

Andrea Isabel Moreira Pinto

Avaliação da biomassa de Paulownia enquanto
combustível na forma peletizada

abril 2015



Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Resumo

Este trabalho teve por objetivo a avaliação da biomassa de *Paulownia* enquanto combustível na forma peletizada, na perspectiva do desempenho energético e ambiental numa caldeira doméstica. Os resultados foram comparados com péletes de Pinho comerciais e certificados pela norma ENplus. A *Paulownia* é uma espécie de crescimento rápido, originária da China e resistente numa gama alargada de condições climáticas. A espécie utilizada foi a Cotevisa 2, que é uma espécie híbrida interespecífica e não invasora, produzida em Espanha a partir de *Paulownia elongata* x *Paulownia fortunei*. O poder calorífico da biomassa de *Paulownia* apresenta valores idênticos aos de outras espécies de biomassa, como o Pinho, mas o seu teor reduzido de poluentes torna-a num alvo de estudo de interesse.

Após o corte dos troncos de *Paulownia* em pedaços mais pequenos, procedeu-se à secagem numa estufa solar e noutra elétrica, seguindo-se o destorroamento e, por fim, a peletização. Foram efetuadas análises às amostras, no sentido de determinar o teor de humidade. Os péletes produzidos apresentaram um valor médio de teor de humidade de 6,3% na base húmida. Foram realizados ensaios de qualidade aos péletes para permitir uma comparação com os péletes de Pinho.

Procedeu-se, então, à combustão dos péletes de *Paulownia* e de Pinho com os parâmetros de operação indicados pelo fabricante da caldeira, em três cargas térmicas diferentes: mínima, média e máxima. Foram obtidos os dados que permitiram calcular a rendimento térmico e, simultaneamente, foram monitorizadas as emissões de poluentes em cada uma das cargas. Verificou-se que o caudal mássico tem grande influência no rendimento da caldeira, sendo este superior na *Paulownia*; no entanto, nenhuma das espécies cumpre o requisito mínimo exigido pela norma de referência. Relativamente às emissões de CO, tanto os péletes de *Paulownia* como os Pinho apresentaram uma tendência decrescente entre a carga mínima e a máxima, embora menos acentuada na máxima no que diz respeito aos de *Paulownia*. As emissões de NO_x de *Paulownia* foram bastante superiores às de Pinho, mostrando serem mais dependentes do teor de azoto da amostra e não tanto das condições de operação da caldeira.

No sentido de melhorar o valor do rendimento térmico, refizeram-se ensaios com valores inferiores de excesso de ar e, posteriormente, isolou-se, termicamente, a caldeira. Verificou-se um aumento muito significativo do rendimento em todas as cargas, neste caso, respeitando a norma. O efeito isolado da redução do excesso de ar mostrou provocar um aumento acentuado do valor de rendimento, acompanhado por uma redução de emissões de CO; no entanto, após a aplicação do isolamento obteve-se um ligeiro aumento do rendimento mas à custa de emissões elevadas de CO.

Abstract

This study intended to evaluate *Paulownia*'s biomass as a fuel in a pelletized form, in energy and environmental performance perspective of a domestic boiler. The results were compared with commercial and ENplus certified Pine pellets. *Paulownia* is a fast growing and resistant species in a wide range of climate conditions, native from China. The species used in this work was Cotevisa 2, from Spain, *Paulownia elongata* x *Paulownia fortunei*, which is an interspecific hybrid and not invasive. *Paulownia*'s biomass heating value is in the same range of other biomass species, such as Pine's, but its low pollutant content makes it an interesting case study.

Paulownia logs were cut into small pieces and dried in both a solar and an electric greenhouse, then milled and finally pelletized. Throughout all the stages tests were made to know its moisture content. Pellets had 6.3% in wet basis. Quality tests were performed to the pellets to allow comparing with pine pellets.

Pine and *Paulownia* pellets were burned according to the boiler manufacturer's parameters in three nominal thermal loads: reduced, medium and high. Data was obtained in order to determine thermal efficiency and, simultaneously, pollutants emissions were monitored in each of the loads. It was found that the mass flow rate has a large influence on the boiler efficiency, with *Paulownia* species showing greater values; however none of the species meets the minimum value required by the reference standard. With regard to CO emissions, *Paulownia* and Pine pellets showed a downward tendency between reduced and high load, although less pronounced in *Paulownia*'s, especially at high load. *Paulownia* NO_x emissions presented higher than Pine's and shown to be more dependent on the nitrogen content of the sample rather than the boiler operation conditions.

In order to improve thermal efficiency, new tests were made with lower excess air values and then insulation was installed on the boiler. There was a considerable increase in thermal efficiency, for each load, exceeding the standard minimums in this case. The isolated effect of excess air caused a high increase in thermal efficiency, accompanied by CO emissions reduction; however after applying the insulation, even though thermal efficiency increased slightly, very high levels of CO emissions were measured.

