 2012 ou em fase de implementação com início de atividade até final de 2013.	101
Figura 58 – Diagrama de operações da unidade de produção de pellets em estudo (2014).	107
Figura 59 - diagrama das operações de combustão, decantação, secagem e decantação.	111
Figura 60 - Distribuição das emissões totais de vários poluentes atmosféricos decorrentes da atividade de exploração florestal.	120
Figura 61 – Esquema da análise de <i>inputs-outputs</i> da atividade de exploração florestal.	121

Figura 62 - Esquema da análise de <i>inputs-outputs</i> da operação de destroçamento intermédio.....	123
Figura 63 - Esquema da análise de <i>inputs-outputs</i> da atividade de transporte de matérias-primas.....	126
Figura 64 - Distribuição do consumo de energia elétrica do processo de fabrico de pellets, por operação.....	129
Figura 65 - Distribuição das emissões provenientes das diversas operações, em percentagem, em toda a linha do processo de fabrico de pellets.....	133
Figura 66 - Esquema da análise de <i>inputs-outputs</i> das várias operações realizadas na unidade de produção de pellets.....	134
Figura 67 - Esquema da análise de <i>inputs-outputs</i> da atividade de transporte de matérias-primas.....	136
Figura 68 - Distribuição das emissões provenientes das diversas operações, em percentagem, inerentes a todo o processo de logística da conversão de biomassa em pellets.....	140
Figura 69 - Representação esquemática dos fluxos de energia com a indicação das perdas na transformação.....	144

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - As principais vantagens e desvantagens reais e potenciais para os diferentes agentes na utilização de biomassa florestal em comparação com a produção de energia a partir de combustíveis fósseis. (Fonte:(Stupak et al., 2007))	25
Tabela 2 - Áreas por classe de uso do solo em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha). (Fonte:(ICNF, 2013)).....	33
Tabela 3 - Área de floresta decomposta por tipo de ocupação florestal em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha). (Fonte:(ICNF, 2013))	34
Tabela 4 - Áreas totais por espécie florestal dominante em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha). (Fonte:(ICNF, 2013)).....	35
Tabela 5 - Volume existente e biomassa total por espécie florestal dominante, em portugal continental. (Fonte:(ICNF, 2007)).....	36
Tabela 6 – Biomassa florestal disponível por espécie florestal e respetivo carbono armazenado e CO _{2eq} , em Portugal continental (valores em kt). (Fonte: (ICNF, 2007)).....	40
Tabela 7 - Especificações de qualidade referentes a pellets de biomassa florestal para uso não industrial de acordo com a norma europeia EN 14961-2.	45
Tabela 8 - Resumo dos critérios de avaliação para possíveis matérias-primas para peletização, características dos pellets e efeitos associados (Fonte: (Oberberger & Thek, 2010)).	48
Tabela 9 - Exportações de pellets de madeira para a EU-27 em kt (Fonte: Eurostat).....	95
Tabela 10 - Comercialização de pellets na EU-27 em kt (Fonte: Eurostat)	96
Tabela 11 - Panorama da procura de pellets destinadas ao mercado de aquecimento (kt) (Fonte: PellCert, EPC, Ekman).....	97
Tabela 12 - Especificações técnicas e de qualidade dos pellets da unidade fabril em estudo.	116
Tabela 13 - Fatores de emissão para a atividade de exploração florestal ($g_{poluente}/kg_{combustível}$) (FONTE: EMEP/EEA, 2009).	119
Tabela 14 - Emissões totais para a atividade de exploração florestal ($kg_{poluente}/ano$).....	119
Tabela 15 – Fatores de emissão específica de vários poluentes atmosféricos por quantidade de pellets produzida ($g_{poluente}/t_{pellets}$).	120
Tabela 16 - Fatores de emissão definidos em GWh de energia eléctrica consumida ($t_{poluente}/GWh$).	122
Tabela 17 - Emissões totais para a operação de destroçamento intermédio ($kg_{poluente}/ano$).	122
Tabela 18 – Fatores de emissão específica de vários poluentes atmosféricos por quantidade de pellets produzida ($g_{poluente}/t_{pellets}$).	122
Tabela 19 - Fatores de emissão associados ao transporte de biomassa florestal (g/km)... ..	125

Tabela 20 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes do transporte de biomassa florestal.....	125
Tabela 21 - Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados ao transporte de biomassa florestal.	126
Tabela 22 – Quantificação das emissões dos variados poluentes atmosféricos (g/ano) associados à movimentação de máquinas na operação de recolha e armazenamento de matérias-primas.	127
Tabela 23 – Fatores de emissão específica dos variados poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados à movimentação de máquinas na operação de recolha e armazenamento de matérias-primas.	128
Tabela 24 – Emissões totais indiretas associadas ao consumo de energia elétrica no processo de fabrico de pellets ($t_{\text{poluente}}/\text{ano}$).....	129
Tabela 25 – Fatores de emissão específica dos variados poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados ao consumo de energia elétrica nas várias operações do processo de fabrico de pellets.....	130
Tabela 26 - Fatores de emissão para o processo de combustão utilizando como combustível a biomassa florestal.	131
Tabela 27 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos resultantes do processo de combustão de BFR da unidade industrial em estudo.....	131
Tabela 28 – Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) resultantes do processo de combustão de BFR da unidade industrial em estudo.	132
Tabela 29 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes da distribuição de pellets.....	135
Tabela 30 - Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados à distribuição.	135
Tabela 31 - Fatores de emissão para o processo de combustão de pellets como combustível para aquecimento do ambiente e de águas.	137
Tabela 32 - Emissões totais dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes da combustão de pellets em equipamentos de pequena escala.	137
Tabela 33 - Fatores de emissão para a cadeia de valorização de biomassa para pellets (Ozgen et al., 2014).	138
Tabela 34 – Emissões totais dos poluentes atmosféricos provenientes das diversas operações, em tonelada, inerentes a todo o processo de logística da conversão de biomassa em pellets e da sua utilização como combustível.....	139
Tabela 35 - Dados base para o cálculo do balanço de CO ₂ (SILVA, 2009).	141
Tabela 36 - Sequestro de CO ₂ para cada espécie analisada.	141
Tabela 37 - Balanço energético para a produção de 73000 toneladas de pellets.	143

1. INTRODUÇÃO

1.1 *Enquadramento*

Desde a antiguidade que a energia representa um papel elementar no desenvolvimento social e económico da humanidade, proporcionando deste modo conforto pessoal, mobilidade e riqueza, a nível industrial e comercial (EEA, 2006). A grande diferença entre a nossa civilização e as antecedentes é a capacidade de transformar e utilizar energia de forma sistemática.

O uso de combustíveis fósseis em atividades humanas, particularmente o carvão, remonta a milhares de anos. Estes tiveram um papel crucial no decorrer de uma das mais importantes épocas da evolução humana, sendo os combustíveis de eleição da Revolução Industrial, no século XVIII, que potenciou o aumento da necessidade de abastecimento energético das indústrias. Posteriormente, no século XIX, com a exploração do petróleo e descoberta da refinação do mesmo, presenciou-se à origem de vários combustíveis com diferentes características. Estes vieram impulsionar novamente o setor industrial, com o surgimento de novos tipos de equipamentos capazes de transformar a energia química disponível numa outra forma de energia necessária à existência e desenvolvimento da sociedade. Para além disso, no século XX, a exploração do gás natural permitiu também que durante muitos anos se vivesse uma era de despreocupação energética generalizada.

Com o desenrolar da evolução da sociedade e consequente massificação do consumo de combustíveis fósseis alcançou-se a situação atual e a consciência dos potenciais problemas associados ao consumo dos mesmos. Os combustíveis fósseis sendo recursos energéticos não renováveis e cujas reservas se encontram na Natureza em quantidades limitadas e propensas a esgotamento, são considerados fontes de energia não renovável. A este facto, acrescem fatores económicos e ambientais relacionados com a utilização destes, que ao longo dos tempos têm despoletado crises petrolíferas e o aumento da poluição atmosférica e consecutivamente os efeitos associados.

Perante esta realidade e face à necessidade de reduzir a elevada dependência das importações de energia a Europa foi pressionada no sentido de rever a sua política energética, tendo por base a racionalização dos recursos, o aumento da eficiência dos dispositivos clássicos de conversão de energia, a segurança de abastecimento e fontes alternativas de energia com um menor impacto ambiental, sendo objetivos a atingir a curto e médio prazo (CCE, 2005).

Neste contexto, têm vindo a ser aprovados uma série de documentos base que visam impulsionar o recurso às Fontes de Energia Renováveis (FER) que são recursos energéticos inesgotáveis ou que podem ser repostos a curto ou médio prazo espontaneamente ou por intervenção humana e consistem na energia proveniente de recursos naturais (MEE, 2008). O Protocolo de Quioto foi o primeiro diploma jurídico internacional que explicitamente pretende limitar as emissões quantificadas de Gases com Efeito de Estufa (GEE) dos países desenvolvidos, no período de 2008-2012.

O investimento nas energias renováveis para além de funcionarem como alternativa aos combustíveis fósseis, têm menor impacto ambiental negativo, ajudando a reduzir as emissões de GEE, diversificam o aprovisionamento energético, promovem o desenvolvimento local e reduzem a dependência em relação a mercados de combustíveis fósseis pouco fiáveis e voláteis, em particular o de petróleo e gás natural. Além disso, os recursos renováveis ao fazerem parte de uma política energética desempenham um papel fundamental e representam uma forma de alcançar o desenvolvimento energético sustentável (MEE, 2008). O desenvolvimento sustentável dos sistemas energéticos define-se como a energia que, durante a sua produção ou consumo, apresenta impactos negativos mínimos na saúde humana e no funcionamento saudável dos sistemas ecológicos

fundamentais e que pode assim ser fornecida continuamente às gerações futuras (Stupak et al., 2007).

Numa perspectiva de desenvolvimento sustentável do setor energético as principais FER concentram-se na biomassa, energia hidroelétrica, energia solar e energia eólica. No entanto, irá dar-se ênfase à biomassa, que apresenta vários processos de conversão e uma multiplicidade de matérias com potencial energético, que podem gerar três tipos de biocombustível (sólido, líquido ou gasoso), o que lhe confere uma flexibilidade de adaptação tecnológica de acordo com o objetivo determinado. Os investimentos e avanços tecnológicos observados nos últimos anos têm permitido um crescimento do potencial de utilização desta fonte de energia, existindo atualmente o reconhecimento que o recurso à biomassa é uma medida fundamental do ponto de vista dos benefícios ambientais esperados, em particular na redução das emissões de GEE, devido às suas múltiplas aplicações: produção de calor, de energia elétrica e de biocombustíveis.

A mobilização de novas tecnologias de produção de dispositivos clássicos de conversão de energia mais eficientes e de transformação de biomassa num recurso com maior potencial energético e de fácil manuseamento, transporte, armazenamento e utilização, deu origem a um biocombustível sólido denominado de pellets que constitui um pressuposto essencial para a disseminação da biomassa, ao nível da produção de calor e energia elétrica.

Contudo, não foram ainda avaliados de forma integrada e holística os impactes ambientais associados à Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets, desde a exploração da matéria-prima até à sua aplicação final, incluído o processo de produção.

1.2 Relevância do Estudo

De acordo com alguns estudos o aumento do aproveitamento de biomassa para produção de energia e calor poderá fomentar alterações ao nível do uso do solo e de emissões de outros poluentes para a atmosfera para além dos GEE. Atualmente ainda não há um conhecimento detalhado relativamente aos impactes inerentes à Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets, designadamente os seus efeitos na qualidade do ar (resultantes das alterações de uso do solo, das emissões associadas aos processos de produção, e ainda dos transportes), bem como a sua amplitude. Neste sentido, a elaboração

da dissertação apresentada, tem o intuito de avaliar os impactos da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets, na qualidade do ar, em Portugal Continental.

1.3 *Objetivos e Metodologia*

A presente dissertação, enquadrada no projeto BIOG AIR, tem como principal objetivo a avaliação do impacto sobre a qualidade do ar da conversão física da biomassa para produção de pellets na indústria portuguesa. A concretização do objetivo definido resulta da abordagem de cinco propósitos:

- Pesquisa bibliográfica;
- Caracterização de uma cadeia de valorização de biomassa para pellets;
- Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos com base em fatores de emissão;
- Balanço energético à cadeia de valorização de biomassa para pellets;
- Avaliação do impacto nas emissões de CO_{2e} associadas a um cenário de uso exclusivo de pellets para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em detrimento de outras fontes de energia.

O objeto de estudo da dissertação incide, numa primeira fase, sobre as unidades de produção de pellets que se encontram atualmente em operação em Portugal. No entanto, a concretização do objetivo formulado tem como caso de estudo uma unidade de produção de pellets típica a laborar em Portugal.

1.4 *Estrutura da Dissertação*

De forma a alcançar os objetivos formulados a dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 do presente estudo introduz-se a temática em análise, contextualizando a sua relevância e os objetivos definidos. O Capítulo 2 e 3 resultam de uma revisão aprofundada da literatura, inserindo-se a problemática da energia, poluição atmosférica e estratégias europeias e nacionais associadas (Capítulo 2), bem como o tema da bioenergia, o seu desenvolvimento em Portugal e a descrição dos sistemas de conversão

de biomassa em energia, dando-se particular ênfase aos processos físicos (Capítulo 3). O Capítulo 4 é dedicado à descrição do biocombustível sólido, denominado de pellets, compreendendo as normas associadas, a cadeia logística de biomassa inerente, as tecnologias de combustão aplicadas e o panorama e projeções do mercado internacional e nacional. No Capítulo 5 expõe-se o objeto de estudo, sendo feita uma caracterização da cadeia logística de biomassa e do processo de fabrico de pellets referente à unidade industrial em análise, uma determinação das emissões de poluentes atmosféricos que lhe estão associadas, bem como as emissões de CO_{2e} evitadas, seguida da avaliação ambiental do uso de pellets para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em detrimento de outras fontes de energia. Para finalizar foram extraídas as principais ilações inerentes a todo o procedimento (Capítulo 6).

2. A ENERGIA E A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A energia desempenha uma enorme importância no desenvolvimento e qualidade de vida das populações, evidenciando-se um aumento progressivo pela procura da mesma, e conseqüentemente a sua produção tem vindo igualmente a aumentar ao longo dos anos de modo a satisfazer as necessidades requeridas.

O setor energético exerce sobre o ambiente pressões significativas, sobretudo associadas às atividades de produção, transformação e utilização final. Entre estas pressões incluem-se as emissões atmosféricas, o uso dos solos, a produção de resíduos entre outros impactos ambientais, contribuindo para fenómenos como as alterações climáticas, a destruição dos ecossistemas naturais e a degradação do ambiente antrópico, bem como no incremento de efeitos nocivos para a saúde humana (EEA, 2011).

O presente capítulo apresenta a problemática do consumo de energia e o estado de arte da poluição atmosférica, dando-se particular ênfase ao contributo do setor energético nesta temática. Além disso, pretende-se expor as estratégias climáticas e energéticas a nível Europeu e Nacional.

2.1 *Consumo de Energia*

A partir do século XIX, durante a revolução industrial, e como resultado da evolução tecnológica e crescimento económico, iniciou-se uma intensificação do processo produtivo, com o conseqüente aumento de extração de matérias-primas e de um elevado consumo de energia.

Atualmente, os combustíveis fósseis apresentam-se como a fonte energética com maior aplicabilidade na produção de energia a nível mundial e cujo consumo, de acordo com o estudo da Rede de Políticas de Energias Renováveis para o século 21 (REN21) em 2010, representava 80.6% da energia final mundial consumida, sendo as energias renováveis a fonte energética com a segunda maior representatividade com cerca de 16,7% apresentando uma tendência crescente em todos os setores que consomem energia (incluindo a produção de energia elétrica, transportes, aquecimento e arrefecimento), e por fim a energia nuclear representava 2,7% (Figura 1). Do consumo mundial de energia, cerca de 8,2% corresponde a energias renováveis modernas (compreendendo a energia hidroelétrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa e biocombustíveis) e a biomassa tradicional, que é usada principalmente como fonte de energia para cozinhar e para aquecimento em áreas rurais nos países em desenvolvimento, pode ser considerada renovável e é responsável por aproximadamente 8,5% do total da energia final mundial consumida (REN21, 2012). A energia hidroelétrica contribuiu cerca de 3,3% para o consumo mundial de energia final em 2010, é de salientar que a capacidade hídrica tem vindo a crescer de forma constante para uma base alargada (REN21, 2012). Todas as restantes energias renováveis modernas, cuja estimativa é cerca de 4,9%, têm vindo a registar um rápido crescimento. No entanto, em vários países, o crescimento destas tecnologias renováveis excede em muito a média global.

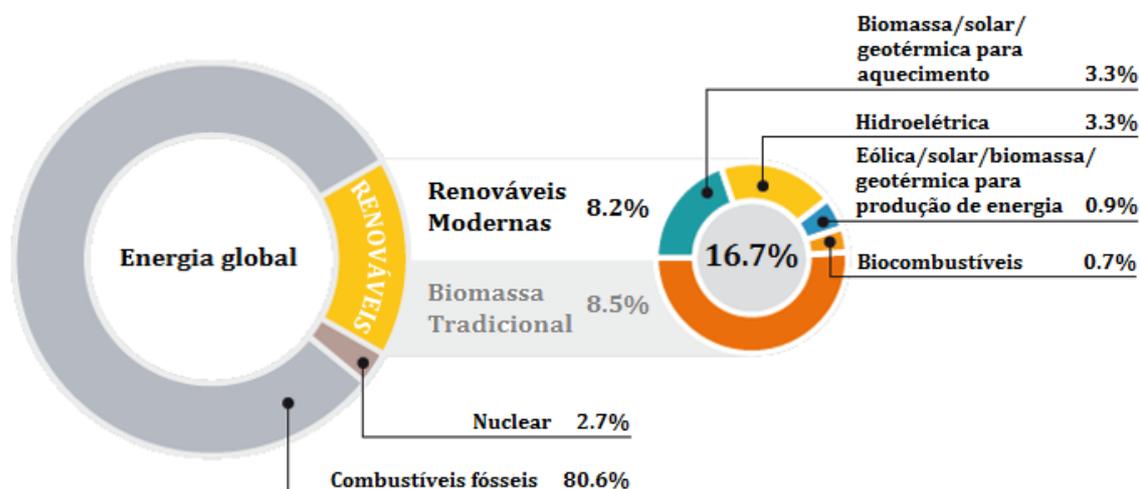


Figura 1 - Consumo de energia final mundial, 2010. (Fonte: (REN21, 2012))

A União Europeia é considerada, atualmente, como um dos maiores consumidores de energia do mundo, predominando o consumo de combustíveis fósseis no seu mix energético. O cenário, referente ao ano de 2010, do consumo total de energia primária dos 27 Estados-Membros da União Europeia (UE-27), segundo os dados do Eurostat, aumentou 3,3% quando comparado com o ano de 2009. As necessidades energéticas da média europeia são satisfeitas maioritariamente com recurso aos combustíveis fósseis, representando 76,1% do consumo total de energia primária (1759 Mtep), registando-se um decréscimo de 0,7% face ao ano anterior; cerca de 13,5% são satisfeitas através da energia nuclear e os restantes 9,8% através de FER em rápida evolução (Figura 2). Este pode ser um indicador de mudança ao nível do consumo de energia proveniente de fontes com menor carga de poluição atmosférica, devendo-se sobretudo à aplicação de políticas energéticas que refletem o aumento do consumo de energia primária de 12,6% entre 2009 e 2010 por parte das energias renováveis, satisfazendo deste modo 62,5% da meta da União Europeia fixada para 2020 (REN21, 2012). Os combustíveis derivados da biomassa e resíduos representam a maior porção do consumo de FER (68,6 %) que teve um aumento de 13% em 2010. Esta categoria compreende 4 subcategorias: lenhas e resíduos vegetais, biocombustíveis, resíduos sólidos urbanos e biogás. De acordo com a Figura 2 a subcategoria lenhas e resíduos vegetais representa 66,6% do total dos combustíveis derivados de biomassa e resíduos, sendo a subcategoria mais significativa, posteriormente seguem-se os biocombustíveis e resíduos sólidos urbanos com uma percentagem a rondar os 12% e por último o biogás com 8,7%. O uso de energia eólica aumentou 12%, enquanto a de energia geotérmica aumentou apenas 1,2%, apesar da energia hidroelétrica continuar

ser a segunda FER com maior representatividade no mix energético europeu. A energia solar apresentou o maior crescimento no consumo de FER, com um aumento de 48%.

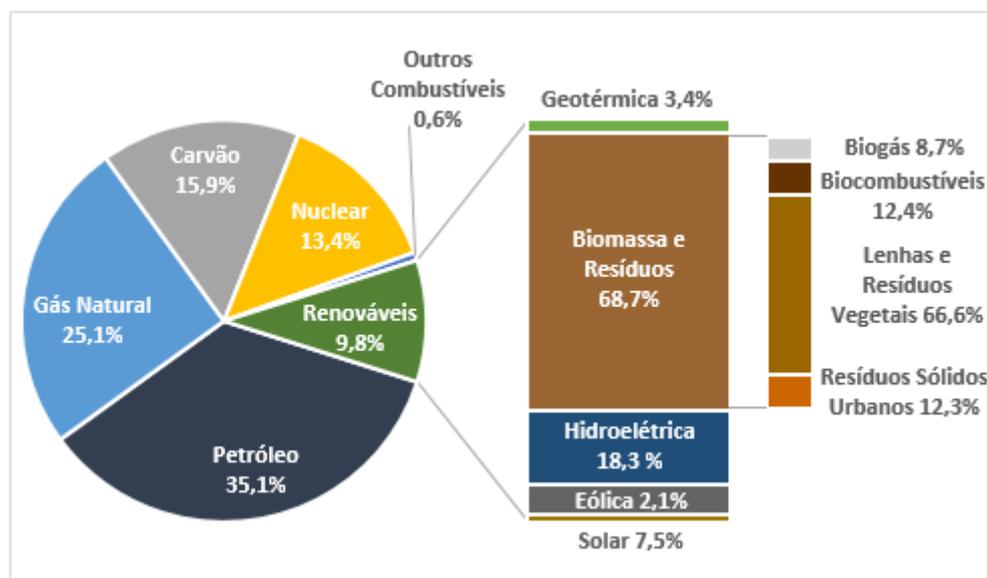


Figura 2 - Consumo total de energia primária por fontes de energia na UE-27, 2010. (Fonte:(Eurostat, 2012))

Relativamente ao panorama nacional, Portugal revela uma forte dependência energética, como resultado dos escassos recursos energéticos fósseis endógenos, em valores que atingem cerca de 75,4% referente ao ano de 2010, expressa predominantemente em combustíveis fósseis (Eurostat, 2012). No que respeita aos combustíveis fósseis o petróleo continua a manter o papel essencial na estrutura de abastecimento, o gás natural tem contribuído, no último decénio, para diversificar a estrutura da oferta de energia e para uma evolução positiva no mix energético e relativamente ao carvão cuja tendência reflete uma redução progressiva.

No final de 2010, segundo o Balanço Energético de 2010 publicado pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), o consumo de energia primária proveniente de fontes renováveis representava 23,7% do consumo total de 23,9 Mtep (Figura 3). De acordo com a estratégia da UE para a energia renovável aprovada pelo governo Português, o compromisso para 2010 consistia em atingir a meta dos 12% de contribuição das energias renováveis, meta esta que foi superada.

Indo de encontro aos dados da UE-27 para a mesma base temporal, em Portugal, os combustíveis provenientes da biomassa e resíduos apresentam a maior contribuição para as FER, com cerca de 57,7%, seguidos da energia hidroelétrica (26%) e eólica (14,4%). A subcategoria constituída pelas lenhas e resíduos vegetais (53,1%) evidencia-se com sendo a

mais representativa dos combustíveis derivados de biomassa e resíduos, posteriormente seguem-se os biocombustíveis com 38,1%, sendo as subcategorias que abrangem os resíduos sólidos urbanos (6,1%), os resíduos industriais (1,7%) e o biogás (1,0%) as menos significativas.

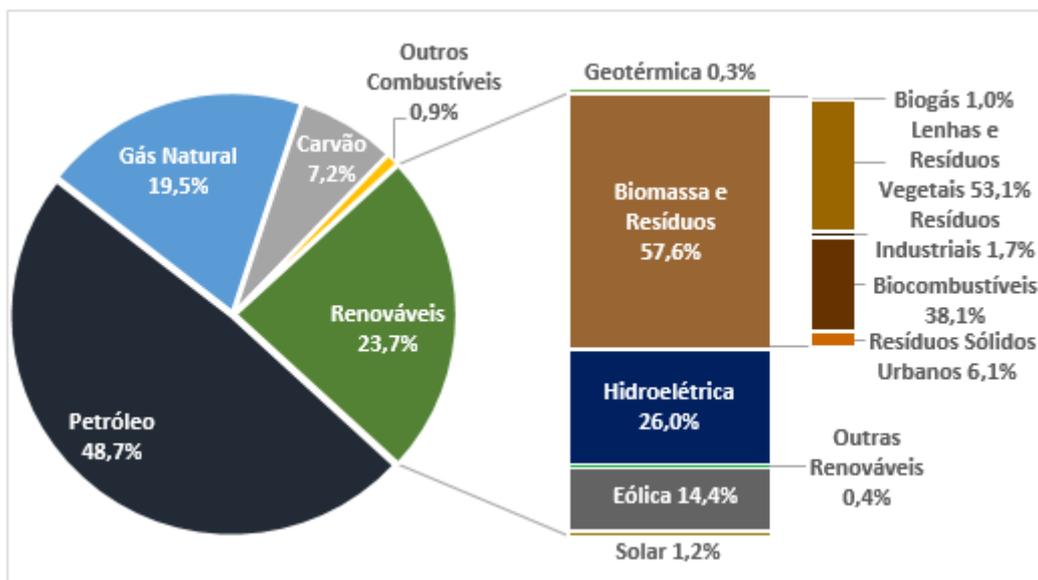


Figura 3 - Consumo total de energia primária por fontes de energia na Portugal, 2010. (Fonte: (DGEG, 2013))

Numa análise de consumo final de energia em Portugal para o ano de 2010, era notório que o setor dos transportes (37%) e da indústria (33%) correspondiam a mais de metade do consumo total de energia final, sendo o restante consumo repartido pelo setor doméstico (17%), serviços (11%) e agricultura e pesca (2%) (Figura 4).

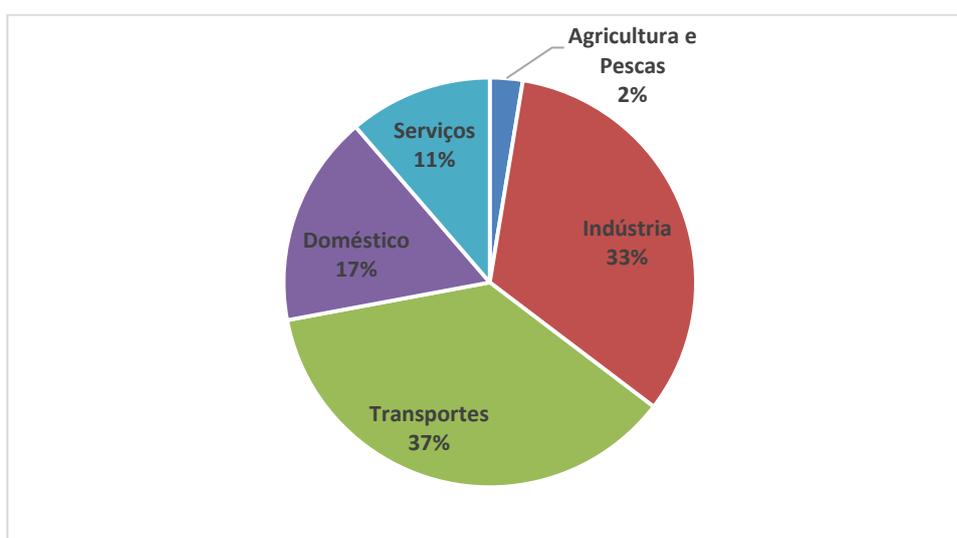


Figura 4 - Consumo de energia final, por setor em 2010 (Fonte: (DGEG, 2013))

A Energia e a Poluição Atmosférica

O setor doméstico ao apresentar-se como o terceiro setor com maior representatividade no consumo de energia final, corresponde ao setor onde se insere o objeto de estudo, os pellets, no caso específico português. O consumo de energia renovável no alojamento, que inclui o carvão vegetal, a lenha e a energia solar térmica, representa cerca de 25% do consumo total de energia no alojamento (não contabilizando a parte de energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis) (DGEG & INE, 2011). A lenha (biomassa e carvão vegetal) revela-se assim como a segunda principal fonte de energia consumida nos alojamentos portugueses, com um peso de 24,2% no consumo total de energia nas habitações, sendo de destacar a sua perda de importância nos últimos anos apesar de revelar-se como a fonte de energia com menor custo unitário. O consumo de lenha é maioritariamente constituído por Pinho (37,4%), seguido de Eucalipto (21,2%), Azinho (7,4%), Sobro (5,7%), Resíduos Florestais (4,2%) e outros tipos de lenhas, que incluem os pellets e briquetes (24,0%).

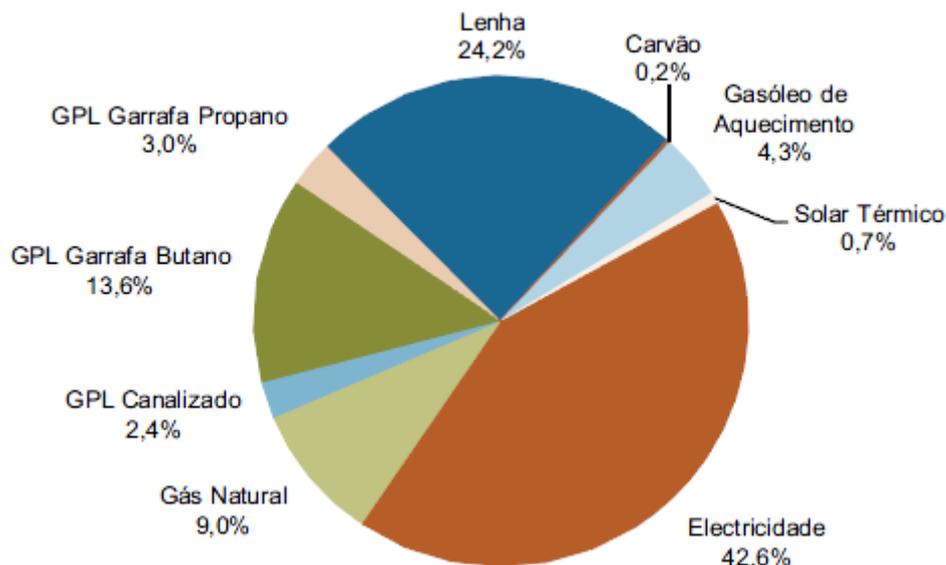


Figura 5 - Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de fonte - Portugal, 2010. (Fonte:(DGEG & INE, 2011))

Numa perspetiva de consumo de energia por tipo de utilização, a lenha consumida nas habitações, não incluindo os pellets e briquetes, destinou-se principalmente ao aquecimento do ambiente (52%) e à cozinha (42,1%), registando-se com menor relevância no aquecimento de águas (5,9%). No que respeita ao consumo de energia no setor doméstico (excluindo a parcela relativa ao consumo de energia nos veículos afetos aos indivíduos residentes no alojamento), o aquecimento do ambiente surge como o tipo de

utilização menos dispendioso, face ao consumo de energia associado (21,5%) que corresponde apenas 10,7% da despesa, em grande medida devido ao elevado consumo de lenha para essa finalidade (67,6%), que surge assim como a mais económica fonte de energia utilizada no setor doméstico. As principais fontes de energia utilizadas para o aquecimento do ambiente foram, por ordem decrescente de importância, a lenha, o gasóleo de aquecimento, a eletricidade e o GPL Garrafa Butano.

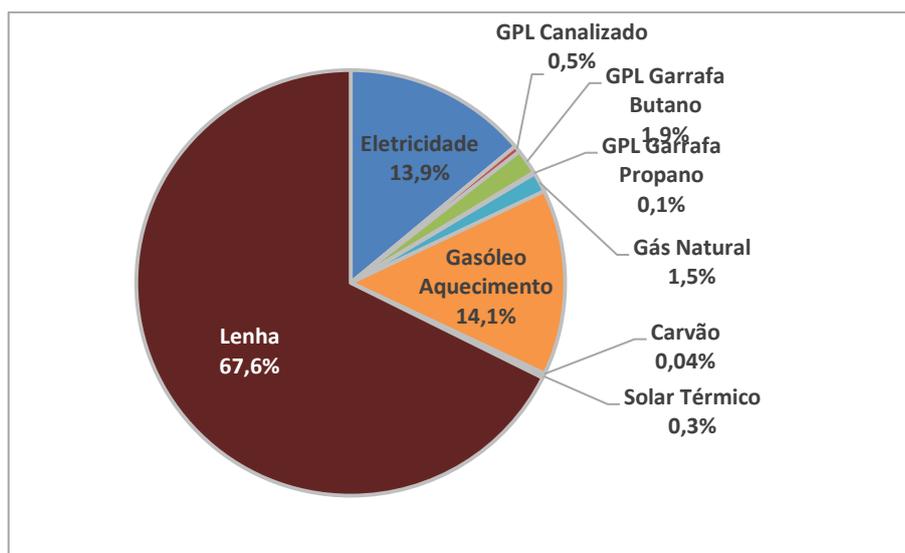


Figura 6 - Distribuição do consumo de energia para aquecimento do ambiente por tipo de fonte – Portugal, 2010 (Fonte:(DGEG & INE, 2011))

2.2 Poluição Atmosférica

As emissões de GEE e outros poluentes para a atmosfera apresentam-se como um dos fatores ambientais que suscita uma maior preocupação na generalidade dos cidadãos europeus. De acordo com os atuais padrões de produção e consumo de energia o desenvolvimento sustentável não tem sido alcançado, sendo necessário reaver um melhor equilíbrio entre as três principais vertentes da política energética: a segurança do abastecimento energético, o desenvolvimento económico e a proteção do ambiente. Neste contexto e face aos diversos e significativos impactes ambientais associados, o setor energético apresenta-se como um dos maiores desafios do presente século (S. I. Moreira, 2012).

A nível europeu, a UE-27, no ano de 2011, apresentou uma emissão de 4550 milhões de toneladas de CO₂ equivalente representando uma diminuição de 3,3% das emissões de GEE em relação ao ano de 2010 (EEA, 2013). Este facto deveu-se principalmente ao inverno mais ameno, de 2011, em muitos países europeus, levando a uma menor necessidade de aquecimento no setor doméstico e comercial. No entanto, é de realçar o facto que a contribuição para estes valores varia consideravelmente de país para país, dependendo em parte da utilização das FER e das recessões económicas.

Desde de 2004 que existe uma tendência de redução das emissões de GEE, com a exceção de 2010, quando as emissões aumentaram temporariamente devido a um maior crescimento económico em alguns países juntamente com um inverno mais rigoroso. Em relação aos níveis de 1990, as emissões de GEE da UE-27 diminuíram em 18,4% entre 1990 e 2011 (Figura 7).

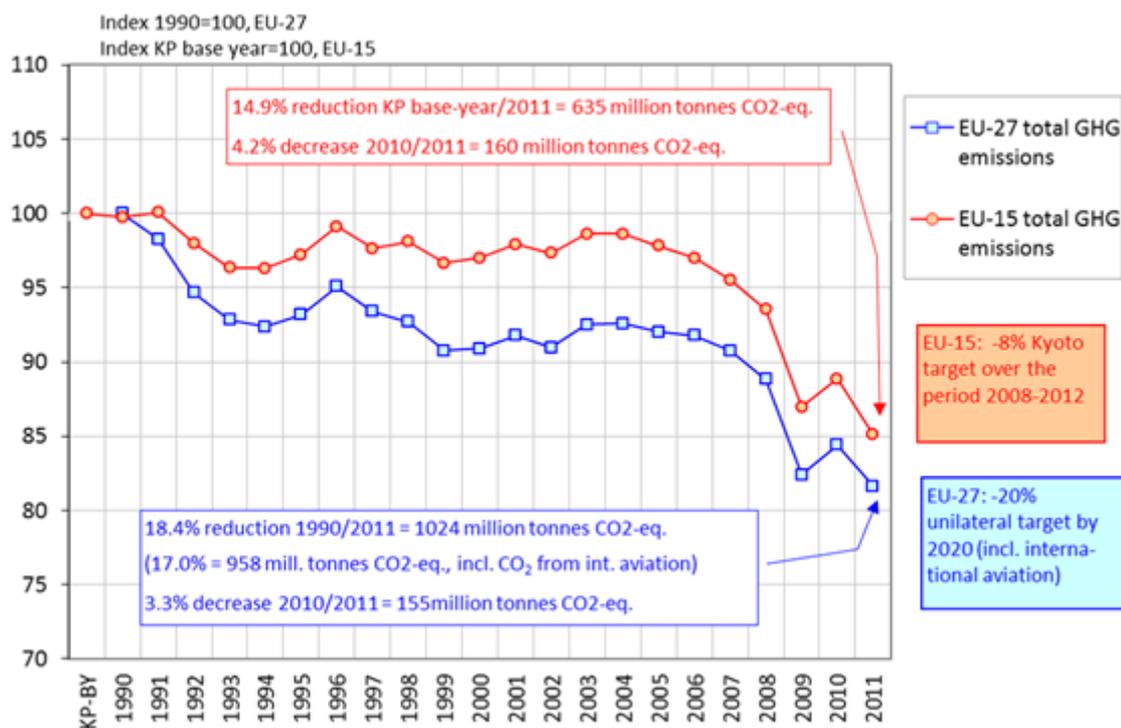


Figura 7 - Emissões de GEE na UE-27, entre 1990-2011 (Fonte: (EEA, 2013)).

Em 2011, o setor de produção e consumo de energia, incluindo o setor dos transportes, constituíam os principais responsáveis pela emissão de GEE na Europa, correspondendo a uma percentagem de 79,4% do total das emissões. A restante contribuição encontra-se distribuída pelo setor da agricultura (10,2%), dos processos industriais (7,3%), resíduos (2,9%) e pelas emissões fugitivas (1,7%) (Figura 8). As

emissões de GEE dos setores de produção e consumo de energia diminuíram 4,92 % em 2011, devido a reduções significativas de emissões do setor doméstico e serviços e do setor de industriais energéticas (EEA, 2013). O setor doméstico e comercial foi o que mais contribuiu para a redução das emissões na UE em 2011, cuja principal razão para a diminuição de 104 milhões de toneladas de emissões deveu-se ao inverno mais ameno. As emissões de indústrias transformadoras e da construção diminuíram em 11,5 Mt de CO_{2e}. Em geral, o consumo de combustíveis líquidos e gasosos na indústria diminuiu, mas foi parcialmente compensada por um aumento da utilização de combustíveis sólidos e de biomassa. O setor de produção de calor e energia continua a ser o que mais contribui para as emissões de GEE na UE, sendo responsável por 26,6% das emissões totais de GEE em 2011, no entanto apresentam uma diminuição de 1,6%.

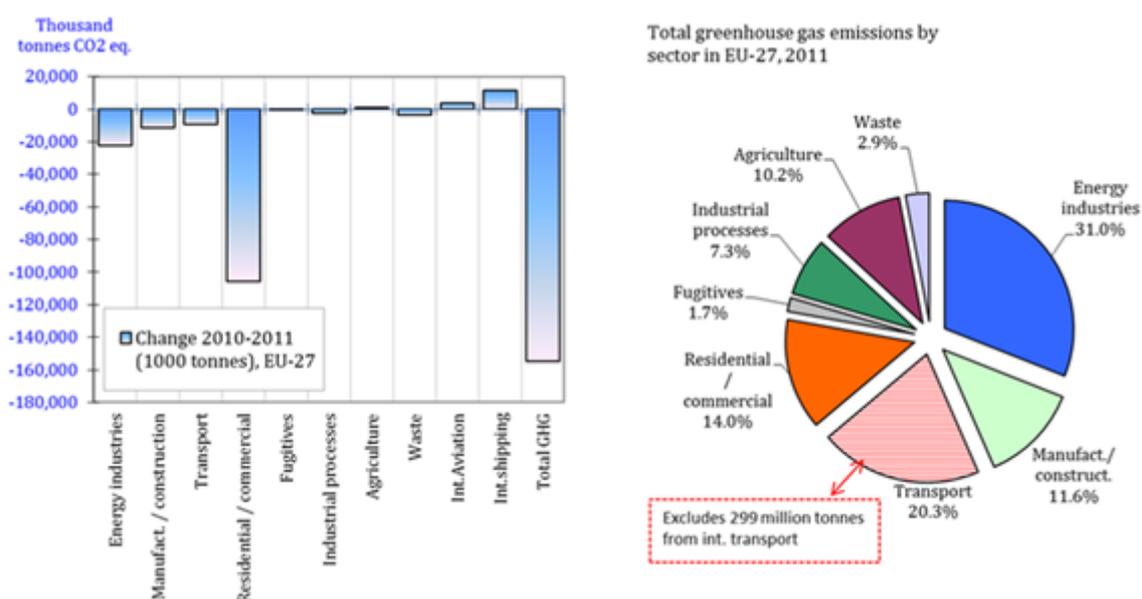


Figura 8 - Emissões de GEE na UE-27, por setor de atividade, entre 1990-2011 e emissões totais de GEE, por setor de atividade, em 2011 (Fonte: (EEA, 2013)).

Com base no Relatório do Estado do Ambiente de 2013, no panorama nacional, para período de 1990 a 2011, as emissões de GEE (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC e SF₆), excluindo o setor florestal e alterações de uso do solo (LULUCF), cresceram a um ritmo médio de 0,7% por ano, situando-se, em 2011, cerca de 1% abaixo da meta nacional de cumprimento no âmbito do Protocolo de Quioto (27%), com um valor de aproximadamente 70 Mt CO_{2e} equivalente. Em 2011 o CO₂ foi o principal poluente responsável pelas emissões registadas, representando 73,6% do total, seguido do CH₄ com 17,8% e do N₂O com 6,4%. Seguindo a tendência europeia, o setor de produção e consumo

A Energia e a Poluição Atmosférica

de energia, incluindo o setor dos transportes, manteve-se em 2011 como o principal dos principais responsáveis pelas emissões de GEE, contribuindo com 71% das emissões nacionais e apresentando um crescimento face a 1990 de cerca de 16,75%. Para o mesmo período, o setor dos transportes, sendo fortemente dominado pelo tráfego rodoviário, foi um dos setores que apresentou maior crescimento de emissões (70.2%), verificando-se atualmente uma certa estabilização/redução destas emissões. Por outro lado, as emissões provenientes das indústrias energéticas aumentaram cerca de 1,2%, sendo este o principal responsável pelas emissões de CO₂. Estas tendências são o reflexo do forte crescimento económico registado na década de 90, associado a um aumento da procura de energia e da mobilidade, e caracterizado por um padrão de produção e consumo de energia fortemente dependentes da queima de combustíveis fósseis. Os setores dos resíduos, agricultura e processos industriais apresentam um peso semelhante (12,1%, 11,0% e 5,5%, respetivamente). No entanto, os resíduos e processos industriais apresentam uma tendência de crescimento da ordem dos 38,1% e 10,1%, respetivamente, face a 1990, enquanto os setores da agricultura e solventes registam uma tendência de redução das emissões de -8% e -19,1%, respetivamente (Figura 9).

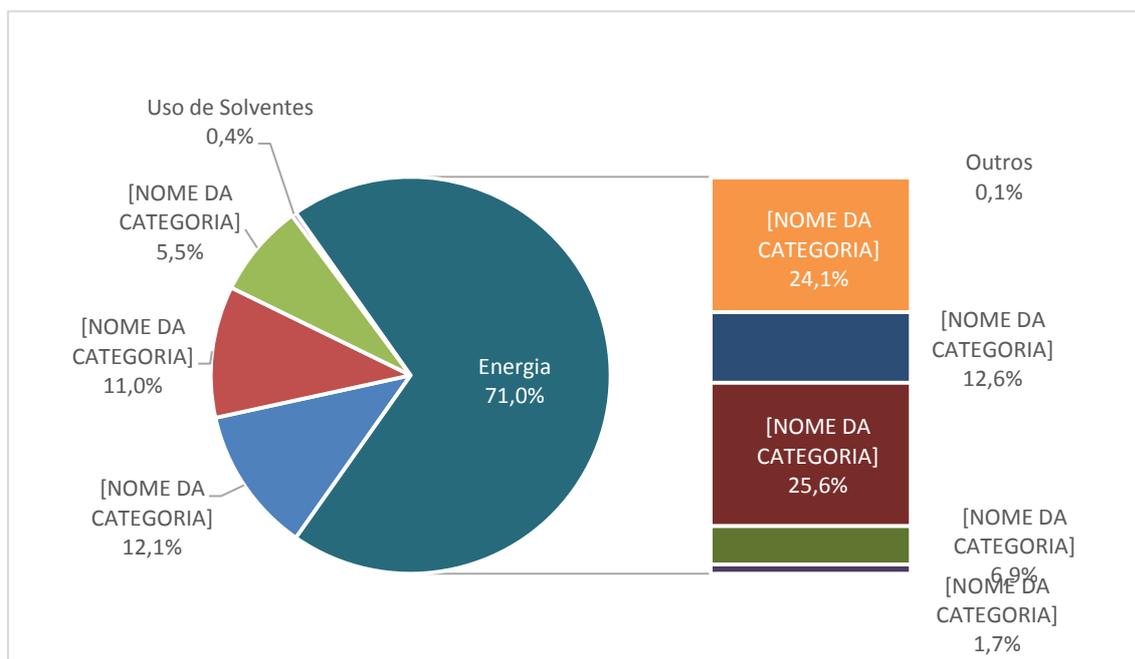


Figura 9 - Emissões de GEE em Portugal, por setor de atividade, em 2011 (Fonte: (APA, 2013)).