Agradecimentos

A concretização desta dissertação de mestrado só se tornou uma realidade graças a preciosas colaborações.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Luís Monney de Sá Paiva, por me incentivar a procurar as melhores soluções para os problemas que surgiram, pela sua orientação e total disponibilidade, pelo rigor e exigência, pelo conhecimento que transmitiu e pelas opiniões e críticas tão valiosas durante a realização deste trabalho.

Às investigadoras, Engenheira Tânia Ferreira e Doutora Diana Almeida, pela inestimável ajuda em todas as etapas, pela valiosa transmissão de conhecimentos, pela inteira disponibilidade, boa disposição e amizade.

Ao Professor Edmundo Marques pelo apoio prestado, pelo conhecimento transmitido e pela disponibilidade.

Ao Engenheiro Abel Oliveira, ao Engenheiro Paulo Figueiredo e à sua equipa e ao Engenheiro Nelson Santos, pela ajuda na resolução de problemas.

Aos meus amigos e namorado, que me incentivaram a concretizar este trabalho, pelo apoio constante e pela compreensão nos momentos em que não me foi possível estar presente.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram a sonhar mais alto, pela preciosa ajuda e por toda a compreensão e força nos momentos mais difíceis.

Índice

Índice	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Símbolos.....	xvii
1. Introdução.....	1
2. Bioenergia.....	11
2.1 Biomassa.....	11
2.2 Biomassa florestal	13
2.3 <i>Paulownia</i>	16
2.3.1 Cruzamento de espécies de <i>Paulownia</i>	19
2.3.2 <i>Paulownia</i> como biomassa.....	20
2.3.3 <i>Paulownia</i> em Portugal	22
2.4 Conversão energética.....	24
3. Tecnologias de conversão.....	25
3.1 Processos termoquímicos	25
3.2 Processo de peletização.....	26
3.2.1 Secagem	26
3.2.2 Destroçamento.....	26
3.2.3 Acondicionamento.....	27
3.2.4 Peletização.....	27
3.2.5 Arrefecimento.....	28
3.2.6 Separação de finos.....	28
3.2.7 Certificação de péletes	28
3.2.8 Péletes em Portugal.....	29
3.3 Combustão	30
3.3.1 Ignição	31
3.3.2 Secagem	32
3.3.3 Pirólise	32
3.3.4 Combustão do resíduo carbonoso.....	32
3.3.5 Poluentes	32
4. Instalação experimental.....	35

4.1	Instalação inicial	35
4.2	Instalação final.....	36
4.3	Caldeira.....	37
4.4	Procedimento experimental.....	38
4.4.1	Temperaturas.....	39
4.4.2	Caudal mássico de péletes.....	39
4.4.3	Caudal mássico de água.....	39
4.4.4	Caudal mássico dos gases de combustão	39
4.4.5	Composição dos gases de combustão.....	40
5.	Pré-Tratamento de <i>Paulownia</i>	41
5.1	Secagem	41
5.1.1	Ciclo A.....	43
5.1.2	Ciclo B	46
5.1.3	Ciclo C.....	48
5.2	Destroçamento.....	48
5.3	Caracterização da espécie	49
5.3.1	Teor de humidade.....	49
5.3.2	Análise granulométrica	49
6.	Peletização.....	53
6.1	Testes de Qualidade	54
6.1.1	Dimensões	54
6.1.2	Massa volúmica.....	54
6.1.3	Teor de humidade.....	54
6.1.4	Teor de finos	55
6.1.5	Durabilidade mecânica.....	55
6.1.6	Composição química	56
7.	Resultados e discussão	57
7.1	Procedimento de cálculo.....	57
7.2	Ensaios experimentais.....	61
7.2.1	Fase de arranque	64
7.2.2	Regime permanente	65
8.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	83
9.	Referências	87

Anexos	93
Anexo A – Espécie não invasora: certificado de <i>Paulownia</i> Cotevisa 2.....	93
Anexo B – Calibração	94
B.1 - Medidor de caudal da turbina	94
B.2 – Termopares	95
Anexo C – Distribuição de partículas.....	97
C.1 - Análise granulométrica Amostra 2	97
C.2 - Análise granulométrica Amostra 3.....	98
Anexo D – Outros ensaios.....	99
Anexo E – Cálculo da perda de carga	100
Anexo F – Análise de incertezas.....	102
F.1 – Incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes	103
F.2 – Incerteza associada à medição do caudal mássico de água.....	104
F.3 – Incerteza associada à medição das temperaturas da água.....	105
F.4 – Incerteza associada à medição da temperatura dos gases de exaustão	106
F.5 – Incerteza associada à medição da concentração dos gases de exaustão.....	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da biomassa.	15
Tabela 2.2 – Massa volúmica de duas espécies de <i>Paulownia</i> . Fonte: Martín <i>et al.</i> , 2009.	21
Tabela 2.3 – Características do clone <i>inVítro</i> 112. Fonte: Alvarez, 2012.	21
Tabela 2.4 – Análise imediata e elementar do clone <i>in inVítro</i> 112. Fonte: Alvarez, 2012.	22
Tabela 3.1 – Norma ENplus: valores de referência das propriedades dos péletes. Fonte: EPC, 2013.	29
Tabela 3.2 – Fontes de emissões de poluentes na combustão de biomassa. Fonte: Werther <i>et al.</i> , 2000.	33
Tabela 6.1 – Comparação teor de humidade entre serrim e péletes.	55
Tabela 6.2 – Análise imediata e elementar aos péletes de <i>Paulownia</i> e de Pinho.	56
Tabela 7.1 – Ensaio experimentais.	63
Tabela 7.2 - Ensaio experimentais nas três potências.	66
Tabela 7.3 – Ensaio experimentais em diferentes condições.	75
Tabela 7.4 – Perdas térmicas.	79
Tabela D.1 – Resultados obtidos com outros ensaios.	99
Tabela F.1 – Exatidão e resolução dos equipamentos de medição.	103
Tabela F.2 – Incertezas associadas à medição do caudal mássico de péletes.	104
Tabela F.3 – Incertezas associadas à medição do caudal mássico de água.	104
Tabela F.4 – Incertezas associadas à medição da temperatura de entrada de água.	105
Tabela F.5 – Incertezas associadas à medição da temperatura de saída de água.	105
Tabela F.6 – Incertezas associadas à medição da temperatura dos gases de exaustão.	106
Tabela F.7 – Incertezas aleatórias associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.	106
Tabela F.8 – Incertezas sistemáticas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.	107
Tabela F.9 – Incertezas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.	107

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Trilema Energético Mundial. Fonte: WEC, 2014.	1
Figura 1.2 – Consumo de energia primária mundial por tipo de combustível. Fonte: BP, 2014.2	
Figura 1.3 – Consumo de energia primária em Portugal por tipo de combustível. Fonte: DGEG, 2015.	3
Figura 1.4 – Emissões de GEE e metas 2008-2012. Fonte: APA, 2014.	5
Figura 1.5 – Utilização das renováveis para produção de eletricidade em 2013. Fonte: REN 21,2014.	7
Figura 1.6 – Evolução da energia produzida de origem nas FER até abril 2015. Fonte: DGEG, 2015.	7
Figura 1.7 – Contribuição de cada FER para a energia elétrica produzida. Fonte: DGEG, 2015.	8
Figura 1.8 – Dependência energética de Portugal. Fonte: APREN, 2015.	8
Figura 2.1 – Consumo global da energia de biomassa 2013. Fonte: REN 21, 2014.	12
Figura 2.2 – Ciclo de carbono. Fonte: Barbosa,2008. Fonte: Barreto, 2008.	13
Figura 2.3 – Distribuição das espécies florestais em Portugal em 2010. Fonte: ICNF, 2013. ...	14
Figura 2.4 – Espécies de <i>Paulownia</i> . Fonte: <i>Paulownia</i> , 2015.	17
Figura 2.5 – Ciclo de vida de <i>Paulownia</i> . Fonte: Plantation, 2015.	19
Figura 2.6 – Plantação de <i>Paulownia</i> Cotevisa 2 na Alemanha com 8 meses. Fonte: <i>Paulownia</i> Germany, 2015.	20
Figura 2.7 – Técnicas e produtos da conversão da biomassa. Fonte: Enersilva, 2007.	24
Figura 3.1 – Matriz tipo Anel de peletizadora. Fonte: Pellet Process, 2014.	27
Figura 3.2 – Esquema de produção de péletes. Fonte: Buddekker, 2009.	28
Figura 3.3 – Descrição esquemática do processo de combustão de estilha de madeira. Fonte: Khan <i>et al.</i> , 2009.	31
Figura 4.1 – Instalação experimental inicial. Fonte: Ferreira, 2013.	35
Figura 4.2 – Instalação experimental final. Fonte: Ferreira, 2013.	36
Figura 4.3 – Caldeira e câmara de combustão.	37
Figura 5.1 – Troncos de <i>Paulownia</i> tal como recebidos.	41
Figura 5.2 – Estufa laboratorial e exsiccador com amostras de <i>Paulownia</i>	42
Figura 5.3 – Estufa solar da ESTGV com <i>Paulownia</i>	43
Figura 5.4 – Ciclo A: variação do teor de humidade de amostras de <i>Paulownia</i>	44
Figura 5.5 – Variação da humidade relativa no interior da estufa solar.	45
Figura 5.6 – Variação da temperatura no interior da estufa solar.	45
Figura 5.7 – Variação da irradiação no exterior e interior da estufa solar.	46
Figura 5.8 – Secagem ao ar livre de <i>Paulownia</i>	46
Figura 5.9 – Ciclo B: variação do teor de humidade de amostras de <i>Paulownia</i>	47
Figura 5.10 – Ciclo C: variação do teor de humidade de amostras de <i>Paulownia</i>	48
Figura 5.11 – Moinho de martelos e crivo no interior.	49
Figura 5.12 – Agitador de peneiros.	50
Figura 5.13 – Distribuição granulométrica da amostra 1 de <i>Paulownia</i>	51