No entanto, é de salientar a importância das emissões atmosféricas de substâncias acidificantes e eutrofizantes na contribuição do fenómeno de efeito de estufa (APA, 2013).

As substâncias acidificantes como o SO₂ e os NO_x, provenientes essencialmente da combustão de combustíveis fósseis, e o NH₃, que em conjunto com os seus produtos de reação, como ácido sulfúrico e nítrico, podem contribuir também, após a sua deposição, a alterações ao nível da composição química do solo e da água de superfície. Os NO_x e NH₃ são igualmente substâncias eutrofizantes que contribuem para o enriquecimento excessivo de elementos nutritivos das águas, provocando um crescimento anormal das espécies vegetais aquáticas para níveis que colocam em causa a utilização normal e desejável da água.

Em 2011, no contexto nacional, foram emitidas 47 kt de SO₂, 176 de NO_x e 47 kt de NH₃, sendo o maior contributo no total das emissões de substâncias acidificantes do NO_x (47,5%), seguido do NH₃ (34,2%) e finalmente do SO₂ (18,3%). No período de 1990 a 2011 as emissões de substâncias acidificantes apresentaram globalmente uma redução de 41,6%. Numa análise das emissões destes poluentes por setor de atividade entre 1990 e 2011 constata-se que o setor “Outros” e o setor da agricultura foram os que mais contribuíram para a emissão de substâncias acidificantes e eutrofizantes, com 31,8% e 23% respetivamente. Analogamente, os setores dos resíduos, energia e indústria, apresentaram reduções significativas de aproximadamente 73,2%, 71,8% e 51,8%, respetivamente. Deste modo, todas as emissões de substâncias acidificantes e eutrofizantes encontraram-se abaixo, para o ano em análise, dos valores estabelecidos no Protocolo de Gotemburgo e pela “Diretiva Tetos” (APA, 2013).

As emissões de substâncias precursoras do ozono troposférico, como os NO_x, os COVNM, o CO e o CH₄, provenientes essencialmente da combustão de combustíveis fósseis, afetam igualmente a qualidade do ar, que na presença de oxigénio e de radiação solar, origina o ozono, um poderoso oxidante, através de diversas reações fotoquímicas.

Na conjuntura nacional, foram emitidas 177 kt de COVNM e 176 kt de NO_x, referentes ao ano de 2011, ambos os valores inferiores aos tetos fixados pelo Protocolo de Gotemburgo e pela “Diretiva Tetos”. Estes valores refletem, respetivamente, numa redução de 39% para os COVNM e 23% para os NO_x, desde 1990. Os setores da energia e dos transportes apresentaram reduções significativas na ordem de 64% e 50%, respetivamente, no ano de 2011. Em contrapartida, o setor industrial foi o que mais contribuiu para a formação de ozono na troposfera em 2011, apresentando um aumento substancial de 6% nas emissões destes poluentes em relação a 1990 (APA, 2013).

No entanto é de salientar, que a aplicação de medidas de mitigação e de um conjunto de medidas de adaptação, nomeadamente através da regulação das atividades humanas e de uma estratégia de adaptação aos efeitos das alterações climáticas no território e na saúde humana, podem contribuir para que muitos impactes sejam evitados, reduzidos ou estabilizados.

2.3 *Estratégias Climáticas e Energéticas*

Os passos iniciais na implementação da política climática e energética na Europa foram dados com a aprovação de uma série de documentos base, tais como o Livro Verde, relativo à segurança de abastecimento, ou o Livro Branco respeitante às FER e segundo o qual “a energia de biomassa é versátil, uma vez que pode ser utilizada para produzir eletricidade, calor ou como combustível para os transportes, conforme as necessidades, e, ao contrário da energia elétrica, pode ser armazenada de forma simples e geralmente económica. Além disso, as unidades de produção podem variar de pequena escala até aos vários MW” (COM, 2000, 2006). Estes documentos têm como objetivo contribuir para alcançar um desenvolvimento equilibrado do mercado comum da energia, minimizando os riscos associados à garantia de abastecimento, satisfazendo simultaneamente os requisitos de menor impacto ambiental negativo e contribuindo para a mitigação das alterações climáticas.

No seguimento do Livro Branco de 1997 para as FER, a UE-15 estabelece como metas que 12 % do consumo interno bruto de energia e 22,1 % do consumo de eletricidade teriam que ser provenientes de FER até 2010. Estes alvos seriam alcançados através da promoção de energias renováveis em três diferentes direções: energia elétrica, aquecimento e arrefecimento, e transportes. Para atingir este objetivo, a Diretiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à promoção da energia elétrica obtida por FER no mercado interno da eletricidade, definiu metas indicativas nacionais para a percentagem do consumo de eletricidade proveniente de FER. A Diretiva constituiu uma parte essencial do pacote de medidas necessárias para obedecer aos compromissos assumidos pela UE ao abrigo do Protocolo de Quioto para a redução das emissões de GEE. Com o alargamento de 2004, os objetivos indicativos nacionais estabelecidos nos tratados de adesão para a percentagem de eletricidade produzida pelas FER para cada novo Estado-

Membro resultou num objetivo global de 21 % para a UE-25. Apesar da implementação de tais medidas, o consumo bruto de eletricidade proveniente de energias renováveis alcançou uma percentagem de 14,7% na UE-27 em 2006, enquanto a quota das energias renováveis no consumo interno bruto de energia representou 7,1 % (66,1 % de biomassa, 20,5 % de energia hidroelétrica, 5,5 % de energia eólica, 4,3 % de energia geotérmica e 0,8 % de energia solar) Como resultado desta falta de progresso para atingir os objetivos de 2010, a necessidade de um quadro jurídico mais abrangente tornou-se evidente.

Em Março de 2007, o Conselho Europeu aprovou uma abordagem integrada da política climática e energética, que visa controlar o 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, sendo partes importantes constituintes do pacote de medidas necessárias para reduzir as emissões de GEE 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 GEE para além de 2012. Deste modo, proporcionando o aumento da segurança energética, do investimento e fomento no desenvolvimento em tecnologias de energias renováveis na UE, reforçando simultaneamente a sua competitividade.

No seguimento da adoção em codecisão da Diretiva 2009/28/CE relativa à promoção da utilização de energias provenientes de fontes renováveis, que revoga as Diretivas 2001/77/CE e 2003/30/CE, Portugal compôs o seu Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER), estabelecendo um conjunto de objetivos gerais obrigatórios relativos à quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia, nos setores da energia elétrica, de aquecimento e arrefecimento e dos transportes. Os objetivos a serem cumpridos até 2020 pelos Estados-Membros da UE, consistem em alcançar a redução das emissões de GEE, no mínimo 20% abaixo dos níveis de 1990, a redução de 20% no consumo de energia primária em comparação com os níveis previstos, a ser alcançado através da melhoria da eficiência energética e o aumento da quota de FER no consumo final de energia primária para 20%, a partir de aproximadamente 8,5% em 2005. Para além dos objetivos nacionais obrigatórios que foram acordados por cada Estado-Membro todos os países se comprometeram com uma meta mínima de 10% na contribuição de energias renováveis no setor dos transportes. Além disso, a Diretiva definiu requisitos em termos dos diferentes mecanismos que os

Estados-Membros podem aplicar para atingir os seus objetivos: regimes de apoio, garantias de origem, projetos conjuntos, medidas de cooperação entre Estados-Membros e países terceiros, e critérios de sustentabilidade para biocombustíveis. Como é exigido pela Diretiva, os Estados-Membros adotaram planos de ação nacional para as energias renováveis em 2010. No seguimento da mesma, tiveram de traçar uma trajetória indicativa para alcançar os seus objetivos finais obrigatórios e para certificar o cumprimento dos mesmos. A trajetória indicativa deve consistir nas seguintes quotas de energia proveniente de fontes renováveis:

$S_{2005} + 0,20 (S_{2020} - S_{2005}) = 22,6$, como média para o período de dois anos de 2011 a 2012;

$S_{2005} + 0,30 (S_{2020} - S_{2005}) = 23,75$, como média para o período de dois anos de 2013 a 2014;

Em que S_{2005} = a quota para Portugal em 2005 e S_{2020} = a quota para Portugal em 2020. Com base nos dados de 2005, Portugal tinha uma quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto de energia, na ordem dos 20,5 %.

Adicionalmente e seguindo o quadro orientador da política energética europeia, Portugal estabeleceu um conjunto de estratégias e medidas no setor da energia. Com a aprovação da Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020) na Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de Abril, foram definidos objetivos complementares. Assim, a política energética nacional, tendo em consideração a contribuição das FER, tem como principais objetivos :

- Cumprir os acordos adotados por Portugal na conjuntura das políticas europeias de energia e de combate às alterações climáticas, permitindo que em 2020, 31% do consumo final bruto de energia tenha origem em FER (60% da eletricidade produzida, 30% e 10% do consumo de energia no setor de aquecimento e arrefecimento e dos transportes rodoviários, respetivamente);
- Reduzir a dependência energética do país face ao exterior, baseada no consumo e importação de combustíveis fósseis (83-85%), para cerca de 74% em 2020, a partir de uma crescente utilização de recursos energéticos endógenos;
- Reduzir em 25% o saldo importador energético face a 2008 com a energia produzida a partir de fontes endógenas;

- Gerar riqueza e consolidar o cluster energético no setor das energias renováveis e da eficiência, criando mais de 100 mil novos postos de trabalho na produção de energia elétrica com FER;
- Promover o desenvolvimento sustentável, criando condições para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo país em matéria de redução de emissões de GEE, através de uma maior utilização das FER e da eficiência energética.

Com vista ao cumprimento das metas foram estabelecidas igualmente um conjunto de medidas específicas nas mais diversas áreas. Relativamente ao incentivo da produção de biomassa florestal as medidas aprovadas visam assegurar as necessidades de consumo já instaladas e a instalar, através do acesso a apoios públicos, da certificação da gestão florestal sustentável, avaliação da utilização e promoção das culturas energéticas, bem como da biomassa residual resultante das atividades agrícolas e agroindustriais para a produção de energia. As restantes medidas previstas na área da biomassa consistem em promover a gestão profissional das florestas nacionais, contribuindo para a redução dos riscos associados (incêndios), bem como a sua sustentabilidade e a utilização da biomassa para aquecimento residencial através de equipamentos eficientes e com baixas emissões de gases e partículas.

A importância que o setor florestal representa para o desenvolvimento do país é reconhecida na Estratégia Nacional para as Florestas, aprovada na Resolução do Conselho de Ministros nº 114/2006, de 15 de Setembro, a qual ainda destaca o valor dos recursos florestais nas suas diversas valências económicas, sociais e ambientais.

A conjugação destas duas estratégias visa criar sinergias e contribuir para uma gestão profissional e sustentável da floresta assim como para a concretização dos objetivos assumidos para o setor da energia (Relatório “Biomassa Florestal - Oportunidade e Valor”).

A nível europeu a Comissão Europeia publicou o Plano de Ação Biomassa (CCE, 2005), que representa o primeiro passo para a coordenação comunitária nesta área, que define um conjunto de medidas destinadas a aumentar o desenvolvimento da produção de energia primária com recurso à biomassa, através da criação de incentivos de mercado e da eliminação das barreiras ao desenvolvimento deste. Em relação aos incentivos de mercado, designadamente a aplicação desta FER para a produção de energia, calor e biocombustíveis, o plano expõe variadas medidas que compreendem:

1. Promoção da melhor eficiência dos equipamentos de combustão de biomassa doméstica e redução da poluição, com vista à definição de requisitos no âmbito da diretiva Eco design;
2. Estimular os Estados-Membros a que procedam a uma revisão do valor do IVA no aquecimento de edifícios a biomassa;
3. Promoção da investigação na área das bio refinarias e biocombustíveis de 2ª geração;
4. Financiamento de campanhas de sensibilização junto dos agricultores e proprietários florestais, face às propriedades das culturas energéticas e às oportunidades que estas oferecem.

Relativamente à estratégia da UE no domínio dos biocombustíveis a Comissão tem como objetivo intensificar a promoção dos mesmos e preparar a sua utilização em larga escala, é igualmente definido um programa coordenado para ação comunitária, incluindo medidas para melhorar a procura de biomassa, melhorar o fornecimento de energia, ultrapassar barreiras técnicas e desenvolver e encorajar iniciativas de investigação.

Apesar de não se verificar uma política energética florestal definida praticamente em qualquer país ou a nível da UE, a necessidade de uma coordenação das políticas florestais com outras políticas, como a política energética, é reconhecida pelo Conselho Europeu

3. BIOENERGIA

A União Europeia motivada pelo reconhecimento de que o uso de combustíveis fósseis para produzir energia causa danos significativos ao meio ambiente e bem-estar da sociedade, estabeleceu a ambiciosa meta de aumentar a participação de FER no consumo final de energia em 20% até 2020 (Diretiva 2009/28/CE, 2009).

Neste contexto na Europa, a bioenergia tem um papel central nos planos nacionais de ação para as energias renováveis (PNAER), correspondendo a mais de metade da produção de energia renovável projetada para 2020, tendo sido destacada pelas infindas vantagens que apresenta em relação às fontes de energia convencionais, a diversidade de aplicação (produção de energia elétrica, calor ou combustível), a menor dependência em relação a variações climáticas e a promoção de estruturas económicas regionais. Este conjunto de fatores poderá igualmente beneficiar a Europa reduzindo a sua dependência face às importações de energia, aumentando a sustentabilidade e estimulando o crescimento económico (CCE, 2005).

Neste capítulo apresenta-se o estado de arte da bioenergia e dos sistemas de conversão de biomassa florestal, dando-se particular ênfase à biomassa sólida. Além disso, pretende-se expor a disponibilidade dos recursos nacionais à implementação da biomassa florestal como fonte de energia, bem como a política de promoção desta FER.

3.1 *Biomassa para Fins Energéticos*

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 cumprir os compromissos, assumidos a nível comunitário e internacional, de redução das emissões de GEE. Estas condições apresentam igualmente um importante papel na promoção da segurança do aprovisionamento energético, na promoção do desenvolvimento tecnológico e da inovação e na criação de oportunidades de emprego e desenvolvimento regional (Diretiva 2009/28/CE, 2009).

Deste modo o Conselho Europeu da Primavera de 2004 concluiu que o aumento da utilização de energias renováveis na Europa seria fundamental por razões ambientais e de competitividade, tendo a energia que deriva da biomassa, sendo esta definida como “fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura, incluindo substâncias de origem vegetal e animal, da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”, excluindo a que está retida em formações geológicas, sido encarada como um elemento crucial para as estratégias nacionais e europeias no setor da energia (Diretiva 2009/28/CE, 2009). Nesta perspetiva, a utilização da biomassa florestal como fonte de energia é geralmente reconhecida como estando de acordo com os princípios de desenvolvimento sustentável (Stupak, Asikainen et al. 2007). No entanto, para além das inúmeras vantagens existem alguns efeitos adversos, para a sociedade, ambiente, setor florestal e energético, associados à exploração e utilização da biomassa para a produção de energia.

Tabela 1 - As principais vantagens e desvantagens reais e potenciais para os diferentes agentes na utilização de biomassa florestal em comparação com a produção de energia a partir de combustíveis fósseis. (Fonte: (Stupak et al., 2007))

Vantagens	Desvantagens
<i>Sociedade – sistema de energia sustentável</i>	
<ul style="list-style-type: none"> •A biomassa é geralmente reconhecida por ser um combustível neutro em termos de emissões de CO₂ e uma fonte de energia sustentável. •Segurança de abastecimento pela multiplicidade de fontes e possibilidades de utilização. •Apresenta uma estabilização ao nível dos preços aplicados. • Promove o emprego e o desenvolvimento local e regional. •Redução do conteúdo de enxofre no combustível e subsequentemente redução das emissões. 	<ul style="list-style-type: none"> •Mercado não competitivo. •Insuficiente promoção da investigação orientada e do desenvolvimento. •Apoio ao investimento, com a tributação da energia de combustíveis fósseis e preços fixos para a energia oriunda de fontes renováveis. •Emissões de gases e partículas que possam ser prejudiciais para a saúde humana e ecossistemas.
<i>Setor Florestal - produção sustentável de biomassa</i>	
<ul style="list-style-type: none"> •Operações de exploração florestal têm vindo a ser realizadas para benefícios florestais futuros mesmo sem considerar o aproveitamento energético. •Redução dos custos de regeneração florestal, como a preparação do solo e plantação de culturas após a remoção dos resíduos florestais. •O risco de infeção das raízes do novo povoamento é reduzido após a colheita dos toros do antigo povoamento e resíduos resultantes, isto se este for infetado. •Diminuição do risco de pragas de insetos, através da remoção de material potencialmente suscetível a este tipo de risco. 	<ul style="list-style-type: none"> •Os lucros são geralmente baixos. •Possibilidade da redução de crescimento florestal e fertilidade local devendo-se ao aumento da remoção de nutrientes. •Aumento dos custos de fertilização. •Aumento da lixiviação após a colheita dos troncos devido ao aumento da decomposição. •Em alguns casos, a perda de biodiversidade devido ao menor substrato fértil para os organismos e risco de madeira armazenada atuando como risco na propagação de pragas. •Aumento do risco de compactação do solo, devido à remoção de resíduos e ao aumento do número de operações florestais.
<i>Setor Energético – produção sustentável de energia</i>	
<ul style="list-style-type: none"> •Preços dos combustíveis mais baixos em economias com altas taxas de energia. •Segurança no abastecimento pela utilização de recursos endógenos. •Menores emissões atmosféricas de dióxido de enxofre (SO₂) para a atmosfera em relação aos combustíveis fósseis. •Reutilização dos resíduos gerados no processo de combustão, nomeadamente as cinzas de combustão que podem funcionar na correção do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento de corrosão e deposição nos equipamentos onde ocorre a combustão. •Custos altos relativamente à deposição de resíduos, se não for possível reciclar os mesmos. •Maiores emissões atmosféricas de NO_x e de partículas em relação aos combustíveis fósseis. •Altos níveis de investimento, custos de transação. •Baixa densidade energética em comparação aos combustíveis fósseis.

Neste contexto mais amplo de uma política energética integrada e coerente, e em particular na promoção da produção de energia primária proveniente de FER que a Comissão Europeia em Dezembro de 2005 elaborou o Plano de Ação para a Biomassa

apresentando uma análise dos custos/benefícios da sua utilização e estabelecendo medidas com o intuito de aumentar o desenvolvimento da energia proveniente deste recurso renovável através da criação de incentivos baseados no mercado para a sua utilização e da remoção de obstáculos ao seu desenvolvimento (CCE, 2005).

Particularizando os incentivos à produção de energia com recurso a biomassa sólida, estes estão atualmente limitados ao setor energético, sendo classificados em quatro categorias (CCE, 2005):

- **Tarifas de aquisição (*feed-in tariffs*):** consistem em contratos de longo prazo com preços vinculados aos custos de produção de energia para os produtores que utilizam uma FER. Este esquema é o mais frequente na UE, nomeadamente em Portugal;
- **Certificados verdes (*green certificates*):** este sistema de incentivo, baseia-se no princípio de que a energia elétrica produzida com recurso a FER proporciona dois produtos diferentes ao consumidor final: a energia elétrica, suscetível de ser vendida no mercado de energia elétrica, e um conjunto de benefícios ambientais e sociais que tomam a forma de certificados, cuja aquisição em mercado próprio, origina receitas adicionais à da venda de energia elétrica para os produtores de energia renovável;
- **Concurso (*tender*):** constitui um processo seletivo que tem por objetivo avaliar as empresas que concorrem com projetos de produção de eletricidade, sendo estabelecido *a posteriori* um contrato entre o Estado e a empresa vencedora, garantindo um determinado valor monetário. Este mecanismo aplica-se, no caso português, em conjunto com as tarifas de aquisição;
- **Incentivos fiscais (*tax incentives*):** consistem na redução da carga fiscal da eletricidade produzida a partir de FER, proporcionando a competitividade com os restantes produtores.

A biomassa suscetível de aplicação em sistemas de conversão energética, dependendo da sua origem pode ser classificada em quatro categorias (GREENPRO, 2004):

- **Cultura para Fins Energéticos:** cultura cuja função é o armazenamento da radiação solar para armazenamento em forma de biomassa, normalmente associadas a plantações de crescimento rápido.
- **Resíduos florestais e agrícolas:** resíduos provenientes das atividades agrícolas ou florestais, cujo aproveitamento permite a redução dos custos dos produtos principais, valorizando assim estes subprodutos naturais.
- **Subprodutos orgânicos:** subprodutos resultantes do processamento da biomassa para criação de produtos, nomeadamente resíduos orgânicos, efluentes de agropecuária e resíduos consequentes da indústria transformadora de madeira e de fibras vegetais. Nestes casos, a reciclagem energética proporciona o aumento da utilidade e assegura que partes do processo de produção sejam permanente e ambientalmente sustentáveis.
- **Resíduos orgânicos:** resíduos que compreendem os resíduos domésticos e lamas de efluentes domésticos e industriais, encontrando-se geralmente sujeitos a legislação específica. Consequentemente, a utilização deste tipo de resíduos exige o cumprimento de uma gama completa de requisitos legais, desde a sua origem até ao controlo epidémico.

3.2 Conversão Energética de Biomassa Florestal

No panorama das energias renováveis a valorização energética da biomassa apresenta-se cada vez mais como uma alternativa com forte potencial e futuro, sendo a biomassa florestal um desses recursos com maior potencial de crescimento e de valorização. Deste modo, torna-se importante a integração dos aspetos da valorização energética na definição da política florestal, tal como foi abordado em capítulos precedentes.

A valorização energética deste recurso requer a avaliação de vários fatores, tais como, quantidade, qualidade e respetiva distribuição geográfica, salvaguardando sempre as funções ecológicas da floresta, permitindo consequentemente que este seja uma mais-valia para as vertentes económica, social e ambiental. No entanto, alguns processos de

conversão geram impactos negativos para o meio ambiente, saúde pública e para o próprio equipamento da unidade industrial.

Geralmente as fontes de biomassa usadas como biocombustíveis são classificadas de acordo com o estado de agregação, podendo encontrarem-se no estado: sólido, líquido ou gasoso. De acordo com as tecnologias e sistemas de conversão disponíveis será determinado o estado de agregação dos produtos de biomassa processados, sendo que para cada tipo de aplicação existe um método de operação otimizado para as características da biomassa e níveis de desempenho específicos, devendo estes manterem-se dentro de limites rígidos (GREENPRO, 2004).

O tipo de biocombustível determina a infraestrutura de conversão energética passível de aplicar, permitindo a obtenção de três tipos fundamentais de energia (GREENPRO, 2004):

- **Energia Térmica:** normalmente produzido em sistemas de combustão. Em pequena escala o calor pode ser usado para aquecimento doméstico (lareiras, salamandras, entre outros) e em grande escala para produzir calor em centrais que, por meio de redes térmicas, distribuem o calor a diversas habitações para aquecimento ambiente e da água. Para sistemas de combustão estacionários, cuja única função seja a produção de calor, predominam os biocombustíveis sólidos, no que diz respeito à biomassa. A biomassa, como resíduo ou matéria-prima, pode ser usada para produção de calor, com reduzidos custos de processamento, de trituração ou secagem.
- **Energia Mecânica:** produzida por meio de geradores de calor e energia, como as máquinas a vapor ou motores de combustão interna. Geralmente associada ao biocombustível líquido e gasoso, onde ocorre estes são inflamados nos cilindros de um motor de combustão. A expansão da mistura combustível/ar, causada pela combustão é então convertida em energia. O calor produzido por este processo é dissipado para o ambiente, através de um sistema de arrefecimento. Como exemplo temos a utilização do biodiesel ou do etanol no setor dos transportes.
- **Energia Elétrica:** os sistemas que produzem energia mecânica, em motores de combustão ou em turbinas de combustão direta e indireta, são acoplados a geradores elétricos, convertendo a energia mecânica em energia elétrica. A utilização de energia mecânica para produção de energia elétrica produz

aproximadamente dois terços de calor, para um terço de eletricidade, o que evidencia o aumento da eficiência económica da cogeração (produção simultânea de calor e eletricidade) em aplicações estacionárias.

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

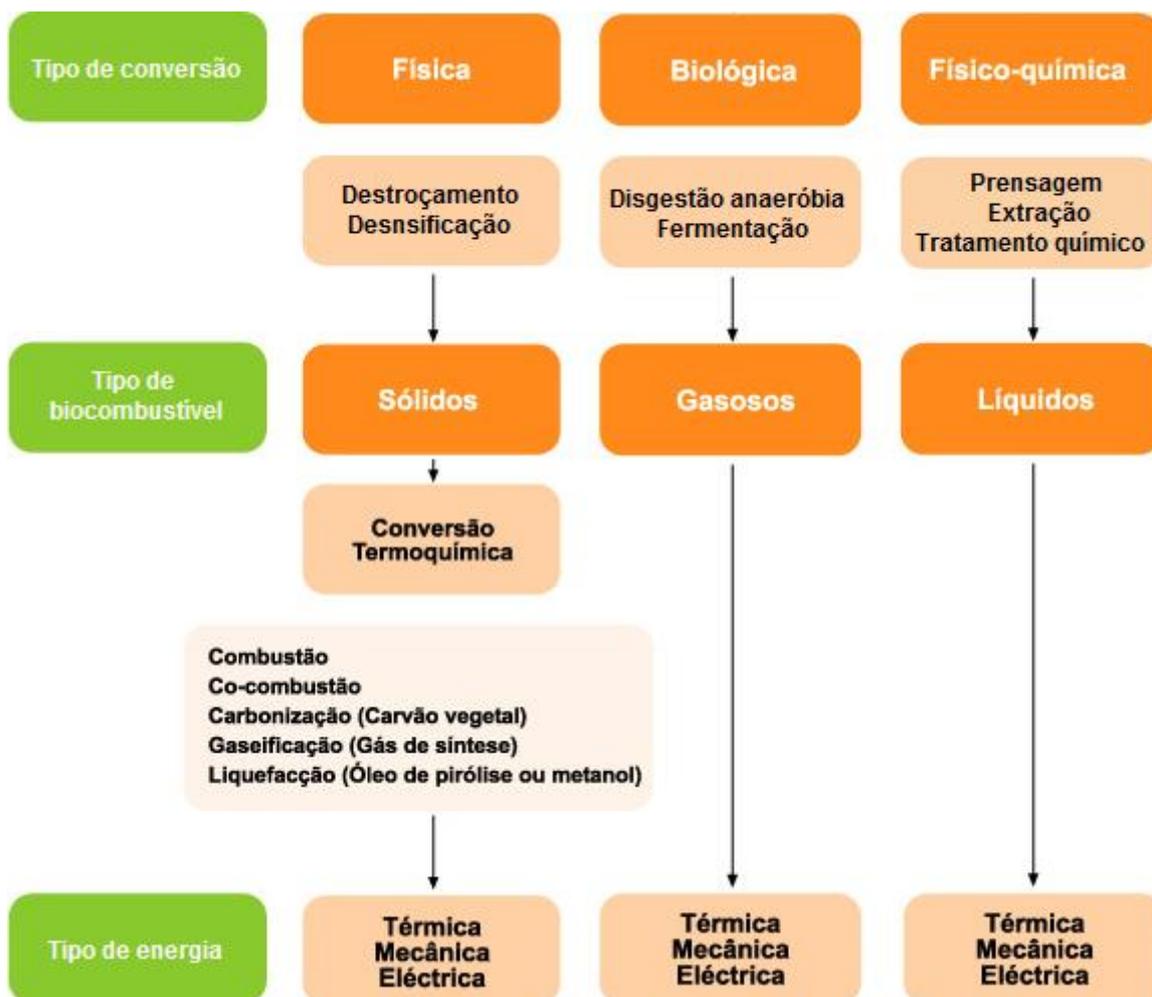


Figura 10 – Representação esquemática dos processos de conversão de biomassa (Fonte: Adaptado de (Enes, Valle, & Martínez, 2007))

Dado o âmbito da dissertação a abordagem desta temática irá incidir apenas na valorização energética da biomassa sólida que requer uma série de operações de logística e processos, antes da conversão desta matéria-prima nos diversos tipos de energia. As operações logísticas incluem a colheita, transporte e armazenamento da biomassa, de forma a garantir o abastecimento da unidade transformadora de energia.

A conversão física da biomassa permite obter uma variedade de biocombustíveis sólidos, tendo como objetivo facilitar a realização das operações posteriores e minimizar os custos associados às mesmas, melhorando as características do biocombustível e a eficiência de conversão de energia, bem como reduzindo os problemas técnicos na unidade transformadora de energia. O processo de destorroamento consiste na redução granulométrica da matéria-prima, permitindo obter a estilha, cujo tamanho facilita o manuseamento e armazenamento, tornando viável o transporte e a eficiência dos processos seguintes. O processo de densificação permite através da aplicação de pressão a uma massa de partículas com ou sem adição de ligantes ou tratamento térmico, a transformação da biomassa triturada em biomassa densificada, podendo originar dois tipos de biocombustível sólido, nomeadamente os briquettes e pellets.

A tecnologia de conversão termoquímica consiste na transformação da energia química contida na biomassa em energia térmica, elétrica e mecânica. Os quatro processos disponíveis na conversão termoquímica compreendem a combustão, pirólise, gaseificação e liquefação.

O processo de combustão é usualmente aplicado na indústria de produção de energia térmica, face à sua fiabilidade e disponibilidade. Este processo caracteriza-se pela queima da biomassa a altas temperaturas (800 a 1000°C), tendo em conta as propriedades do biocombustível sólido, principalmente o teor de humidade, e a presença de um agente oxidante (oxigénio ou ar) em excesso em relação à necessidade estequiométrica, permitindo obter as condições ótimas para a combustão completa do biocombustível sólido (Netto, 2008). Em condições ideais de combustão, ocorre a oxidação completa da parte orgânica do biocombustível sólido em gases simples (CO_2 e H_2O) (OBERNBERGER, BRUNNER, & BARNTHALER, 2006). De salientar que ao tratar-se de uma tecnologia complexa, tais condições não se verificam, resultando produtos inqueimados devido ao processo de combustão incompleto, e de diversos tipos de compostos, nomeadamente CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 , havendo a produção de outros compostos em menores quantidades como o CO e H_2 , CH_4 , NO_x e SO_2 , entre outros (Jenkins, Baxter, Jr, & Miles, 1998). Neste processo ocorrem de forma sequencial um conjunto de reações enquadradas nas seguintes etapas: secagem, pirólise, gasificação e combustão. Inicialmente na etapa de secagem, há uma redução do teor de humidade do biocombustível sólido, face a uma temperatura próxima dos 100°C. Na etapa de pirólise e gasificação, sucede a libertação de compostos

voláteis e gases (CO e CO₂), ocorrendo paralelamente a fragmentação das partículas, resultante do coque térmico da secagem e da libertação dos compostos voláteis. Este fenómeno encontra-se relacionado com a oxidação total ou parcial das partículas, consecutivamente o seu arrastamento para fora do sistema de combustão provoca uma diminuição da eficiência térmica e da conversão do carbono, originando conseqüentemente perda de energia e emissão de partículas para a atmosfera (N. A. R. Moreira, 2007; Tarelho, 2008). O processo de combustão finaliza com a oxidação do carbonizado e a retenção de cinzas (Loo, Sjaak, & Koppejan, 2008).

A co-combustão da biomassa encontra-se habitualmente associada à combustão de biomassa e carvão para a produção de energia, podendo ser aplicado em instalações já existentes que operem com combustíveis sólidos. As principais vantagens deste processo comparativamente à combustão isolada de carvão, residem na redução total de emissões por unidade de energia produzida, minimização de desperdícios e redução dos níveis de poluição do solo e água, dependendo da composição química biocombustível sólido (I., 2008; Pereira, 2006).

A pirólise pode ser definida como a queima de biomassa sólida a uma temperatura intermédia (300 a 600°C) associada a uma degradação térmica numa atmosfera redutora, ou seja, na ausência de agente oxidante externo, impedindo a combustão completa. Face às condições operatórias em que ocorre o processo, nomeadamente, a velocidade de aquecimento, temperatura de reação, pressão, gás de inertização e tempo de residência dos produtos no meio reacional, consideram-se três tipos distintos de pirólise: carbonização, pirólise rápida e gaseificação pirolítica (Bridgwater, 2003). Destes processos resulta um conjunto de biocombustíveis compreendendo o carvão, fração líquida e gases de baixo peso molecular (CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₆), respetivamente, suscetíveis de serem valorizados de distintas formas.

Atualmente o processo mais promissor na conversão da biomassa sólida num biocombustível gasoso é a gasificação, que se resume basicamente na combustão incompleta da biomassa, a temperaturas elevadas, na presença de uma quantidade de agente oxidante (ar atmosférico, vapor de água e O₂) em quantidades inferiores à estequiométrica. O gás resultante é constituído por uma mistura de CO, H₂, CH₄, CO₂ e N₂, cujas proporções variam dependendo das condições do processo, do tipo de gasificador, do teor de humidade e da fonte de biomassa usada (Basu, 2006). A valorização do gás de

síntese baseia-se na produção de metanol e na produção de energia térmica e elétrica através da sua combustão, aplicado em turbinas a gás ou motores de combustão, caso haja a remoção prévia de contaminantes (Loo et al., 2008).

Por último, o processo de liquefação consiste na conversão termoquímica de fase líquida combinando baixas temperaturas (250 a 300°C) com altas pressões (100 a 200 bar), podendo originar dois tipos de biocombustível: líquido e gasoso. Em síntese, consideram-se dois tipos distintos de liquefação: direta e indireta. A liquefação direta surge numa atmosfera redutora de H₂, ou mistura de H₂ e CO, a altas pressões e a temperaturas moderadas, sendo a biomassa diretamente convertida num biocombustível líquido com auxílio de catalisadores e solventes. O biocombustível líquido proveniente deste processo possui um elevado poder calorífico, face ao reduzido teor de O₂, analogamente ao concebido na pirólise. Por outro lado, a liquefação indireta engloba diversas operações, surgindo a produção de gás de síntese (CO, CO₂, H₂ e CH₄), por gasificação. O gás será convertido a metanol ou a hidrocarbonetos, por ação de catalisadores (Loo et al., 2008).

3.3 *Panorama Nacional da Biomassa Florestal*

Na última década têm sido apresentadas diversas estimativas para o potencial de biomassa existente no país, valores estes que nem sempre são convenientemente identificados de acordo com a sua representatividade face ao universo da biomassa florestal.

A abordagem à temática biomassa e, em particular de biomassa florestal para fins energéticos deve ter-se especial atenção aos fatores que condicionam a sustentabilidade da utilização deste recurso. A biomassa florestal é um recurso muito heterogéneo, bastante disperso no terreno, associado a condições geográficas adversas e, muitas vezes, com escassas infra-estruturas associadas, o que o torna oneroso e de difícil exploração. No entanto durante o século XX, o setor florestal português teve um desempenho surpreendente.

De acordo com o 6.º Inventário Florestal (IFN6), que tem como referência o ano de 2010, apresenta os resultados preliminares da 1ª fase para Portugal Continental relativamente à avaliação das áreas por classes de uso e ocupação do solo. Estes valores representam a capacidade produtiva ou o potencial produtivo, instalado em espaço

florestal, nestas quantidades apenas uma pequena fatia representa a biomassa disponível para a utilização energética. As seguintes fases correspondem à avaliação biométrica dos povoamentos florestais e avaliação do carbono do solo.

Da análise dos resultados preliminares publicados em Fevereiro de 2013, apura-se que em 2010 o uso florestal do solo ocupa 35,4% do território, representando o uso predominante em território continental. De acordo com este dado Portugal encontra-se na média dos 27 países da União Europeia relativamente à percentagem de uso florestal do solo (37,6%) (FAO, 2011). A salientar que as áreas de uso florestal incluem as superfícies arborizadas, que correspondente aos povoamentos florestais, e as superfícies temporariamente desarborizadas que são constituídas pelas superfícies ardidadas, cortadas e em regeneração, para as quais é previsto uma recuperação do seu coberto arbóreo no curto prazo. A segunda classe com maior representatividade de uso do solo constituiu os matos e pastagens, com uma percentagem de 32%, correspondendo os matos a 52,6 % desta classe. As áreas agrícolas correspondem a cerca de 24% do território continental. As águas interiores e os solos improdutivos constituem as classes de uso do solo com menor área, de 2% cada, antecedendo a classe destinada a áreas urbanas (4.8%). A Tabela 2 apresenta a evolução das áreas dos distintos tipos de uso do solo entre 1995, 2005 e 2010, em Portugal Continental.

Tabela 2 - Áreas por classe de uso do solo em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha).
(Fonte:(ICNF, 2013))

Usos do Solo	1995	2005	2010
Floresta	3305411	3211839	3154800
Agricultura	2407772	2205124	2114278
Matos e Pastagens	2539279	2720297	2853229
Águas Interiores	150586	176867	182568
Urbano	315475	398945	425526
Improdutivos	190370	195822	178492
Total	8908893	8908894	8908893

Pela análise dos dados constata-se que ao longo do período de estudo 1995 a 2010, as áreas de floresta apresentam uma diminuição de 4,6%, permitindo concluir que em cada ano se perdeu 10 mil hectares. Esta diminuição deve-se sobretudo à sua conversão para a classe de uso “matas e pastagens” (85%) e “urbano” (15%), verificando-se um aumento da área destas. Apesar de tal evidência, o facto de esta diminuição não ser acentuada revela a

significativa resiliência da floresta às fortes perturbações a que esteve sujeita, que se devem essencialmente aos gravíssimos incêndios florestais que se fizeram sentir nos últimos 20 anos, nos quais mais de 2,5 milhões de hectares foram ardidos, e por outro lado, à ocorrência de doenças, sobretudo no pinheiro-bravo, que por imposição dos regulamentos fitossanitários obrigou à realização de cortes excepcionais. De referir que Portugal foi o único país na Europa que esteve sujeito a este nível de perturbações.

A diminuição da área de floresta prende-se substancialmente à diminuição das superfícies temporariamente desarborizadas. De destacar que o aumento da área arborizada, cerca de +0,4% ao ano, se deve à regeneração natural e à ação dos proprietários florestais, que têm continuado a investir na floresta com ações de arborização e rearborização.

Tabela 3 - Área de floresta decomposta por tipo de ocupação florestal em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha). (Fonte:(ICNF, 2013))

	1995	2005	2010
Total (Floresta)	3305411	3211839	3154800
Superfície arborizada	2786688	2898664	2942800
Superfície temporariamente desarborizada	518723	313174	212000
<i>Superfície cortada</i>	33133	80644	25356
<i>Superfície ardida</i>	27031	52813	41010
<i>Superfície em regeneração</i>	458559	179718	145635

A evolução das áreas florestais por espécie no período que decorreu o estudo apresenta padrões distintos de variação, que de alguma forma demonstram as motivações económicas do setor florestal, a gestão do risco do investimento e a rentabilidade de cada espécie florestal. Com variação negativa, originando reduções de áreas relevantes, destaca-se o pinheiro (263 mil ha), de -13% alusiva à superfície arborizada e de -27% quanto à superfície total, passando a ser a terceira espécie com maior representatividade em termos de superfície florestal (22,7%). Em antítese, originando aumentos assinaláveis de área, destaca-se o eucalipto (+13% entre 1995 e 2010), sendo esta a espécie dominante, representando 25,8% da superfície florestal. Relativamente à espécie de sobreiro a sua área manteve-se praticamente estável durante o período de análise, apresentando um ligeira diminuição, representando deste modo a segunda espécie com maior área de superfície florestal (23,4%). As restantes áreas arborizadas correspondem a espécies resinosas, que acomodam cerca de 31% da floresta portuguesa, e a espécies folhosas, que ocupam 69% da

superfície florestal. As alterações que estas sofreram durante o período 2005 a 2010 foram pouco expressivas. Verifica-se um aumento significativo das áreas arborizadas e totais com pinheiro-manso (54 % e 46%, respetivamente) e castanheiro (48% e 27%, respetivamente). A espécie dos carvalhos apresenta uma diminuição da área total, devendo-se em grande parte à perda de superfícies temporariamente desarborizadas, face ao aumento de 14% em termos de área arborizada.

Tabela 4 - Áreas totais por espécie florestal dominante em Portugal Continental, para 1995, 2005 e 2010 (valores em ha). (Fonte:ICNF, 2013))

Espécie dominante	1995	2005	2010
Pinheiro-bravo	977883	795489	714445
Eucalipto	717246	785762	811943
Sobreiro	746828	731099	736775
Azinheira	366687	334980	331179
Carvalhos	91897	66016	67116
Pinheiro-manso	120129	172791	175742
Castanheiro	32633	38334	41410
Alfarrobeira	2701	4726	5351
Acácias	12278	12203	11803
Outras folhosas	155187	169390	177767
Outras resinosas	61340	73442	73217

A área de floresta em matas nacionais e perímetros florestais, sob jurisdição do ICNF, corresponde a 5,8% da floresta de Portugal continental. A área de floresta integrada no Sistema Nacional de Áreas de Conservação, corresponde a 18,7% da floresta de Portugal continental.

Relativamente à avaliação biométrica dos povoamentos florestais os dados apresentados na seguinte tabela correspondem ao IFN5, uma vez que ainda não foram publicados os referentes ao IFN6. Em termos de volume dos povoamentos (m³ com casca), a análise comparativa correspondente ao período de 1995 e 2005 apresenta uma quebra de 14 milhões de m³ totais para o pinheiro bravo, sendo no entanto a espécie mais representativa (42,2%), e um aumento de 6 milhões de m³ totais para o eucalipto, representado 25,2%. De salientar que para os dados de 2010 provavelmente esta tendência irá manter-se devido à diminuição e aumento significativo do pinheiro-bravo e eucalipto, respetivamente.

Tabela 5 - Volume existente e biomassa total por espécie florestal dominante, em portugal continental. (Fonte: ICNF, 2007)

Espécie dominante	Volume total existente (x10 ³) m ³
Pinheiro-bravo	85 756
Eucalipto	45 828
Sobreiro	24 773
Azínheira	7 566
Carvalhos	5 405
Pinheiro-manso	4 330
Castanheiro	1 631
Acácias	521
Outras folhosas	4 325
Outras resinosas	1 639
Total	181 774

A floresta portuguesa apresenta como um dos principais problemas em termos de sustentabilidade a excessiva fragmentação da propriedade, com cerca de 93% da área florestal a pertencer a mais de 400 mil proprietários, sendo a restante área do Estado e baldios, traduzindo-se num défice de gestão das áreas florestais juntando-se o crescente abandono de muitas áreas agrícolas.

3.4 *Emissões e Remoções de GEE no Setor Florestal*

As emissões de GEE para atmosfera, resultantes das atividades humanas, têm provocado um aumento adicional da temperatura do globo, sendo o CO₂ responsável por cerca de 60% do aquecimento global, cuja origem antropogénica resulta maioritariamente da combustão e desflorestação (IPCC, 2001). Deste modo torna-se importante ter em consideração o ciclo de carbono para se identificar as potenciais fontes, reservatórios e sumidouros do mesmo.

O ciclo de carbono do setor florestal, composto por um ciclo biológico (ecossistemas florestais) e um ciclo industrial (produtos florestais), pode ter um contributo relevante na mitigação dos efeitos associados ao aumento de emissões de GEE para a atmosfera, uma vez que a floresta constitui um dos principais reservatórios de carbono da biosfera participando de forma ativa nas trocas de carbono entre a atmosfera através de

processos biológicos elementares como a fotossíntese e a respiração (Equação 1) (Gower, 2003).



O processo de fotossíntese consiste na absorção de água e CO_2 atmosférico pelos seres clorofilados e a sua conversão em hidratos de carbono (CH_2O) para a produção de matéria orgânica, os quais ficam armazenados nos vários compartimentos (Dias, 2005). Simultaneamente, há libertação de O_2 para a atmosfera. Neste processo há captação de energia luminosa, a radiação solar, sendo esta convertida em energia química.