Figura 6.1 – Peletizadora do LTTC.	53
Figura 6.2 – Péletes de <i>Paulownia</i>	53
Figura 7.1 – Temperatura dos gases de exaustão na fase de arranque.	65
Figura 7.2 – Efeito do caudal de combustível na concentração de O ₂ e excesso de ar.	67
Figura 7.3 – Efeito do caudal de combustível na concentração de poluentes.	68
Figura 7.4 – Influência do oxigénio nas emissões poluentes.	69
Figura 7.5 – Influência do tipo de combustível nas emissões de CO e NO _x	70
Figura 7.6 – Influência do caudal de combustível no rendimento térmico.	72
Figura 7.7 – Isolamento da caldeira.	73
Figura 7.8 – Pinho: efeito do excesso de ar no rendimento térmico.	76
Figura 7.9 – Pinho: efeito do isolamento no rendimento térmico.	77
Figura 7.10 – <i>Paulownia</i> : efeito do excesso de ar e do isolamento no rendimento térmico.	78
Figura 7.11 – Influência do caudal de combustível nas perdas pela chaminé e TGE.	81
Figura A.1 – Certificado de <i>Paulownia</i> Cotevisa 2 como não invasora.	93
Figura B.1 – Curva de calibração do medidor de caudal da turbina.	95
Figura B.2 – Curvas de calibração dos termopares.	96
Figura C.1 – Distribuição granulométrica da amostra 2 de <i>Paulownia</i>	97
Figura C.2 – Distribuição granulométrica da amostra 3 de <i>Paulownia</i>	98
Figura E.1 – Relação entre a diferença de altura e o caudal mássico de água.	101

Lista de Símbolos

A	Área, m ²
\bar{c}_p	Calor específico à temperatura média, kJ/(kg·K)
\bar{c}_{H_2O}	Calor específico da água à temperatura média, kJ/(kg·K)
d_p	Diâmetro de uma partícula, m
d_{pi}	Média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros consecutivos, m
h	Entalpia específica, kJ/kg
h_{lv}	Entalpia latente de vaporização da água, kJ/kg
H_{bh}	Teor de humidade na base húmida, %
H_{bs}	Teor de humidade na base seca, %
$m_{água}$	Massa de água, kg
$m_{inicial}$	Massa inicial da amostra, kg
m_{final}	Massa final da amostra, kg
m_{finos}	Massa de finos, kg
m_p	Massa de um pélete, kg
$m_{p_inicial}$	Massa inicial de péletes, kg
m_{p_final}	Massa final de péletes, kg
$\dot{m}_{água}$	Caudal mássico de água, kg/s
\dot{m}_{CO}	Caudal mássico de CO, kg/s
\dot{m}_p	Caudal mássico de péletes, kg/s
M	Massa molecular, kg/kmol
n	Número de produto em causa em função de um quilograma de péletes, kmol/kg
O_{2med}	Concentração de O ₂ medida, %
O_{2ref}	Fator de correção, %
P	Pressão, Pa
PCi_{CO}	Poder calorífico inferior do monóxido de carbono, kJ/kg
PCi_p	Poder calorífico inferior do material dos péletes, kJ/kg
$[P]_{corr}$	Concentração de poluente corrigido a um fator de correção, ppm ou %
$[P]_{med}$	Concentração de poluente medida, ppm ou %
$\dot{Q}_{chaminé}$	Perdas pela tubagem de exaustão, kW
\dot{Q}_{CO}	Perdas térmicas pelos não-queimados, kW
$\dot{Q}_{conv+rad}$	Perdas por convecção e radiação, kW
$\dot{Q}_{fornecida}$	Potência térmica libertada durante a combustão dos péletes, kW
\dot{Q}_{gases}	Perdas pela corrente dos produtos de combustão, kW
$\dot{Q}_{humidade}$	Perdas relativas à humidade do combustível, kW
$\dot{Q}_{transferida\text{Água}}$	Potência térmica transferida para a água, kW

T_{amb}	Temperatura ambiente, °C
T_{ent}	Temperatura de entrada de água na caldeira, °C
T_{gases}	Temperatura média dos gases de exaustão, °C
T_{sai}	Temperatura de saída de água na caldeira, °C
u	Energia interna específica, kJ/kg
v	Volume específico, m ³ /kg
V_p	Volume de um pélete, m ³
x_i	Fração mássica das partículas do material retido no intervalo i , -

Símbolos gregos

α	Fração de água dos péletes, -
Δt	Intervalo de tempo, s
$\eta_{térmico}$	Rendimento térmico, %
ρ_p	Massa volúmica de um pélete, kg/m ³
ϑ	Velocidade, m/s

Abreviações

AEBIOM	European Biomass Association
ANPEB	Associação Nacional de Pellets Energéticas de Biomassa
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APREN	Associação de Energias Renováveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIODAT	Biomass Database
BioEnergISA	Campo Pedagógico de Plantas Bioenergéticas
CAM	Comissão de Agricultura e Mar
CELPA	Associação da Indústria Papeleira
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
EIA	U.S. Energy Information Administration
EPC	European Pellet Council
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
FER	Fontes de Energia Renováveis
GEE	Emissões de gases com efeito de estufa
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IEA	International Energy Agency
INE	Instituto Nacional de Estatística
LNEG	Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia
LTTC	Laboratório de Termodinâmica e Transferência de Calor
PCI	Poder calorífico inferior
PCs	Poder calorífico superior

PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
RCM	Resolução de Conselho de Ministros
REN 21	Renewable Energy Policy Network for the 21 st Century
SRWC	Short Rotation Woody Crop
WEC	World Energy Council
WEO	World Energy Outlook

1. Introdução

A energia é a base da sociedade atual, alimentando transversalmente os setores fundamentais como a indústria, os transportes e a eletricidade. O desafio energético com que o mundo se depara reside no equilíbrio entre três vetores essenciais, designado por “Trilema Energético Mundial” no relatório anual *World Energy Outlook (WEO)* (IEA, 2013):

- **Segurança Energética:** gestão eficaz de fornecimento de energia primária, tanto de fontes domésticas como de externas, confiança nas infraestruturas energéticas e capacidade dos fornecedores de energia em responder à procura atual e futura.
- **Equidade Energética:** disponibilidade e preços acessíveis de energia para toda a população.
- **Sustentabilidade Ambiental:** conquista da eficiência energética, tanto na vertente do fornecimento como na da procura, e o desenvolvimento de formas de fornecimento de energia com base em fontes renováveis.

No sentido de obter um bom desempenho nestas três vertentes, os países têm vindo a repensar as suas estratégias na utilização da energia, principalmente na diversificação das fontes disponíveis: gás natural, nuclear e renováveis, como a solar, a eólica, a hídrica, biomassa e geotérmica.

Na caracterização de cada país no contexto do trilema energético, foi atribuído pelo *World Energy Council (WEC, 2014)* um valor de acordo com o seu desempenho em cada um dos princípios do trilema e na globalidade. A Suíça é o país com melhor resultado, seguida pela Suécia e pela Noruega. Portugal está em 25º lugar (23º em 2013), num total de 129 países avaliados. A Figura 1.1 apresenta os países com desempenhos excelentes em cada um dos vértices do trilema.



Figura 1.1 – Trilema Energético Mundial. Fonte: WEC, 2014.

1. Introdução

Santos (2013), participante do congresso de 2013 do WEC, refere que o desempenho de Portugal é positivo em relação à sustentabilidade ambiental, uma vez que tem mantido a redução das emissões de dióxido de carbono através duma crescente produção de eletricidade a partir de energias renováveis. No horizonte analisado neste congresso, uma das metas de Portugal era reduzir o consumo de energia primária em 20% até 2020, o que tem sido promovido pelo alargamento, à população, da utilização de processos e equipamentos de produção de energia, como é o exemplo da térmica, mais eficientes e, também, sustentados nas renováveis. Como Portugal não possui recursos energéticos fósseis, depende de outros países para a obtenção de petróleo, carvão e gás natural, embora se evidencie uma diversificação das fontes de energia utilizadas, como a eólica, a solar, a biomassa ou a hídrica, tal não é suficiente para dar resposta aos desafios que o país enfrenta. O trilema assenta, então, na competitividade, devido ao aumento dos preços dos combustíveis e da eletricidade e da segurança de abastecimento (Santos, 2013).

A produção de energia tem sido dominada pela utilização de combustíveis fósseis e, segundo o relatório *International Energy Outlook 2013* (EIA, 2013), espera-se que a tendência se mantenha com valores na ordem dos 80% até 2040. De acordo com o relatório *Energy Outlook 2035* (BP, 2014), espera-se que o consumo de energia primária cresça cerca de 1,5 pontos percentuais por ano, atingindo um total de 41% entre 2012 e 2035. Embora a utilização de petróleo continue a aumentar, já se revela um crescimento menor, sendo a renovável (incluindo os biocombustíveis) a fonte energética que revela maior crescimento, com valores de 6,4% ao ano. A Figura 1.2 apresenta o consumo de energia primária mundial de cada tipo de combustível, de 1965 a 2012, e os valores projetados, de 2012 a 2035.