Contrariamente, no processo de respiração ocorre a oxidação de CH_2O proporcionando a emissão para a atmosfera de CO_2 . No entanto, ao longo do tempo, a diferença entre os fluxos de carbono de ambos os processos resulta na aglomeração de carbono na floresta (Gower, 2003).

A floresta constitui um reservatório de carbono, podendo também ser um sumidouro se o seu crescimento superar as perdas de biomassa associadas a um conjunto de fatores que afetam a acumulação de carbono na floresta. Estes, nomeadamente a desflorestação consequente do consumo de biomassa pelas indústrias conexas à exploração florestal ou pela conversão em terrenos agrícolas e/ou para pastagens, as pragas e os incêndios, são maioritariamente induzidos por atividades humanas.

Os produtos florestais podem armazenar igualmente o carbono durante períodos longos, constituindo reservatórios de carbono, retardando o seu regresso à atmosfera. Para além disso acarretam benefícios adicionais pelo facto de serem combustíveis renováveis e materiais de construção alternativos a materiais mais intensivos do ponto de vista energético.

De salientar que nem todo o carbono fica armazenado na biomassa, visto que 50% do CO_2 é absorvido pela vegetação presente na floresta, sendo usado na reparação e manutenção dos tecidos existentes, bem como na composição de novos tecidos. No entanto, o carbono presente na biomassa florestal é posteriormente transferido, sequencialmente, através de vários reservatórios (UNFCCC, 2003):

1. Da floresta para a biomassa em toros ou para a atmosfera por combustão/decomposição aeróbia dos resíduos florestais;

2. Da biomassa em toros para os produtos florestais processados ou para a atmosfera por combustão/decomposição aeróbia dos mesmos;
3. Dos produtos florestais processados para os produtos florestais finais;
4. Dos produtos florestais finais para os aterros ou para a atmosfera por combustão/decomposição anaeróbia dos produtos florestais descartados ou em fim de vida.

Ao longo destas etapas, o carbono contido na biomassa florestal é emitido para a atmosfera, essencialmente como CO₂ e CH₄, através dos processos de combustão (Equação 2) e de decomposição aeróbia e anaeróbia da mesma nos seus diferentes estados de transformação.



A Figura 12 expõe, de forma simplificada, as emissões e remoções dos GEE inerentes aos processos do setor florestal, desde a biomassa florestal até ao destino final da mesma, não estando representadas as emissões de GEE de origem fóssil associadas ao transporte de produtos florestais.

A combustão incompleta da biomassa florestal fomenta a emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) e monóxido de carbono (CO), os quais representam uma pequena porção do carbono contido na mesma. Os COVs são igualmente emitidos para a atmosfera pelas árvores, produtos florestais em uso ou em fim de vida e processos de decomposição de resíduos florestais (Dias, 2005).

No decorrer das atividades de gestão e exploração florestal, processamento industrial de biomassa, tratamento final dos resíduos industriais e dos produtos em fim de vida e transporte de biomassa, resíduos industriais e produtos florestais, ocorre a combustão de combustíveis fósseis provocando a emissão de CO₂ e outros GEE para atmosfera, como o CH₄ e N₂O (Dias, 2005), tendo este último origem em outras fontes como a combustão de biomassa e os processos de nitrificação e desnitrificação nos solos (IPCC, 2003).

As emissões evitadas relacionadas com a utilização da biomassa como combustível pelas indústrias em detrimento dos combustíveis fósseis, a reciclagem e o uso de produtos florestais em vez de produtos potencialmente mais poluentes são igualmente consideradas no balanço de carbono no setor florestal (John Perez-Garcia & Miner, 2007).

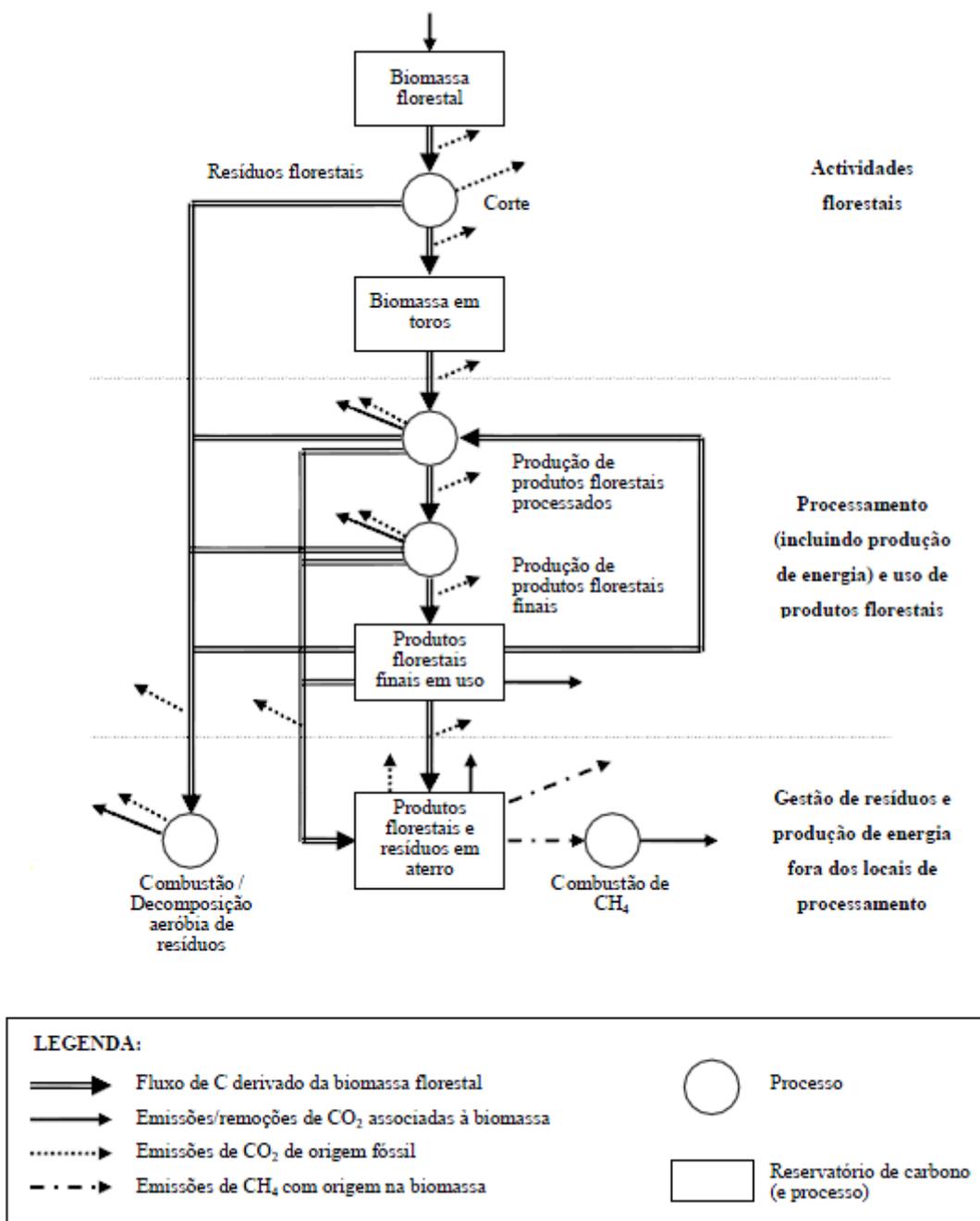


Figura 11 - Processos, reservatórios de carbono e emissões de GEE no setor florestal. (Fonte: (Dias, 2005))

De acordo com o IFN5 houve uma variação significativa no balanço de carbono na floresta portuguesa durante o período de análise de 1990 a 2005. No entanto, salienta-se o facto de esta se ter comportado como fonte de carbono no ano 1990 e como sumidouro no período de 1993 a 2002. A floresta portuguesa tem sido sempre uma fonte de carbono para

a atmosfera, desde 2003, devendo-se esta circunstância à ocorrência de incêndios florestais (Pereira, 2006). Os dados apresentados na Tabela 6 são referentes à totalidade da biomassa florestal, compreendendo a biomassa aérea e a subterrânea, disponível em Portugal Continental por espécie florestal, bem como à quantidade de carbono armazenado por espécie florestal e ao seu equivalente em CO₂. Na totalidade as florestas portuguesas armazenam cerca de 76 mil toneladas de carbono, sendo o pinheiro bravo (32,6%), o eucalipto (23,8%) e o sobreiro (22,9%), as espécies florestais mais representativas.

Tabela 6 – Biomassa florestal disponível por espécie florestal e respetivo carbono armazenado e CO₂eq, em Portugal continental (valores em kt). (Fonte: (ICNF, 2007))

Espécie dominante	Biomassa total	C armazenado total	CO₂ equivalente total
Pinheiro-bravo	49 690	24 845	91 098
Eucalipto	36 252	18 126	66 462
Sobreiro	34 925	17 463	64 029
Azinhaira	10 671	5 336	19 564
Carvalhos	6 527	3 264	11 966
Pinheiro-manso	5 325	2 663	9 763
Castanheiro	2 407	1 204	4 413
Acácias	716	358	1 313
Outras folhosas	4 989	2 495	9 147
Outras resinosas	963	482	1 766
Total	152 465	76 236	279 521

4. PELLETS

As desvantagens da biomassa como combustível alternativo aos combustíveis fósseis prendem-se essencialmente pela sua baixa densidade energética, alto teor de humidade e heterogeneidade. Neste sentido, e face à evolução tecnológica, surgem os pellets como um biocombustível sólido com uma qualidade consistente, apresentando um baixo teor de humidade, densidade energética elevada, tamanho e forma homogêneos, associada a uma menor emissão de poluentes atmosféricos no processo de combustão, composto essencialmente por biomassa densificada (Oberberger & Thek, 2010). Estes requisitos, associados a um transporte economicamente viável e a um armazenado compacto, permitem que este tipo de biocombustível seja adequado para uma ampla área de aplicação, desde salamandras e sistemas de aquecimento central até centrais termoelétricas.

A implementação de normas que regulamentam a produção e certificação de pellets teve um contributo importante para o desenvolvimento do mercado internacional e nacional deste biocombustível, permitindo aumentar a confiança dos consumidores e garantir a qualidade do produto colocado no mercado, em conformidade com os requisitos harmonizados internacionalmente e reconhecido pela indústria.

No entanto, as preocupações de segurança e saúde no decorrer das operações de produção, transporte, manuseio e armazenamento são de grande prioridade. Como qualquer material biológico, a biomassa está sujeita a decomposição aeróbia resultando na

emissão de gases, tais como CO, CO₂, CH₄ e hidrocarbonetos, sendo um motivo de preocupação durante o transporte, manuseio e armazenamento (Oberberger & Thek, 2010). Além disso, os pellets devido à sua reduzida durabilidade/resistência mecânica quando expostos ao atrito e ao impacto, podem originar uma quantidade de partículas finas considerável. Estas funcionam como combustível sendo uma potencial fonte de incêndio e de explosão, para além de prejudicarem a qualidade do ar podendo provocar problemas no sistema respiratório.

O foco deste capítulo encontra-se na produção e aproveitamento energético dos pellets de biomassa florestal, a partir das normas associadas, das matérias-primas, da cadeia logística até às tecnologias de combustão.

4.1 *Normas das Pellets*

Em particular, o mercado de pellets residenciais exige altos padrões de qualidade, pois neste setor estas são aplicadas predominantemente em equipamentos de pequena escala. Neste contexto, em alguns países já se encontra em vigor a aplicação de algumas normas que regulamentam a produção deste tipo de biocombustível, no entanto, estas diferem entre si. Relativamente ao mercado de pellets industriais, estes altos padrões de qualidade já não são exigidos, uma vez que estamos na presença de equipamentos com sistemas mais sofisticados para o controlo da combustão, tratamento de gases de exaustão e controlo do processo.

As normas demonstradas posteriormente visam a utilização de pellets em equipamentos de pequena escala, abaixo de 100 kW térmico, em que altos padrões são necessários para assegurar uma operação totalmente automatizada e sem problemas. Além disso, há outras classes de qualidade em certos países, as pellets industriais, que se destinam a ser utilizadas em equipamentos de grande escala, acima de 100 kW térmico, e possuem requisitos de qualidade mais baixos.

Neste sentido de proceder à uniformização de critérios e ao desenvolvimento de um sistema de normalização europeu único para os pellets, a Comissão Técnica 335 do Comité Europeu de Normalização tem desenvolvido uma série de normas para os biocombustíveis sólidos, abrangendo um conjunto de parâmetros. Em 2010, a publicação da norma EN

14961 referente às especificações e classes do biocombustível sólido encontra-se esquematizada da seguinte forma:

1. Requisitos gerais
2. Pellets de biomassa florestal para uso não industrial
3. Briquetes de biomassa florestal para uso não industrial
4. Estilha de biomassa para uso não industrial
5. Biomassa não processada para uso não industrial
6. Pellets de material não lenhoso para uso não industrial

A norma europeia EN 14961-1 inclui a classificação dos biocombustíveis sólidos baseada na sua origem permitindo diferenciar e especificar as matérias-primas, especificar as classes e propriedades e é dirigida a todos os grupos de consumidores. Os biocombustíveis sólidos são divididos e classificados de acordo com as seguintes categorias: biomassa de origem lenhosa, herbácea, frutícola, e combinações e misturas. Os produtos em fim de vida provenientes de operações de demolição não estão incluídos neste âmbito. As características normativas devem ser parte da especificação do biocombustível sólido de acordo com EN 14961-1, sendo os parâmetros caracterizados os seguintes:

- **Teor de Humidade** – influencia o poder calorífico do combustível e o processo de combustão, uma vez que parte da energia libertada durante o processo é consumida na vaporização da água contida nas pellets.
- **Teor de Cinzas** – influencia a produção de resíduos sólidos e a corrosão em equipamentos metálicos. Este varia consoante a função da espécie florestal e da componente da biomassa (toros, casca e folhas), para além da constituição de impurezas presentes na mesma.
- **Durabilidade Mecânica** – determina a capacidade dos pellets resistirem ao manuseamento, transporte e armazenamento.
- **Teor de Finos** – influencia a emissão de partículas finas, quando as pellets estão sujeitas ao atrito e impacto.
- **Teor de Aditivos** – influencia o processo de combustão e a emissão de gases e partículas. Normalmente funcionam como catalisadores para aumentar a eficiência de combustão.

- **Distribuição Granulométrica** – influencia o sistema de abastecimento e transporte podendo provocar o seu entupimento ou danificação e no comportamento do processo de combustão.
- **Poder Calorífico** – influencia o rendimento do processo de combustão, correspondendo à energia libertada por unidade de massa do combustível. Este varia num intervalo relativamente estreito.
- **Densidade Aparente** – influencia o transporte, o armazenamento e o processo de combustão e expressa a massa contida num determinado volume.
- **Teor de Carbono, Hidrogénio e Azoto** – influencia o poder calorífico e as emissões gasosas provenientes do processo de combustão.
- **Teor de Enxofre e Cloro** – influencia a corrosão dos equipamentos metálicos e as emissões gasosas de carácter ácido provenientes do processo de combustão.
- **Teor de Alumínio, Cálcio, Ferro, Magnésio, Fósforo, Potássio, Silício, Sódio e Tirânio** – influencia as alterações do comportamento de fusão das cinzas e a corrosão dos equipamentos metálicos.
- **Teor de Arsénio, Cádmio, Cobalto, Crómio, Cobre, Mercúrio, Manganês, Moliibdénio, Níquel, Chumbo, Antimónio, Vanádio e Zinco** – influencia as emissões gasosas provenientes do processo de combustão.
- **Determinação do comportamento de fusão das cinzas** – influencia a produção de resíduos sólidos.

As pellets de biomassa florestal são especificadas de acordo com a norma EN 14961-2 e subdivididas em 3 classes de qualidade. As pellets de Classe A1 são aquelas cuja matéria-prima provém de biomassa florestal ou de resíduos florestais sem tratamento químico, com baixo teor de cinzas, azoto e cloro, apresentando deste modo uma qualidade superior sendo aplicadas no setor de aquecimento doméstico. A Classe A2 corresponde a pellets que contêm um teor de cinzas, azoto e cloro ligeiramente superiores, sendo aplicadas maioritariamente ao setor industrial. No entanto, pode tornar-se num padrão relevante para aplicação no setor de aquecimento doméstico, logo que haja uma adaptação dos equipamentos. As pellets de acordo com a Classe B representam as pellets industriais suscetíveis de serem usadas em aplicações de grande escala. Nesta classe é permitida a inclusão de produtos lenhosos com tratamento químico ou em fim de vida, mas os valores limite para os metais pesados são bastante rigorosos mas relativamente superiores face às

restantes classes. As principais diferenças face às pellets de alta qualidade residem sobretudo ao nível do diâmetro, teor de cinzas, azoto, enxofre e cloro que se apresentam superiores.

Tabela 7 - Especificações de qualidade referentes a pellets de biomassa florestal para uso não industrial de acordo com a norma europeia EN 14961-2.

	Property class /Analysis method	Unit	A1	A2	B
Normative	Origin and source EN 14961-1		1.1.3 Stemwood 1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.1.1 Whole trees without roots 1.1.3 Stemwood 1.1.4 Logging residues 1.1.6 Bark 1.2.1 Chemically untreated wood residues	1.1 Forest, plantation and other virgin wood 1.2 By-products and residues from wood processing industry 1.3 Used wood
	Diameter, D* and Length L ^b , prEN16127	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
	Moisture, M, EN 14774-1, EN 14774-2	as received, w-% wet basis	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ash, A, EN14775	w-% dry	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
	Mechanical durability, DU, EN 15210-1	as received, w-%	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU98.5 ≥ 98,5
	Fines at factory gate in bulk transport (at the time of loading) and in small (up to 20 kg) and large sacks (at time of packing or when delivering to end-user), F, prEN 15210-1	w-% as received	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Additives ^c	w-% dry	≤ 2 w-% Type and amount to be stated	≤ 2 w-% Type and amount to be stated	≤ 2 w-% Type and amount to be stated
	Net calorific value, Q, EN 14918	as received, MJ/kg or kWh/kg	Q16.5, 16.5 ≤ Q ≤ 19 or Q4.6, 4.6 ≤ Q ≤ 5.3	Q16.3, 16.3 ≤ Q ≤ 19 or Q4.5, 4.5 ≤ Q ≤ 5.3	Q16.0, 16.0 ≤ Q ≤ 19 or Q4.4, 4.4 ≤ Q ≤ 5.3
	Bulk density, BD, EN 15103	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Nitrogen, N, prEN 15104	w-% dry	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Sulphur, S, prEN 15289	w-% dry	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
	Chlorine, Cl, prEN 15289	w-% dry	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsenic, As, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Cadmium, Cd, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chromium, Cr, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Copper, Cu, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Lead, Pb, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Mercury, Hg, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nickel, Ni, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zinc, Zn, prEN 15297	mg/kg dry	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Informative: Ash melting behavior ^d , prEN15370	°C	Should be stated	Should be stated	Should be stated	

^a Actual diameter class (D06, D08) of pellets to be stated.

^b Amount of pellets longer than 40 mm can be 1 w-%. Maximum length shall be < 45 mm.

^c Type of additives to aid production, delivery or combustion (e.g., pressing aids, slagging inhibitors or any other additives like starch, corn flour, potato flour, vegetable oil,...). Also additives which are used after production, before unloading to end-user storages, shall be stated similarly (type and amount).

^d All characteristic temperatures (shrinkage starting temperature (SST), deformation temperature (DT), hemisphere temperature (HT) and flow temperature (FT) in oxidizing conditions should be stated.

A norma EN 14961-2 pretende que haja uma harmonização e uma melhor comparabilidade de pellets de biomassa florestal a nível internacional. Com a entrada em vigor desta norma todas as normas nacionais têm de ser retiradas ou adaptadas, apesar de

algumas destas terem sido amplamente utilizadas nos últimos anos em vários países que não o de origem, como a ÖNORM M 7135 ou DINplus.

Além de normas relacionadas com a matéria-prima para pellets e análises relacionadas, bem como padrões de garantia de qualidade, há também normas e sistemas de certificação para o transporte, armazenamento e equipamentos de combustão de pellets no setor do aquecimento doméstico. Nestas áreas, os novos sistemas de certificação ENplus irão contribuir igualmente para a uniformidade, pelo menos a nível Europeu.

4.2 Caracterização Físico-química da Matéria-prima e das Pellets

A avaliação das características físico-químicas da matéria-prima e dos pellets segue um conjunto de critérios de avaliação estabelecidos com base na EN14961-2, que prevê limitações para determinadas substâncias presentes na matéria-prima, bem como nos pellets. Os requisitos básicos de combustão e da tecnologia de peletização também se encontram incorporados.

Os critérios de avaliação para possíveis matérias-primas suscetíveis de serem aplicadas no processo de peletização, bem como as características dos pellets e os efeitos associados, encontram-se sintetizados na Tabela 8. A contaminação mineral e o tamanho da estilha foram identificados e estabelecidos como parâmetros relevantes para a matéria-prima. Os seguintes parâmetros relativos ao teor de aditivos biológicos, humidade, cinzas, poder calorífico, carbono, hidrogénio, oxigénio, azoto, enxofre, cloro, conteúdo volátil, cinzas e metais pesados enquadram-se como sendo significativos para caracterizar os pellets e a matéria-prima. As dimensões, densidade de partículas, durabilidade mecânica e densidade energética são parâmetros importantes restritos para os pellets. A limitação adequada e os valores limite foram definidos para os parâmetros mencionados e foram utilizados como critérios de avaliação para diferentes matérias-primas e pellets produzidos a partir destas.

Qualquer tipo de biomassa lenhosa pode ser empregue como matéria-prima para o processo de peletização, apesar de a sua utilização ser muitas vezes limitada a biomassa proveniente de coníferas, formalizando a norma estabelecida. A produção de pellets com

origem em biomassa folhosa depara-se com alguns obstáculos ao nível do processo, não apresentando uma qualidade tão alta, especialmente no que diz respeito à durabilidade mecânica derivada do menor teor de lignina deste tipo de biomassa. Atendendo ao teor de cinzas estabelecido segundo a EN 14961-2 para pellets de Classe A1 será improvável ao processamento deste tipo de biomassa. A mistura de matérias-primas pode permitir a utilização de uma variedade de biomassa para a produção de pellets, tendo a estilha e serrim que se acumulam na indústria de processamento de biomassa uma grande representatividade. Outras matérias-primas da indústria de processamento de biomassa, tais como costaneiros, ou de silvicultura, como fragmentos de biomassa florestal, até mesmo a culturas energéticas de curta rotação adequam-se para a produção de pellets, sendo previamente processadas (Oberberger & Thek, 2010).

Relativamente à aplicação de biomassa herbácea no processo de fabrico de pellets, contempla alguns problemas associados às suas características específicas (altos teores de cinzas, azoto, enxofre e cloro, e baixo ponto de fusão de cinzas) tornando esta inadequada à produção de pellets. A resolução destes passaria por uma abordagem que envolve a mistura deste tipo de biomassa com biomassa lenhosa. Além disso, o uso de aditivos inorgânicos, tais como hidróxido de alumínio, caulim, óxido de cálcio ou calcário pode influenciar positivamente o comportamento de fusão de cinzas (Oberberger & Thek, 2010).

A adição de aditivos biológicos naturais decorrentes da agricultura primária e silvicultura permite a melhoria da qualidade dos pellets e otimização de produção das mesmas. Algumas substâncias provenientes da agricultura primária e florestal são empregadas com sucesso como agentes aglutinantes na peletização (por exemplo, o milho ralado, amido de milho e farinha de centeio). No entanto, os efeitos deste tipo de materiais como aditivos biológicos ainda não foram totalmente examinados (Oberberger & Thek, 2010).

Pellets

Tabela 8 - Resumo dos critérios de avaliação para possíveis matérias-primas para peletização, características dos pellets e efeitos associados (Fonte: (Oberberger & Thek, 2010)).

Parameter	Unit	Limiting / guiding value	Relevance	Effect / comment
Length	mm	< 40	P	Choice of conveying and combustion technology; danger of blockings caused by overlengths; burnout time
Bulk density	kg/m ³	> 600	P	Energy density; transport and storage costs
Particle density	kg/dm ³	> 1.12	P	Burnout time; bulk density
Mechanical durability	wt. % (d.b.)	> 97.5	P	Conveying behaviour; dust emissions; transport losses
Content of natural binding agents	wt. % (d.b.)	h	R/P	Especially starch, fats and lignin of relevance; durability of pellets; throughput and economy of pelletisation; adding starch containing biological additives of up to 2 wt. % (w.b.) is allowed according to prEN 14961-2
Moisture content	wt. % (d.b.)	8 - 12 < 10	R P	Suitability for pelletisation, durability of pellets; depends on the raw material; raw materials with higher moisture content have to be dried
Ash content	wt. % (d.b.)	0.7	R/P	Operational comfort; increased risk of slagging in the furnace
GCV	MJ/kg (d.b.)	h	R/P	Plant dimensioning and control; depends only on the raw material used; can not be influenced
NCV	MJ/kg (w.b.)	h	R/P	Plant dimensioning and control; energy density
Energy density	MJ/m ³	h	P	Plant dimensioning and control; transport and storage capacity
Carbon, hydrogen and oxygen content	wt. % (d.b.)		R/P	GCV and NCV; depends only on the raw material used; can not be influenced
Volatiles	wt. % (d.b.)		R/P	Thermal decomposition; combustion behaviour; depends only on the raw material used; can not be influenced
Nitrogen content	wt. % (d.b.)	0.3 ¹⁾	R/P	Indicator for prohibited substances; increased NO _x emissions
Sulphur content	wt. % (d.b.)	0.03 ¹⁾	R/P	Indicator for prohibited substances; increased risk of corrosion and SO _x emissions
Chlorine content	wt. % (d.b.)	0.02 ¹⁾	R/P	Indicator for prohibited substances; increased risk of corrosion and HCl, Cl ₂ and PCDD/F emissions
Content of relevant ash forming elements	wt. % (d.b.)		R/P	Ca, Mg, Si, K and P of relevance; influence ash melting behaviour and therefore reliability of the plant; Ca and Mg increase, K decreases the ash melting point; K influences aerosol formation; elevated Si and P concentrations in combination with K may cause slagging
Heavy metal content	wt. % (d.b.)	l	R/P	Ash quality; ash utilisation; fine particulate emissions; indicator for prohibited substances; Zn and Cd particularly relevant for wood fuels
Mineral contamination	wt. % (d.b.)	l	R	Decrease NCV, increase ash content and wear in the pellet mill
Particle size	mm	< 4	R	Absolutely necessary for pelletisation; guiding value is approximately equivalent to the grain size of sawdust; raw materials with bigger particle size have to be ground

4.3 Cadeia Logística de Biomassa para Pellets

A cadeia de valorização energética de biomassa para pellets típica inclui os seguintes processos: exploração, produção e distribuição.

O processo de exploração da biomassa florestal, abrange um conjunto de operações florestais que visam o cultivo, recolha e transporte de biomassa para fornecimento às unidades de produção. Relativamente a este processo e considerando o objeto do presente trabalho, centra-se a análise nas duas últimas operações. De salientar que uma pequena percentagem da biomassa provem de indústrias de transformação de madeira.

A cadeia logística subjacente ao processo de transformação da biomassa encontra-se estruturada em três grandes componentes: pré-tratamento, processamento e pós-tratamento.

O processo de distribuição, consiste no carregamento e transporte dos pellets para os consumidores finais ou intermediários.

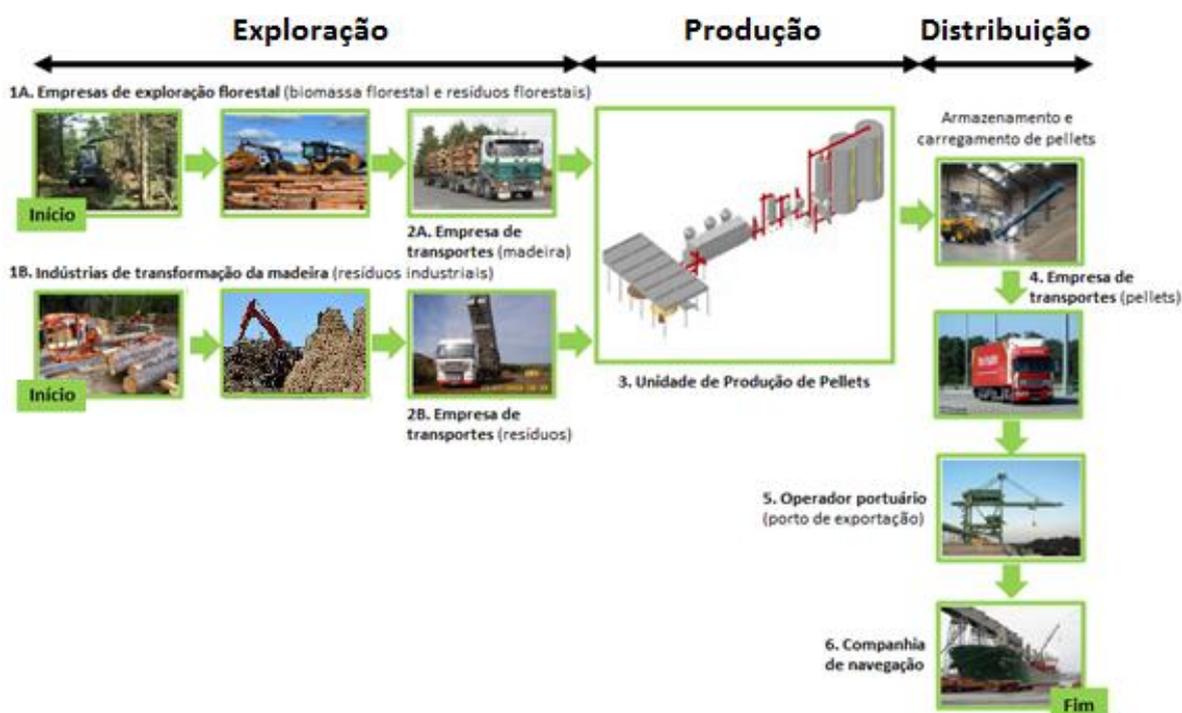


Figura 12 - Cadeia logística de biomassa para pellets (Fonte: Adaptado de (Bioenergy Portugal, n.d.)).

Normalmente as entidades envolvidas na cadeia logística de biomassa para pellets compreendem empresas de exploração florestal e de transportes, indústrias de

transformação de madeira, unidades de produção de pellets, operadores portuários e companhias de navegação.

De seguida, serão analisados pormenorizadamente todas as operações que envolvem os processos da cadeia de valorização energética de biomassa para pellets.

Exploração Florestal

Neste contexto, um sistema de exploração de biomassa florestal pode ser compreendido como um conjunto de operações florestais desenvolvidas com o intuito de abastecer uma unidade transformadora. Ao longo das últimas décadas tem-se assistido a uma diversificação e evolução das tecnologias e técnicas utilizadas neste processo. A escolha mais apropriada destas está condicionada por diversos fatores, que são ponderados numa ótica de eficiência económica, entre os quais se destacam: a densidade e dispersão da biomassa, o tipo de povoamento, as características físicas do terreno e dos centros de consumo, o estado de conservação da rede viária e os impactes ambientais associados.

As cinco operações fundamentais numa exploração florestal encontram-se de seguida descritas e ocorrem de forma sequencial:

1. **Abate** – Compreende o corte das árvores, o mais perto do solo possível, para que as operações seguintes sejam facilitadas. Esta operação pode ser efetuada manualmente ou mecanicamente, com recurso a motosserras ou a *Harvester*, respetivamente.
2. **Processamento** – Operação que inclui o corte dos ramos, toragem e descasque das árvores abatidas, realizada com o objetivo de comercialização da madeira. O corte dos ramos consiste na eliminação dos ramos e da bicada após o abate da árvore. Na toragem, procede-se ao seccionamento transversal dos troncos abatidos, através de cortes perpendiculares ao seu eixo, e no descasque a casca da árvore abatida é removida. Nesta operação é aplicado o mesmo tipo de equipamentos que na operação de abate.
3. **Transporte primário** – Conjunto de duas operações, a recheia e a extração. A extração implica a movimentação do material lenhoso para junto de uma via principal, ficando o mesmo empilhado em áreas específicas, denominadas de carregadouros. Esta pode incluir uma fase inicial de recheia, na qual o material que se encontra disperso pelo local de abate, é deslocado e concentrado junto aos trilhos

de extração e posteriormente transferido para o carregadouro. O transporte primário deve ser efetuado por veículos adaptados às necessidades do trabalho que realizam, sendo que os mais utilizados são o trator arrastador ou rechegado, o trator agrícola equipado com grua e reboque, o trator transportador e o Forwarder. Estes veículos são caracterizados por possuírem uma estrutura robusta devido às cargas que transportam, e também por se deslocarem frequentemente em terrenos com declive acentuado ou sem trilhos.

4. **Transporte Secundário** – Nesta fase, o material acumulado nos carregadouros é colocado em veículos de transporte, normalmente camiões de 80 m³, para ser conduzido a um interposto ou a uma unidade industrial.
5. **Armazenamento** – O material transportado pelos camiões é armazenado num interposto nas proximidades ou na área subjacente à unidade de produção, para facilitar o abastecimento.

O método de exploração de biomassa florestal em natureza consiste na realização destas cinco operações sem que a biomassa passe por nenhum tipo de pré-tratamento. Atualmente este método é cada vez menos viável, devido aos custos associados ao transporte, uma vez que em termos de peso de carga suporta menores quantidades face a outros métodos. Deste modo, o transporte de biomassa em natureza numa ótica económica deve apenas ocorrer em situações de distâncias muito reduzidas, compreendidas entre 10 a 15 km, entre o local de exploração e os destinos finais ou intermédios. A seguinte figura

ilustra o sistema de exploração de biomassa florestal em natureza.

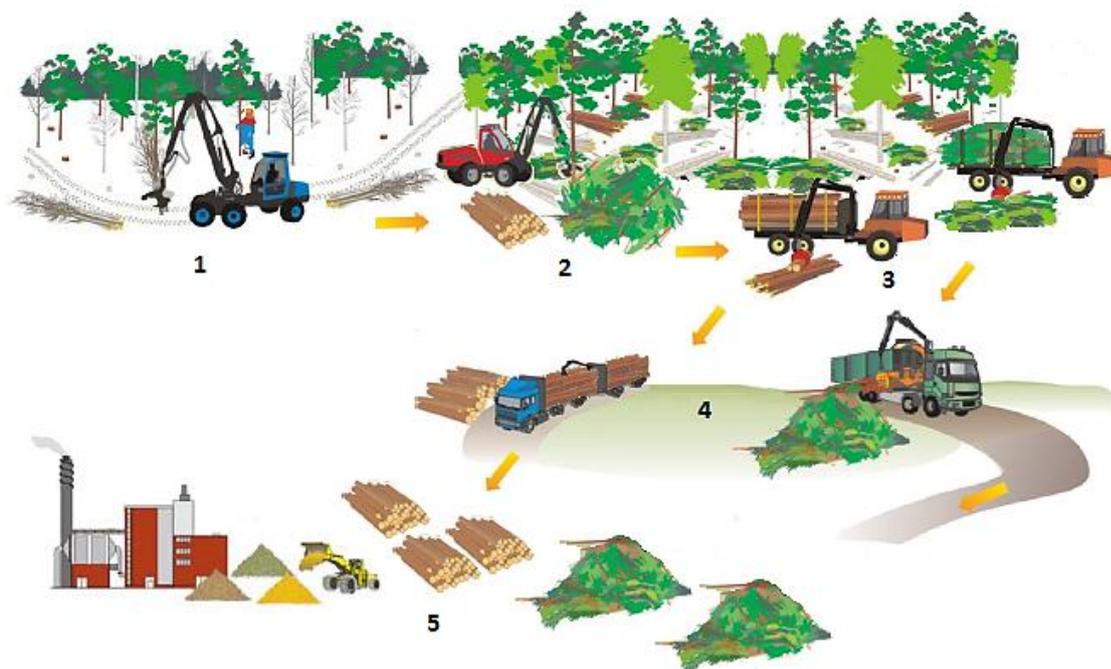


Figura 13 - Sistema de exploração de biomassa florestal em natureza (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004)).

De modo a obter um biocombustível sólido homogêneo adequado ao sistema de transformação de biomassa, torna-se imprescindível a inserção da operação de pré-tratamento no processo de exploração florestal. Esta apresenta como principais benefícios:

1. Redução dos custos de operação e de manutenção, utilizando um biocombustível adequado ao funcionamento de um sistema de transformação de biomassa em pellets;
2. Redução dos custos associados ao transporte, armazenamento e processamento, através do incremento da densidade da biomassa florestal;
3. Redução do teor de humidade, das impurezas e partículas contidas no biocombustível, aumentando a sua qualidade;
4. Melhorar a eficiência de conversão e minimizar os problemas técnicos;
5. Redução dos impactes ambientais (Loo et al., 2008).

A operação de pré-tratamento consiste basicamente na produção de estilha e pode ser realizada segundo três métodos distintos, no povoamento, no carregadouro, ou na unidade industrial, estando posicionados distintamente ao longo da cadeia logística.

Geralmente os dois métodos iniciais estão associados ao pré-tratamento de resíduos florestais enquanto o último abrange o pré-tratamento destes e da biomassa florestal.

No caso de o pré-tratamento ser efetuado no povoamento, depois da recheia, os resíduos florestais são recolhidos e sujeitos ao processo de estilhagem no local de abate. Este será executado por um estilhador dotado de grande mobilidade e de uma grua, preparado para laborar e simultaneamente movimentar-se na floresta, o qual se encontra equipado com um contentor de 15 a 20 m³. A estilha é acumulada no contentor, que uma vez cheio é levado para o carregadouro. Nesta altura a estilha é descarregada dos contentores, e transferida para os camiões de grande capacidade, responsáveis pelo transporte para a unidade final ou intermédia. Neste método de tratamento o custo de deslocação das máquinas é reduzido o que possibilita a viabilidade económica em terrenos de menores áreas e com bons acessos viários. No entanto, implica que o estilhador utilizado seja leve e móvel, o que proporciona uma menor potência e estabilidade. A eficiência de funcionamento deste tipo de estilhador exige um terreno de baixo declive e uma deslocação a uma velocidade lenta. A seguinte figura ilustra o método de pré-tratamento de resíduos florestais efetuado no povoamento.

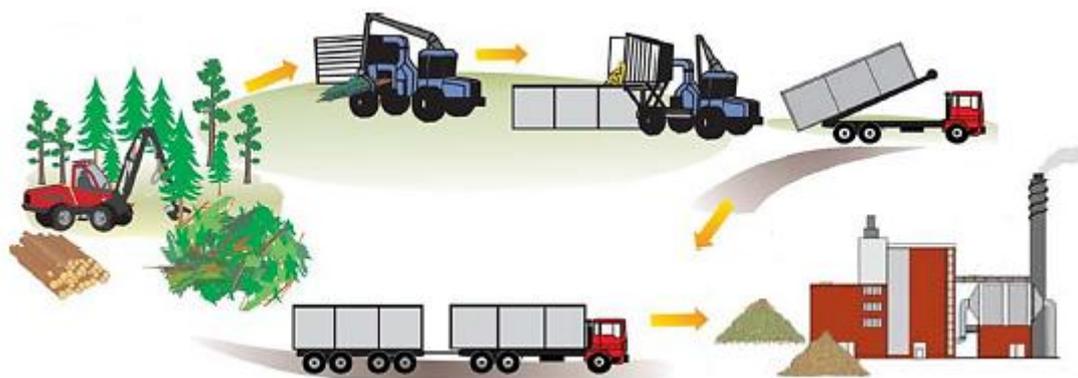


Figura 14 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no povoamento (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004).

Quando o processo de estilhagem ocorre no carregadouro, depois da extração, os resíduos florestais são acoplados em pilhas de 4 a 5 metros e posteriormente processados por um estilhador dando origem à estilha. Este é alimentado por tratores adaptados usados em trabalhos de pequena dimensão e, normalmente, quando o processo de estilhagem é de dimensões maiores utiliza-se camiões dotados de uma grua. Por fim a estilha sai do

Pellets

estilhador diretamente para o reboque do camião, com um volume de aproximadamente 80 m³, e é transportada para a unidade de produção. Os estilhadores fixos são fiáveis, com uma disponibilidade técnica e um tempo de vida elevados, e por norma, apresentam uma maior potência e eficiência relativamente aos estilhadores móveis. Este método apresenta desvantagens relativamente ao tempo de operação, porque necessita que os resíduos florestais sejam carregados, transportados e descarregados no carregadouro. A dependência do estilhador com a presença de um camião resulta na redução da eficiência operacional, isto é, uma parte considerável do tempo operacional é desperdiçada durante o tempo de espera, que depende da capacidade do estilhador e do transporte de estilha pelo camião. É também necessário dispor, no carregadouro de uma área suficientemente grande, para receber os resíduos florestais, a maquinaria de estilhaçamento e, para permitir as manobras do camião de carga e descarga. A seguinte figura ilustra o método de pré-tratamento de resíduos florestais efetuado no carregadouro com recurso a um estilhador fixo.



Figura 15 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no carregadouro, com recurso a um estilhador fixo (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004).

De modo a otimizar o tempo de operação, surge a possibilidade deste método de tratamento ser efetuado por um estilhador acoplado ao camião, dotado de uma grua, que processa a estilha movimentando-a diretamente para o reboque e, em seguida, esta é transportada para a unidade de produção. Este tipo de camião apresenta uma capacidade de carga menor e é utilizado para movimentações de curtas distâncias. A seguinte figura ilustra o método de pré-tratamento de resíduos florestais efetuado no carregadouro com recurso a uma estilhador acoplado ao camião.



Figura 16 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado no carregadouro, com recurso a um estilhador acoplado ao camião (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004).

Por fim, no método de estilhagem de biomassa florestal e de resíduos florestais numa unidade industrial o processamento ocorre em final de linha, isto é, num parque de pré-tratamento ou na própria unidade de produção. Neste caso, a disponibilidade técnica e operacional do equipamento aumenta o controlo do processo de aquisição de biomassa, o tempo de operação diminui e o controlo da qualidade da estilha é melhorado. O equipamento aplicado consiste em estilhadores fixos, robustos e estáveis, possibilitando a estilhagem de todos os tipos de biomassa. No entanto, estes requerem sempre equipamentos de apoio que efetuem a sua alimentação e a movimentação da biomassa no parque. Este processo acarreta elevados custos de transporte, uma vez que a biomassa chega em natureza ocupando um grande volume, necessitando assim de uma frota maior de veículos transportadores. De modo a otimizar o transporte e armazenamento foi desenvolvida maquinaria específica para aumentar a densidade dos resíduos florestais. Neste sistema, os resíduos florestais entram numa enfardadeira, sendo compactados e atados em fardos. Estes posteriormente são transportados para o carregadouro com recurso a uma Forwarder, sendo o transporte para a unidade industrial realizado por um camião convencional. A utilização de terminais de acumulação e processamento do material pode também ser vista como vantajosa. Além de reduzir a área necessária ao armazenamento, aumenta as possibilidades logísticas de otimização e distribuição. Isto significa que o material adequado pode ser entregue onde é mais necessário e no prazo imposto, o que torna o método mais flexível face a alterações nas necessidades de abastecimento. A seguinte figura ilustra o método de pré-tratamento de biomassa florestal e resíduos florestais efetuado numa unidade industrial.

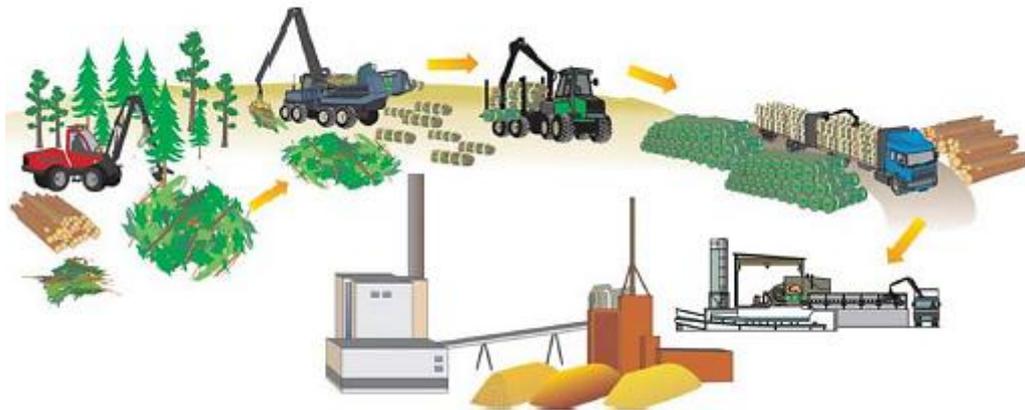


Figura 17 - Sistema de exploração florestal baseado no pré-tratamento efetuado numa unidade industrial (Fonte: Adaptado de (Hakkila, 2004)).

Produção

Na produção de pellets o processo envolvido é o da densificação de biomassa que consiste, na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem a adição de ligantes ou tratamento térmico. No entanto, a biomassa que serve como matéria-prima requer tratamento ao longo da linha de produção para que reúna as condições necessárias ao processo de densificação. O produto gerado, os pellets, necessita igualmente de tratamento para que sejam obtidas, conservadas e conferidas as especificações técnicas pretendidas.

A linha de produção de pellets é constituída por vários componentes, direcionados para uma determinada operação, conectados entre si de modo a obter-se um ciclo de produção. Esta pode ser dividida em várias operações, sendo integral ou parcialmente automatizada e de acordo com as necessidades do produtor.

O diagrama seguinte representa a sequência de operações numa unidade típica de produção de pellets a laborar em Portugal.

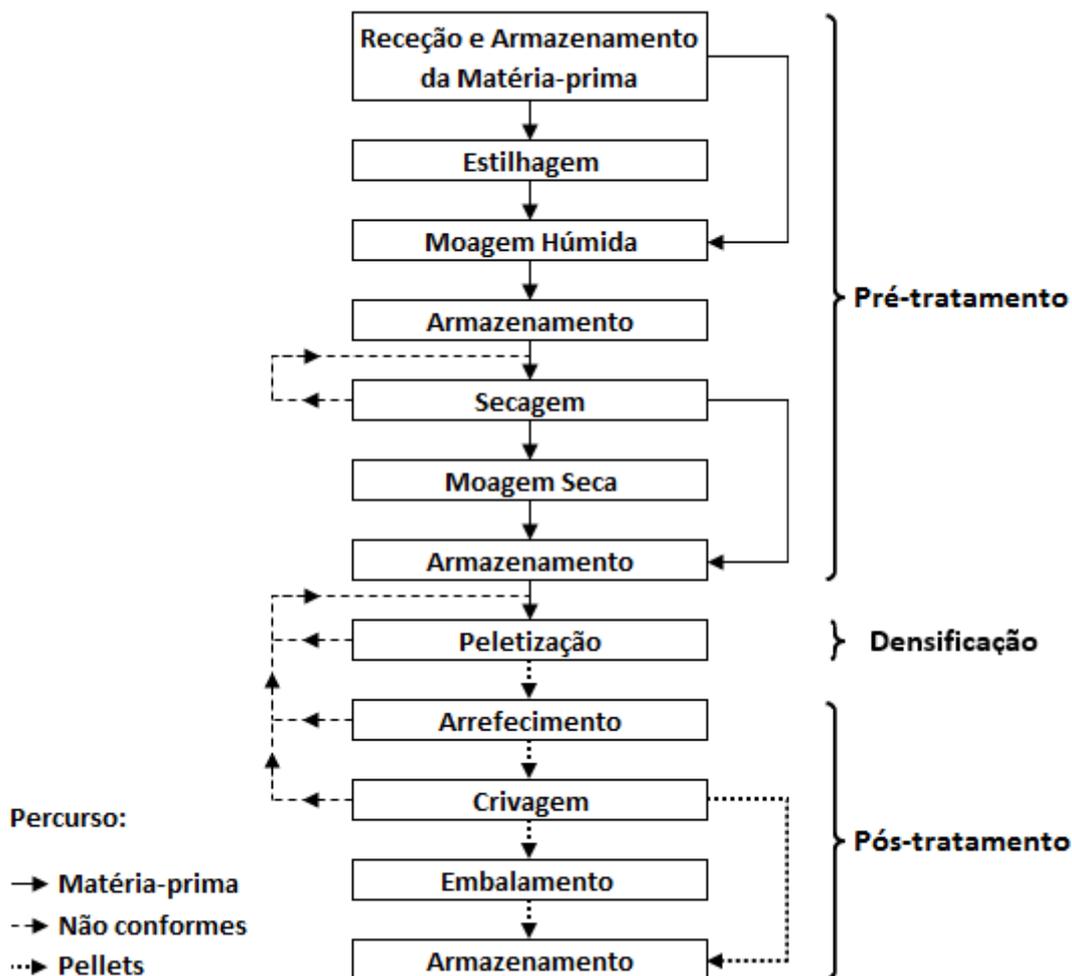


Figura 18 - Diagrama sequencial das operações de uma linha de produção de pellets.

Deste modo, serão descritos sequencialmente neste item as principais operações constituintes de uma linha de produção de pellets.

1. *Receção e Armazenamento da Matéria-prima*

A matéria-prima aquando da sua receção antes de ser descarregada dos camiões semi-reboque, passa por uma balança de pesagem, posteriormente uma grua acoplada ao camião ou um carregador frontal equipado com uma pá ou grua deposita-a no parque de armazenamento, que permite assegurar a existência de stocks de matéria-prima. A figura seguinte ilustra os meios utilizados na recepção e armazenamento da matéria-prima.



Figura 19 - Receção e armazenamento da matéria-prima no parque de armazenamento (Fonte: (Fernando Fernandes & Irmão, 2012; Florestal, 2013)).

A matéria-prima rececionada pode entrar em bruto ou em forma de estilha, dependendo da sua origem. Caso a matéria-prima seja proveniente da exploração de biomassa florestal segue para operação de estilhagem, se chegar em bruto, ou para a operação de moagem, se chegar em forma de estilha. Os subprodutos provenientes de transformação primária da madeira podem chegar em forma de estilha, sendo introduzida diretamente na operação de moagem, ou em forma de aparas, de costaneiros ou de outros isentos de produtos químicos, sendo sujeitos à operação de estilhagem.

Geralmente a biomassa florestal que chega em bruto e é utilizada como matéria-prima no fabrico de pellets sendo denominada por madeira de rolaria. No processo de secagem da matéria-prima necessária ao fabrico de pellets, a biomassa florestal residual e os resíduos de madeira provenientes da indústria transformadora, são a principal fonte energética.

2. Estilhagem

A estilhagem pressupõe o processamento da biomassa florestal em bruto e tem por função a produção de um produto final padronizado, designado de estilha. Esta operação de pré-tratamento, abordada anteriormente, pode efetuar-se no povoamento, no carregadouro ou na unidade de transformação.



Figura 20 - Exemplo de um estilhador de martelos. (Fonte: (Enerpellets, 2013a))

De acordo com o mercado existem duas tipologias de processamento: a estilhagem por facas e por martelos. O primeiro é mais adequado para materiais homogéneos como árvores inteiras ou madeira de rolaria e o segundo permite o processamento de matéria-prima heterogénea, sendo o mais eficaz para os resíduos florestais. Normalmente, consistem num sistema de alimentação onde é introduzida a matéria-prima manipulada por um carregador frontal equipado com uma pá ou grua, entre o parque de armazenamento e o equipamento, num sistema de trituração e num sistema de descarga.

O funcionamento de um estilhador de facas consiste na movimentação do tapete rolante proporcionando o movimento rotacional dos toros alimentando desta forma o tambor do estilhador, onde os dispositivos de corte procedem à estilhagem do material lenhoso.

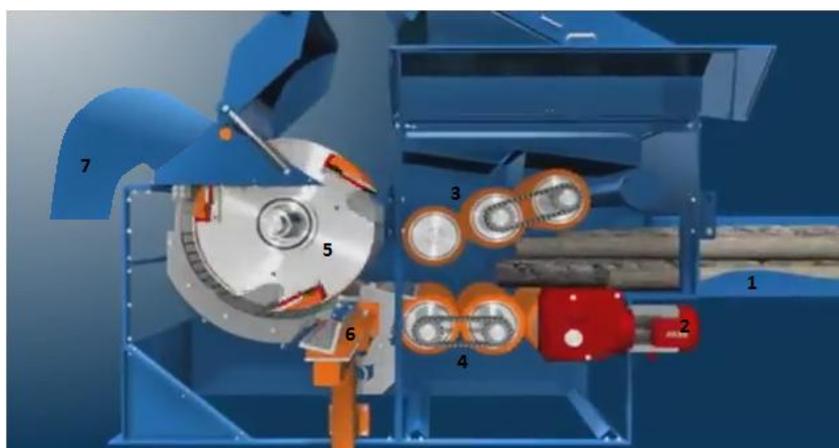


Figura 21 - Esquema de um estilhador de facas. 1 – Tapete rolante de alimentação; 2 – Motor e engrenagem; 3 – Rolos superiores de alimentação; 4 – Rolos inferiores de alimentação; 5 – Tambor com dispositivos de corte; 6 – Sistema de segurança; 7 – Sistema de descarga. (fontes: (Wood Fisrt, 2013b))

Os princípios de laboração de um estilhador de martelos são em tudo similares ao do estilhador de facas, sendo que a única diferença reside na existência de um dispositivo de destroçamento mecânico, os martelos, face a um dispositivo de corte, as facas.

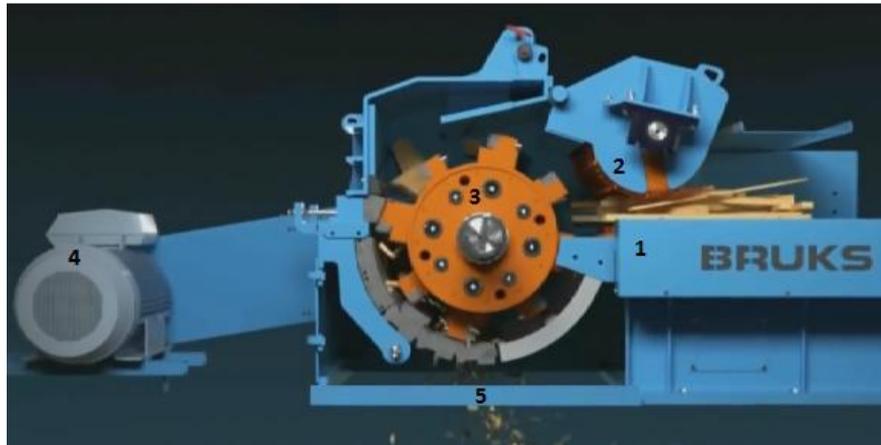


Figura 22 - Esquema de um estilhador de martelos. 1 – Tapete rolante de alimentação; 2 – Rolo superior de alimentação; 3 – Tambor com dispositivos de destroçamento; 4 – Motor e engrenagem; 5 – Sistema de descarga. (Fonte: (Wood Fisrt, 2013b))

Geralmente, a estilha gerada segue posteriormente para a operação de moagem por um transportador sem fim.

3. *Moagem Húmida*

A operação de moagem compreende, particularmente, a diminuição do tamanho e homogeneização na uniformização da matéria-prima. Esta é realizada com auxílio a um conjunto de moinhos de martelos fixos, cuja quantidade está relacionada com a capacidade de produção da unidade fabril, que funcionam por meio de um motor elétrico.



Figura 23 - Exemplo de um moinho de martelos (Fonte: (HAMMERMILL, n.d.)).

Estes equipamentos são destinados vulgarmente à trituração de partículas de tamanho médio ou reduzido e permitem a sua incorporação em linhas automáticas de moagem sem qualquer tipo de intervenção manual. Normalmente carece de equipamentos adicionais como seja o sistema de aspiração e outros por forma a garantir a permanente limpeza e exaustão do produto triturado. A estrutura de um moinho de martelos comporta basicamente um rotor formado por vários discos acoplados a um eixo que por sua vez, são interligados por pinos e estes sustentam os martelos. Lateralmente, o rotor é envolvido por crivos internos, cujos diâmetros dos orifícios são pré-determinados de acordo com a necessidade de granulometria do produto a ser moído. A operação inicia-se com a introdução, com recurso a um transportador sem fim, da biomassa em forma de estilha na câmara do rotor onde ocorre o primeiro contacto com os martelos. As partículas de biomassa ao serem sujeitas ao impacto, gerado pelos martelos, são projetadas contra os crivos e essa sequência continua até que as partículas ostentem uma granulometria, aproximadamente inferior a 1mm, que permita a sua passagem através dos orifícios dos crivos.

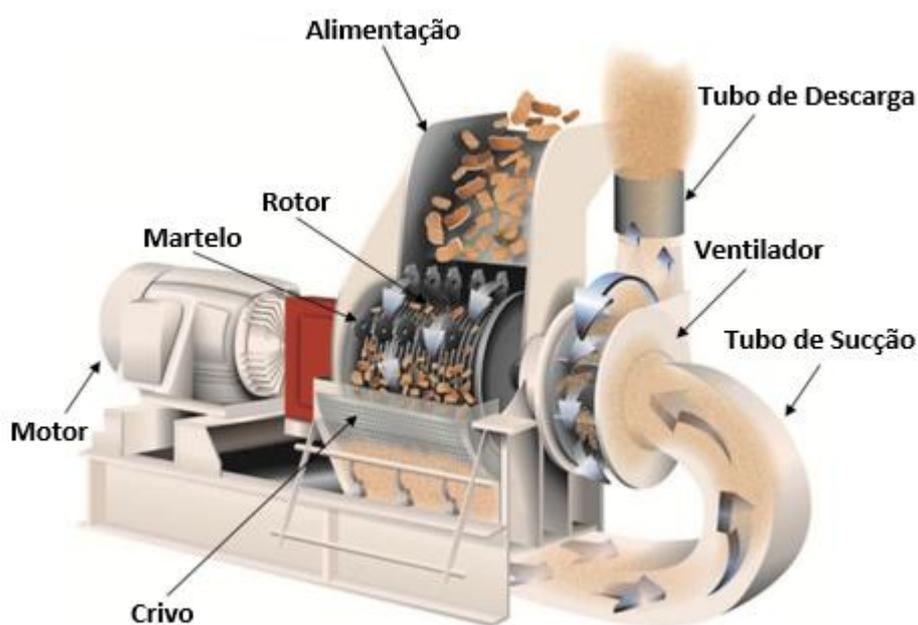


Figura 24 - Esquema do funcionamento de um moinho de martelos. (Fonte: (HAMMERMILL, n.d.))

Sensivelmente 2 a 3% do teor de humidade presente na matéria-prima é removido nesta operação, face ao aquecimento progressivo do material constituinte do moinho de martelos no decorrer do seu funcionamento.

A homogeneização da biomassa tem como finalidade obter um material com características constantes dado que, o mercado é exigente e as normas assim o obrigam. Desta forma, o material deve apresentar uma superfície extremamente lisa e muito resistente à abrasão, brilhante, sem fendas para assim evitar a formação de pó de forma a facilitar a realização das operações seguintes, pelo que deve possuir uma boa resistência mecânica e ser de fácil conservação.

Após esta operação, a matéria-prima movimenta-se por meio de transportadores sem fim para os silos, equipados com fundos móveis destinados ao armazenamento e alimentação automática, para posteriormente se proceder à operação de secagem.

Da produção total de estilha aproximadamente 10 a 20% é utilizada como fonte de combustível na fornalha no processo de secagem, sendo a restante percentagem correspondente à matéria-prima dedicada para a produção de pellets. De salientar, que a estilha aplicada em cada situação provém de origens diferentes, biomassa florestal e biomassa florestal residual ou indústrias transformadoras de madeira, sendo a primeira usada como matéria-prima e a segunda como combustível.

4. Secagem

No processo de densificação de biomassa para a produção de pellets há a necessidade de reduzir o teor de humidade existente na matéria-prima para a ordem dos 8 a 12%, antes de seguir para a operação de peletização. Normalmente, a matéria-prima adquirida pela unidade de produção apresenta um conteúdo de humidade de cerca de 50%, sendo necessário a implementação de um sistema de secagem que permita um decréscimo da humidade, antes de a matéria-prima prosseguir para as operações seguintes.

Num sistema de secagem podem ser utilizados vários tipos de secadores: de leito fluidizado, rotativo, ciclónico ou de esteira. No entanto, o secador mais aplicado é o secador rotativo que dependendo das suas características, procede à secagem da matéria-prima por meio de um fluxo contracorrente e contínuo de ar quente. Ao apresentar um mecanismo de funcionamento contínuo e integrado não requer qualquer operação humana durante o seu funcionamento.

Este tipo de secador é constituído por um tambor cilíndrico rotativo, disposto de forma horizontal ou ligeiramente inclinada, que gira em torno de um eixo longitudinal, onde circula o caudal de matéria-prima e o caudal de gases quentes. O abastecimento de matéria-prima para o secador é efetuado com recurso a um transportador sem fim. No interior das paredes do tambor cilíndrico encontram-se suspensores, dispostos axialmente com dimensões e geometrias diversas. Estas estruturas são responsáveis pela ascensão e queda da matéria-prima ao longo do tambor. Durante a fase de queda, a matéria-prima entra em contacto com o fluxo de ar quente sofrendo deste modo a secagem e aquecimento por convecção. O ciclo de ascensão e queda da matéria-prima e o fluxo contracorrente de ar quente proporcionam um elevado grau de mistura das partículas de biomassa, uma elevada taxa de transferência de calor e de massa e uma boa uniformização.

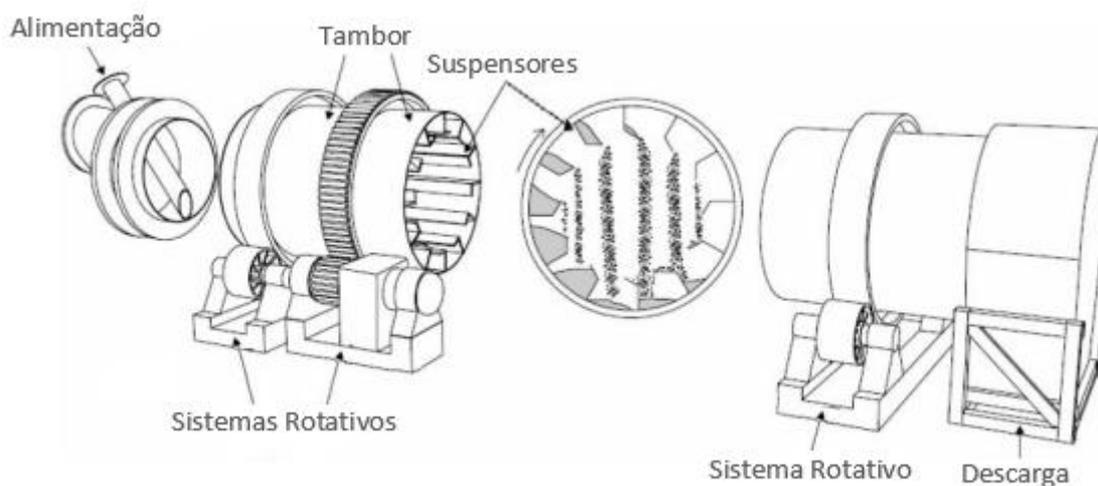


Figura 25 - Imagem representativa do secador rotativo (Fonte: (Fernandes, 2008)).

O controlo e monitorização automática e contínua na saída do produto, através de um higrómetro de precisão, garantem a obtenção de um produto com a humidade pretendida e com fiabilidade.

Uma vez seca, a matéria-prima presente no fluxo de ar ingressa num conjunto de ciclones à saída do secador, por meio de uma conduta, cujo número depende da capacidade de produção da unidade. Estes equipamentos têm como finalidade remover as partículas presentes no fluxo de ar, através da força centrífuga e consistem num corpo cilíndrico com uma entrada tangencial, uma base cónica, uma abertura inferior para a descarga das partículas recolhidas e uma abertura superior para a saída do ar limpo. O efluente gasoso dentro do ciclone de fluxo invertido geralmente descreve um movimento em duplo vórtice, ou seja, um descendente, localizado numa posição exterior e outro ascendente, localizado

numa posição interior. O fluxo de ar com material particulado entra tangencialmente pela parte superior do ciclone, onde é forçado a descrever uma trajetória em espiral de acordo com a forma do corpo do ciclone, promovendo o vórtice descendente e originando forças centrífugas que atuam sobre as partículas, sendo obrigado a contrair na zona cônica inferior. Deste modo, ocorre a inversão do sentido do fluxo antes de atingir a base, formando uma segunda espiral, em sentido oposto, desenvolvendo o vórtice ascendente, que corresponde à trajetória do ar de extração que é direcionado para a conduta de saída superior. O ar de extração é constituído essencialmente por gases quentes que são expelidos através da conduta e da chaminé para a atmosfera em forma de vapor de água, devido à transformação de calor por convecção natural. As partículas são projetadas contra a superfície interna do ciclone pela força centrífuga e perdem parte da sua energia cinética, promovendo a separação entre estas e o fluxo de ar e uma trajetória descendente imposta pela força da gravidade, sendo posteriormente extraídas pela abertura inferior localizada na parte cônica. Este fenómeno pode ser observado na seguinte imagem.

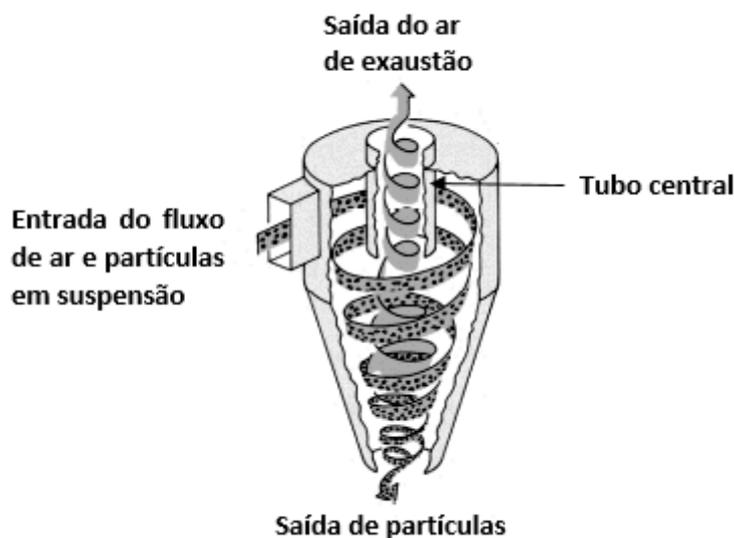


Figura 26 - Escoamento gasoso e trajeto efetuado pelas partículas num ciclone de entrada tangencial e de fluxo invertido (Fonte: Adaptado de (Soler & Palau, 2013)).

Numa fase posterior, através de um transportador ou elevador sem fim, a matéria-prima proveniente dos ciclones segue um de três percursos obrigatórios, para o secador se não cumprir com os requisitos de humidade, para um moinho de martelos refinadores se constar na linha de produção da unidade ou para os silos de armazenamento.

A escolha deste tipo de secador prende-se com o facto de este se destacar pela sua simplicidade, baixo custo de operação e versatilidade quando comparado com outros tipos de secadores.

O secador necessita de um equipamento para produzir o fluxo de ar quente, a fornalha, onde ocorre a combustão da biomassa florestal residual gerando temperaturas na ordem dos 800°C a 1000°C. A fornalha é fabricada em estrutura metálica com revestimento térmico e refratário, composta basicamente por cinco elementos fundamentais, o sistema de alimentação do combustível, a câmara de combustão primária, o sistema de ar secundário, a câmara de combustão secundária e o sistema de descarga de cinzas.

Na parte frontal da fornalha encontra-se acoplado um sistema de alimentação, que introduz automaticamente o combustível conforme a necessidade de calor e gases para o secador, sendo o fornecimento realizado por ação da gravidade através de um transportador sem fim.

O movimento do combustível no interior da câmara de combustão primária efetua-se com recurso a grelhas inclinadas, móveis e mecanizadas, no decorrer do qual o combustível inicialmente sofre uma redução no teor de humidade, seguindo-se a ignição e combustão, e por fim um arrefecimento durante a remoção das cinzas. A injeção do ar primário ocorre pela parte inferior da grelha, sendo normalmente separado em secções, permitindo o controlo de quantidades específicas de ar nas diferentes secções da grelha. As cinzas remanescentes da combustão vão caindo através dos orifícios das grelhas, ficando depositadas nos reservatórios abaixo destas, sendo as restantes cinzas recolhidas de forma automática na secção final da grelha, e a matéria volátil é carbonizada no espaço imediatamente acima da grelha. O sistema de fornecimento de ar secundário permite a formação de zonas de recirculação ou de fluxos circulares, criando diferentes ambientes de combustão. Deste modo, favorecendo uma melhor mistura entre o combustível e o comburente, possibilitando a otimização do gás de combustão e a redução das emissões.

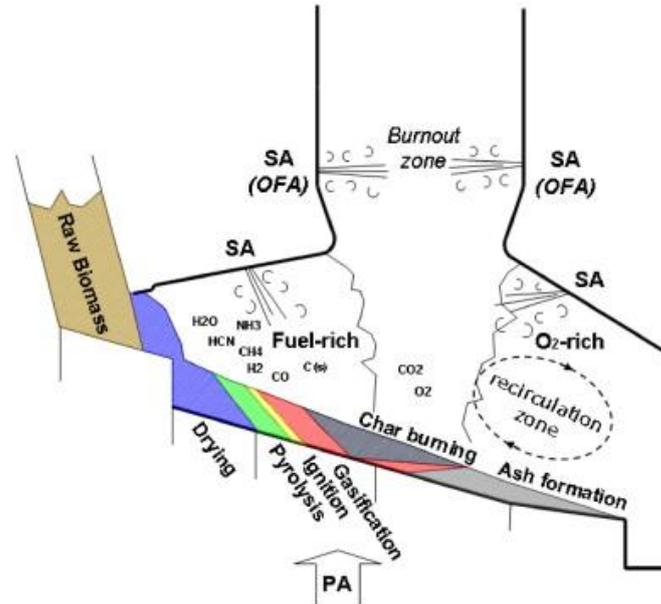


Figura 27 - Esquema representativo do fornecimento de ar e diferentes zonas resultantes na câmara de combustão primária (Fonte: (Chungen Yin, , Lasse A. Rosendahl, 2008)).

A câmara de combustão secundária, localizada na parte terminal da fornalha, proporciona um tempo de residência adequado para a realização das reações de combustão da fase gasosa, o arrefecimento dos gases de combustão e a redução das emissões. Nesta, a temperatura deve ser mantida entre os 800°C e 900°C, sendo o ar de combustão adicional introduzido à entrada da câmara através de uma série de orifícios, para assegurar uma oxidação completa dos compostos orgânicos voláteis. As cinzas remanescentes da combustão caem por um orifício conectado ao sistema de descarga de cinzas.

O sistema de descarga de cinzas consiste num conjunto de transportadores sem fim submersos em água que recolhem as cinzas dos depósitos. Na parte final do sistema há uma inclinação do transportador para permitir a remoção das cinzas da superfície da água e garantir a sua descarga num depósito.

Geralmente, este tipo de sistema de combustão é arrefecido a água, de forma a evitar os fenómenos de “slagging”, que consiste na formação de depósitos de cinzas na combustão, e a prolongar o tempo de vida dos materiais.

A injeção do ar adicional à saída da fornalha e a mistura deste com o ar de combustão origina o fluxo de ar quente, que é introduzido no secador rotativo em sentido contrário ao da matéria-prima, a uma temperatura aproximadamente de 550°C e com uma velocidade de 2m/s, sendo produzida por um ventilador centrífugo com dois ciclones,

situados a jusante da fornalha permitindo igualmente a remoção de cinzas e cujo mecanismo é semelhante ao apresentado anteriormente.

Na figura seguinte podemos observar uma ilustração de uma fornalha com sistema de combustão com grelhas para biomassa.

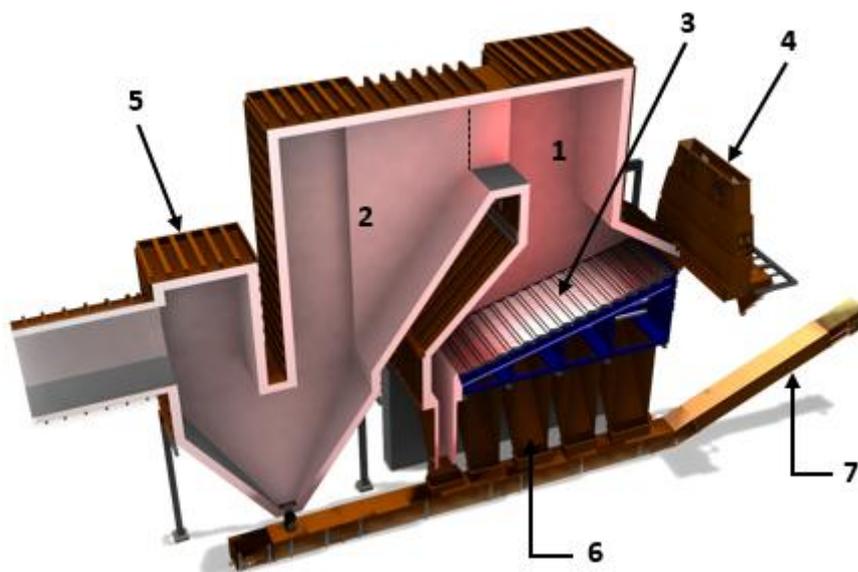


Figura 28 - Ilustração de uma fornalha com sistema de combustão em grelha para biomassa. 1 – Câmara de combustão primária; 2 – Câmara de combustão secundária; 3 – Grelhas; 4 – Sistema de alimentação de combustível; 5 – Estrutura metálica; 6 – Depósito de cinzas; 7 – sistema de descarga de cinzas. (Fonte : Adaptado de (Thermal, 2013))

Na figura seguinte podemos observar as instalações técnicas da operação de secagem e os seus equipamentos associados.



Figura 29 - Exemplo das instalações técnicas da operação de secagem, à esquerda a fornalha e à direita o secador rotativo, os ciclones e o silo de armazenamento (Fonte: (Enerpellets, 2013b; Pinewells, 2013))

5. Moagem Seca

A operação de moagem seca tem a mesma finalidade e baseia-se nos mesmos princípios que a moagem húmida. Com o intuito de melhorar a qualidade e a homogeneização da matéria-prima são implementados um ou mais moinhos de martelos refinadores, dependendo da linha de produção. Estes equipamentos são destinados vulgarmente à trituração de partículas secas de tamanho médio ou reduzido e normalmente necessitam de equipamentos adicionais associados à limpeza e exaustão do produto triturado, como o sistema de aspiração e outros. Posteriormente a matéria-prima triturada é movimentada num transportador ou elevador sem fim para os silos de armazenamento.

Nesta operação ocorre a remoção de sensivelmente 3 a 4% do teor de humidade presente na matéria-prima, face ao aquecimento progressivo do material constituinte do moinho de martelos refinadores no decorrer do seu funcionamento.

6. Peletização

Após toda a fase de pré-tratamento e a matéria-prima reunir todas as condições desejadas, por meio de um sistema de alimentação automático, esta que se encontra nos silos de armazenamento prossegue para a operação seguinte que corresponde à peletização, podendo eventualmente passar anteriormente por uma câmara de mistura se esta constar na linha de produção.

A câmara de mistura tem como finalidade incorporar os aditivos na matéria-prima, sendo eles, do tipo aglutinante, lubrificante ou protetor dos efeitos da humidade. Esta é munida de um sistema de tubos, pelo qual se procede a exaustão de gases e de um sistema de spray, que permite a aplicação dos aditivos. Atualmente, a maior maioria dos produtores de pellets Europeus, não são apologistas da aplicação de aditivos, devido ao facto de serem produzidas emissões no momento da combustão, algo que é contra a tipologia criada para este tipo de biocombustível sólido. A adição de aditivos no fabrico de pellets deve ser controlada, porque compreende custos acrescidos de produção e nem sempre a sua utilização é justificável. Aquando da sua incorporação estes não devem produzir gases contaminantes nem intervir na combustão. De acordo com as Normas Europeias, o limite máximo de incorporação de aditivos que melhorem a qualidade dos pellets é de 2% da sua massa total, permitindo a diminuição das emissões, o aumento da eficiência de combustão

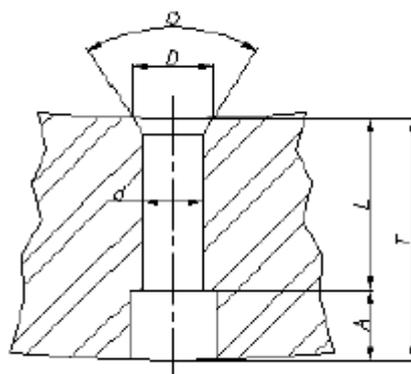
ou a resistência abrasiva. Os aditivos mais usados são o lignosulfonato, amido, dolomita e alguns óleos vegetais.

As peletizadoras são equipamentos destinados à produção de pellets de material lenhoso e geralmente incluem os seguintes componentes: sistema de alimentação, câmara de alimentação, câmara de peletização, câmara de corte e extração, secção composta pelo motor e grupo de engrenagem e transmissão.

O sistema de alimentação de matéria-prima consiste num transportador sem fim, que tem como principal característica o ajuste da velocidade em função das condições de funcionamento, permitindo um fluxo contínuo de abastecimento e impedindo a progressão de possíveis contaminantes à operação seguinte do processo de produção.

A câmara de alimentação tem como finalidade incorporar na peletizadora a matéria-prima.

Posteriormente, à conclusão das ações precedentes descritas, na câmara de peletização as partículas de biomassa são submetidas a uma pressão mecânica constante, exercida por um conjunto de rolos compressores, formados em filamentos sem fim, sobre uma matriz. A pressão exercida sobre a matéria-prima depende da sua granulometria e de um conjunto de características da peletizadora, de entre as quais se destacam a geometria do canal e do cone, a quantidade e velocidade dos rolos, a distância entre rolo-matriz e a relação de compressão, velocidade e diâmetro. Estas características são fatores de influência na qualidade dos pellets e na quantidade de energia requerida pela peletizadora. A matriz é o “coração” da operação de peletização e consiste basicamente num molde cuja superfície detém uma série de perfurações que definem o tamanho e a forma dos pellets que se pretendem produzir.



- T – Espessura total da matriz
- L – Espessura efetiva da matriz
- d – Diâmetros dos pellets
- A – Profundidade do alívio
- D – Diâmetro de entrada
- D/d – Relação de compressão
- α – Ângulo de entrada
- L/d – Relação de dureza

Figura 30 - Geometria das perfurações de uma matriz (Fonte: (Ecoheater, 2013)).

De acordo com a ilustração da geometria das perfurações de uma matriz o diâmetro de entrada apresenta uma pequena entrada cônica para facilitar o fluxo de material e o início do processo de compressão do mesmo. A relação de compressão, consiste na relação entre a área de entrada e a área da perfuração, sendo normalmente para pellets de dimensões pequenas na ordem 1,56:1. O ângulo de entrada é geralmente de 30° para matrizes de perfurações pequenas, chegando até 60° para matrizes com perfurações maiores.

De forma a obter-se um alívio de pressão no produto, as perfurações da matriz podem ser sujeitas a um alargamento no seu lado externo até a uma determinada profundidade. A matriz pode apresentar-se sem alívio, geralmente usada para a produção de pellets com diâmetro superior a 6 mm, com alívio total ou parcial uniforme e com alívio total ou parcial variável, permitindo adicionar resistência à matriz, evitar que as perfurações fiquem entupidas, reduzir o desgaste dos rolos e manter uma espessura efetiva da matriz. Na ilustração seguinte pode-se verificar os vários formatos da matriz com e sem alívio.

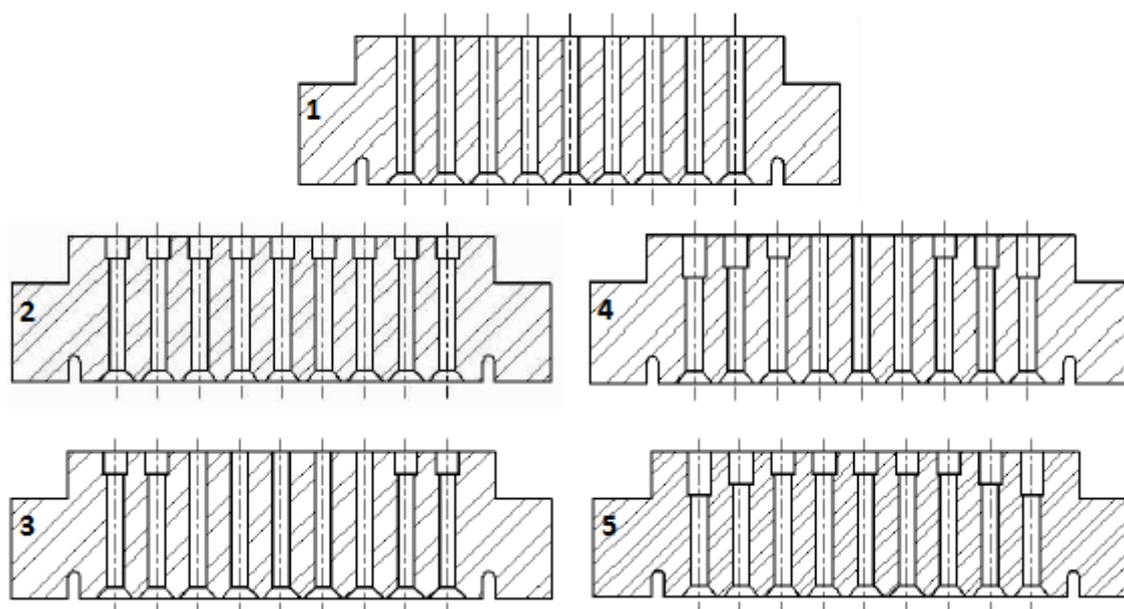


Figura 31 - Tipos de matrizes. 1 - Sem alívio; Alívio total uniforme; 3 – Alívio parcial uniforme; 4 – Alívio parcial variável; 5 – Alívio total variável. (Fonte: (Ecoheater, 2013))

Na câmara de corte e extração, o dispositivo de corte rola sobre a superfície inferior da matriz efetuando o corte da matéria-prima densificada dando origem aos pellets, que caem sobre um plano situado próximo da extremidade inferior da peletizadora por onde se precede a sua extração.

Relativamente à composição dos componentes, estes são contruídos em aço com intenção de proporcionar robustez e alta resistência à abrasão, em termos de monitorização os sensores de temperatura permitem averiguar o desgaste dos componentes e o momento de substituição dos mesmos, com alguma periodicidade.

Na produção de pellets existem dois tipos de peletizadoras, com matriz plana e com matriz anelar, apresentando modos de funcionamento diferentes, onde usualmente, os pellets gerados apresentam diâmetros compreendidos entre os 6 e 12 mm, com 30 mm de comprimento e densidade variável entre os 1000 e 1300 kgm-1.

Numa peletizadora com matriz plana o mecanismo de peletização baseia-se na alimentação da matéria-prima, através de um transportador sem fim, por ação da força da gravidade, a qual será sujeita a uma pressão exercida pelos rolos compressores dentro da câmara de peletização, que se encontram acoplados a um eixo vertical rolando sobre a superfície superior de uma matriz circular plana estacionária. A superfície útil da matriz é aquela sobre a qual circulam os rolos compressores, onde é comprimida a matéria-prima entre duas circunferências de raio diferente e dispostas perpendicularmente. A distância

dos rolos compressores à matriz e a pressão que estes exercem sobre os materiais da estrutura são determinados numa unidade de regulação de pressão hidráulica, posicionada na extremidade superior do eixo vertical principal, permitindo controlar a qualidade dos pellets. No interior da câmara de peletização estão alojados os dispositivos de raspagem que impedem a acumulação do material sobre as superfícies externas da secção, evitando possíveis bloqueios. O dispositivo de corte conectado ao eixo vertical rola sobre a superfície inferior da matriz efetuando o corte da matéria-prima densificada gerando menores quantidades de finos e dando origem a pellets com superfícies lisas, que caem sobre um plano situado próximo da extremidade inferior da peletizadora por onde se precede a sua extração.

Dependendo dos modelos o número de rolos pode variar entre um a seis, apresentando uma baixa e constante velocidade periférica de aproximadamente 2,5m/s de modo a garantir uma boa remoção de gases, um bom funcionamento do mecanismo e um reduzido ruído sonoro. A permanente lubrificação dos eixos dos rolos compressores com vedantes especiais previnem possíveis contaminações dos pellets pelos lubrificantes assim como perdas de gorduras. A rápida mudança da matriz aumenta a disponibilidade de funcionamento a 100% da unidade de produção. O produto pode estar suscetível a variações de humidade. Cada pressão de peletização é testada antes do fornecimento em simulação em plena carga.

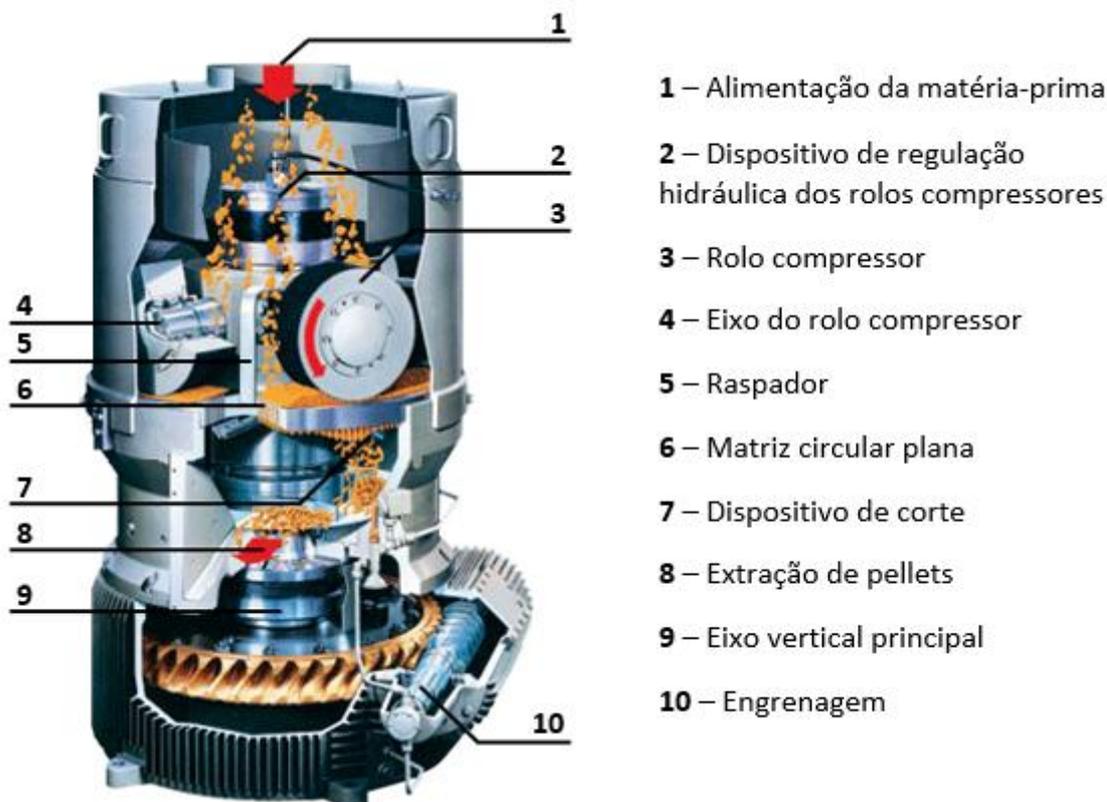


Figura 32 - Esquema de funcionamento de uma peletizadora de matriz plana. (Fonte: (KG, 2007))

O mecanismo de uma peletizadora com matriz anelar consiste na pressão gerada pelo movimento rotacional de rolos compressores, que se encontram acoplados a um eixo horizontal e montados sobre um suporte concêntrico independente da matriz, sobre a superfície interna da matriz circular anelar estática. No entanto, este mecanismo pode ocorrer de forma inversa onde a matriz anelar possui um movimento de rotação em torno de um eixo horizontal rodando acoplada aos rolos compressores que estão posicionados na câmara de peletização.

A alimentação da matéria-prima pode ser realizada por dois tipos de sistemas de alimentação, com recurso a um transportador sem fim, permitindo a matéria-prima fluir dentro da câmara de peletização somente por ação da força da gravidade ou através do movimento do tipo centrífugo, direcionando a matéria-prima até à câmara de peletização através de suportes ajustáveis, permitindo uma alimentação constante e uniforme.

Normalmente, as peletizadoras com matriz anelar apresentam um ou três rolos compressores dentro da câmara de peletização. Estes possuem uma elevada capacidade de resistência com o intuito de suportar as altas pressões exercidas e ostentam uma superfície

Pellets

que proporciona uma máxima pressão sem haver escorregamento, estando unidos com rolamentos devidamente protegidos de modo que não entrem resíduos para o seu interior.

O dispositivo de corte conectado ao eixo horizontal com movimento rotacional sobre a superfície externa da matriz, efetua o corte da matéria-prima densificada, originando os pellets cuja extração ocorre por queda livre numa bandeja de descarga, posicionada na zona de fecho frontal da peletizadora. A remoção dos pellets na zona de acumulação geralmente é efetuada mecanicamente.