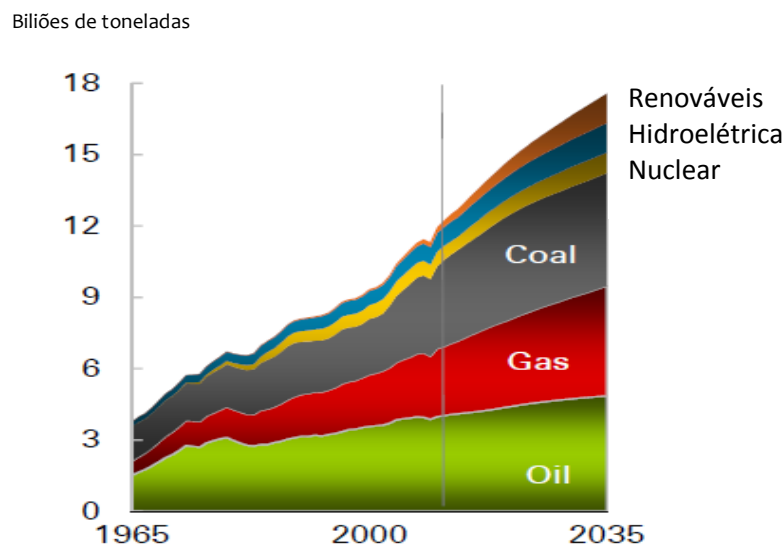


Figura 1.2 – Consumo de energia primária mundial por tipo de combustível. Fonte: BP, 2014.

Em Portugal, o petróleo e os seus derivados têm sido os mais utilizados no consumo de energia primária, embora se verifique uma diminuição de 2004 para 2013, respetivamente, de 59,5% para 45,1%. Por ordem decrescente, em 2013, as restantes fontes de energia

consumidas foram as renováveis com 24,8%, o gás natural com 17,6 e o carvão com 12,4. A evolução do consumo de energia primária entre 2004 e 2013 apresenta-se na Figura 1.3.

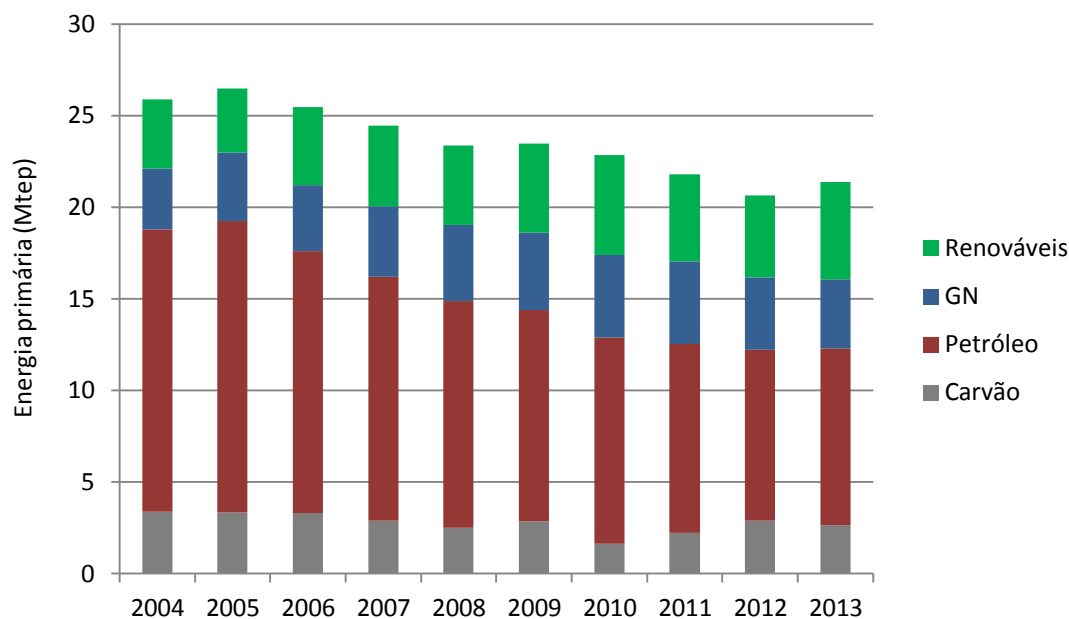


Figura 1.3 – Consumo de energia primária em Portugal por tipo de combustível. Fonte: DGEG, 2015.

A diversificação dos combustíveis utilizados é visível, inclusive, nas indústrias mais tradicionais, como é o caso da *Papeleira Portuguesa*, que tem vindo a aumentar a utilização de biocombustíveis. Em 2013, a biomassa representava 69% dos combustíveis consumidos por esta indústria (CELPA, 2014).

Embora as desvantagens ambientais da utilização dos combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, sejam um tema atual, há diversos motivos para que a sua utilização esteja muito difundida. A questão da disponibilidade e abundância destes combustíveis é incontornável, principalmente quando confrontada com a taxa a que se produzem, por exemplo, os biocombustíveis. Comparando as propriedades intrínsecas, como o poder calorífico, entre um biocombustível e o combustível fóssil mais aproximado, como o etanol e a gasolina, o biodiesel e o gasóleo e a biomassa e o carvão, a superioridade dos fósseis é perceptível (Tabak, 2009), por exemplo, os valores médios de poder calorífico da biomassa rondam 18 MJ/kg e os do carvão 26. Outra das razões está relacionada com o facto da indústria da energia estar direccionada para o armazenamento, distribuição e consumo destes combustíveis, de tal forma que a substituição por outros combustíveis ambientalmente apropriados, obrigaria a investimentos onerosos e, portanto, pouco atrativos para as empresas. Os países do Médio Oriente continuam a ser o principal fornecedor de petróleo, no entanto, a evolução da tecnologia e os elevados preços do petróleo têm promovido o aparecimento de novas fontes de petróleo, até então considerados inacessíveis, tal como o Brasil, que é considerado, no relatório WEO (IEA, 2013), o país mais em foco no fornecimento de petróleo.

1. Introdução

Relativamente às questões ambientais, no WEO de 2013 (IEA, 2013), alertou-se que 66% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) têm origem no setor da energia e caso não sejam instaurados outros procedimentos, o objetivo de limitar a subida da temperatura global terrestre até 2 °C não será atingido. A procura de alternativas aos combustíveis fósseis tem promovido a elaboração de estratégias no sentido de mitigar as consequências que a utilização intensiva destes combustíveis tem provocado. Como referido por Teixeira (2009), embora os combustíveis fósseis apresentem vantagens, reconhecendo-se o seu caráter dominante como fonte de energia primária, na maioria das economias desenvolvidas, existem inúmeras e importantes desvantagens, cada vez mais presentes e que obrigam a repensar as estratégias atuais de utilização:

- GEE e alterações climáticas.
- A *U.S. Energy Information Administration* no seu relatório *International Energy Outlook 2013* (EIA, 2013) estimava que, ao ritmo de exploração atual, as reservas exploráveis de petróleo durarão mais cerca de 50 anos, as de gás natural 60,2 anos e as de carvão cerca de 126 anos.
- Grande dependência energética de países importadores.

Dos fatores referidos, um dos mais preocupantes é a emissão dos GEE e as alterações climáticas. Com a criação do Protocolo de Quioto em 1997 e a sua ratificação em 2002 pelo Parlamento Europeu, os estados membros assumiram um compromisso de redução de emissões gasosas para o combate ao efeito de estufa com objetivos diferentes, para os países que o assinaram, a serem cumpridos até 2020.

O Instituto Nacional de Estatística (INE) lançou um relatório acerca dos Indicadores Económico-ambientais de Portugal entre 1995 e 2012 (INE, 2014), onde refere que, em 2012, se registou um novo valor mínimo através de uma diminuição de 1,8 pontos percentuais das emissões de GEE. Embora no ano anterior a redução tenha sido idêntica, cerca de 1,2 pontos percentuais, a diminuição não se revelou tão acentuada como em períodos anteriores, como entre 2006 e 2010, o que pode ser justificado, em parte, pela menor pluviosidade em 2011 e 2012. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) lançou em 2014 o mais recente “Relatório do Estado do Ambiente” onde são apresentados, entre outros, os dados sobre os valores das emissões dos GEE em Portugal. A evolução das emissões de GEE, de 1990 a 2012, com indicação da meta do protocolo de Quioto 2008-2012 é apresentada na Figura 1.4.

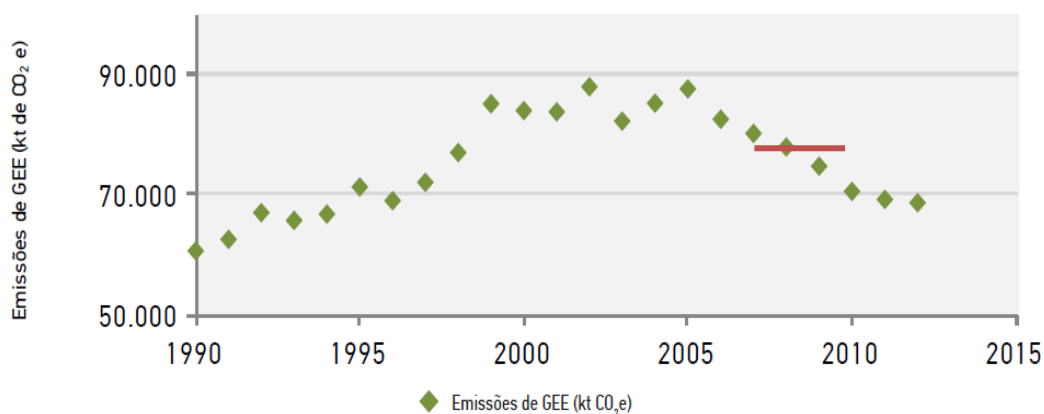


Figura 1.4 – Emissões de GEE e metas 2008-2012. Fonte: APA, 2014.

No Protocolo de Quioto estava estabelecido que no período 2008-2012, Portugal não poderia ultrapassar o limite de 27% de aumento de GEE em relação a 1990, o que corresponde a 76.400 kt CO₂e. Em 2012 o valor de GEE foi de 68.800 kt de CO₂e, pelo que o objetivo foi cumprido.