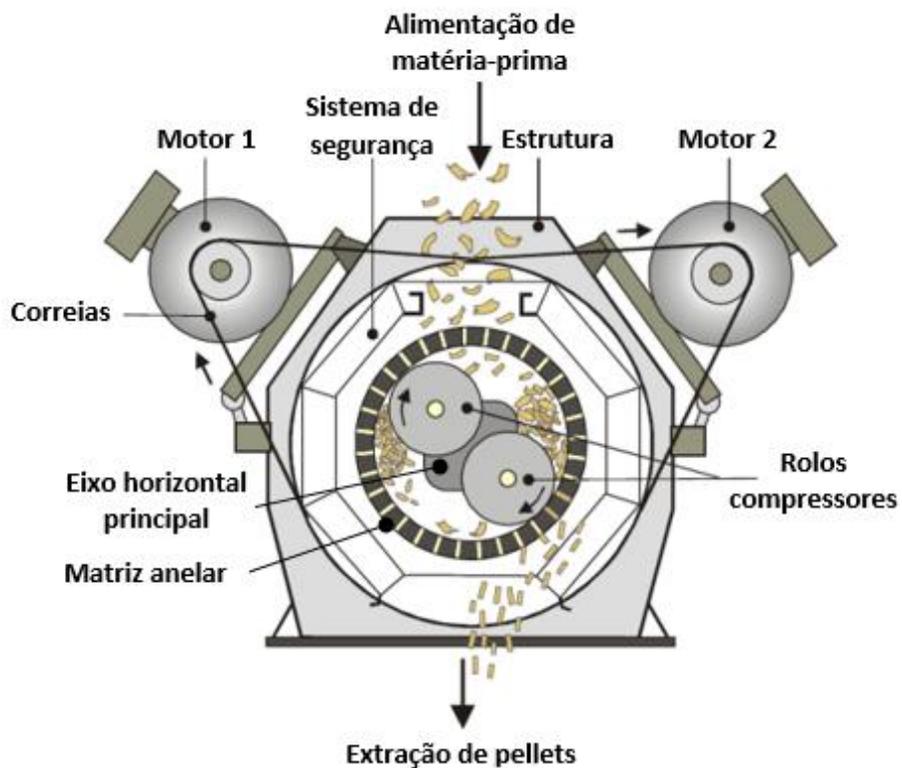


Figura 33 - Esquema de funcionamento de uma peletizadora de matriz anelar (Fonte: Adaptado de (Stelte et al., 2012)).

Atualmente a peletizadora de matriz anelar tem uma maior aplicabilidade face à de matriz plana, essencialmente devido às especificações técnicas requeridas pelos produtores. Na figura seguinte pode observar um exemplar de cada peletizadora.



Figura 34 - Exemplo de uma peletizadora de matriz anelar, à esquerda, e de uma peletizadora de matriz plana, à direita. (Fonte: (Blanch, 2013; KG, 2007))

Os pellets produzidos na operação de peletização seguem para a operação seguinte por meio de um transportador sem fim.

7. Arrefecimento

Após o processo de peletização, anteriormente descrito, os pellets encontram-se a uma elevada temperatura, a rondar os 90-95°C, contendo um teor de humidade aproximadamente de 15%.

Neste contexto, o arrefecimento é uma etapa essencial na linha de produção de pellets, pois contribui para redução da temperatura e diminuição do teor de humidade, permitindo que a lenhina da biomassa alcance o seu maior potencial aglutinante, fundamental para a estabilização do formato dos pellets.

O arrefecedor, equipamento aplicado nesta etapa, pode ser do tipo horizontal ou vertical, ambos apresentam o mesmo mecanismo de funcionamento mas os arrefecedores horizontais usufruem uma maior capacidade face aos arrefecedores verticais, no entanto estes têm uma maior aplicabilidade.

Deste modo será descrito o funcionamento do arrefecedor vertical que inclui uma válvula rotativa de alimentação fornecendo um fluxo uniforme de pellets para a câmara de arrefecimento formando uma camada sobre a qual ocorre a passagem de um fluxo de ar ambiente em contra corrente de movimento ascendente, gerado por ventiladores mecânicos. Os pellets e o ar apresentam fluxos opostos possibilitando uma transferência de

Pellets

calor gradual que permite melhorar a qualidade do produto e reduzir o teor de finos. À medida que o ar sobe através da camada de pellets aquece, aumentando a capacidade de transporte da humidade existente neste. Os pellets, num momento inicial, quando entram no topo da câmara de arrefecimento estão expostos à temperatura do ar de exaustão, que corresponde à temperatura mais elevada verificada no interior da câmara de arrefecimento, minimizando assim o choque térmico. O ar de exaustão segue uma conduta de ar até alcançar os ciclones, cuja técnica consiste em remover as partículas em suspensão presentes no fluxo de ar através da força centrífuga, sendo posteriormente o ar expelido pela chaminé, ocorrendo transformação de calor por convecção natural, e as partículas voltam a reintegrar a linha de produção imediatamente antes do processo de peletização, através de um transportador sem fim. O dispositivo de rotação ao movimentar a camada de pellets permite otimizar o seu arrefecimento, diretamente relacionado com a área de contato do fluxo de ar com os pellets, uniformizando e dispersando as pellets ao longo de toda a câmara. As entradas laterais de ar a temperatura e humidade ambiente encontram-se na parte inferior do aparelho. A saída dos pellets da câmara de arrefecimento ocorre pela parte inferior do aparelho por um sistema de descarga de grelha com piso fixo posteriormente fluindo através de uma única camada por painéis móveis que controlam a descarga.

Na figura seguinte encontra-se representado num diagrama o funcionamento de um arrefecedor vertical.

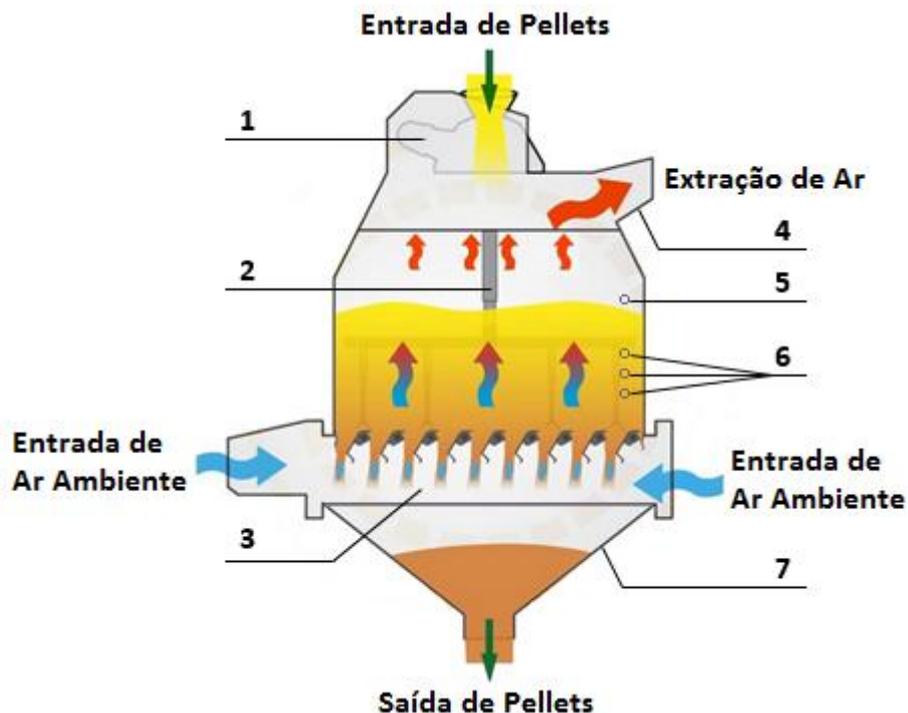


Figura 35 - Diagrama de funcionamento de um arrefecedor vertical (Fonte: (Wood Fisrt, 2013a)). 1 – Válvula rotativa de alimentação; 2 – Dispositivo de rotação; 3 – Sistema de descarga de grelha com piso de grade fixa; 4 – controlador do ar de exaustão, 5 – Sensor de sobrecarga; 6 – sensores de nível; 7 – depósito de recolha.

A grelha de piso fixo assemelha-se a um degrau em formato de “V” que vai articulando permitindo que os pellets fluam com maior facilidade, quando aberto e interrompe completamente o fluxo quando fechado, como se pode observar na seguinte figura. O design da grelha permite albergar de forma eficiente o peso sobre esta e a limpeza completa no final de cada ciclo de produção.

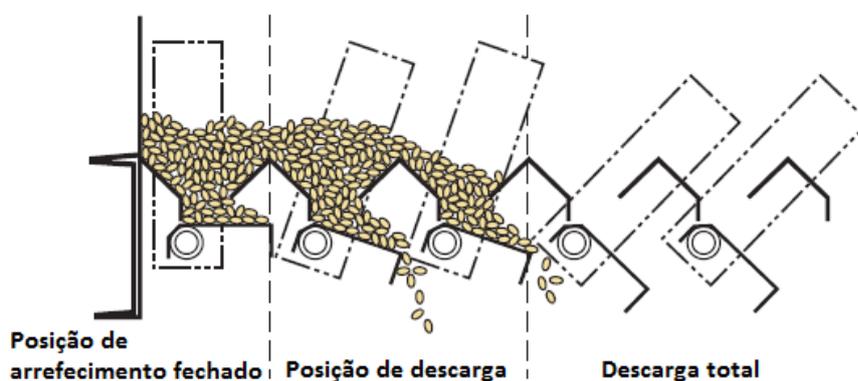


Figura 36 - Diagrama de funcionamento da grelha de piso fixo (Fonte: Adaptado de (Bliss Industries, 2010)).

Em termos de design, o arrefecedor pode apresentar uma câmara de arrefecimento retangular ou circular, sendo a primeira a tecnologia mais comum e a ultima a mais

recente, uma porta e um visor de vidro convenientemente localizados para facilitar o acesso e inspeção ao interior da câmara de arrefecimento. O design circular permite uma distribuição uniforme dos pellets por toda a área da secção, aumentando a uniformidade do arrefecimento. Na imagem seguinte pode-se observar um exemplar de cada arrefecedor.



Figura 37 - Arrefecedor vertical com câmara retangular, à direita, e câmara circular à esquerda (Fonte: (Feelwarm, 2013; Bliss Industries, 2010)).

Para se processar o armazenamento e acondicionamento em condições corretas, a temperatura dos pellets deverá estar próxima da temperatura ambiente, sendo a sua movimentação efetuada por um transportador ou elevador sem fim para a etapa seguinte.

8. Crivagem

Após terminado o fabrico dos pellets, procede-se à separação das partículas. Esta etapa consiste em remover os finos residuais ou partículas excedentes que se foram gerando ao longo do processo de peletização e arrefecimento.

O aparelho aplicado nesta fase consiste num crivo, com movimento oscilante vibratório ou com movimento circular centrífugo. Na figura seguinte encontram-se dois exemplares de cada tipo de crivo.



Figura 38 - Exemplos de dois tipos de crivos, à esquerda crivo com movimento circular centrífugo e à direita crivo com movimento oscilante vibratório (Fonte: (Promill-stolz, 2013)).

O crivo vibratório funciona segundo um movimento oscilante, através de um eixo excêntrico, com uma frequência adequada de forma a efetuar-se uma separação eficaz das partículas, o qual possui telas internas que podem se adaptadas e trocadas conforme as preferências do produtor ou as necessidades e características do produto. O produto, composto por pellets e finos, entra por gravidade numa tremonha doseadora e são distribuídos, de maneira uniforme, em toda a largura da tela onde o movimento vibratório dá origem à seleção granulométrica havendo a passagem dos finos através das perfurações desta.

No entanto a tecnologia mais recente enquadra-se num aparelho fechado com movimento circular cuja separação de partículas ocorre pela ação da força centrífuga. Neste, o produto entra no centro da tela onde se procede a centrifugação. Os finos que passam por queda pela parte inferior do aparelho são recolhidos e movimentados para a conduta de saída por um rotor com um dispositivo de raspagem. Os pellets permanecem na tela de centrifugação sendo ejetados para a periferia e libertados por um defletor para a saída lateral. Na figura seguinte é possível observar um diagrama que representa o funcionamento deste aparelho.

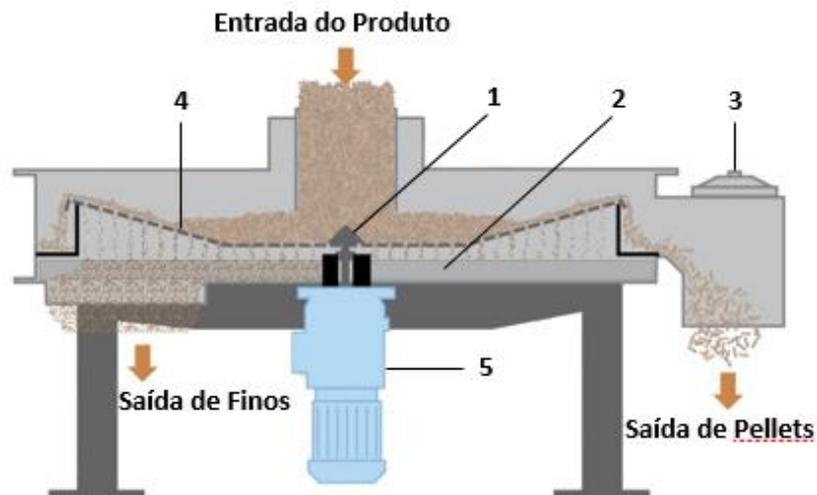


Figura 39 - Diagrama do funcionamento de um crivo com movimento centrífugo. 1 - Dispositivo de distribuição; 2 - Rotor com dispositivo de raspagem; 3 - Defletor; 4 - Tela de centrifugação; 5 - Eixo vertical (engrenagem e motor) (Fonte: (Promill-stolz, 2013))

Posteriormente a esta etapa as duas frações são então recolhidas e dirigidas por sistemas de transporte de alimentação que podem ser do tipo mecânico, pneumático ou de gravidade idênticos aos existentes nos outros processos. A fração de finos reintegra a linha de produção de maneira automática imediatamente antes ao processo de pelletização de modo a serem novamente processados enquanto a fração de pellets pode ser encaminhada para dois destinos, para a fase de embalagem ou armazenamento.

9. *Ensacamento*

Depois de todos os processos anteriormente descritos os pellets, podem ser acondicionados de forma a serem introduzidos no mercado. O ensacamento dos pellets é realizado mais vulgarmente em unidades de 15 kg, para pequenas aplicações, contudo existem equipamentos que dispõem de outras parametrizações (10 - 40 kg), por forma a responderem às necessidades do mercado. Para grandes aplicações os pellets são acondicionados em sacos com peso compreendido entre 500 kg e 1000 kg.



Figura 40 - Exemplos de máquinas de ensacar, à direita aplicável a sacos de pequenas dimensões e à esquerda a sacos de grandes dimensões (Fonte: (JFT, 2013; Payper, 2013)).

A alimentação dos pellets é efetuada pela parte superior da máquina com recurso a um transportador sem fim, sendo posteriormente inseridos em sacos. A dosagem efetua-se através de uma válvula de descarga, que reduz o fluxo de material quando o saco se aproxima do seu limite de peso, quando alcançado o peso pré-estabelecido o fluxo é interrompido instantaneamente garantindo deste modo o peso exato. A introdução dos sacos vazios para o acondicionamento de pellets ocorre de forma automática, sendo fechados depois do processo de embalamento, com ou sem vácuo.

Posteriormente a esta operação os sacos de pequenas dimensões podem ser redirecionados para um sistema de paletização automático, que consiste basicamente em acondicionar os sacos sobre uma palete, com ou sem sistema de filme, de modo a facilitar o seu transporte e armazenamento.



Figura 41 - Sistema de paletização (Fonte: (JFT, 2013)).

O sistema de paletização é composto essencialmente por uma paletizadora e por um tapete rolante.

10. Armazenamento

No final da linha de produção de pellets há a necessidade de armazenamento do produto para que este conserve as suas propriedades e não esteja sujeito a fatores adversos, permitindo uma maior durabilidade.

Os pellets que seguem diretamente da etapa de crivagem, por transportadores ou elevadores sem fim, não estando sujeitos a acondicionamento em sacos são inseridos em silos que têm a capacidade de manter o material seco de modo a evitar a sua degradação. Estes podem ser munidos com mecanismos de descarga automática de forma rápida e de sistemas de ventilação.

De salientar que em algumas linhas de produção há mecanismos que possibilitam os pellets armazenados nos silos de serem acondicionados em sacos, através de um mecanismo de retorno à máquina de ensacar ou de um dispositivo acoplado ao silo de armazenamento.

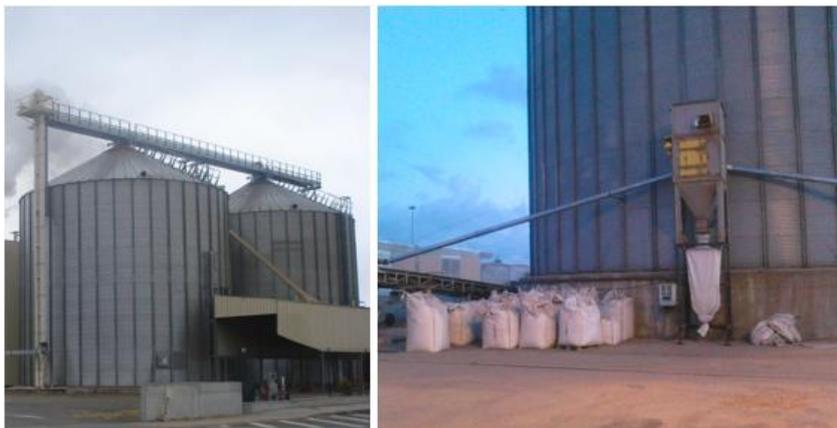


Figura 42 - Silos de armazenamento e dispositivo acoplado de acondicionamento de sacos de grandes dimensões (Fonte: (Aveiro, 2013; Pelletspower1, 2013)).

Relativamente aos pellets embalados a sua deposição deverá ser em locais secos, usualmente no interior de armazéns, de modo a não favorecer o aumento do teor de humidade e o desenvolvimento de bactérias e fungos.

Sistema de Transporte

Durante todo o processo de produção de pellets o material é movimentado entre os diferentes equipamentos constituintes da linha de produção. Nesta tarefa importante são aplicados diferentes tipos de transportadores sem fim dependendo das suas características, face às exigências requeridas para a movimentação entre os componentes, podem operar horizontalmente, em declive ou verticalmente, sendo de fácil construção e de dimensionamento de acordo com as especificações do produto a transportar. Os transportadores sem fim mais comuns numa linha de produção de pellets fundamentam-se nos transportadores de arrasto, de tela, de rolos e de hélice para aplicações em plano horizontal ou inclinado e os elevadores de alcatruzes para aplicações em plano vertical. Os transportadores de arrasto podem ter diferentes secções em função da disposição dos eixos de tração e do tipo de material a transportar.

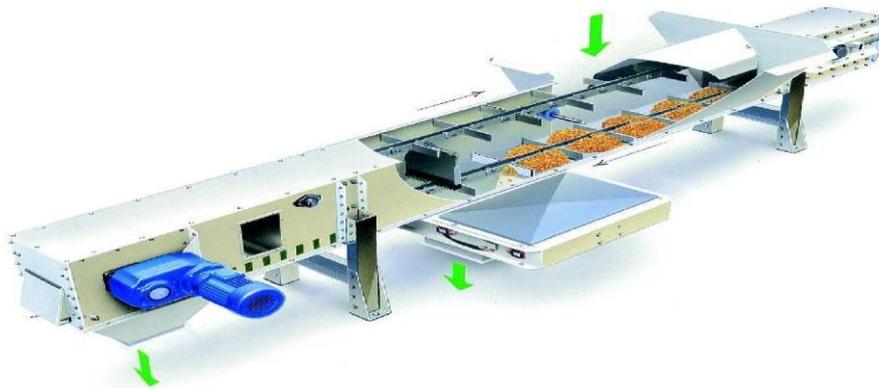


Figura 43 - Transportador de arrasto horizontal (Fonte: (Projeto, 2013)).

Estes equipamentos podem ainda ser combinados com outros tipos de transportadores contruindo diferentes linhas de transporte. O equipamento consiste basicamente numa caixa retangular aberta ou hermeticamente fechada por onde o produto arrastado é transportado por meio de uma corrente propulsora dotada de suportes arrastadores. Geralmente, o motor e a tração situam-se numa das extremidades com a transmissão do movimento composta pela corrente acoplada a eixos de tração com roda dentada que a mantêm esticada e em movimento.

O transportador de tela compreende uma estrutura com rolos de sustentação ao longo do comprimento da mesma e de eixos de tração localizados nas extremidades que mantêm uma tela esticada e em movimento, disposta em forma plana ou em “U”. As telas normalmente são constituídas por material sintético com revestimento de borracha podendo a sua superfície ser lisa ou com saliências para evitar o escorregamento do material. O mecanismo de transmissão é semelhante ao do transportador de arrasto.



Figura 44 - Transportador de tela com declive (Fonte: (Indústria, 2013)).

O princípio de funcionamento e o mecanismo de transmissão do transportador de rolos são semelhantes ao do transportador de tela, a única diferença reside na movimentação do material sobre os rolos de sustentação sem presença de uma tela.



Figura 45 – Transportador de rolos (Fonte: (SPG, 2013)).

Os transportadores de hélice consistem simplesmente em um eixo com uma estrutura em espiral helicoidal no interior de um tubo ou de uma caixa em forma de “U” hermeticamente fechada onde uma das extremidades é mergulhada no material a transportar. A estrutura em espiral helicoidal ao ostentar um movimento de rotação permite o transporte do material até à extremidade da saída. O motor situa-se numa das extremidades com a transmissão do movimento composta por uma engrenagem acoplada ao eixo.



Figura 46 - Transportador de hélice horizontal (Fonte: (Ibis-Int, 2013)).

Os elevadores de alcatruzes comportam uma série de pequenos baldes acoplados a uma corrente que transportam o material para um nível superior. O funcionamento destes transportadores sem fim consiste numa estrutura com eixos de tração localizados nas extremidades que mantêm a corrente esticada e em movimento, disposta numa caixa retangular hermeticamente fechada. O motor e a tração situam-se na extremidade superior com a transmissão do movimento composta por uma corrente acoplada a eixos de tração com roda dentada.



Figura 47 - Elevador de alcatruzes (Fonte: (HRV, 2013)).

Distribuição

O último processo da cadeia logística de biomassa para pellets consiste na distribuição do biocombustível sólido produzido, sendo um fator importante na economia deste tipo de mercado. Um dos aspetos que influenciam a economia prende-se pela dificuldade no transporte a longas distâncias, principalmente pelos custos que implica, deste modo as unidades de produção de pellets devem estar localizadas nas proximidades das áreas de abastecimento ou de portos marítimos, onde por vezes possuem silos de armazenamento, como se pode verificar na figura seguinte.



Figura 48 - Silos de armazenamento de pellets situados no Porto de Aveiro. (Fonte: (Aveiro, 2013))

Do transporte de pellets não resulta qualquer tipo de perigo de expulsão ou contaminação ao contrário dos combustíveis fósseis e devido à sua elevada compactação apresenta uma densidade inferior à da lenha, permitindo ocupar um menor espaço. No entanto, no decorrer do transporte os pellets não devem ser sujeitos a pressões ou tensões mecânicas excessivas, facto este resultaria na alteração da sua estrutura, bem como a qualquer tipo de humidade, para que as suas características que lhe conferem qualidade não sejam alteradas.

A distribuição de pellets pode ser realizada diretamente aos consumidores finais ou através de intermediários. A distribuição direta está normalmente associada a instalações do setor industrial e/ou comercial que utilizam sistemas de combustão ou co-combustão de grande escala. Relativamente à distribuição indireta, esta tem como finalidade abastecer sistemas de combustão de média e pequena escala existentes principalmente no setor doméstico e comercial, sendo efetuada normalmente com recurso a intermediários.

Em ambos os tipos de distribuição o transporte de pellets pode ser a granel ou em sacos, com peso compreendido entre 500 kg e 1000 kg ou entre 10 e 40 kg, sendo a última gama de peso geralmente associada apenas à distribuição indireta. Por via terrestre o transporte a granel recorre a camiões do tipo cisterna ou semirreboque basculante, enquanto o transporte em sacos utiliza camiões do tipo semirreboque de lona. Por via marítima, aplicada exclusivamente na distribuição direta, os pellets são transportados a granel ou em

Pellets

sacos em navios-tanque. Todas as formas de transporte de pellets encontram-se na figura seguinte.



Figura 49 - Formas de distribuição de pellets, parte superior por via terrestre e parte inferior por via marítima. (Fonte: (Aveiro, 2013))

Os pellets podem ser facilmente descarregados e depositados no local de armazenamento das instalações do destinatário, por meio de um sistema de ar pressurizado ou com recurso a meios mecânicos, como a grua ou o carregador frontal.

4.4 Tecnologias de Combustão de Pellets – Aquecimento Doméstico

O desenvolvimento de um biocombustível sólido, como os pellets, que apresenta uma qualidade elevada e constante cria diferenças significativas entre a tecnologia de combustão de pellets e as tecnologias de combustão convencionais de biomassa. Neste sentido, surgem equipamentos com elevados padrões que permitem um conforto operacional semelhante aos sistemas de aquecimento a gasóleo de aquecimento ou gás natural.

Em Portugal, o foco principal recai sobre a utilização de pellets em sistemas de pequena escala, para aquecimento doméstico e comercial, na banda de potência de até 100 kWth. Este facto deve-se essencialmente ao clima mais quente, comparado com aquele que se faz sentir na Europa Central e Norte, o que reduz as necessidades de aquecimento para 5-6 meses.

Os sistemas de combustão de pellets podem ser classificados em dois, aquecimento central e aquecimento do ar ambiente, de acordo com o modo de dissipação do calor. Basicamente os três tipos de dispositivos de aquecimento utilizados são os recuperadores de calor, as caldeiras e as salamandras a pellets (Figura 50).



Figura 50 - Equipamentos de combustão a pellets – recuperador de calor (esquerda), caldeira (centro) e salamandra (direita).

As salamandras a pellets geralmente usadas como opção de aquecimento complementar de uma divisão, são projetadas com tecnologia avançada para aquecimento ecológico e economia de energia, detendo um sistema de alimentação automático que pode ser monitorizado eletronicamente e um sistema de depósito de cinzas. Normalmente apresentam um rendimento até 95% com uma potência máxima de 30 kWth. O funcionamento deste tipo de equipamento compreende quatro fases (Figura 51):

- **Alimentação** – os pellets inseridos no depósito do equipamento são automaticamente introduzidos através de um mecanismo sem fim na câmara de combustão, na cadência necessária para manter a temperatura programada.
- **Ignição** – efetuada através de uma resistência elétrica localizada atrás da câmara de combustão, que ao torna-se incandescente e em conjunto com a passagem de ar permite iniciar a combustão de forma rápida e automática.
- **Combustão** – a reação exotérmica entre os pellets e o comburente (oxigénio) resulta na libertação de calor que é transmitido para os permutadores (condutas de ar), sendo distribuído posteriormente para o ar ambiente com recurso a um ventilador.
- **Extração de Gases** – a libertação dos gases de exaustão da combustão para o exterior é realizada através de um ventilador de extração.

Pellets

Face ao baixo custo de investimento e aos sistemas de aquecimento implementados nos edifícios, em geral as vendas das salamandras a pellets têm vindo a aumentar nos últimos anos em Portugal sendo o equipamento com maior aplicação.

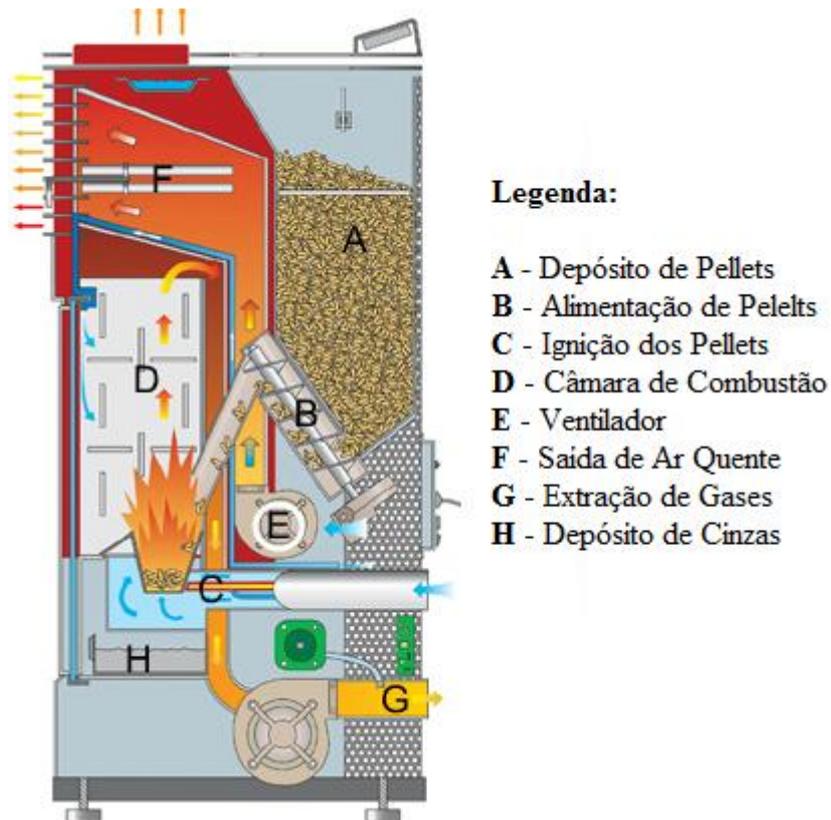


Figura 51 – Esquema de funcionamento de uma salamandra a pellets (Fonte: (EnergiaBiomassa, 2013)).

Os recuperadores de calor e as caldeiras a pellets destinam-se a sistemas de aquecimento central. Estes sistemas possuem um funcionamento semelhante ao da salamandra, expeto no modo de dissipação do calor gerado durante a fase de combustão que usa a água como meio de transferência de calor através de condutas que percorrem um circuito dissipando o calor para o ambiente através de radiadores. Ao contrário de sistemas a gasóleo de aquecimento e gás natural, sistemas de aquecimento a pellets necessitam a integração de um depósito de água quente, a fim de reduzir as perdas de calor, que podem ser usadas para aquecimento de águas sanitárias.

4.5 Panorama e Projeções do Mercado Internacional e Nacional

4.5.1 Mercado Internacional

Atualmente as pellets de biomassa são uma fonte de energia renovável estabelecida e valiosa, face à 20 anos em que eram uma fonte de energia pouco conhecida na maioria dos países europeus. Os incentivos dados pelas autoridades locais para a produção de energia e calor com recurso à biomassa permitiram o desenvolvimento deste mercado.

A produção mundial de pellets tem mostrado um crescimento exponencial: de sensivelmente 1,7 milhões de toneladas de pellets em 2000 a 7,5 milhões de toneladas em 2006, para 11,7 milhões em 2008 (REN21, 2012). Em 2010, o volume de produção mundial de pellets foi aproximadamente de 16 milhões de toneladas (Poyry, 2011; REN21, 2012), e segundo os dados preliminares para 2011 este era de 18,3 milhões de toneladas (REN21, 2012). Na figura seguinte pode-se constatar a evolução da produção de pellets por zona geográfica numa base temporal de 11 anos.

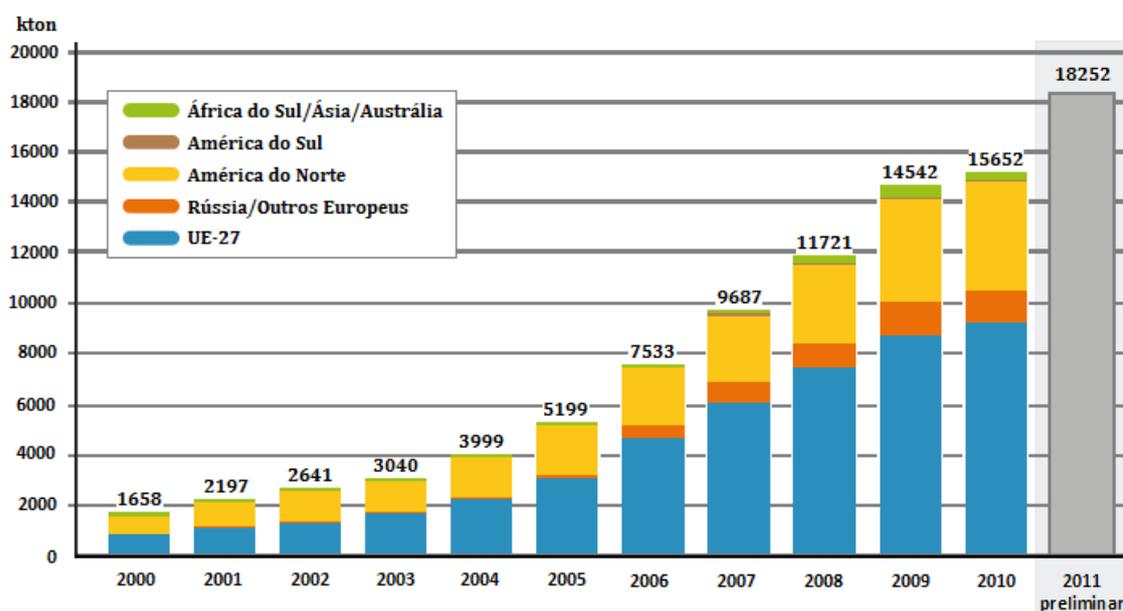


Figura 52 - Produção mundial de pellets, 2000-2011 (Fonte: (REN21, 2012))

As projeções para a produção mundial de pellets para 2015 são de 30,2 milhões de toneladas e para 2020 de 45,2 milhões de toneladas. Atualmente, a Europa ainda continua a ser o motor do mercado de pellets. Em 2010, a Europa produziu 9,9 milhões de toneladas de pellets, correspondendo a cerca de 60% da produção mundial. As perspetivas para 2015

Pellets

e 2020 continuam a manter a Europa como o líder do mercado de pellets ao nível da produção, atingindo valores na ordem dos 13,5 e 16,3 milhões de toneladas respetivamente. No entanto em 2020 essa predominância não será tão significativa.

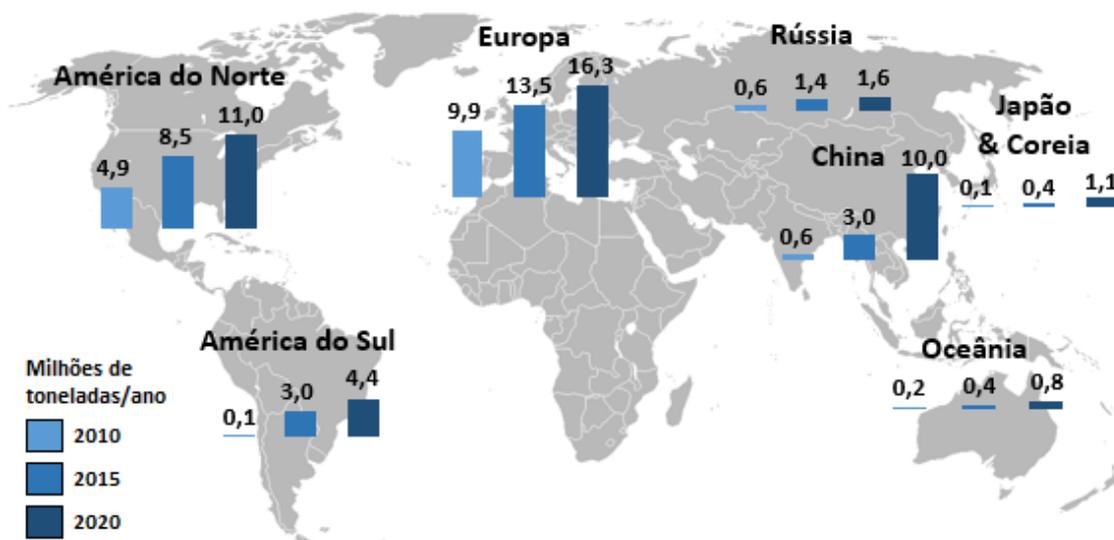


Figura 53 - Produção mundial de pellets (Fonte: (Poyry, 2011))

Relativamente a 2010 a maior produção foi proveniente de países como a Alemanha, Áustria e Suécia, representado cerca de 50% da produção total segundo os dados da European Pellet Council (consultar Anexo I).

Em geral, a capacidade de produção tem vindo a aumentar e é por norma superior à produção real nos últimos anos. A capacidade de produção mundial atingiu mais de 33 milhões de toneladas no início de 2012 (International, 2012). Nesse mesmo ano foram listadas 642 unidades de produção havendo um ligeiro aumento face ao ano anterior. É de salientar que mundialmente existe um maior número de unidades de produção e na maioria dos países existem unidades de produção com uma capacidade de produção anual instalada inferior a 10 quilotoneladas, as quais não foram incluídas nesta base de dados. A capacidade anual instalada pode ser calculada de várias maneiras. Normalmente, é baseada na peletização instalada em toneladas por hora (t/h) e para uma operação de 24 horas por 7 dias. Existem também números relativos à produção de muitos produtores, os quais possuem unidades de produção a funcionarem acima de 100% da capacidade e outras que não produzem na totalidade da sua capacidade. A Bioenergy International, que mantém uma base de dados da produção de pellets sugere que não é utilizada mais do que 50% da capacidade de produção instalada.

A capacidade de produção foi distribuída de forma desigual entre os maiores produtores Alemanha, Canadá, EUA, Rússia e Suécia, e as potências de emergente produção, como África do Sul, Austrália, China, Índia e países da América do Sul, passando o futuro dos fluxos comerciais por incluir estes destinos. No grupo de maiores produtores os EUA destacam-se como sendo aquele que apresenta maior capacidade de produção (5973 kt), bem como o maior número de unidades de produção instaladas a nível mundial (93). Relativamente aos países emergentes a China ressalta pelo facto de apresentar uma capacidade de produção (882 kt) e um número de unidades de produção instaladas (18) na generalidade 4 vezes superiores face às restantes potências (consultar Anexo II).

A grande área florestal no noroeste da Rússia parece atrair um grande número de investidores, que potencializaram a construção de grandes unidades de produção de pellets nos últimos anos, incluindo a maior do mundo, a unidade de produção de pellets em Vyborgskaya (capacidade de produção na ordem das 900 kt/ano).

A nível mundial registou-se em 2010 um consumo de 16 milhões de toneladas de pellets das quais cerca de 74% foram consumidas na Europa.

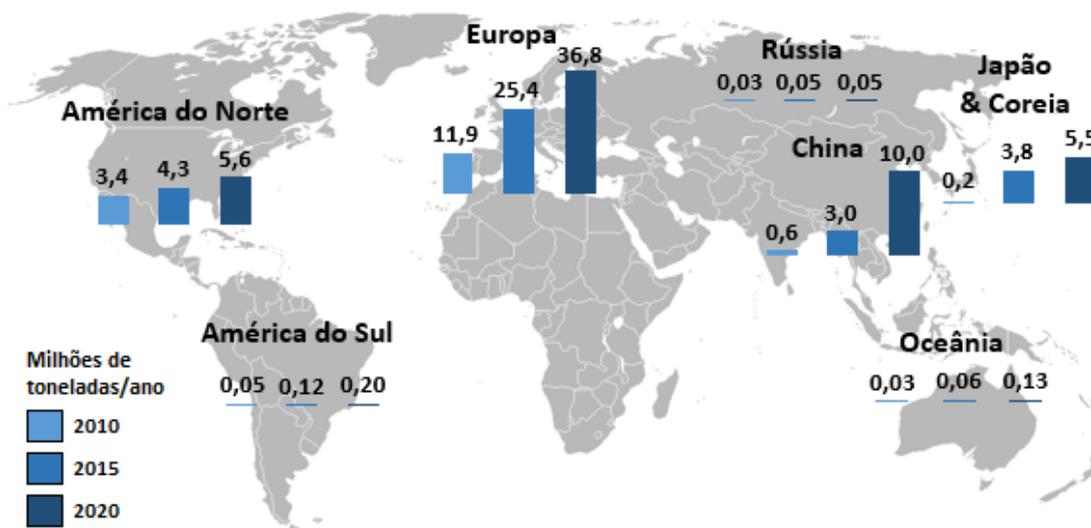


Figura 54 - Consumo mundial de pellets (Fonte: (Poyry, 2011)).

O consumo de pellets na União Europeia tem aumentado de forma constante desde 2005, no qual se registava 3,8 milhões de toneladas para 9,8 milhões de toneladas em 2010, das quais 2,6 milhões de toneladas foram importadas. Embora esta seja uma grande quantidade, isto corresponde a apenas 0,2% do consumo bruto de energia da UE. A

expectativa é que aumente o dobro até 2020 atingindo-se as 24 milhões de toneladas, das quais 11 milhões de toneladas serão importadas. A maior parte da produção de pellets é assim exportada para a Europa, onde existe a maior procura.

De acordo com os dados publicados pelo projeto European Pellet Council de 2005 a 2010, que se encontram no Anexo III, o consumo de pellets nos 27 países pertencentes à União Europeia quase triplicou para 10 milhões de toneladas. Os países que mais contribuíram para este notável aumento de consumo foram a Alemanha, Dinamarca e Suécia, representando cerca de 50% do consumo total na UE-27 relativo ao ano de 2010.

Fluxos Comerciais de Pellets

Os principais fluxos comerciais provêm do Canadá e dos EUA. O Canadá desempenha um importante nos fluxos de comércio, sendo o seu principal mercado a Europa, com as exportações a rondar 1,2 milhões de toneladas em 2011 (cerca de 90% das exportações). De salientar que o Canadá consome apenas cerca de 40 a 50 mil toneladas de pellets por ano. A Figura 60 mostra uma visão global dos fluxos comerciais de pellets relativos ao ano de 2011.

Dentro da Europa, as pellets industriais são exportados dos países do Báltico, Finlândia e Rússia para a Suécia, Dinamarca, Bélgica, Holanda e Reino Unido por navio (EUBIONET 3). A Rússia também exporta quantidades significativas, enquanto a Austrália, América do Sul e África do Sul têm visto um aumento da sua capacidade de produção.

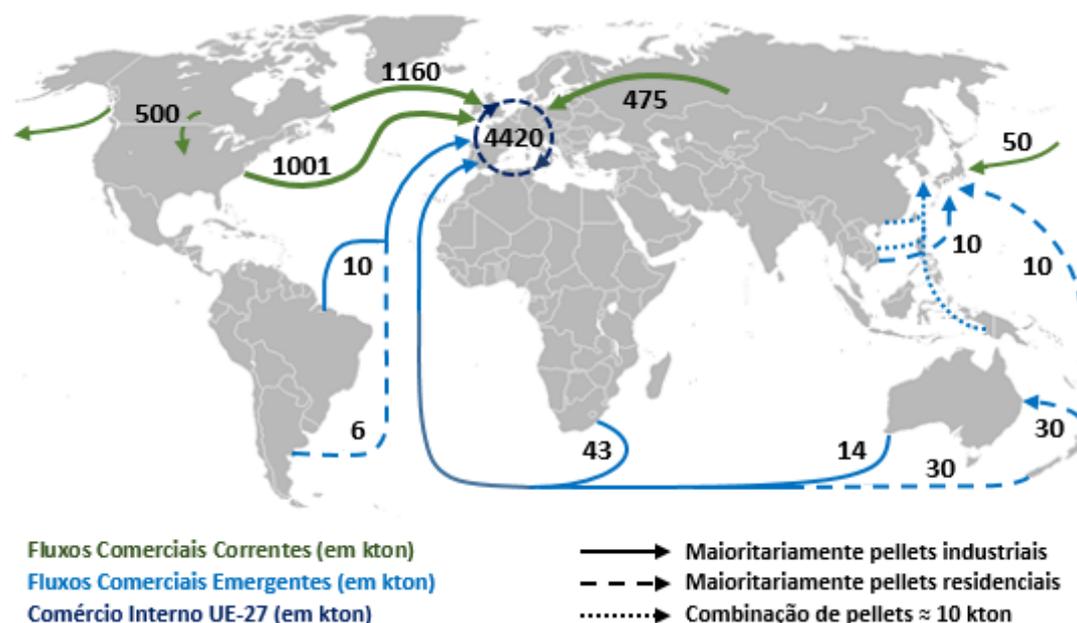


Figura 55 - Mapa dos fluxos comerciais a nível mundial de pellets de biomassa relativamente ao ano de 2011 (Fonte: Adaptado de (Poyry, 2011))

As importações de pellets em grande escala para a Europa, destinadas ao mercado de produção de energia são um fenómeno bastante recente, especialmente estimuladas pelo uso de pellets em aplicações em grande escala. Os principais países exportadores são Canadá, Estados Unidos da América e Rússia. As importações para a Europa cresceram cerca de 50% de 2009 para 2011.

Tabela 9 - Exportações de pellets de madeira para a EU-27 em kt (Fonte: Eurostat)

País exportador	2009	2010	2011	Principais países de destino
África do Sul	42	25	43	NL, UK
Argentina	10	9	6	IT
Austrália	9	66	14	NL
Bielorrússia	75	90	100	LT, DK
Bósnia	54	44	47	IT, SLO
Canadá	520	983	1160	UK, NL, BE
Chile	0	1	3	IT
Croácia	73	95	115	IT
EUA	535	763	1001	NL, UK, BE
Nova Zelândia	0	21	30	IT, UK
Noruega	10	4	13	SE
Rússia	379	396	475	DK, SE
Suíça	6	15	3	IT
Ucrânia	30	57	149	PL
Total importação	1743	2569	3159	

Pellets

para a EU-27

A alta densidade de pellets facilita igualmente o comércio interno na Europa. Este de 2009 para 2010 teve um crescimento de 60% e de acordo com as projeções é esperado que amplie ainda mais, devido à introdução oficial de normas comuns europeias (EN 14961-2), em 2011. A Tabela 10 dá uma ideia dos principais agentes no mercado de pellets na EU-27, onde as importações são significativamente importantes em comparação com a capacidade de produção. Os maiores exportadores de pellets são a Alemanha, Letónia, Estónia e Áustria. Enquanto a Alemanha e Áustria também apresentam uma forte procura nacional, os países bálticos utilizam os seus grandes recursos florestais e a sua localização estratégica no Mar Báltico para abastecer os grandes consumidores, especialmente a Dinamarca e a Suécia.

Tabela 10 - Comercialização de pellets na EU-27 em kt (Fonte: Eurostat)

País exportador	2009	2010	2011	Principais países de destino
Alemanha	370	543	680	DK, AT, IT
Áustria	159	285	274	IT, DE
Bélgica	119	50	51	FR, NL
Bulgária	11	8	6	IT
Dinamarca	20	124	184	DE, SE, NL
Eslováquia	46	64	44	IT, HU
Eslovénia	75	81	106	IT
Espanha	59	138	121	PT, FR
Estónia	316	383	562	DK, SE
Finlândia	154	187	116	DK, SE
França	59	62	87	IT, BE, DE
Holanda	74	103	136	DK, BE
Hungria	33	13	20	IT
Itália	2	4	10	
Letónia	231	420	670	DK
Lituânia	93	126	203	DK, IT
Luxemburgo	7	15	37	
Polónia	98	142	135	DK
Portugal	138	199	508	DK, UK, NL
Reino Unido	6	61	57	DK
República Checa	72	102	83	AT, IT, DE
Roménia	62	142	176	AT, IT
Suécia	104	69	154	DK
EU-27	2308	3323	4420	

Na Europa, cerca de metade do consumo de pellets é destinado ao mercado de aquecimento, com aplicação em equipamentos de aquecimento de pequena escala (caldeiras e salamandras), a restante metade é destinada ao setor energético, com aplicação em sistemas de combinação de calor e energia de grande escala.

De acordo com as projeções obtidas numa pesquisa realizada entre os parceiros PellCert, outras associações de pellets e Ekman a procura de pellets destinadas ao mercado de aquecimento deverá aumentar para mais de 22 milhões de toneladas em 2020.

Tabela 11 - Panorama da procura de pellets destinadas ao mercado de aquecimento (kt) (Fonte: PellCert, EPC, Ekman)

País/Ano	2011	2015	2020
Alemanha	1400	1900	3500
Áustria	710	1490	3500
Bélgica	100	150	200
Dinamarca	700	1000	1250
Espanha	150	450	1150
Finlândia	70	150	450
França	560	1400	2500
Irlanda	40	60	70
Itália	1900	3100	4250
Reino Unido	50	500	1250
Suécia	1000	1200	1400
Suíça	160	250	400
Outros Países	1100	1600	2200
Total	7940	13250	22120

Mercado de Pellets por Setor

A comercialização de pellets industriais destinadas ao setor energético e de aquecimento é caracterizada por grandes volumes, atingindo valores superiores a 10 milhões de toneladas por ano. Enquanto a comercialização de pellets destinadas ao aquecimento doméstico é realizada ao nível local, as pellets industriais são comercializadas globalmente.

Nem todos os países têm a mesma proporção de procura de pellets industriais. Os países pertencentes à União Europeia que mais estão envolvidos na comercialização de pellets industriais são:

- Bélgica, Holanda, Reino Unido, Suécia e Dinamarca como consumidores, alta importância da biomassa na produção de eletricidade e aquecimento;

Pellets

- Alemanha, Lituânia, Estónia, Letónia, Portugal, Finlândia e Suécia como fornecedores.

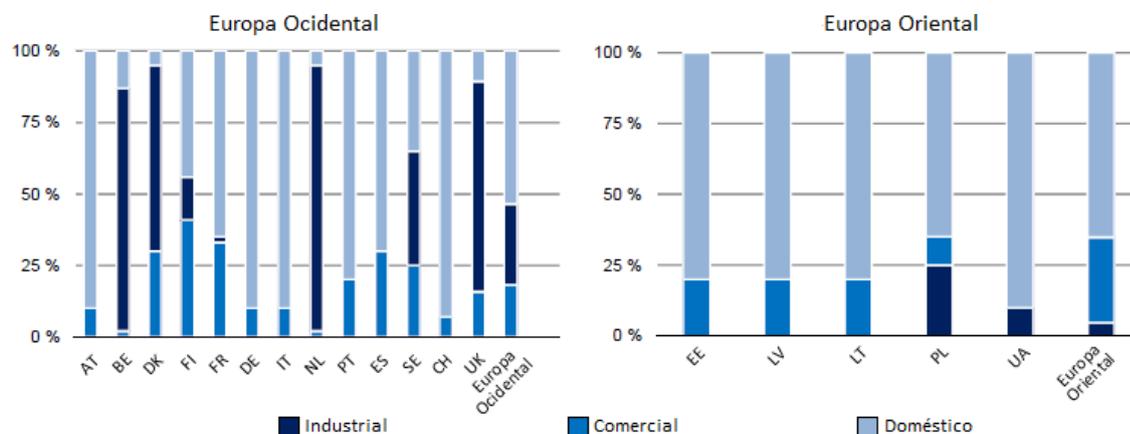


Figura 56 - Consumo de pellets por setor, volume e país (UE-27), em 2010 (Fonte: (Poyry, 2011))

A Suécia é o líder mundial em consumo de pellets. Em 2010, consumiu 2,3 milhões de toneladas, dos quais dois terços foram utilizados no setor doméstico e comercial (pequenas e médias empresas) para aquecimento.

Na Bélgica, Dinamarca, Holanda e Reino Unido a aplicação das pellets destina-se normalmente a centrais de cogeração, predominando o setor industrial.

A Itália tem o maior mercado doméstico de pellets do mundo, onde num consumo total de 1,8 milhões de toneladas em 2011, 90% foram destinadas ao setor doméstico.

Relativamente a Portugal o setor doméstico representa mais de 75% do consumo de pellets, sendo a restante parcela destina ao setor comercial.

4.5.2 Mercado Nacional

O mercado nacional de biomassa para aquecimento doméstico sofreu uma mudança substancial nos últimos anos. A implementação de um setor industrial nacional de produção de pellets, juntamente com uma crescente procura de alternativas viáveis para substituir os combustíveis fósseis com elevados custos de funcionamento, como o gasóleo de aquecimento e o gás natural, criou a condição perfeita para a penetração no mercado de equipamentos de combustão a pellet.

Desde de 2006 que estes equipamentos começaram a aparecer sistematicamente, beneficiando de inúmeras vantagens competitivas em comparação com os equipamentos

munidos a combustíveis fósseis, destacando-se o menor custo de aquisição do biocombustível pellets, a dedução de impostos, a facilidade de utilização com sistemas de alimentação e ignição automático.

Os principais setores de consumo de pellets em Portugal são o doméstico e comercial, sendo este último representado por pequenas indústrias com necessidades de calor, como a panificação. Atualmente, a nível nacional ainda não existem instalações de produção de energia a utilizar este biocombustível sólido. Em Portugal o conceito de aquecimento é parcialmente desconhecido, principalmente por causa do clima mais quente, comparando com países da Europa central, o que reduz as necessidades de aquecimento para 5-6 meses, mas também por causa dos investimentos financeiros que precisam de ser feitos nas infraestruturas dos edifícios. Assim, o mercado Português de pellets é estabelecido sobre os pequenos e médios consumidores e, principalmente, centrado no período de aquecimento, de Outubro a Abril. Por este motivo, o consumo interno de pellets é aproximadamente apenas de 10% da produção total. Este em 2012 registou um aumento significativo de 41% em relação ao ano de 2011.

Com base no relatório de ANPEB (Associação Nacional de Pellets Energéticas de Biomassa) a capacidade instalada estabelecida para o ano de 2012 em Portugal, supondo uma produção contínua de 24 horas e 365 dias por ano foi de 904 kt, sendo a produção efetiva de aproximadamente 690 kt de pellets, representando um aumento de 8% comparativamente ao ano anterior. No entanto, durante o ano de 2013 perspetivava-se a implementação de 3 a 5 novas unidades de produção de pellets potencializando a capacidade instalada até 1240 kt anuais.

A relação produção-consumo confirma que o mercado de pellets em Portugal encontra-se ainda pouco desenvolvido e com uma procura pequena, mas também mostra que há uma grande aceitação das pellets produzidas em território nacional em mercados muito exigentes, como a Noruega, Suécia ou na Alemanha, indicando a boa qualidade que estas possuem.

Na generalidade as empresas de produção de pellets do mercado nacional centralizam-se na exportação, uma vez que não é possível, para o mercado português, absorver a capacidade de produção nacional, sendo as necessidades deste quase exclusivamente concedidas pela produção nacional e a taxa de importação quase inexistente.

Neste contexto, existem dois tipos distintos de produtores de pellets em Portugal que desempenham um papel complementar no domínio da bioenergia nacional:

- Os grandes operadores, que têm no norte e centro da Europa, o seu principal mercado-alvo.
- Os pequenos operadores, que abastecem quase todo o mercado nacional.

De salientar que o mercado de pellets em Portugal teve um grande desenvolvimento a partir de 2005 até hoje, passando a partir de uma única unidade de produção para cerca de 25 em 7 anos.

As unidades de produção de pellets surgem com maior concentração a norte do rio Douro e na zona centro entre os Distritos de Viseu e Leiria onde há uma maior concentração de área florestal, como se pode verifica na figura abaixo, onde cada marcador representa uma unidade de produção de pellets referente ao ano de 2012. Relativamente à dimensão das unidades de produção de pellets, os dados são:

- 24% de todas as unidades têm uma produção inferior a 5000 t/ano;
- 12% produz entre 5000 a 10000 t/ano;
- 24% produz entre 10000 a 50000 t/ano;
- 16% produz entre 50000 a 100000 t/ano;
- 24% têm uma produção igual ou superior a 100000 t/ano.

No Anexo IV estão representadas as unidades de produção de pellets em funcionamento em 2012 ou em fase de implementação com início de atividade até final de 2013, assim como a sua localização, ano de implementação e capacidade de produção.

**Legenda:**

Azul-escuro - até 5000 t/ano

Rosa - 5000 a 10000 t/ano

Verde - 10000 a 50000 t/ano

Azul-claro - 50000 a 100000 t/ano

Amarelo - igual ou superior a 100000 t/ano

Figura 57 – Distribuição das unidades de produção de pellets em funcionamento em 2012 ou em fase de implementação com início de atividade até final de 2013.

Atualmente, segundo a ANPEB existem apenas sete produtores de pellets (Pinewells, S.A., Pelletsfirst, José Afonso & Filhos, S.A., Enermontijo, Lda, Pelletspower, Lda, Palser – Bioenergia e Paletes, Lda. e Nicepellets, Lda.) certificados pela EN 14961-2 de acordo com a classe A1. As pellets apresentadas pelos restantes produtores possuem características que se enquadram na classe A2 segundo a EN 14961-2. A maioria dos produtores não apresenta matérias-primas provenientes de uma fonte sustentável certificada.

A implementação de unidade de produção de pellets contribui para o desenvolvimento das áreas rurais, agregando valor ao meio natural e aos locais de transformação primária de resíduos, melhorando a economia local e a criação de emprego.

As grandes empresas mostram um grau de industrialização elevado, liderando o caminho das tecnologias inovadoras, desenvolvendo o interesse em novas fontes de matérias-primas como culturas energéticas e aumentando a taxa de empregabilidade local.

Pellets

No entanto, alguns pequenos produtores demonstram uma grande automação no seu processo de produção, controlando parâmetros específicos para a obtenção de pellets de qualidade, tornando a aplicação de normas viável.

5. CASO DE ESTUDO

A presente dissertação pretende contribuir para a avaliação do impacto da cadeia de valorização energética de biomassa para pellets na qualidade do ar atmosférico. Como resultado, procedeu-se à caracterização de uma unidade de produção de pellets, atualmente em operação segundo diversos critérios, nomeadamente, a sua localização, a potência nominal instalada, a capacidade de produção, as tecnologias e processos de conversão de biomassa, o consumo de biomassa, o ano de entrada em funcionamento, entre outros parâmetros. Cumulativamente foram estimadas as emissões associadas a cada uma das operações que decorrem ao longo da cadeia de valorização de biomassa para pellets. Posteriormente procedeu-se à avaliação do impacto nas emissões de CO_{2e} associadas a um cenário de uso exclusivo de pellets para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em detrimento de outras fontes de energia.

5.1 *Caraterização da Unidade de Produção de Pellets*

Neste subcapítulo é feita uma exposição detalhada da linha de produção de uma unidade de produção de pellets de biomassa floretal a laborar em Portugal, onde foi efetuado o estudo de caso, bem como a cadeia de abastecimento e de distribuição. Relativamente à cadeia de abastecimento são descritas as matérias-primas utilizadas, os veículos usados e a área abrangente. Seguidamente é feita uma descrição detalhada da

linha de produção, das operações envolventes e dos consumos subjacentes aos mesmos. Por fim, são apresentados dados relativos à cadeia de distribuição, evidenciando os veículos usados, as quantidades comercializadas e tipo de mercados.

A unidade industrial em estudo foi uma das primeiras desta dimensão a ser instalada em Portugal, tendo iniciado a laboração em 2008, apresentando uma capacidade de produção anual de cerca 80 kt, dispondo de 3 peletizadoras com uma capacidade de produção de 4 t/h cada. Esta detém uma área de implantação total de aproximadamente 2,5 ha, na qual se encontram incorporados um parque de armazenamento com 1,3 ha, dois edifícios industriais e um edifício administrativo com 150 m². A sua localização estratégica tem em vista a proximidade das fontes de matérias-primas e do porto marítimo de Aveiro, permitindo a exportação das pellets produzidas.

A principal atividade da unidade fabril em questão restringe-se exclusivamente à transformação de biomassa florestal para a produção de pellets para posterior venda, sendo as atividades de exploração florestal, abastecimento e distribuição subcontratadas a serviços externos pela unidade fabril ou pelos clientes.

O abastecimento de matérias-primas é realizado por mais de 150 fornecedores, maioritariamente de pequena dimensão, sendo adquiridas localmente uma vez que, devido à sua reduzida densidade, o transporte a grandes distâncias tornar-se-ia economicamente inviável. Relativamente ao diâmetro de abastecimento compreendido nos 120 km, é de salientar a existência de um ponto intermédio de concentração e recolha de matéria-prima sob a forma de serrim e estilha, localizado em Albergaria-a-Velha, o qual tem uma contribuição de 20% no abastecimento de biomassa destinada ao processo de fabrico de pellets. Esta logística de abastecimento permite uma redução de custos ao nível do transporte, uma vez que é utilizado o mesmo veículo que transporta os pellets da unidade fabril para o porto de Aveiro e no seu regresso à unidade fabril abastece com matéria-prima no ponto intermédio.

A matéria-prima utilizada para o processo de produção de pellets é constituída, por várias espécies florestais, com predominância de pinho, representado mais de 75%, e eucalipto. A obtenção desta provém da exploração florestal com abate recente, incorporada no processo de fabrico sob a forma de rolaria, podendo ostentar qualquer tipo de diâmetro desde que os inertes nas pellets não ultrapassem os valores previstos nas normas, constituindo a biomassa florestal primária (BFP) que se entende pela fração biodegradável

dos produtos gerados na floresta e que são processados para fins energéticos, integrando ainda subprodutos provenientes da transformação primária de biomassa, tais como:

- Estilha;
- Serrim;
- Aparas;
- Costaneiros e outros isentos de produtos químicos.

Estes constituem a biomassa florestal secundária (BFS) que se caracteriza pela matéria orgânica residual e representa atualmente 35% da matéria-prima utilizada no processo de fabrico. No entanto, este tipo de biomassa florestal já teve uma maior relevância chegando a representar 50%, o facto deste decréscimo de incorporação deve-se essencialmente ao desenvolvimento do mercado e custos associados à sua aquisição.

Com esta matéria-prima a unidade fabril, apesar de não ter certificação ao nível do produto, pretende cumprir os requisitos de certificação do produto pela norma europeia EN 14961-2, que são desenvolvidas maioritariamente tendo por base biomassa de pinho descascada. No entanto, há a incorporação de eucalipto que se deve essencialmente ao preço da biomassa, que no mercado nacional é determinado pelas indústrias de celulose, e à falta de ordenamento florestal, que provoca uma decadência nas plantações de pinho. A inclusão desta espécie florestal pode provocar efeitos adversos na qualidade das pellets afetando o teor de cloro, enxofre e cinzas e por conseguinte o desempenho dos equipamentos de combustão que não estão desenvolvidos para espécies florestais menos nobres.

Na operação de combustão necessária para se processar a secagem da matéria-prima utilizada no fabrico de pellets, a biomassa florestal residual (BFR) é a principal fonte energética, incorporando os resíduos de biomassa florestal e os resíduos provenientes da indústria transformadora de madeira, que podem estar sob a forma de bruto ou de estilha.

De acordo com a capacidade de produção horária (12 t/h) e admitindo que uma laboração de 24 horas por dia durante 330 dias, obtém-se os seguintes resultados:

- Capacidade de Produção Diária – 288 t/dia
- Capacidade de Produção Anual – 95040 t/ano

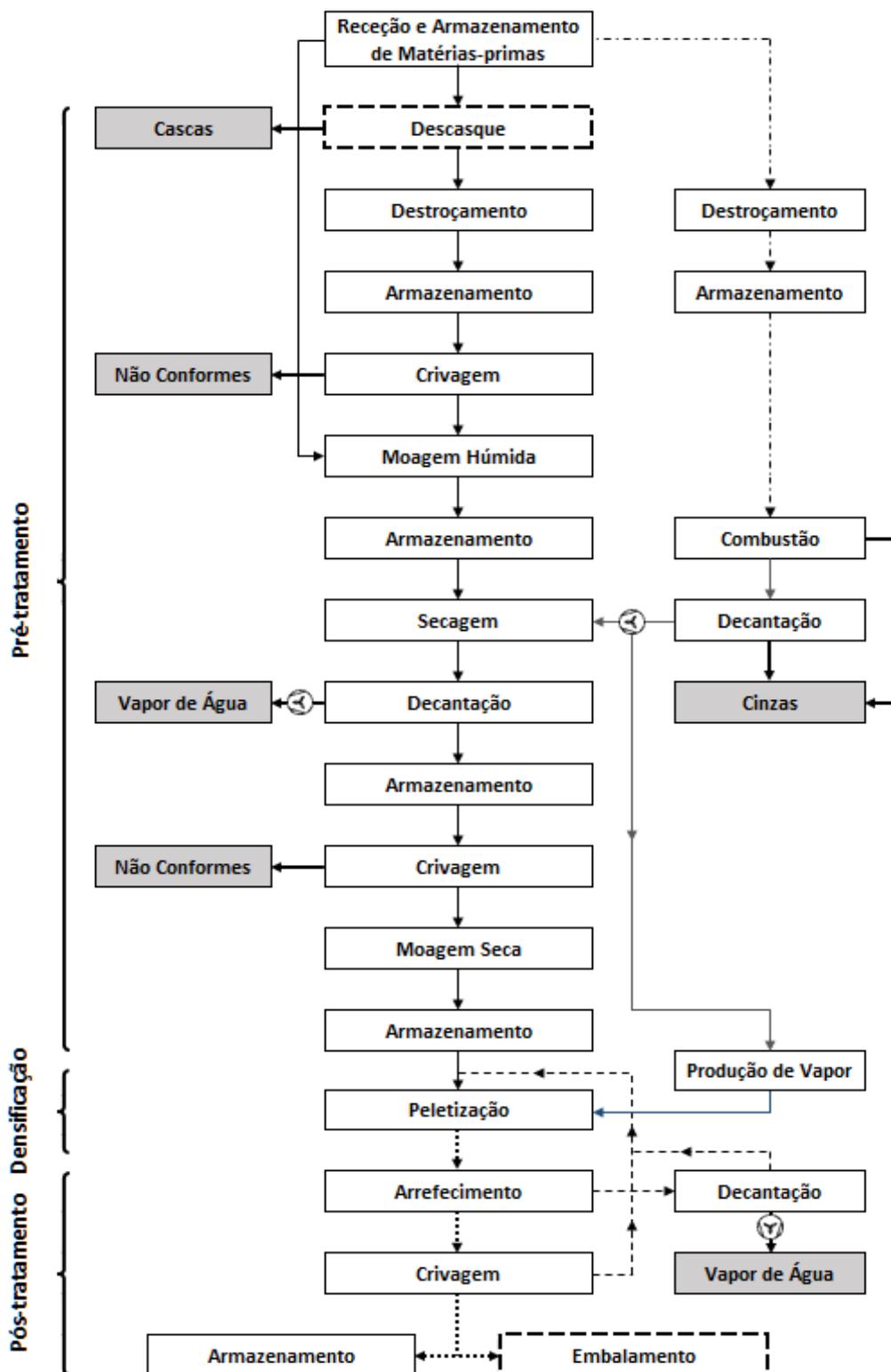
No entanto o valor da produção anual é na ordem das 80 kt, facto este deve-se em parte à escassez da matéria-prima necessária para que seja possível atingir a capacidade de

Caso de Estudo

produção, tendo em conta também as ineficiências relativas ao processo, maioritariamente na operação de secagem, e as avarias que condicionam igualmente o mesmo.

Os fatores que influenciam o preço final das pellets, que ronda os 185 €/t à saída da unidade fabril, estão relacionados com o custo das matérias-primas, do consumo de energia e da mão-de-obra.

O processo de produção de pellets da unidade industrial em estudo engloba as operações que se encontram descritas no seguinte diagrama, no qual há a elucidação a algumas operações a implementar no futuro.



Legenda:

→ Fluxo de biomassa primária e secundária	→ Fluxo de ar quente	⊗ Ventilador
- - -> Fluxo de biomassa residual	→ Fluxo de vapor seco	□ Operação
⋯> Fluxo de pellets	- - -> Fluxo de não conformes	- - - □ Operação a implementar
		■ Output

Figura 58 – Diagrama de operações da unidade de produção de pellets em estudo (2014).

Receção e Armazenamento de Matérias-Primas

Na receção das matérias-primas antes de serem descarregadas dos veículos, efetua-se um registo da origem e tipo de matéria-prima fornecida, da quilometragem e da carga dos veículos, sendo esta última realizada através da passagem destes por uma balança de pesagem à entrada das instalações da empresa. Posteriormente o descarregamento e movimentação das matérias-primas no parque de armazenamento procedem-se com recurso a uma máquina giratória ou a um carregador frontal equipado com uma pá ou grua, podendo eventualmente serem descarregadas pela grua acoplada ao camião no caso de este ser dotado da mesma. A unidade fabril dispõe de uma máquina giratória e de dois carregadores frontais que funcionam alternadamente.

Geralmente os veículos de transporte de BFP e de costaneiros (BFS) são camiões semirreboque ou reboque, o transporte de BFR sob a forma de bruto é realizado por camiões reboque com ou sem atrelado com aplicações laterais, sendo a restante BFS e BFR sob a forma de estilha e serrim, transportada por camiões semirreboque basculante ou de lona com piso móvel, denominados por “graneleiros”.

Dada a laboração contínua a unidade industrial necessita de assegurar a existência de stocks de matérias-primas, o que acontece através da existência de um parque de armazenamento.

Descasque

Com a implementação da operação de descasque da BFP, que consiste basicamente na remoção de cascas, a unidade fabril pretende otimizar o aproveitamento de biomassa e melhorar a qualidade das suas pellets, uma vez que a presença de casca origina um aumento do teor de cinzas no produto final.

O resíduo, as cascas, gerado nesta operação poderá ser inserido no processo de combustão ou comercializado, dependendo da viabilidade económica.

Destroçamento

Uma vez que a operação de descasque ainda não se encontra implementada é neste setor que se inicia o pré-tratamento da biomassa para o processo de fabrico de pellets, existindo duas linhas distintas:

- Destroçamento de BFP e BFS: é a operação onde se executa a trituração da biomassa por um destrojador de lâminas, sendo diariamente trituradas cerca de 450 ton.
- Destroçamento de BFR: trata-se igualmente de uma operação que envolve a trituração da biomassa, no entanto realizada por outro tipo de destrojador. O consumo desta matéria-prima pela fornalha varia em certa parte com as condições climatéricas que se fazem sentir nas várias estações do ano, proporcionando uma variação da quantidade diária triturada entre 40-70 ton.

Armazenamento

Nesta operação a biomassa triturada sob a forma de estilha é armazenada e posteriormente inserida no processo.

Crivagem

A operação de crivagem tem como princípio de funcionamento a separação pela espessura ou comprimento do subproduto, a estilha, sendo processada por um crivo vibratório, atuado por um sistema excêntrico.

O output resultante desta operação denomina-se de não conformes, uma vez que não reúnem as condições necessárias para prosseguirem no processo de fabrico, sendo geralmente reincorporados no processo.

Moagem Húmida

Trata-se da operação na qual a biomassa primária e secundária já triturada sob a forma de estilha é reduzida a partículas de menor dimensão, originando um serrim não refinado. Para o efeito, a unidade industrial utiliza moinhos de martelos, dispondo atualmente de três.

Sensivelmente 2 a 3% do teor de humidade presente na matéria-prima é removido nesta operação.

Ao longo da linha de produção, iniciada na operação de destorroamento até à operação de moagem húmida, inclusive, estão distribuídos por cada operação um detetor metal, à exceção da operação de crivagem que apresenta dois, perfazendo um total de cinco detetores. A aplicação destes permite a remoção dos metais presentes permitindo que estes não interfiram no processo de fabrico, nem provocando danos nos equipamentos.

Armazenamento – intermédio

Nesta operação a matéria-prima húmida é ensilada no Silo 1, permitindo assegurar a existência de stocks de matérias-primas e a laboração continua.

Combustão

A energia térmica necessária à operação de secagem provém da operação de combustão na qual se realiza a queima da BFR anteriormente triturada, gerando temperaturas na ordem de 800-1000°C.

O equipamento utilizado nesta operação é uma fornalha de grelha com uma potência de 15 MWtérmicos, que produz um fluxo de ar quente resultante da combinação de ar injetado (temperatura ambiente) com ar de combustão (temperatura no interior da fornalha).

Desta operação resultam como output as cinzas que têm como destino o aterro sanitário, tendo a empresa em curso alguns contactos com empresas de valorização deste tipo de resíduo.

De modo a facilitar a compreensão da interação entre esta operação e as três operações posteriores encontra-se na seguinte figura um esquema representativo das mesmas.

permitir, devido às elevadas temperaturas envolvidas, a transferência de calor e consecutivamente que a humidade existente no serrim húmido vaporize. Uma vez seca, a matéria-prima (serrim seco) presente no fluxo de ar ingressa na operação seguinte a uma temperatura de aproximadamente de 80°C.

A operação de secagem e as posteriores operações encontram-se numa zona suscetível a incêndios e explosões devido às elevadas temperaturas reinantes no secador, entre 250 °C e 450 °C, e à presença de matéria combustível, o serrim a secar.

Decantação

Nesta operação o fluxo de ar que transporta juntamente a matéria-prima seca proveniente da operação de secagem ingressa num conjunto de quatro ciclones, que têm como finalidade remover o serrim seco existente no mesmo, originando devido à transformação de calor por convecção natural como output o vapor de água, que é expelido para a atmosfera através da chaminé com recurso a um ventilador.

Armazenamento - intermédio

Nesta operação a matéria-prima seca não refinada é ensilada no Silo 2, permitindo assegurar a existência de stocks de matérias-primas e a laboração continua.

Crivagem

Esta operação de crivagem tem o mesmo princípio de funcionamento, utilizando o mesmo tipo de equipamento e originando o mesmo output que a descrita anteriormente.

Antes desta operação encontra-se um detetor de metais, que caso sejam detetados serão removidos para que não entrem no processo de fabrico e danifiquem os equipamentos.

Moagem Seca

Na moagem seca realiza-se a homogeneização dimensional do serrim, tornando-o refinado, fator que promove o aumento da densidade e, conseqüentemente, do poder calorífico das pellets.

Após a secagem, o material, já com os níveis de humidade pretendidos, é novamente triturado para ser homogeneizado relativamente à dimensão, através de três moinhos de martelos refinadores.

Os moinhos de martelos refinadores são constituídos por crivos metálicos, com a abertura de malha correspondente ao tamanho máximo que se pretende obter para as partículas.

Nesta operação ocorre a remoção de sensivelmente 3 a 4% do teor de humidade presente na matéria-prima. Posteriormente a esta operação encontra-se um detetor de metais, cuja finalidade é a remoção destes e garantir o bom funcionamento da linha de produção.

Armazenamento – intermédio

Nesta operação a matéria-prima seca refinada é ensilada no Silo 3, permitindo assegurar a existência de stocks de matérias-primas e a laboração contínua.

Produção de Vapor

Nesta operação é produzido o vapor seco que caso seja necessário será empregue na operação de peletização. O princípio de funcionamento consiste na introdução do fluxo de ar quente proveniente da operação de combustão numa caldeira que aproveita o calor residual da passagem deste e justamente com o calor produzido pela caldeira aquecem um sistema mono-tubular que transporta a água, ocorrendo a transformação gradual desta em vapor. No entanto, verificou-se que a aplicação desta operação não se torna vantajosa, pelo facto que na maior parte das vezes a matéria-prima apresenta as condições necessárias para uma boa operação de peletização.

Peletização

Após toda a fase de pré-tratamento e a matéria-prima reunir todas as condições desejadas, o serrim seco refinado é densificado, originando-se um granulado de biomassa, geometricamente cilíndrico, com diâmetro de 6 ou 8 mm e comprimento entre 20 e 40 mm, as denominadas pellets.

O equipamento aplicado nesta operação denomina-se de peletizadora ou prensa, cuja alimentação deverá ser lenta de modo a poder vencer, de forma adequada, o elevado

atrído do lenho. Para o efeito, a unidade industrial dispõe atualmente de um conjunto de três prensas, com uma capacidade de produção de 4 t/h cada.

Na operação de peletização poderá ser necessário aquecer o serrim até temperaturas da ordem de 120-130°C, com recurso a vapor seco proveniente da operação de produção de vapor. O serrim é pressionado a alta pressão por uma matriz anelar que possui um movimento de rotação em torno de um eixo horizontal rodando acoplada aos rolos compressores, sendo o material prensado cortado no comprimento desejado por um dispositivo de corte (facas), situado sobre a superfície externa da matriz, dando origem às pellets.

Dependendo do material a ser pelletizado, é necessária uma série de ajustes, os mais críticos dos quais ocorrem através da alteração da matriz. Ao alterar-se a dimensão dos orifícios ou o número de orifícios na matriz irá alterar-se a resistência. A pressão adequada permite que a matéria-prima seja aquecida e amolecida de modo a ser moldada e compactada na forma desejada. Se a pressão for insuficiente, a matéria-prima não será compactada e simplesmente passará através dos orifícios saindo, basicamente, como entrou, sob a forma de serrim.

Esta operação consome cerca de 30% da energia elétrica requerida pela unidade fabril.

Arrefecimento

À saída das peletisadoras, as pellets apresentam alguma plasticidade, devido, nomeadamente, à elevada temperatura (90 a 95 °C) a que ainda se encontram, sendo sujeitos à operação de arrefecimento.

Neste setor inicia-se o pós-tratamento das pellets produzidas, sendo uma operação muito importante no processo de fabricação de pellets, pois contribui para que a lenhina da biomassa alcance o seu maior potencial aglutinante, fator fundamental para que as pellets mantenham a sua forma. Durante o arrefecimento, as pellets tornam-se rígidos e perdem humidade, de modo que o teor de humidade final, após o arrefecedor, equipamento utilizado nesta operação, pode chegar aos 6 %. No entanto, dado que as pellets estarão sujeitas à humidade do ar envolvente, o seu teor de humidade irá estabilizar entre 8 e 10% e apresentarão uma temperatura sensivelmente de 25°C, ingressando posteriormente na operação de crivagem.

O ar de exaustão do arrefecedor, cuja temperatura é aproximadamente de 45°C, transporta juntamente alguns não conformes que irão seguir para a operação de decantação.

Decantação

Nesta operação de decantação o ar de exaustão proveniente do arrefecimento ingressa num conjunto de dois ciclones, que têm como finalidade remover os não conformes presentes no mesmo, originando devido à transformação de calor por convecção natural como output o vapor de água, que é expelido para a atmosfera através da chaminé com recurso a um ventilador.

Os não conformes ingressam no processo de fabrico imediatamente antes da operação de peletização.

Crivagem

Ao longo das operações de peletização e arrefecimento foram-se gerando não conformes, denominados de finos ou partículas residuais, sendo necessária a operação de crivagem para a remoção destes permitindo deste modo alcançar o teor de finos previsto nos requisitos.

O equipamento aplicado nesta operação consiste num crivo, com movimento oscilante vibratório que dá origem à seleção granulométrica entre pellets e finos.

A fração de não conformes reintegra a linha de produção imediatamente antes da operação de peletização, enquanto os pellets prosseguem para a operação posterior.

Armazenamento - final

Após o processo de fabrico acima descrito, o pós-tratamento das pellets termina nesta operação, onde estes são ensilados no Silo 4 e 5, sendo a sua distribuição efetuada a granel. Desde que armazenados em local seco, os pellets não se degradam com o tempo, permitindo abastecer o mercado.

Embalamento

Atualmente a unidade industrial em questão não possui na sua linha de produção a operação de embalamento, no entanto há possibilidade de esta vir a ser implementada no

Caso de Estudo

futuro caso se registre mudanças relativamente ao mercado de destino e consequente qualidade das pellets.

Nesta operação as pellets são introduzidas em máquinas de pesagem e de embalagem automática, sendo comercializados em sacos de 15 kg ou em big bags (1000 kg).

As pellets produzidas, cujas especificações técnicas se encontram na Tabela 12, destinam-se maioritariamente, cerca de 95% da produção anual, para o mercado industrial, sendo aplicadas no processo de co-combustão. A nível do produto para consumo industrial, os principais destinos são: Reino Unido, Holanda e Dinamarca, sendo a exportação efetuada através do Porto de Aveiro, que se encontra a uma distância de 120 km da unidade fabril.

Os veículos usados para o transporte de pellets são camiões semirreboque basculante ou de lona com piso móvel, denominados por “graneleiros”.

Tabela 12 - Especificações técnicas e de qualidade dos pellets da unidade fabril em estudo.

Parâmetros	Unidade	Especificação
Diâmetro	mm	4-10
Comprimento	mm	10-40
Matéria volátil		
Teor de humidade	% DM	< 10
Densidade volúmica (aparente)	kg/m ³	> 600
Valor calorífico (como recebido)	GJ/t ar	17
Teor de cinzas	% DM	< 1,5
Conteúdo de cascas	%	< 8
Temperatura de fusão inicial	°C	> 1200
CI	% DM	< 0,03
S	% DM	< 0,05
F	ppm	< 30
Aditivos (óleo vegetal)	%	Interdito
Metais pesados		
As	mg/kg DM	< 2
Cd	mg/kg DM	< 1
Cr	mg/kg DM	< 15
Cu	mg/kg DM	< 20
Hg	mg/kg DM	< 1
Pb	mg/kg DM	< 20
Zn	mg/kg DM	
Distribuição de tamanho das partículas		Mínimo
% < 3.0 mm (Durabilidade)	%	100
% < 2.0 mm	%	95
% < 1.5 mm	%	75
% < 1.0 mm	%	50

5.2 *Avaliação das Emissões Atmosféricas da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets*

Neste subcapítulo será realizada a avaliação detalhada das emissões atmosféricas associadas às operações realizadas ao longo da cadeia de valorização de biomassa para pellets, tendo por base os dados de uma empresa de exploração florestal obtidos no âmbito do projeto BIOG AIR e da unidade de produção de pellets referente ao caso de estudo.

Em 2013 a unidade industrial teve uma produção anual de 73000 toneladas de pellets, operando 330 dias com uma laboração 24 horas por dia. De modo a satisfazer esta produção necessitou aproximadamente de 195938 toneladas de matéria-prima, correspondendo 65% a BFP, 15% a BFS e os restantes 20% à BFS, em forma de estilha. No entanto, de forma a facilitar os cálculos considerou-se que os 15% de BFS tinham o mesmo desempenho ao longo da cadeia que a BFP, tal facto prende-se pela multiplicidade de origens deste tipo de biomassa e do tipo de transporte utilizado, sendo de difícil análise face à escassez de dados obtidos.

A matéria-prima com origem na BFS, em forma de estilha, produzida através do processo de conversão física da BFP, corresponde aproximadamente a 39188 toneladas. Deste modo, tornou-se relevante estimar a quantidade de BFP processada, tendo por base a densidade da estilha de 354 kg/m^3 , com um teor de humidade de 50%, o fator de conversão de 2,78 entre volume de estilha e volume de BFP ("Units, conversion factors and formulae for wood for energy") e o fator de conversão de 0,775 entre volume sobre casca e peso verde para o Pinheiro Bravo, obtendo-se um volume estilha na ordem 110699 m^3 correspondendo aproximadamente a 30895 toneladas de BFP.

Na operação de combustão, em resultado da variação da quantidade diária triturada de BFR (40 a 70 t/d), assumiu-se uma média de 60 toneladas de BFR trituradas por dia, totalizando um valor de 19800 toneladas anuais.

5.2.1 Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Exploração de Matérias-primas e no Destroçamento Intermédio.

No âmbito do projeto BIOG AIR foi recolhido uma série de dados, referentes a uma empresa de exploração florestal, com intuito de estimar as emissões atmosféricas relacionadas com esta atividade. Para tal é necessário conhecer um conjunto de variáveis entre elas: quantidade de biomassa florestal extraída, recursos utilizados e tipo de combustível, horas de trabalho, distâncias dos cursos percorridos e do consumo das máquinas utilizadas. A empresa no ano de 2011 operou 247 dias, extraíndo 13000 toneladas de BFR e 44000 toneladas de biomassa primária florestal, perfazendo um total de 57000 toneladas de biomassa florestal. Normalmente, laborava diariamente com duas motosserras durante 8 horas por dia e com um gasto de 18 litros de gasolina por hora, perfazendo um consumo anual de 35568 litros de gasolina. Deste modo obteve-se um consumo específico de 0,48 litros de gasolina por tonelada de BFP e um consumo específico de 0,14 litros de gasolina por tonelada de BFR. Além disso laboravam com duas máquinas específicas para a atividade de exploração florestal, a *Harvester* e a *Forwarder*, sendo o consumo anual de 21000 litros de gasóleo correspondente a 1750 horas de trabalho anuais. Neste sentido obteve-se um consumo específico de 0,28 litros de gasóleo por tonelada de BFP e um consumo específico de 0,08 litros de gasóleo por tonelada de BFR.

De forma a calcular as emissões associadas à atividade de exploração florestal, a metodologia adotada baseou-se na aplicação de uma equação matemática para estimar a emissão de um poluente (Equação 3):

$$E_i = CE_y \times FE_i \times m_z \times \rho_y \times 10^{-3} \quad \text{Equação 3}$$

Onde, E_i – emissão por espécie de poluente i , kg/ano; CE_y – consumo específico por tipo de combustível y , l_y/t_z ; FE_i – fator de emissão por espécie de poluente i , g_i/kg_y ; m_z – massa por tipo de biomassa z , t_z/ano ; ρ_y – densidade por tipo de combustível y , kg/l_y .

Os fatores de emissão (FE) são expressão da taxa de emissão de um dado poluente atmosférico dividida pelo nível de atividade que lhe deu origem, sendo resultado da compilação dos FE incluídos em versões anteriores do Guia do Inventário relativo às emissões de poluentes atmosféricos do EMEP/EEA (2009). Este fornece orientações de carácter metodológico para compiladores e investigadores dos inventários nacionais

interessados em calcular as emissões de poluentes atmosféricos, disponibilizando para tal um conjunto de capítulos relativos a fontes setoriais específicas, onde se encontram reunidos diversos fatores de emissão e métodos de cálculo. É ainda de salientar que os fatores de emissão aplicados encontram-se inseridos na SNAP 08 (outras fontes móveis e máquinas) (Tabela 13).

Tabela 13 - Fatores de emissão para a atividade de exploração florestal ($g_{poluente}/kg_{combustivel}$) (FONTE: EMEP/EEA, 2009).

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	COVNM	NO _x	PM ₁₀
Motosserras	2,200	620,793	3,197	0,017	0,003	242,197	2,765	3,762
Harvester e Forwarder	0,033	7,834	3,160	0,138	0,008	2,020	29,093	0,976

A Tabela 14 apresenta os valores anuais correspondentes às emissões totais por tipo de equipamento e para a atividade de exploração florestal resultantes do total de biomassa florestal extraída utilizada como matéria-prima para a produção de pellets em 2013 pela unidade industrial em estudo, em que a BFP tem um contributo de 97%, e a BFR os restantes 3%.

Tabela 14 - Emissões totais para a atividade de exploração florestal ($kg_{poluente}/ano$).

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	COVNM	NO _x	PM ₁₀
Motosserras	153,79	43395,11	223,48	1,19	0,21	16930,23	193,28	262,97
Harvester e Forwarder	1,53	362,12	146,07	6,38	0,37	93,37	1344,81	45,12
Conjunto Equipamentos	155,31	43757,24	369,55	7,57	0,58	17023,60	1538,09	308,09

De acordo com aplicação da equação matemática (Equação 4) determinou-se a quantidade de poluente i resultante da atividade de exploração florestal por quantidade de pellets produzida.

$$FEE_i = (E_i \times 10^3) / m_{pellets} \quad \text{Equação 4}$$

Onde FEE_i – fator de emissão específica do poluente i, g_i/t_{pellets}; E_i – emissão por espécie de poluente i, kg_i/ano; m_{pellets} – massa de pellets produzida, t_{pellets}.

Caso de Estudo

Tabela 15 – Fatores de emissão específica de vários poluentes atmosféricos por quantidade de pellets produzida ($\text{g}_{\text{poluente}}/\text{t}_{\text{pellets}}$).

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	COVNM	NO _x	PM ₁₀
Motosserras	2,107	594,454	3,061	0,016	0,003	231,921	2,648	3,602
Harvester e Forwarder	0,021	4,961	2,001	0,087	0,005	1,279	18,422	0,618
Conjunto Equipamentos	2,128	599,414	5,062	0,104	0,008	233,200	21,070	4,220

Os dados exibidos na Tabela 15 referentes aos fatores de emissão específica dos poluentes analisados permitem constatar que o CO e os COVNM enquadram-se nos poluentes com maior contribuição nas emissões de poluentes atmosféricos provenientes da atividade em questão.

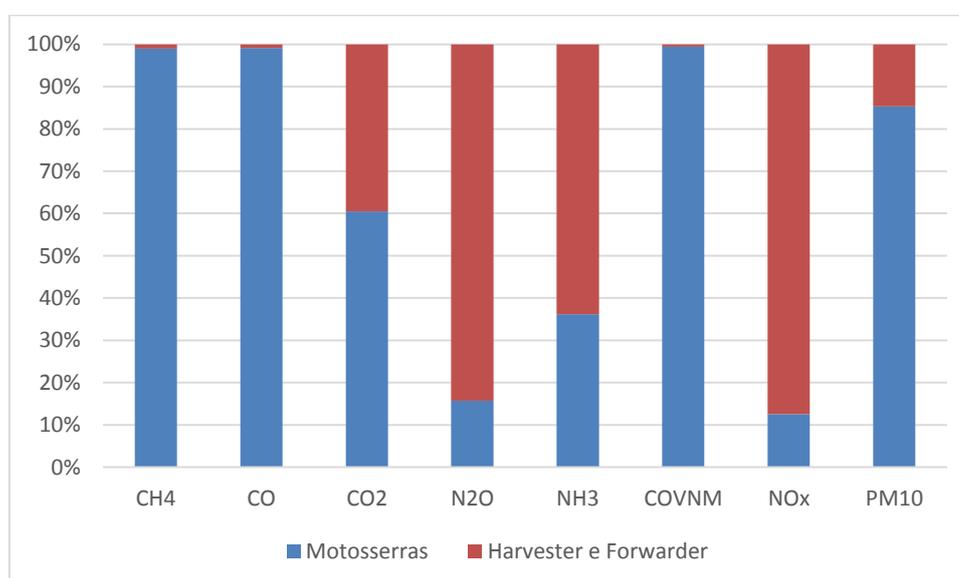


Figura 60 - Distribuição das emissões totais de vários poluentes atmosféricos decorrentes da atividade de exploração florestal.

A Figura 60 mostra as emissões associadas aos vários equipamentos utilizados na atividade de exploração florestal, sendo o CH₄, o CO, o CO₂, os COVNM e as PM₁₀ maioritariamente provenientes da *Harvester e Forwarder*. No entanto, a utilização das motosserras tem um grande contributo nas emissões associadas ao N₂O, NH₃ e NO_x.

Da análise de *inputs-outputs* da atividade de exploração florestal, que encontra-se esquematizada na figura abaixo, fica-se a conhecer o consumo de combustível e as emissões de poluentes atmosféricos associados à quantidade de biomassa florestal explorada.

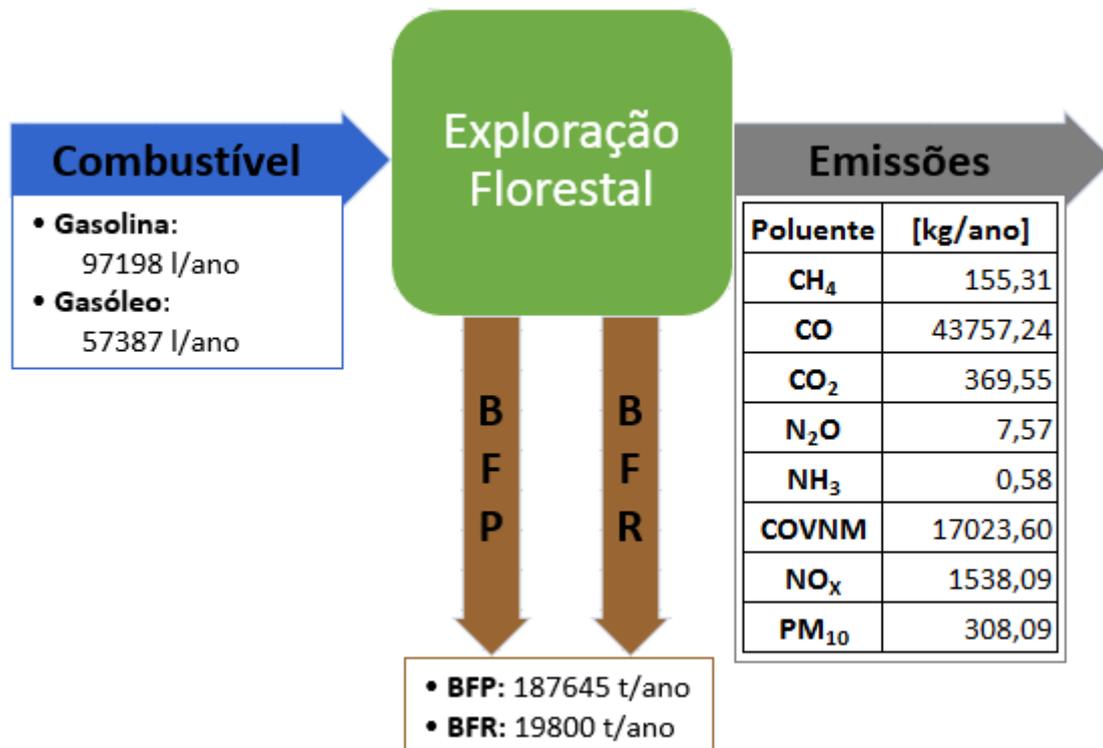


Figura 61 – Esquema da análise de *inputs-outputs* da atividade de exploração florestal.

As emissões de poluentes atmosféricos referentes à operação de destroçamento de BFP em BFS (estilha) processada no ponto intermédio, estimaram-se com base no consumo de energia elétrica anual de 0,32 GWh associado à produção de estilha por um destroçador típico que sustenta uma potência de 350 kW tendo uma capacidade de produção na ordem dos 120 m³/h e com um tempo de operação de 922,5 horas anualmente. A metodologia adotada para determinar as emissões associadas a esta operação, baseou-se na aplicação de uma equação matemática para estimar a emissão de um poluente (Equação 5):

$$E_i = FE_i \times E \times 10^3 \quad \text{Equação 5}$$

Onde E_i – emissão por espécie de poluente i, kg/ano; FE_i – fator de emissão por espécie de poluente i, t/GWh; E – energia elétrica consumida anualmente, GWh/ano.

Os fatores de emissão associados ao consumo de energia elétrica (Tabela 16) aplicados foram determinados tendo por base as emissões com origem nas estimativas

Caso de Estudo

realizadas no âmbito do SNIERPA e no consumo de energia elétrica relativo ao balanço energético da DGEG 2009. Na construção destes fatores de emissão só foi considerada a energia elétrica produzida no território Português. O poluente com a designação de CO_{2e} inclui CO₂, N₂O e CH₄, os dois últimos convertidos a CO₂ equivalente e para o poluente base CO₂ só se consideram as emissões de origem fóssil. O poluente PTS corresponde a partículas totais em suspensão.

Tabela 16 - Fatores de emissão definidos em GWh de energia eléctrica consumida ($t_{\text{poluente}}/\text{GWh}$).

CO _{2e} (CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O)	CO	NO _x	PTS	SO _x
375	0,11	0,94	0,15	0,64

A Tabela 17 apresenta os valores anuais correspondentes às emissões totais para a operação de destroçamento realizado no ponto intermédio resultantes de 20% do total de biomassa florestal utilizada como matéria-prima para a produção de pellets em 2013 pela unidade industrial em estudo.

Tabela 17 - Emissões totais para a operação de destroçamento intermédio ($\text{kg}_{\text{poluente}}/\text{ano}$).

CO _{2e} (CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O)	CO	NO _x	PTS	SO _x
121077,20	35,52	303,50	48,43	206,64

De acordo com aplicação da equação matemática (Equação 4) determinou-se a quantidade de poluente *i* resultante da atividade de exploração florestal por quantidade de pellets produzida (Tabela 18).

Tabela 18 – Fatores de emissão específica de vários poluentes atmosféricos por quantidade de pellets produzida ($\text{g}_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$).

CO _{2e} (CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O)	CO	NO _x	PTS	SO _x
170,83	0,05	0,43	0,07	0,29

Da análise efetuada a esta operação verifica-se que o CO_{2e}, que inclui o CO₂, CH₄ e N₂O contribui expressivamente nas emissões de poluentes atmosféricos.

Na operação de destroçamento intermédio, os *inputs* encontram-se representados pela energia elétrica e BFP, sendo os *outputs* referentes às emissões de poluentes atmosféricos e à BFS resultantes desta operação. A análise encontra-se esquematizada na figura abaixo.

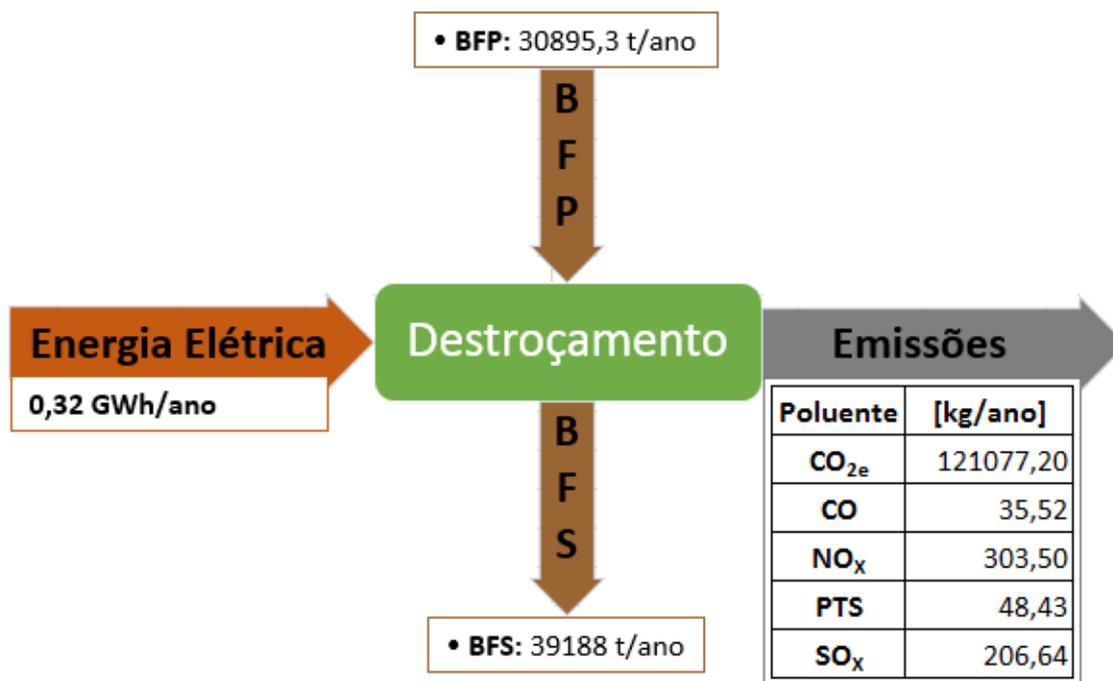


Figura 62 - Esquema da análise de *inputs-outputs* da operação de destroçamento intermédio.

5.2.2 Estimativa de Poluentes Atmosféricos no Transporte

De acordo com as informações obtidas, a BFR é transportada a partir do ponto de recolha para um centro de concentração, e mais tarde para a unidade industrial. O transporte primário pode ser efetuado com recurso a um trator adaptado a um reboque ou por um camião. Normalmente o trator adaptado é usado para distâncias curtas, de até 10 km, e o camião para longas distâncias. Uma vez que a unidade industrial em estudo subcontrata várias empresas de exploração florestal para abastecimento deste tipo de biomassa e as quais laboram nas regiões envolventes a Lousada, este estudo baseou-se no pior cenário, ou seja, o percurso da maior distância entre o ponto de recolha e do centro de concentração (18 km). No centro de concentração, a BFR armazenada e/ou processada segue posteriormente para a unidade industrial que se encontra a 17 km de distância, aproximadamente. O transporte primário e secundário concretizam-se por meio de um camião de classe Euro III com capacidade entre 70-90 m³ correspondente ao transporte de

12 a 26 toneladas de BFR, dependendo do teor de humidade. Para realizar ambos os tipos de transporte, primário e secundário, o camião com um consumo médio de combustível na ordem dos 40 l/100km percorre 5 a 6 vezes por dia o percurso correspondente a ambos durante os 247 dias de laboração, transportando aproximadamente 16 toneladas, perfazendo aproximadamente uma quilometragem de 86625 km anualmente.

Relativamente ao transporte de BFP as informações recolhidas apontam para um percurso de maior distância entre o ponto de recolha e a unidade industrial compreendido nos 60 km, sendo realizado por um conjunto de empresas de exploração florestal que atuam em vários pontos entre a região do Porto e de Braga e por uma empresa que opera na região de Aveiro referente ao ponto intermédio de concentração descrito anteriormente. Para o transporte desta matéria-prima aplica-se o mesmo tipo de camião enunciado no parágrafo acima, no entanto devido à maior carga transportada, sensivelmente 30 toneladas, este apresenta um consumo médio de combustível de 50 l/km, representado anualmente um consumo na ordem dos 375291 litros de gasóleo associados aos 750582 km percorridos.

Por último, tendo em conta a sinergia aplicada na logística de transporte recorrendo à utilização do mesmo veículo entre a distribuição de pellets para o porto de Aveiro e o transporte de matéria-prima (BFS), proveniente do ponto intermédio de concentração, no regresso à unidade fabril, considera-se na metodologia adotada o percurso de maior distância entre o porto de Aveiro e a unidade fabril de 120 km. De salientar que apenas se contabiliza o número de percursos em que efetivamente se realiza o transporte de BFS, sendo os restantes assim como os percursos de retorno contabilizados na fase de distribuição. No mesmo seguimento do tipo de veículo utilizado no transporte de BFR e BFP, este ao transportar em média uma carga de 25 toneladas de BFS detém um consumo médio de combustível na ordem dos 45 l/100 km e associando-se que percorre 4 a 5 vezes por dia o percurso estabelecido durante 330 dias, estabelece deste modo um total de 188100 km anuais.

Face ao nível de detalhe da informação recolhida, a metodologia adotada decaiu sobre o cálculo das emissões de forma individualizada, através da aplicação de um modelo genérico de estimativa de emissão de um dado poluente (EMEP/EEA, 2009) (Equação 6).

$$E_i = A_i \times FE_i \times 10^{-3} \qquad \text{Equação 6}$$

Onde E_i – emissão por espécie de poluente i , kg/ano; A_i – indicador de atividade, km/ano; FE_i – fator de emissão por espécie de poluente i , g/km.

Os fatores de emissão associados ao transporte rodoviário de biomassa florestal foram estimados com recurso ao modelo TREM (Traffic Emission Model) no âmbito do projeto BIOG AIR. O principal objetivo do TREM é a estimativa das emissões do tráfego rodoviário com alta resolução temporal e espacial a serem utilizadas na modelação da qualidade do ar. De forma a compilar um modelo consistente as seguintes condições foram levadas em consideração: disponibilidade de dados de entrada e a utilização prevista dos resultados do modelo. Assim, considerando a melhor abordagem os fatores de emissão foram estimados com base na velocidade média do veículo, de 50 km/h, devido à ausência de informações mais detalhadas relativas à dinâmica do veículo. No entanto, a estimativa depende igualmente da capacidade do motor, da massa do veículo e da tecnologia de redução de emissões aplicada ao mesmo, distinguindo-se no modelo TREM uma agregação adequada de veículos por categorias e classes. Os fatores de emissões estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Fatores de emissão associados ao transporte de biomassa florestal (g/km).

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO _x
Camião Euro III	0,07	1,61	791,00	0,03	0,32	8,54	0,19	0,19

A Tabela 20 apresenta as emissões dos diversos poluentes que resultam da combustão de gásóleo associadas ao transporte de biomassa florestal. Relativamente à distribuição destas por tipo de biomassa transportada, constata-se que a BFP tem uma contribuição de 73,2%, a BFS de 18,4% e a BFR os restantes 8,4%.

Tabela 20 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes do transporte de biomassa florestal.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO _x
Camião Euro III	71,77	1650,74	811017,10	30,76	328,10	8756,11	194,81	194,81

Com base na aplicação da equação matemática (Equação 4) determinou-se o fator de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos analisados na operação em estudo, tendo como referência a quantidade de pellets produzida pela unidade industrial em estudo no ano de 2013 (Tabela 21). De salientar que o transporte rodoviário apresenta-se como a uma fonte emissora relevante de CO₂ e NO_x.

Caso de Estudo

Tabela 21 - Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados ao transporte de biomassa florestal.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO _x
Camião Euro III	0,98	22,61	11109,82	0,42	4,49	119,95	2,67	2,67

Pela observação da figura abaixo, referente à análise de *inputs-outputs* da atividade de transporte de matérias-primas, torna-se possível identificar as emissões de poluentes atmosféricos (*output*) associadas ao consumo de combustível (*input*) decorrente do transporte das quantidades dos três tipos de biomassa florestal em questão.

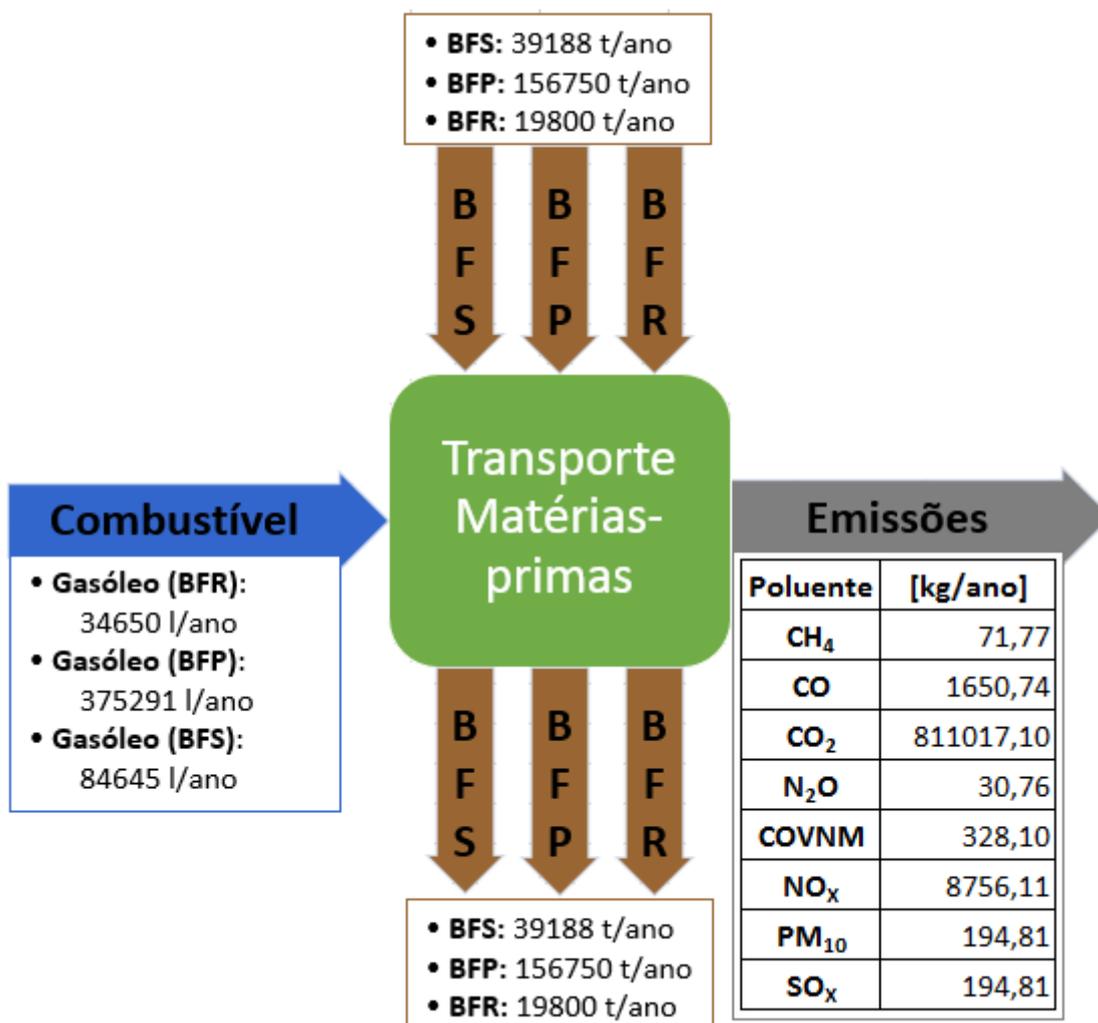


Figura 63 - Esquema da análise de *inputs-outputs* da atividade de transporte de matérias-primas.

5.2.3 Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Unidade de Produção

No presente subcapítulo pretende-se estimar, face às características da unidade de produção de pellets em análise, as emissões de poluentes atmosféricos gerados ao longo das várias operações. Deste modo, foi necessário seguir uma metodologia de recolha de dados e de cálculo que consistiu na execução de duas etapas fundamentais: aplicação de métodos qualitativos e quantitativos, através da observação da linha de produção da unidade fabril e da realização de uma entrevista a um colaborador desta entidade e cálculo das emissões de poluentes atmosféricos.

Deste modo, constatou-se a existência de uma máquina giratória e de dois carregadores frontais que funcionam alternadamente na operação de recolha e armazenamento de matérias-primas efetuada no parque de armazenamento envolvente às instalações da unidade industrial em estudo, cujos consumos de combustível (gasóleo) respeitantes ao ano de 2013 foram de 29500 e 33000 litros, respetivamente. Tendo por base os fatores de emissão apresentados na Tabela 13 recolhidos de EMEP/EEA, estando incluídos na SNAP 08 correspondente a outras fontes móveis e máquinas e a densidade do gasóleo (0,84 kg/l) procedeu-se o cálculo das emissões atmosféricas de forma individualizada, através da aplicação de uma equação matemática para estimar a emissão de um poluente (Equação 7).

$$E_i = A_i \times \rho_y \times FE_i \times 10^{-3} \quad \text{Equação 7}$$

Onde E_i – emissão por espécie de poluente i , kg/ano; A_i – indicador de atividade, l/ano; ρ_y – densidade do combustível y , kg_y/l_y; FE_i – fator de emissão por espécie de poluente i , g_i/kg.

Os dados obtidos referentes às emissões dos variados poluentes provenientes da operação em análise exibidos na Tabela 22 permitem constatar que o CO e o NO_x enquadram-se nos poluentes com maior contribuição.

Tabela 22 – Quantificação das emissões dos variados poluentes atmosféricos (g/ano) associados à movimentação de máquinas na operação de recolha e armazenamento de matérias-primas.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	COVNM	NO _x	PM ₁₀
Máquinas	1,73	411,29	165,90	7,25	0,42	106,05	1527,38	51,240

Caso de Estudo

A metodologia de cálculo, descrita no subcapítulo 5.2.1, para a determinação dos fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos analisados, permitiu obter os dados apresentados na Tabela 23 através da aplicação da Equação 4.

Tabela 23 – Fatores de emissão específica dos variados poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) associados à movimentação de máquinas na operação de recolha e armazenamento de matérias-primas.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	COVNM	NO _x	PM ₁₀
Máquinas	0,024	5,634	2,273	0,099	0,006	1,453	20,923	0,702

Genericamente, o consumo de energia elétrica do processo de fabrico de pellets, considerando o tempo de laboração e a potência instalada apenas nas etapas implementadas na unidade fabril em estudo, segundo os dados recolhidos pode-se resumir em:

- Destoçamento: 5,94 GWh/ano – resultante da laboração de dois destroçadores que integram duas linhas distintas, destinadas à BFP e BFR, ostentando uma potência de 500 kW e de 250 kW, respetivamente;
- Moagem Húmida: 7,48 GWh/ano – consequente da aplicação de três moinhos de martelos, possuindo uma potência de 315 kW cada um;
- Secagem: 1,58 GWh/ano – provém da utilização de um secador de tambor rotativo, cuja potência é de 200kW;
- Moagem Seca: 6,45 GWh/ano – sucede do trabalho executado por dois moinhos de martelos refinadores, com uma potência de 407,5 Kw cada;
- Peletização: 7,48 GWh/ano – proveniente da atividade de três peletizadoras de matriz anelar com uma potência individualizada de 315 kW;
- Arrefecimento: 0,16 GWh/ano – advém do emprego de um arrefecedor vertical com uma potência de 20 kW;
- Sistema de Transporte: 7,17 GWh/ano – procedente do funcionamento efetuado por uma combinação de equipamentos, como os crivos e ventiladores, e de transportadores incluindo os de arrasto, de tela, de rolos, de hélice horizontal e o elevador com alcatruzes. De forma conjunta têm uma potência instalada por ordem sequencial de operação na ordem dos 250 kW, 315 kW, 60 kW, 150 kW, 100 kW e 30 kW.

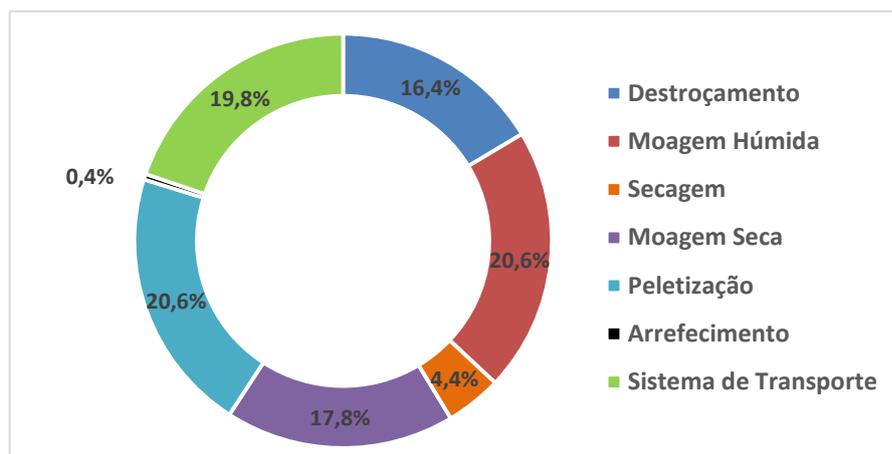


Figura 64 - Distribuição do consumo de energia elétrica do processo de fabricação de pellets, por operação.

Pela análise da Figura 64 as operações de moagem húmida e de peletização têm ambas uma proporção de 20,6% no consumo de energia elétrica do processo de fabricação para pellets, sendo as que mais contribuem para este fator. Seguidamente surge o sistema de transporte, representando 19,8%, e as operações de moagem seca e destroçamento, representando 17,8% e 16,4%, respetivamente. As operações com menor contribuição no consumo de energia elétrica compreendem a secagem (4,4%) e o arrefecimento (0,4%), tendo esta última um tributo praticamente residual.

Com base na metodologia de cálculo, descrita no subcapítulo 5.2.1, adotada para determinar as emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica e os fatores de emissão associados (Tabela 16), obteve-se os seguintes resultados (Tabela 24).

Tabela 24 – Emissões totais indiretas associadas ao consumo de energia elétrica no processo de fabricação de pellets ($t_{\text{poluente}}/\text{ano}$).

CO _{2e} (CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O)	CO	NO _x	PTS	SO _x
13602,60	3,99	34,10	5,44	23,22

A Tabela 25 apresenta os fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos analisados associados ao consumo de energia elétrica nas várias operações do processo de fabricação de pellets, determinados através da Equação 4 seguindo a metodologia de cálculo adotada. O poluente com a designação de CO_{2e} que inclui CO₂, N₂O e CH₄, contribui significativamente nas emissões de poluentes atmosféricos.

Tabela 25 – Fatores de emissão específica dos variados poluentes atmosféricos ($\text{g}_{\text{poluente}}/\text{t}_{\text{pellets}}$) associados ao consumo de energia elétrica nas várias operações do processo de fabrico de pellets.

Operação	CO _{2e} (CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O)	CO	NO _x	PTS	SO _x
Destroçamento	30513,70	8,95	76,49	12,21	52,08
Moagem Húmida	38447,26	11,28	96,37	15,38	65,62
Secagem	8136,99	2,39	20,40	3,25	13,89
Moagem Seca	33158,22	9,73	83,12	13,26	56,59
Peletização	38447,26	11,28	96,37	15,38	65,62
Arrefecimento	813,70	0,24	2,04	0,33	1,39
Sistema de Transporte	36819,86	10,80	92,30	14,73	62,84
Total	186336,99	54,66	467,08	74,53	318,02

Por último, o consumo de energia térmica de aproximadamente 379071 GJ na operação de combustão provém da queima de BFR numa fornalha de grelha com uma potência de 15 MWtérmicos. A determinação deste teve por base a quantidade total de BFR aplicada nesta operação, salientando-se o facto de esta apresentar-se em forma de estilha proveniente de duas espécies florestais, o pinho e o eucalipto, em partes proporcionais, e cujos poderes caloríficos se encontram estabelecidos em 19,79 e 18,50 MJ/kg, respetivamente.

Com base em dados da atividade obtidos, a metodologia adotada para determinar as emissões desta fonte, decaiu sobre o cálculo das emissões de forma individualizada, através da aplicação da Equação 6. Ainda neste contexto, é de salientar que os dados da atividade constituem informações sobre o fluxo de materiais, tendo-se recorrido ao consumo de combustível, expresso em unidade de energia (GJ/ano), como indicador de atividade. Por sua vez, os fatores de emissão aplicados foram recolhidos de EMEP/EEA (2009) estando incluídos no SNAP 01 (combustão na indústria energética e de transformação) dos setores de atividade. Os fatores de emissão dos diversos poluentes emitidos durante o processo de combustão da biomassa para produção de calor, tendo como unidade de atividade o consumo de combustível, encontram-se expostos na Tabela 26.

Tabela 26 - Fatores de emissão para o processo de combustão utilizando como combustível a biomassa florestal.

Poluente	Valor	Unidade	Poluente	Valor	Unidade
NO _x	211	g/GJ	Cu	21	mg/GJ
CO	258	g/GJ	Ni	14	mg/GJ
COVNM	7,3	g/GJ	Se	1,2	mg/GJ
SO _x	11	g/GJ	Zn	181	mg/GJ
PTS	51	g/GJ	PCB	60	µg/GJ
PM ₁₀	38	g/GJ	PCDD/F	50	ng I-TEQ/GJ
PM _{2,5}	33	g/GJ	HCB	6,0	µg/GJ
Pb	21	mg/GJ	Benzopireno	1,12	mg/GJ
Cd	1,8	mg/GJ	Benzo(b)fluoranteno	0,04	mg/GJ
Hg	1,5	mg/GJ	Benzo(k)fluoranteno	0,02	mg/GJ
As	9,5	mg/GJ	Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,37	mg/GJ
Cr	9,0	mg/GJ			

A Tabela 27 apresenta as emissões dos diversos poluentes emitidos durante o processo de combustão da BFR, para a operação de combustão, encontrando-se expressas em unidade de massa por ano.

Tabela 27 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos resultantes do processo de combustão de BFR da unidade industrial em estudo.

Poluente	Valor	Unidade	Poluente	Valor	Unidade
NO _x	79,98	t/ano	Cu	7,96	kg/ano
CO	97,80	t/ano	Ni	5,31	kg/ano
COVNM	2,77	t/ano	Se	0,45	kg/ano
SO _x	4,17	t/ano	Zn	68,61	kg/ano
PTS	19,33	t/ano	PCB	0,02	kg/ano
PM ₁₀	14,40	t/ano	PCDD/F	1,9E-02	g/ano
PM _{2,5}	4,45	t/ano	HCB	2	g/ano
Pb	7,96	kg/ano	Benzopireno	425	g/ano
Cd	0,68	kg/ano	Benzo(b)fluoranteno	15	g/ano
Hg	0,57	kg/ano	Benzo(k)fluoranteno	8	g/ano
As	3,56	kg/ano	Indeno(1,2,3-cd)pireno	140	g/ano
Cr	3,41	kg/ano			

Os fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos analisados resultantes do processo de combustão de BFR da unidade industrial em estudo, obtiveram-se com recurso à aplicação da Equação 4 seguindo a metodologia de cálculo adotada anteriormente descrita no subcapítulo 5.2.1 (Tabela 28). Na operação em estudo o NO_x e

Caso de Estudo

CO enquadram-se nos poluentes atmosféricos com maior representatividade nas emissões, seguidos da matéria particulada (PTS, PM₁₀ e PM_{2,5}). Os metais pesados e os hidrocarbonetos aromáticos têm uma contribuição residual nas emissões de poluentes atmosféricos resultantes da combustão de BFR.

Tabela 28 – Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos ($g_{\text{poluente}}/t_{\text{pellets}}$) resultantes do processo de combustão de BFR da unidade industrial em estudo.

Poluente	Valor	Poluente	Valor
NO _x	1095,67	Cu	0,11
CO	1339,73	Ni	7,3E-02
COVNM	37,91	Se	6,2E-03
SO _x	57,12	Zn	0,94
PTS	264,83	PCB	3,1E-04
PM ₁₀	197,32	PCDD/F	2,6E-07
PM _{2,5}	171,36	HCB	3,1E-05
Pb	0,11	Benzopireno	5,8E-03
Cd	9,3E-03	Benzo(b)fluoranteno	2,1E-04
Hg	7,8E-03	Benzo(k)fluoranteno	1,0E-04
As	4,9E-02	Indeno(1,2,3-cd)pireno	1,9E-03
Cr	4,7E-03		

Pela observação da Figura 65 verifica-se que a operação de secagem, que inclui a energia elétrica e térmica, tem um grande contributo nas emissões totais de CO, NO_x e PTS inerentes à linha do processo de fabrico de pellets, sendo os dois primeiros poluentes atmosféricos derivados essencialmente do consumo de energia elétrica e o PTS provém do processo combustão de biomassa para produção de calor. À exceção da operação de arrefecimento e secagem, a emissão total de CO_{2e} reparte-se de forma quase proporcional por todas as operações referentes ao processo de produção de pellets, com maior expressão na moagem húmida (20,6%) e na peletização (20,6%). Em termos da emissão total de SO_x, a distribuição foi semelhante à da emissão total de CO_{2e}, incluindo a operação de secagem a qual surge com o maior contributo, correspondendo a 18,9%, seguida da operação de moagem húmida (17,5%) e de peletização (17,5%), destacando-se ainda a operação de moagem seca (15,1%), de destroçamento (13,9%) e de sistema de transporte (16,8%). A operação de arrefecimento detém uma colaboração inexpressiva no total das emissões emitidas, para os poluentes atmosféricos analisados, no processo de fabrico de pellets.

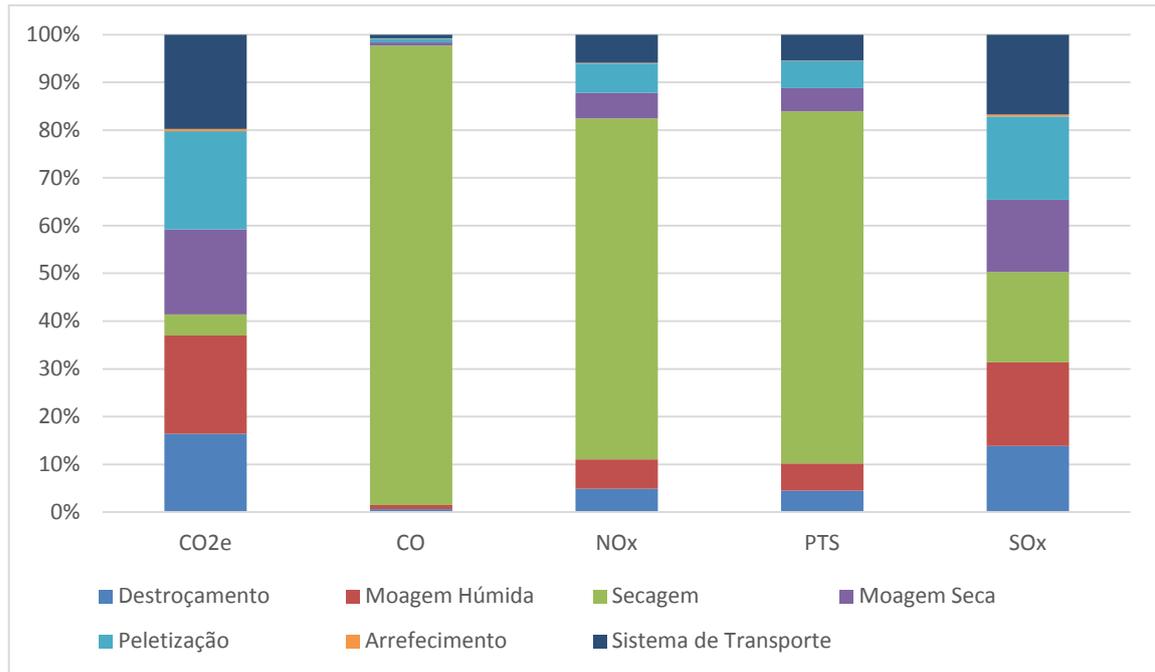


Figura 65 - Distribuição das emissões provenientes das diversas operações, em percentagem, em toda a linha do processo de fabrico de pellets.

No panorama energético da unidade industrial, os *inputs* na produção de pellets são os combustíveis fósseis (gasóleo), a energia elétrica e a energia térmica (BFR). Os outputs resultantes da unidade de produção de pellets consistem nas emissões de poluentes atmosféricos e as pellets produzidas.

Caso de Estudo

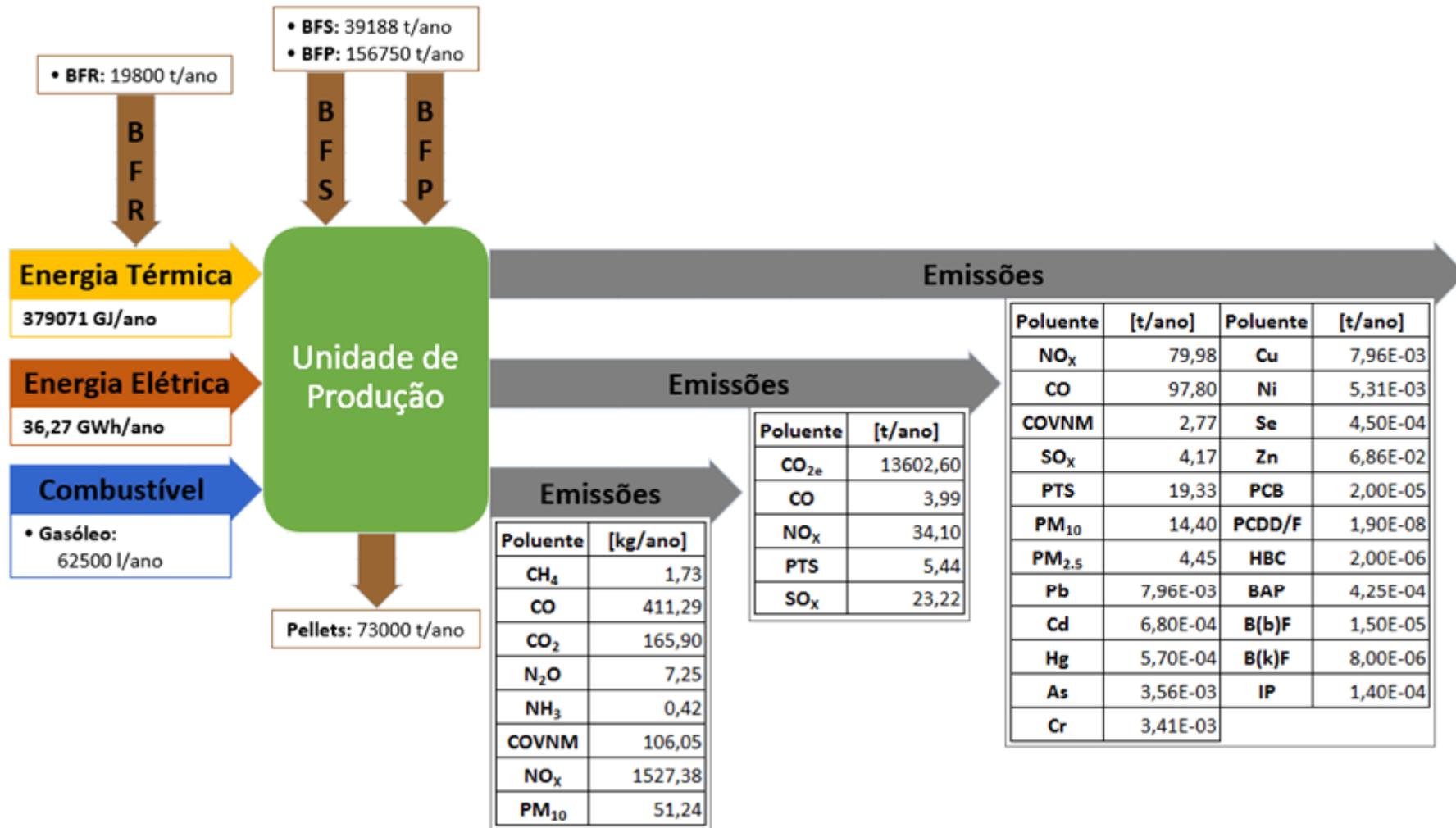


Figura 66 - Esquema da análise de *inputs-outputs* das várias operações realizadas na unidade de produção de pellets.

5.2.4 Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Distribuição de Pellets

A logística de transporte adotada pela unidade industrial em estudo recorrendo à utilização do mesmo veículo entre a distribuição de pellets para o porto de Aveiro e o transporte de matéria-prima (BFS), proveniente do ponto intermédio de concentração, no regresso à unidade fabril, permite uma redução de custos associados a esta operação assim como uma redução nas emissões de poluentes atmosféricos.

Na metodologia de cálculo adotada considerou-se o percurso de maior distância entre a unidade fabril e o porto de Aveiro de 120 km. De salientar que o número de percursos contabilizados correspondem aos percursos associados à distribuição de pellets e aos percursos de retorno em que não ocorre o transporte de BFS. Deste modo, o veículo utilizado nesta operação possui as mesmas características enunciadas para o transporte de BFS, resultando num total de 477660 km percorridos anualmente. O modelo genérico de estimativa de emissão de um dado poluente (E_i), resulta do produto de duas variáveis: o indicador de atividade (A_i) e o fator de emissão por unidade de atividade (FE_i) (EMEP/EEA, 2009) (Equação 6). Por sua vez, os fatores de emissão aplicados resultaram da estimativa efetuada com recurso ao modelo TREM (Traffic Emission Model) no âmbito do projeto BIOGAIR (Tabela 19). A Tabela 29 apresenta as emissões dos diversos poluentes que resultam da combustão de gasóleo associadas à distribuição de pellets.

Tabela 29 - Quantificação das emissões dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes da distribuição de pellets.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO _x
Camião Euro III	33,44	769,03	377829,06	14,33	152,85	4079,22	90,76	90,76

Com base na aplicação da equação matemática (Equação 4) determinou-se o coeficiente de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos analisados na operação em estudo, tendo como referência a quantidade de pellets produzida pela unidade industrial em estudo no ano de 2013 (Tabela 30). De salientar que o transporte rodoviário apresenta-se como uma fonte emissora relevante de CO₂ e NO_x.

Tabela 30 - Fatores de emissão específica dos diversos poluentes atmosféricos (g_{poluente}/t_{pellets}) associados à distribuição.

	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	COVNM	NO _x	PM ₁₀	SO _x
Camião Euro III	0,46	10,53	5175,74	0,20	2,09	55,88	1,24	1,24

Com base no esquema referente à análise de *inputs-outputs* da atividade de distribuição de pellets verifica-se a quantificação das emissões de poluentes atmosféricos alusivas (*output*) ao consumo de combustível (*input*) resultante do transporte de 73 kt de pellets.

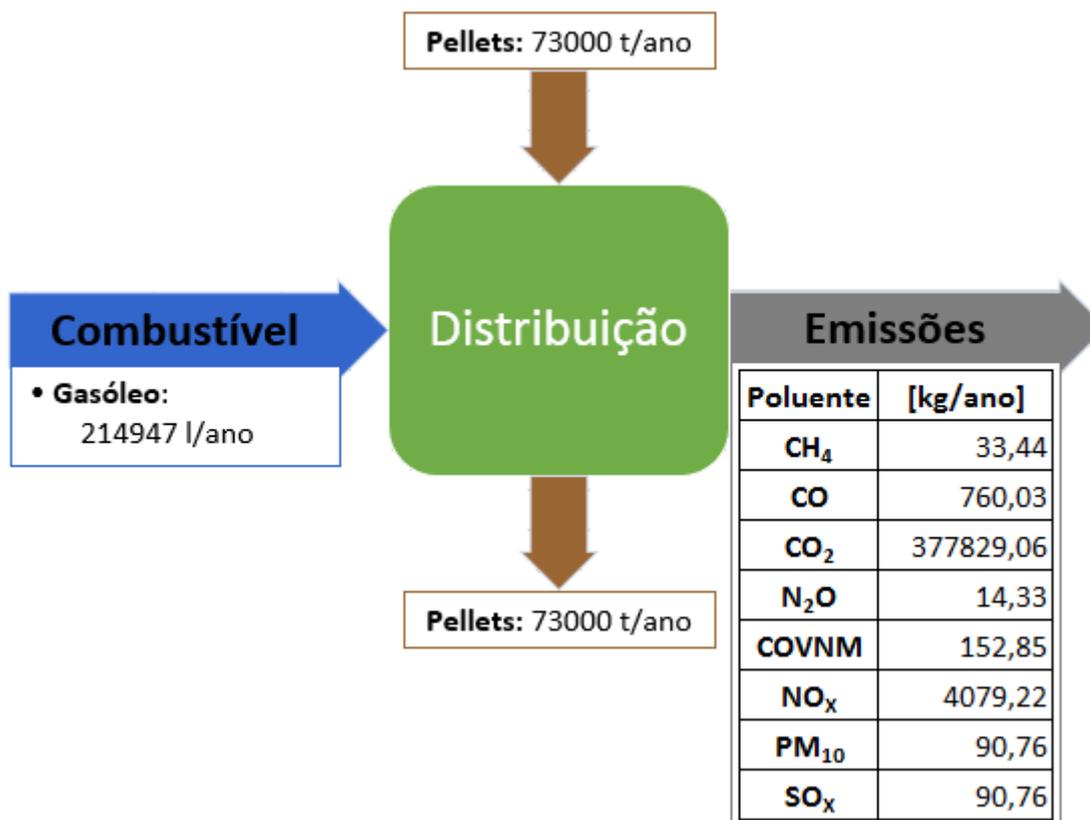


Figura 67 - Esquema da análise de inputs-outputs da atividade de transporte de matérias-primas.

5.2.5 Estimativa de Poluentes Atmosféricos na Utilização de Pellets como Combustível

Neste subcapítulo pretende-se estimar as emissões de poluentes atmosféricos na utilização de pellets como combustível, admitindo que toda a produção da unidade industrial em estudo, correspondente a 73 quilotoneladas, se destina à combustão em equipamentos de pequena escala (salamandra e caldeira), essencialmente direcionados para o setor doméstico.

A metodologia abordada para determinar as emissões desta fonte, incidiu sobre o cálculo das emissões de forma individualizada, com recurso à aplicação da Equação 6. Neste sentido, é de evidenciar que o indicador de atividade constitui o consumo do

biocombustível pellets, expresso em unidade de energia (GJ/ano), tendo por base o seu poder calorífico de 17 GJ/t. Relativamente aos fatores de emissão dos diversos poluentes emitidos durante o processo de combustão de pellets para aquecimento do ambiente e de águas, tendo como unidade de atividade o consumo de combustível, encontram-se expostos na tabela seguinte.

Tabela 31 - Fatores de emissão para o processo de combustão de pellets como combustível para aquecimento do ambiente e de águas.

	Poluentes Atmosféricos							
	(g/GJ)				(mg/GJ)			
Equipamento	CO	NO _x	HCNM	PM	B(a)P	B(b)F	B(k)F	IP
Salamandra	88	60	9	109	1,5	4	1,5	1,1
Caldeira	350	71	1,3	61	0,06	0,07	0,05	0,03

Tendo por base o mercado doméstico nacional de pellets, considerou-se que 80% das 73 kt de pellets destina-se à aplicação em salamandras e os restantes 20% em caldeiras. Deste modo, os dados obtidos para as emissões dos diversos poluentes que resultam da combustão de pellets, encontram-se exibidos na Tabela 32.

Tabela 32 - Emissões totais dos diversos poluentes atmosféricos (kg/ano) decorrentes da combustão de pellets em equipamentos de pequena escala.

	CO	NO _x	HCNM	PM	B(a)P	B(b)F	B(k)F	IP
Salamandra	357700,00	61320,00	9198,00	111398,00	1,53	4,09	1,53	1,12
Caldeira	89425,00	18140,50	332,15	15585,50	0,02	0,02	0,01	0,01
Total	447125,00	79460,50	9530,15	126983,50	1,55	4,11	1,55	1,13

A salamandra pelo facto de ser o equipamento com maior aplicação apresenta-se com sendo aquele que tem maior contribuição nas emissões totais dos poluentes atmosféricos analisados.

5.2.6 Síntese

No presente subcapítulo pretende-se conceber uma síntese das emissões alusivas à cadeia de valorização de biomassa para a produção de 73 kt de pellets, referentes à unidade industrial que serviu com caso de estudo.

A metodologia adotada decaiu sobre o cálculo das emissões de forma individualizada, através da aplicação de um modelo genérico de estimativa de emissão de

Caso de Estudo

um dado poluente (E_i), expressa em unidade de massa (t_i). O modelo resulta do produto de duas variáveis (Equação 6): o indicador da atividade (A_i), expresso em unidade de massa (t_{pellets}), e o fator de emissão por unidade de atividade (FE_i), expresso em $\text{kg}_i/t_{\text{pellets}}$. Por sua vez, os fatores de emissão aplicados (Tabela 33) resultam da compilação dos fatores de emissão específica determinados nos subcapítulos antecedentes (Tabelas 15,18,23,25 e 30). O poluente com a designação de CO_{2e} inclui CO_2 , N_2O e CH_4 , os dois últimos expressos em equivalentes de CO_2 . Com recurso aos respetivos potenciais de aquecimento global, os equivalentes de CO_2 permitem exprimir qualquer GEE em unidades de CO_2 . Estes constituem uma medida da capacidade de cada gás, enquanto GEE, quando comparada com a capacidade do CO_2 , integrada num determinado horizonte temporal. Para os gases contemplados os potenciais de aquecimento global estimados pelo IPCC 2013, para um horizonte temporal de 100 anos, são os seguintes: CH_4 - 34 kg C/kg e N_2O - 298 kg C/kg. De salientar que para o poluente base CO_2 só se consideram as emissões de origem fóssil.

Tabela 33 - Fatores de emissão para a cadeia de valorização de biomassa para pellets (Ozgen et al., 2014).

CO_{2e} (CO_2 , CH_4 e N_2O)	CO	NO_x	PTS	SO_x	COVNM	Unidades
203,167	2,033	1,781	0,348	0,379	0,279	$\text{kg}/t_{\text{pellets}}$
451,483	4,517	3,958	0,774	0,843	0,620	kg/tep

Os valores obtidos das emissões dos diversos poluentes atmosféricos analisados que resultam da cadeia de valorização de biomassa para a produção de pellets, correspondem a 14831,2 t CO_{2e} , 595,5 t CO, 209,5 t NO_x , 152,4 t PTS, 27,7 t SO_x , e 20,4 t COVNM. De salientar que nem todas as operações contribuem de igual forma nas emissões totais de poluentes atmosféricos, face à metodologia adotada não foi possível efetuar a quantificação em alguns poluentes atmosféricos.

As emissões resultantes da combustão de biomassa para a produção energia referente ao mesmo conteúdo energético associado às 73 kt de pellets correspondem a 86,9 t NO_x , 186,9 t COVNM, 620,6 t CO e 28,8 PTS (APA, 2014). Neste sentido verifica-se que as emissões associadas à cadeia de valorização de biomassa para pellets e a sua utilização como combustível são bastantes superiores para os poluentes NO_x e COVNM, sendo ligeiramente superiores na PTS e inferiores no CO.

Tabela 34 – Emissões totais dos poluentes atmosféricos provenientes das diversas operações, em tonelada, inerentes a todo o processo de logística da conversão de biomassa em pellets e da sua utilização como combustível.

Operações	Poluentes Atmosféricos					
	CO _{2e}	CO	NO _x	PTS	SO _x	COVNM
Exploração Florestal	7,905	43,757	1,538	0,308	-	17,02
Destroçamento Intermédio	12,471	0,004	0,031	0,005	0,021	-
Transporte de Biomassa	822,624	1,651	8,756	0,195	0,195	0,33
Produção de Pellets	13604,984	102,202	115,609	24,825	27,385	2,87
Movimentação de Biomassa	0,002	0,411	0,166	0,007	4,20E-04	1,06E-01
Destroçamento	2227,500	0,653	5,584	0,891	3,802	-
Moagem Húmida	2806,650	0,823	7,035	1,123	4,790	-
Secagem	594,000	97,975	81,473	19,570	5,184	2,77
Moagem Seca	2420,550	0,710	6,068	0,968	4,131	-
Pelletização	2806,650	0,823	7,035	1,123	4,790	-
Arrefecimento	59,400	0,017	0,149	0,024	0,101	-
Sistema de Transporte	2687,850	0,788	6,738	1,075	4,587	-
Distribuição de Pellets	383,236	0,769	4,079	0,091	0,091	0,15
Utilização de Pellets como Combustível	-	447,125	79,461	126,984	-	-
Total	14831,220	595,507	209,474	152,407	27,692	20,38

Da análise às emissões totais de poluentes atmosféricos constata-se que a operação de produção apresenta-se como a que tem maior contributo nas emissões totais de CO_{2e}, NO_x e SO_x. Relativamente ao poluente atmosférico COVNM a contribuição nas emissões totais advém maioritariamente da operação de exploração florestal. Esta detém ainda um tributo significativo nas emissões totais associadas ao poluente atmosférico CO. Da utilização dos pellets como combustível resultam emissões significativas de PTS, CO e NO_x, correspondendo a 83,3%, 75,1% e 37,9%, respetivamente, do valor total das emissões. As restantes operações, compreendendo o transporte e a distribuição, apresentam uma contribuição inferior a 6% no total de emissões de CO_{2e} e NO_x, sendo praticamente residual para os demais poluentes atmosféricos analisados.

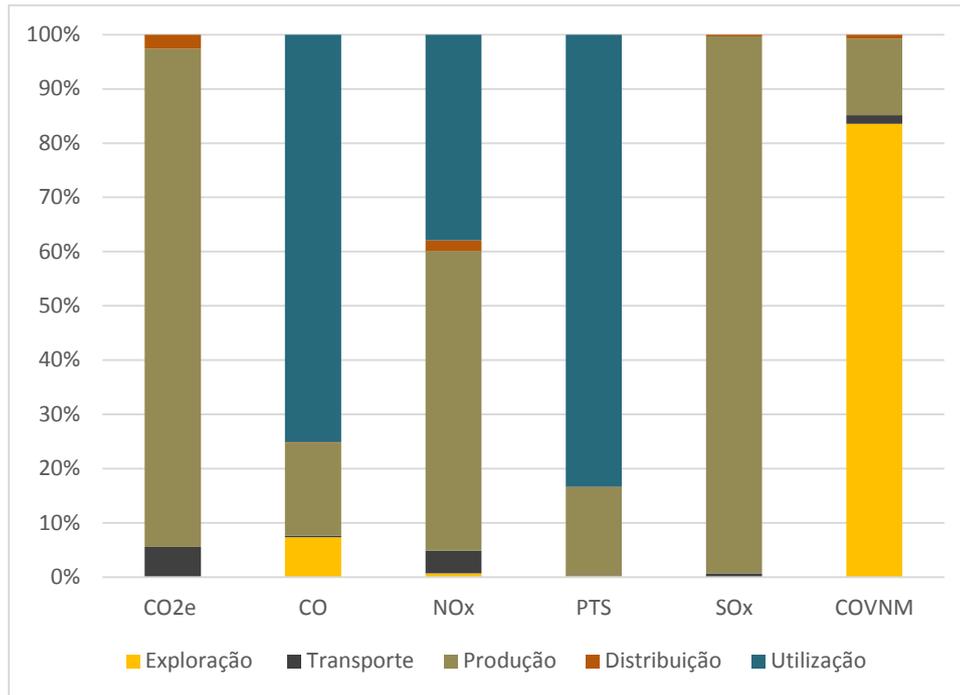


Figura 68 - Distribuição das emissões provenientes das diversas operações, em percentagem, inerentes a todo o processo de logística da conversão de biomassa em pellets.

Em relação aos GEE importa salientar que se admite que todo o carbono sequestrado da atmosfera e contido na matéria-prima mantêm-se nas pellets. Assim, as emissões de CO_{2e} correspondem ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade.

5.3 *Balanço de CO₂ da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets*

O balanço das emissões de CO₂, revelou-se essencial para avaliar o impacto nas emissões associadas à cadeia de produção de pellets em estudo, tendo por base a emissão específica de CO_{2e}. De seguida apresenta-se o balanço quantitativo entre o sequestro e as emissões de CO₂, de acordo com as quantidades entradas na unidade fabril.

$$\text{Balanço } CO_2 \text{ (t } CO_2) = \text{Sequestro (t } CO_2) - \text{Emissões (t } CO_2) \text{ (emissões da cadeia de valorização + combustão de biomassa na operação de secagem)} \quad \text{Equação 8}$$

De acordo com os quantitativos de biomassa utilizada, do CO₂ sequestrado para cada espécie analisada, das emissões discriminadas da biomassa consumida, e das

emissões de origem fóssil respetivas à cadeia de valorização de biomassa para pellets é possível determinar o balanço de CO₂.

Tabela 35 - Dados base para o cálculo do balanço de CO₂(SILVA, 2009).

	Quantidade de biomassa (base seca) (t)	Área de produção (ha)	Produtividade de biomassa (base seca) (t/ha)	Rotação (n.º de anos)	Teor de Carbono na biomassa (%)
Bicadas e ramas E. globulus	9900	673,5	14,7	12	49,4
Estilha do lenho de P. pinaster	87164,2	2895,8	30,1	50	44,3
Estilha do lenho de E. globulus	21791,0	1245,2	17,5	12	40,4

Com base nos dados da Tabela 35 torna-se possível determinar o sequestro de CO₂, da seguinte forma:

$$\text{Sequestro de CO}_2 \left(t_{\text{CO}_2} / \text{ha. ano} \right) = \text{Produtividade de biomassa} \left(t / \text{ha. ano} \right) \times \text{Teor de Carbono na biomassa} \times \left(\frac{MM_{\text{CO}_2}}{MM_C} \right) \quad \text{Equação 9}$$

Tabela 36 - Sequestro de CO₂ para cada espécie analisada.

	Sequestro de CO ₂ (t CO ₂ /ha.ano)	Sequestro de CO ₂ total (t CO ₂)
Bicadas e ramas E. globulus	2,22	1494,35
Estilha do lenho de P. pinaster	0,98	2831,67
Estilha do lenho de E. globulus	2,16	2689,98

De salientar que se considera que o carbono sequestrado na biomassa é reemitido na combustão (admitindo combustão quase perfeita), pelo que o balanço do sequestro e emissão da biomassa, deverá dar valores próximos de zero.

Deste modo apresenta-se um balanço global positivo de 20352,9 t CO₂ para a cadeia de valorização de biomassa para a produção de 73 kt de pellets, admitindo que todo o carbono sequestrado da atmosfera e contido na biomassa mantêm-se nos pellets.

No entanto, se na análise ao balanço de CO₂ fossem contabilizadas as emissões associadas à combustão dos pellets, atendendo uma combustão quase perfeita, resultaria na emissão de valor igual (14831,2 t CO₂) ao resultante das emissões associadas ao consumo

de combustíveis fósseis ao longo da cadeia de valorização de biomassa para pellets, obtendo-se um balanço negativo.

A título exemplificativo, considerando um sequestro médio de carbono de $0,494 \text{ t C}/(\text{t}_{\text{biomassa}} \cdot \text{ha} \cdot \text{ano})$ para a biomassa de ramas e bicadas de eucalipto, seria necessário reflorestar um área aproximada de 66841,1 ha por um período médio de 12 anos, para esta fração de biomassa capturar o excesso de CO_2 emitido.

5.4 Balanço Energético da Cadeia de Valorização de Biomassa para Pellets

A análise de consumo energético para a produção de pellets de biomassa florestal depende das características de implantação e de abastecimento da unidade fabril, tal como da tecnologia empregue, capacidade de produção, da humidade inicial da matéria-prima em bruto, da logística de transporte e, da gestão e exploração florestal.

Seguidamente apresenta-se o balanço energético da cadeia de valorização de biomassa para a produção de 73 kt de pellets (Tabela 37), cuja eficiência energética é de 56,8% resultante da razão entre o potencial energético dos pellets e a entrada total de energia na cadeia. No Anexo V encontram-se os fatores de conversão de energia.

No entanto, é de salientar que as perdas associadas ao processo de transformação de biomassa em pellets correspondem a 32,9%, resultante da razão entre as perdas de energia na transformação e a energia proveniente da matéria-prima.

Relativamente ao consumo energético na cadeia em função do potencial energético dos pellets, verifica-se que a operação de produção de pellets apresenta um consumo de 24,7% do potencial energético dos pellets, sendo aproximadamente 15,5% destinado para a operação de secagem. O consumo de 1,9% do conteúdo energético dos pellets está associado às operações relativas ao transporte de biomassa e distribuição de pellets. As restantes operações totalizam no seu conjunto um consumo de 0,7% do conteúdo energético dos pellets.

Tabela 37 - Balanço energético para a produção de 73000 toneladas de pellets.

N.º	Operações	Energia (tep)	Consumo Energético na Cadeia (%)
1	Matéria-prima	48984,4	
2	Exploração Florestal	125,5	0,38
3	Destroçamento Intermédio	27,8	0,08
4	Transporte de Biomassa	421,4	1,28
5	Produção de Pellets	8122,8	11,17
	Movimentação de Biomassa	53,3	0,16
	Destroçamento	510,84	1,56
	Moagem Húmida	643,66	1,96
	Secagem (Energia Elétrica+Energia Térmica)	5086,22	15,48
	Moagem Seca	555,11	1,69
	Peletização	643,66	1,96
	Arrefecimento	13,62	0,04
	Sistema de Transporte	616,41	1,88
6	Distribuição de Pellets	183,1	0,56
7	Consumo Total de Energia na Cadeia (2+3+4+5+6)	8880,6	27,03
8	Entrada Total de Energia na Cadeia (1+7)	57864,9	
9	Potencial Energético dos Pellets	32850,0	
10	Balanço Energético (8-9)	25014,9	
11	Perdas de Energia na Transformação (1-9)	16134,4	

O consumo energético para a cadeia de valorização de biomassa para pellets em estudo admitindo uma laboração contínua para o período indicado, corresponde a 0,122 tep/t_{pellets}. Na representação esquemática da Figura 69 verificar-se os fluxos de energia com a indicação das perdas na transformação.

Maioritariamente o consumo energético provém da operação de produção de pellets (91,8%), incluindo a operação de destroçamento intermédio (0,3%), em que 57,3% resulta da operação de secagem. O transporte de biomassa e a distribuição de pellets constituem as operações seguintes com maior consumo energético, correspondendo a 4,7% e 2,1%, respetivamente, sendo a operação de exploração florestal a que menos contribui para o consumo energético, representando 1,4% do valor total.

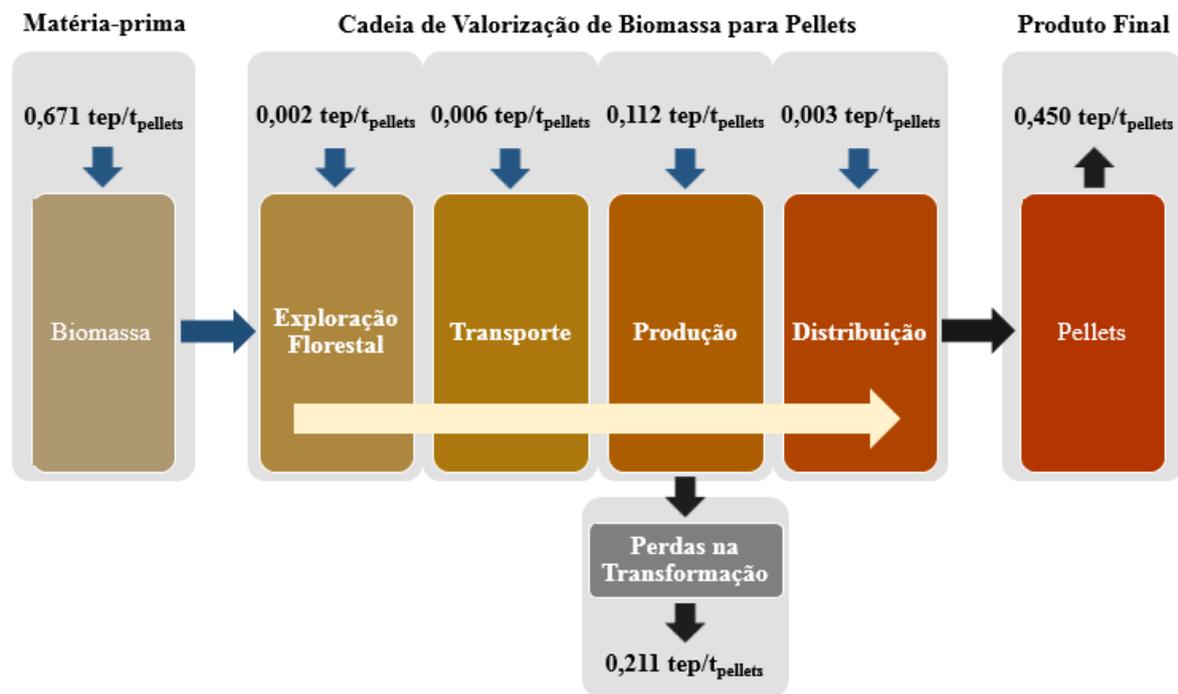


Figura 69 - Representação esquemática dos fluxos de energia com a indicação das perdas na transformação.

5.5 Impacto nas Emissões de CO₂ da Utilização de Pellets no Setor Doméstico Nacional

No que respeita ao consumo nacional de pellets no setor doméstico em 2010, destinado à utilização para aquecimento do ambiente e de águas, foi sensivelmente de 50 quilotoneladas correspondendo a um consumo energético de 22500 tep. Com base no Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico de 2010 o consumo de energia referente aos combustíveis fósseis para o aquecimento do ambiente e de águas corresponde a 171518 e 524465 tep, respetivamente. As principais fontes de energia não renovável utilizadas para o aquecimento do ambiente foram, por ordem decrescente de importância (em termos do consumo em tep), o Gasóleo de Aquecimento (44%), a Eletricidade (43,3%), o GPL Garrafa Butano (5,9%), Gás Natural (4,8%), GPL Canalizado (1,7%), GPL Garrafa Propano (0,2%) e Carvão (0,1%). À exceção do Carvão, o consumo de energia para o aquecimento de águas distribuiu-se por todos os tipos de energia não renovável, com maior expressão no GPL Garrafa Butano (38,4%) e Gás Natural (31%) e

com menor representatividade no Gasóleo de Aquecimento (9,4%), GPL Garrafa Propano (9,2%), GPL Canalizado (8,3%) e Eletricidade (3,7%).

Neste contexto, as emissões de CO_{2e} (E_{CO_{2e}}), expresso em unidade de massa (t CO_{2e}) relativas ao consumo energético, foram determinadas por aplicação da Equação 8, onde E_i representa o total de energia consumida por fonte de energia (tep) e FE_i o fator de emissão de CO_{2e} associado a cada fonte de energia (kg CO_{2e}/tep).

$$E_{CO_{2e}} = E_i \times FE_i \times 10^{-3} \quad \text{Equação 10}$$

Os fatores de emissão para o cálculo da intensidade carbónica pela emissão de GEE, publicados no Despacho n.º 17313/2008, referidos em quilograma de CO₂ equivalente por tonelada equivalente petróleo (kg CO_{2e}/tep) dos combustíveis fósseis selecionados, encontram-se no Anexo VI. Relativamente ao fator de emissão aplicado para o biocombustível pellets encontra-se na Tabela 33, enquanto o fator de emissão aplicado para a eletricidade considerou-se 4360,5 kg CO_{2e}/tep que advém da conversão do fator de emissão que consta na Tabela 19.

Com base na metodologia de cálculo adotada obteve-se um total de emissões de CO_{2e} relativas ao consumo nacional de energia respeitante aos combustíveis fósseis aplicados para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em 2010, correspondente a 2006 kt CO_{2e}, bem como o total de emissões de CO_{2e} referente ao consumo nacional de pellets no setor doméstico em 2010 destinado ao mesmo fim, correspondente a 10,2 kt CO_{2e}.

Num cenário de uso exclusivo de pellets para satisfazer o consumo nacional de energia respeitante aos combustíveis fósseis para aquecimento do ambiente e de águas no setor doméstico em 2010, o valor total de emissões de CO_{2e} obtido corresponde a 314,2 kt, sendo possível deste modo evitar a emissão de sensivelmente 1691,8 kt CO_{2e}, correspondendo a cerca de 84% do valor total emitido pelo consumo de energia de combustíveis fósseis.

2. CONCLUSÕES

A temática das alterações climáticas tem gerado ao longo dos últimos anos um consenso universalizado sobre a necessidade urgente de atuação neste domínio. Esta preocupação levou à elaboração e aprovação de um conjunto de instrumentos de política, tanto a nível internacional como nacional, no sentido da mitigação e adaptação aos impactes ambientais, económicos e sociais resultantes do efeito de estufa provocado pelas emissões de gases com origem em atividades antropogénicas. A tónica de intervenção estratégica nacional, com a recente aprovação da última Estratégia Nacional para a Energia, (ENE 2020), centraliza-se nas energias renováveis como um papel fulcral no setor energético. Neste contexto mais ampliado de uma política energética e climática integrada e coerente, que a aplicação da biomassa florestal enquanto biocombustível destinado a valorização energética pode prosperar.

O presente estudo teve como objetivo primordial avaliar os impactes da cadeia de valorização de biomassa para a produção de pellets em termos de emissão de poluentes atmosféricos, incluindo GEE. Numa primeira fase, procedeu-se à caracterização pormenorizada das várias operações que constituem uma cadeia de valorização de biomassa para pellets típica em Portugal. Posteriormente a avaliação compreendeu a determinação das emissões inerentes a todo o processo logístico de conversão da biomassa florestal em pellets, por aplicação de uma metodologia de cálculo baseada na utilização de

Conclusões

fatores de emissão, bem como na estimativa das emissões de CO_{2e} respeitante ao consumo nacional de energia no setor doméstico para Aquecimento do Ambiente e de Águas para o ano de 2010.

Os principais obstáculos intrínsecos à cadeia de valorização de biomassa para pellets encontram-se associados à disponibilidade de matéria-prima e à promoção da utilização deste tipo de biocombustível. A preocupação da disponibilidade de matéria-prima deve-se em grande parte à constante redução da ocupação de pinheiro bravo nas florestais nacionais, representando esta espécie florestal cerca de 80% da matéria-prima utilizada para a produção de pellets. O consumo anual de aproximadamente 1,4 milhões de toneladas de biomassa, da qual se salientam produtos e subprodutos da exploração florestal e da transformação primária de biomassa, entra em concorrência direta com o mercado da pasta de papel que detém um poder económico maior para influenciar o preço unitário da biomassa. Nesta perspetiva devem ser tomadas medidas e mecanismos de apoio para salvaguardar a gestão sustentável dos recursos florestais e, paralelamente, desenvolver incentivar a criação de novas origens de matéria-prima, com recurso a ações de arborização, promoção e incentivo à certificação florestal que fomentem a rentabilidade e o investimento da floresta nacional.

O consumo atual de pellets em Portugal corresponde sensivelmente a 10% da produção nacional total. As metas impostas pela Diretiva 2009/28/EC com caráter obrigatório, impõe a Portugal a adoção de medidas concretas e eficazes para a redução de emissões de CO₂. Tais medidas, baseadas em investimentos e incentivos no setor energético nacional devem favorecer aplicações que detenham elevado rendimento e fomentem a economia numa perspetiva horizontal.

Os valores obtidos para as emissões alusivas à cadeia de valorização de biomassa, recorrendo ao caso de estudo de uma unidade industrial típica a laborar em Portugal com uma produção de 73 kt de pellets, e à utilização destes como combustível, correspondem a 14831,2 t CO_{2e}, 595,5 t CO, 209,5 t NO_x, 152,4 t PTS, 27,7 t SO_x, e 20,4 t COVNM. De salientar, que a etapa de produção, que incorpora o processo de fabrico e o destroçamento intermédio, a que tem maior contributo nas emissões totais de CO_{2e}, NO_x e SO_x. Nas emissões de COVNM a contribuição advém maioritariamente da atividade de exploração florestal. Da utilização dos pellets como combustível resultam emissões significativas de PTS, CO e NO_x. Em comparação com as emissões associadas à combustão de biomassa

para produção de energia estas apresentam-se bastantes superiores para os poluentes NO_x e COVNM, sendo ligeiramente superiores na PTS e inferiores no CO.

A premissa de que o aproveitamento de biomassa florestal para produção de energia e calor representa um ciclo de carbono neutro não é realista, sendo importante proceder a um balanço das emissões de CO_{2e} para avaliar as emissões associadas a todas as atividades. Este ciclo só se anula se a totalidade do carbono emitido for totalmente reabsorvido com o aumento da área florestada.

Face ao consumo nacional de energia respeitante aos combustíveis fósseis aplicados para Aquecimento do Ambiente e de Águas no setor doméstico em 2010 seria possível evitar a emissão de sensivelmente 1691,8 kt CO_{2e} , correspondendo a cerca de 84% do valor total emitido, se a fonte de energia fosse exclusivamente o biocombustível pellets. Deste modo, a substituição de equipamentos que utilizem combustíveis fósseis, por equipamentos a pellets para produção de calor no setor doméstico e comercial, pode gerar reduções de emissões compreendidas entre 80% e 90%. Analogamente à produção de energia elétrica a adaptação das centrais termoelétricas a carvão para co-combustão (queima combinada de pellets e carvão) possibilitaria reduzir a dependência externa de energia e o nível de emissões, que dependendo da proporção da incorporação de pellets no processo de combustão, pode atingir dimensões na ordem de 10% a 90%.

O balanço energético da cadeia de valorização de biomassa para a produção de 73 kt de pellets apresenta uma eficiência energética de 56,8% e de perdas associadas ao processo de transformação de 32,9%. O consumo energético para a cadeia de valorização de biomassa para pellets em estudo admitindo uma laboração contínua para o período indicado, corresponde a 0,122 tep/ t_{pellets} .

A implementação projetada da operação de descasque da BFP no processo de produção de pellets, para a unidade fabril em estudo, irá permitir otimizar o aproveitamento de biomassa e melhorar a qualidade final dos pellets, satisfazendo os requisitos da norma EN 14961-1 para pellets de Classe A1. Conformemente, a inserção da operação de embalamento tem como finalidade a redireção para o mercado doméstico de pellets, associada a uma melhor qualidade dos mesmos. No entanto, a implementação destas operações pode gerar um aumento significativo, referente à atividade de produção de pellets, na ordem dos 5% na emissão total de CO_{2e} e SO_x , sendo menos expressivo para os restantes poluentes atmosféricos analisados aproximando-se dos 2% do valor total emitido.

Conclusões

Numa perspetiva futura, na implantação de novas unidades de produção devia-se ter em conta um declive ligeiramente acentuado do *layout*, situando a introdução de matéria-prima na extremidade de nível superior e a obtenção do produto final na extremidade de nível inferior. Com esta alteração técnica seria possível reduzir cerca de 20% das emissões associadas à operação do sistema de transporte de matéria-prima inserida no processo de fabrico.

Em trabalhos futuros nesta área, recomenda-se ainda um estudo alargado às restantes unidades de produção de pellets implementadas, de modo analisar a cadeia de valorização de biomassa para pellets para diferentes processos de logística e capacidades de produção, salientando-se igualmente a evolução tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2009/28/CE, D. (2009). Promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno de eletricidade, 16–62.
- APA. (2013). *Relatório do Estado do Ambiente, 2013 Portugal*.
- APA. (2014). *PORTUGUESE INFORMATIVE INVENTORY REPORT 1990 – 2012*. Amadora.
- Aveiro, E. de. (2013). Sistema de Aspiração. Retrieved March 20, 2013, from <http://estivadoresaveiro.blogspot.pt/2013/06/sistema-de-aspiracao.html>
- Basu, P. (2006). Combustion and Gasification in Fluidized Beds. In *Combustion and Gasification in Fluidized Beds* (pp. 59–101, 173– 207, 359–380, 417–436). CRC Press. doi:doi:10.1201/9781420005158.ch3
- Bioenergy Portugal. (n.d.). Logística e Produção. Retrieved November 10, 2013, from <http://bioenergyportugal.com/logistica-e-producao/>
- Blanch, A. (2013). PELLETING PRESS. Retrieved May 22, 2013, from <http://www.alvanblanchgroup.com/pelleting-press>
- Bridgwater, A. . (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2-3), 87–102. doi:10.1016/S1385-8947(02)00142-0
- CCE. (2005). *Plano de Ação Biomassa*. Bruxelas.
- Chungen Yin, , Lasse A. Rosendahl, S. K. K. (2008). Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 725–754.

Referências Bibliográficas

COM. (2000). *Livro Branco sobre Responsabilidade Ambiental* (Vol. 2000). Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias.

COM. (2006). *Livro Verde - Estratégia Europeia para uma energia sustentável, competitiva e segura*. Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias.

DGEG. (2013). *Balanço Energético de 2010*.

DGEG, & INE. (2011). *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*.

Dias, A. C. R. V. (2005). *Avaliação do contributo do setor florestal para as alterações climáticas alterações climáticas*. Universidade de Aveiro.

Ecoheater. (2013, November). Matrizes e Roletes. doi:10.1016/0167-7136(84)90009-X

EEA. (2006). *Energy and environment in the European Union - Tracking progress towards integration*. Copenhaga.

EEA. (2011). Total primary energy consumption by energy source in 2008, EU-27. Retrieved November 30, 2013, from <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/total-primary-energy-consumption-by-1>

EEA. (2013). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2011 and inventory report 2013*. Copenhaga.

EnergiaBiomassa. (2013). Salamandra. Retrieved June 22, 2013, from <http://www.energiabiomassa.com/temas/recuperadores-de-calor-a-pellets/>

Enerpellets. (2013a). Estilhador. Retrieved May 26, 2013, from http://www.enerpellets.pt/our_pellets.html

Enerpellets. (2013b). Fornalha. Retrieved May 23, 2013, from http://www.enerpellets.pt/our_pellets.html

Enes, P., Valle, F. D. del, & Martínez, B. M. (2007). *Enersilva – Promoção do uso da Biomassa Florestal para fins energéticos no sudoeste da Europa (2004-2007)*. Opal Publicidade S. A.

Eurostat. (2012). *Energy Markets in the European Union in 2011*. Luxemburgo.

FAO. (2011). *State of Europe's Forests 2011*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.

Feelwarm. (2013). Arrefecedor. Retrieved May 20, 2013, from <http://www.feelwarm.pt/#!/arrefecedor/zoom/cp01/i616w1>

- Fernandes, N. J. (2008). *Estudo da fluidodinâmica e da secagem de um secador rotatório da indústria de fertilizantes*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Fernando Fernandes & Irmão, L. (2012). Exploração Florestal. Retrieved May 11, 2013, from <http://www.ffernandes.pt/explorflorest.html>
- Florestal, M. (2013). Carregador Frontal TMO FR100. Retrieved May 20, 2013, from http://colheitademadeira.com.br/fotos/carregador_frontal_tmo_fr100/
- Gower, S. T. (2003). Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 169–204.
doi:10.1146/annurev.energy.28.050302.105515
- GREENPRO. (2004). Bioenergia – Manual sobre tecnologias, projeto e instalações.
- Hakkila, P. (2004). *Developing technology for large-scale production of forest chips* (p. 99). Helsinki.
- HAMMERMILL, S. B. (n.d.). Moinho de Martelos. Retrieved March 01, 2013, from <http://www.hammermills.com/about-us/about-us>
- HRV. (2013). Elevador de Alcatruzes. Retrieved May 04, 2013, from http://www.hrv.pt/1/produtos_195515.html
- I., A. P. . G. I. . C. (2008). Release Of Nitrogen Precursors From Coal And Biomass Residues. *Energy & Fuels*, 22, 363–371.
- Ibis-Int. (2013). Transportador. Retrieved April 17, 2013, from <http://www.ibis-int.co.uk/topic.htm>
- ICNF. (2007). I F N 5 espécies florestais de Portugal.
- ICNF. (2013). I F N 6 espécies florestais de Portugal, 0–34.
- Inc., B. I. (2010). *OP FLO Opposite Flow, Counterflow Coolers*. Oklahoma.
- Indústria, M. (2013). Transportador. Retrieved April 25, 2013, from <http://www.mecamig.com/esteira-transportadora/>
- International, B. (2012). World of Pellets 2012.
- IPCC. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis* (p. 881). Cambridge e New York.
- IPCC. (2003). *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Hayama.
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Jr, T. R. M., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54, 17–46.

Referências Bibliográficas

- JFT. (2013). Máquinas de Embalar. Retrieved April 10, 2013, from <http://www.jfj.pt/cms/view/id/97/>
- John Perez-Garcia, P. D., & Miner, R. (2007). *The Greenhouse Gas and Carbon Profile of the Global Forest Products Industry*.
- KG, A. K. G. & C. (2007). *Wood Pelleting Plants Wood Pellets*.
- Loo, V., Sjaak, & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan (pp. 23–55). Londres: Earthscan.
- MEE. (2008). *NATIONAL LONG-TERM PROGRAMME TO ENCOURAGE THE USE OF BIOMASS FOR THE PERIOD 2008-2020*. Sofia.
- Moreira, N. A. R. (2007). *Caracterização da combustão de carvões vegetais em leito fluidizado*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Moreira, S. I. (2012). *A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a Qualidade do Ar*. Universidade de Aveiro.
- Netto, C. P. C. A. (2008). *Potencial da biomassa florestal residual para fins energéticos de três concelhos do distrito de Santarém*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- OBERNBERGER, I., BRUNNER, T., & BARNTHALER, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982. doi:10.1016/j.biombioe.2006.06.011
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook*. London: Earthscan.
- Ozgen, S., Caserini, S., Galante, S., Giugliano, M., Angelino, E., Marongiu, A., ... Morreale, C. (2014). Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets. *Atmospheric Environment*, 94, 144–153. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.032
- Palau &, S. (2013). Ciclone. Retrieved from http://www.solerpalau.pt/formacion_01_37.html
- Payper. (2013). Máquinas de Embalar. Retrieved April 15, 2013, from <http://www.payper.com/payper-productos-ensacadoras-e-paletizadores>
- Pelletspower1. (2013). Silos. Retrieved March 22, 2013, from <http://www.gesfinu.com/index.php?cat=11&item=24&PHPSESSID=211ef2d53a1685450ff201d26d59c1ba>
- Pereira, R. P. S. da C. R. (2006). *Viabilidade Económica e Ambiental da Utilização de Biomassa em Centrais Térmicas em Portugal*. Universidade Nova de Lisboa.

- Pinewells. (2013). Secador. Retrieved April 20, 2013, from <http://www.ipc.com.pt/home/index2.php?area=portfolio&fam=28>
- Poyry. (2011). *Engineering balanced sustainability™ Annual Report 2011 Serving clients globally Core services*. Vantaa.
- Projeto, F. do. (2013). Transportador. Retrieved April 15, 2013, from <http://www.fabricadoprojeto.com.br/2013/03/serie-transportadores-redler-ou-transportador-de-corrente/>
- Promill-stolz. (2013). Centrifugal sifter. Retrieved May 24, 2013, from <http://www.directindustry.com/prod/promill-stolz/centrifugal-sifters-104911-1189901.html>
- REN21. (2012). *Renewables 2012 - Global Status Report*. Paris.
- SILVA, M. T. C. DA. (2009). *Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO2 resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração*. Universidade Nova de Lisboa.
- SPG. (2013). Transportador. Retrieved April 19, 2013, from <http://www.spg.ind.br/produtospg/infoproduto/89?categoriaid=290&categoriapai=103&venda=1&produto=Transportador de Roletes acionado para Paletes>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization – a review. *Bioresources*, 7, 4451–4490.
- Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Karlton, E., Lunnan, A., MIZARAITE, D., ... Roser, D. (2007). Sustainable utilisation of forest biomass for energy—Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries. *Biomass and Bioenergy*, 31(10), 666–684. doi:10.1016/j.biombioe.2007.06.012
- Tarelho, L. (2008). *Tratamento Termoquímico de Resíduos*.
- Thermal, S. (2013). Biomass Fired Hot Gas Generators. Retrieved May 28, 2013, from <http://hdsig.he245.vps.webenabled.net/es/sistemas-de-energia-a-biomasa>
- UNFCCC. (2003). Estimation, reporting and accounting of harvested wood products - technical paper. FCCC/TP/2003/7, 44.
- Wood Fisrt. (2013a). Arrefecedor. Retrieved May 25, 2013, from <http://www.woodfirst.pt/arrefecedores>
- Wood Fisrt. (2013b). DESTROÇADOR DE TAMBOR. Retrieved April 07, 2013, from <http://www.woodfirst.pt/destrocador-tambor>

ANEXOS

Anexo I – Produção de pellets na UE-27 em kt (Fonte:European Pellet Council 2011, Pellet Atlas 2009)

País	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Alemanha	270	470	1100	1460	1600	1750
Áustria	450	617	700	625	695	850
Bélgica				485	223	286
Bulgária			13	27		40
Dinamarca	187	134	149	70		180
Eslováquia			100	117		117
Eslovénia			115			154
Espanha		30	95	163	900	120
Estónia			383			381
Finlândia					299	300
França	71	121	190	240	346	495
Grécia			79			33
Holanda	110	110	108	120		120
Hungria			12	15	81	162
Irlanda			15	15		27
Itália	240	300	600	700	550	600
Letónia			130			223
Lituânia						133
Polónia	200	280	329	378		410
Portugal					400	430

Reino Unido			129	194		138
República Checa			27	168		223
Roménia			108	111		157
Suécia	1100	1458	1400	1405	1575	1645
EU-27	2628	3520	5782	6294	6669	9241

Anexo II – Base de dados a nível mundial das unidades de produção de pellets e respetivas capacidades de produção instaladas (kt), em 2012 (Fonte: Bioenergy International, 2012)

	Países	Unidades de Produção	Capacidade de Produção
Países Desenvolvidos	Alemanha	49	3100,4
	Áustria	26	1221
	Bélgica	9	542
	Bielorrússia	4	71,4
	Bósnia e Herzegovina	6	119,35
	Bulgária	6	119,35
	Canadá	43	3637
	Croácia	6	166
	Dinamarca	7	492,5
	Eslováquia	13	153
	Eslovénia	4	80
	Espanha	26	692
	Estónia	6	372
	EUA	93	5973
	Finlândia	14	440
	França	32	1400
	Grécia	2	30
	Holanda	4	285
	Hungria	6	144,7
	Irlanda	2	110
	Itália	18	650
	Letónia	15	1010
	Lituânia	3	107
	Montenegro	1	Fase Desenvolvimento
Noruega	7	592	
Polónia	18	937	
Portugal	15	855	
Reino Unido	12	616	

	República Checa	5	202
	Roménia	3	200
	Rússia	68	3314
	Servia	3	87
	Suécia	34	2324
	Suíça	10	242
	Ucrânia	13	475,4
Países Emergentes	Argentina	5	93
	África do Sul	2	143
	Austrália	2	256
	Brasil	2	40
	Chile	3	100
	China	18	882
	Colômbia	1	10
	Guatemala	1	70
	Índia	3	200
	Indonésia	1	100
	Japão	5	105
	Nova Zelândia	3	61
	Panamá	1	150
	Coreia do Sul	7	116
	Uruguai	1	20
	Venezuela	1	25
	Vietname	3	135
	Total	642	33266,1

Anexo III – Consumo de pellets na UE-27 em kt (Fonte:European Pellet Council 2011, Pellet Atlas 2009)

País	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Alemanha	240	470	600	900		1200
Áustria	303	392	450	513		660
Bélgica		730	735	920		920
Bulgária						12
Dinamarca	818	892	993			1600
Eslováquia						18
Eslovénia			102			112
Espanha			4	10		95
Finlândia	59	100				213

França	40	90	135			400
Grécia			1,31			11
Holanda	487	486	705	912		913
Hungria						10
Irlanda		33	6			30
Itália	270	340	567	850		850
Letónia		540		312		39
Lituânia						20
Polónia	25	30	32	35		300
Portugal						10
Reino Unido				760		176
República Checa						3
Roménia			0,01	25		25
Suécia	1490	1685	1715	1850		2200
EU-27	3835	5788	6045	7087		9817

Anexo IV – Lista de unidades de produção de pellets em Portugal.

Grupo	Unidades de Produção	Localização	Ano de Implementação	Capacidade de Produção (t/ano)
Gesfinu	PelletsPower1	Lousada	2008	50000 - 100000 (80000)
	PelletsPower	Mortágua	2008	> 100000
	PelletsPower2	Alcácer do Sal	2009	>100000
Visabeira	PineWells, S.A.	Arganil	2009	> 100000
Enerpar	Enermontijo, S.A.	Pegões	2008	50000 - 100000 (80000)
Enerpellets	Enerpellets, S.A	Pedrogão Grande	2007	> 100000 (150000)
	Pelletsfirst	Alcobaça	2012	>100000 (120000)
JAF	José Afonso & Filhos, S.A.	Oleiros	2007	50000 - 100000 (70000)
Alcides Branco	Centroliva	Vila Velha de Ródão		50000 - 100000 (60000)
PROEF	Stellep	Chaves		10000 - 50000
	Bioenergy Portugal	Chamusca	2012	100000
	Glowood	Cercal do Alentejo		50000 - 100000
	Lusoparque	Porto		10000 - 50000
	Vimasol Pellets	Celorico de Basto	2008	5000 - 10000 (9000)

CMC Biomassa - Casal & Carreira	Alcobaça		5000 - 10000
Biomad - Energias Renováveis	Guimarães		até 5000
Castro & Filhos	Guimarães		até 5000
Mepellets	Melgaço		até 5000
Fourpellets	Barcelos		até 5000
Thermowall - Parceiro: Martins Ferreira	Braga		até 5000
XPZ	Esposende		até 5000
Palser-Bioenergia e Paletes, Lda	Sertã	2013	10000 - 50000
Martos & Ca.	Leiria	2013	10000 - 50000
Tecpellets	Póvoa do Varzim	2013	> 100000
Nicepellets	Ílhavo	2013	10000 - 50000

Anexo V – Tabela de Conversões de Energia.

Fonte de Energia	Unidade	tep
Eletricidade	GWh	86
Biomassa	t	0,25
Pellets	t	0,45
Gasóleo	103 l	0,852

Anexo VI – Fatores de Emissão para Combustíveis

Combustível	kg CO₂e/tep
GPL Garrafa Butano	2637,7
GPL Garrafa Propano	
GPL Canalizado	
Gás Natural	2348,8
Gasóleo Aquecimento	3098,2
Carvão Mineral (Turfa)	4433,1