A tendência é positiva, resultado da diversificação das fontes energéticas, com incidência na maior utilização das renováveis, como a eólica, solar e a biomassa, e das não renováveis menos poluentes, como o gás natural, centrais termoelétricas de ciclo combinado e unidades de cogeração. Dentro do setor energético, o qual tem o maior peso (69,7%) nas emissões de GEE, os transportes (24,7%) e a produção e transformação de energia (25,3%) são os que têm maior influência. O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes tem vindo a melhorar estes valores. Nas últimas décadas, a União Europeia tem revisto as políticas energéticas no sentido de criar uma orientação comum aos estados membros. O objetivo destas políticas é o cumprimento de metas ambientais e competitivas através duma maior utilização de energias de fonte renovável, embora com objetivos distintos para a realidade de cada país. Em novembro de 2013, a União Europeia preparou a ratificação do segundo período do protocolo de Quioto (2013-2020) através da apresentação, pela Comissão Europeia, de legislação adequada. Atualmente, o acordo de Quioto ficou mais enfraquecido, após a saída do Japão, Rússia, Nova Zelândia e Canadá, que se opuseram a participar da segunda fase. Além disso, alguns dos maiores emissores de poluentes do mundo, como os Estados Unidos, a China e a Índia, nunca o assinaram. A Resolução de Conselho de Ministros (RCM) n.º 20/2013 de 10 de abril aprovou os seguintes planos:

- Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 (Estratégia para a Eficiência Energética - PNAEE 2016).
- Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020 (Estratégia para as Energias Renováveis - PNAER 2020).

Estes planos estabelecem o modo de alcançar os objetivos e os compromissos internacionais assumidos por Portugal relativamente à eficiência energética e à utilização

1. Introdução

de fontes de energia renováveis (FER). Para além de densificar as metas a atingir, clarificam as limitações e identificam o potencial de melhoria de eficiência energética e de inclusão de fontes renováveis nos diversos setores de atividade, procurando o estabelecimento de programas e medidas mais adequados ao cumprimento dos referidos compromissos, tendo em conta o panorama nacional, tal como descrito na mesma RCM.

A Comissão Europeia, por concluir que os limites mínimos, previamente definidos para 2020 eram insuficientes, estabeleceu em janeiro de 2014 um novo quadro de metas europeias para 2030 (EC, 2015):

- 40% de redução das GEE relativamente aos níveis de 1990.
- 27% de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final.
- 27% de aumento da eficiência energética .

A contribuição de cada estado membro para o horizonte de 2030 ainda não está estabelecida. No período até 2020 e, mediante um aumento da eficiência energética, foi definido para Portugal, um objetivo geral de redução de 25% no consumo de energia primária, e um objetivo específico de redução de 30% para a Administração Pública. No contexto da utilização de energia procedente de fontes endógenas renováveis, pretende-se que, em 2020, os objetivos definidos, de 31% do consumo final bruto de energia e 10% da energia utilizada nos transportes ao serem de fontes renováveis, sejam cumpridos com um menor custo para a economia. Além do claro objetivo de diminuir a utilização de combustíveis fósseis, pretende-se aumentar a independência energética de Portugal com recurso cada vez menor à importação de energia, assim como assegurar a diversificação das fontes de energia.

Devido às políticas referidas, a Europa tem a maior taxa de utilização de FER na produção de energia elétrica, com uma fração de 13% em 2012, estimando-se que chegue até 32% em 2035 (BP, 2014). A percentagem de renováveis utilizada para a produção de eletricidade em 2013, a nível mundial, foi de 22,1%, sendo a hídrica a que apresenta maior contribuição (Figura 1.5).

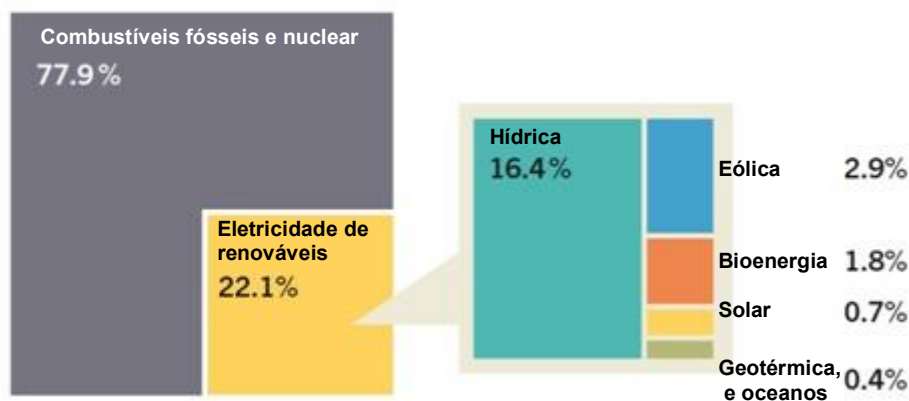


Figura 1.5 – Utilização das renováveis para produção de eletricidade em 2013. Fonte: REN 21,2014.

Em Portugal, a evolução da utilização de FER para a produção de eletricidade tem sido positiva, tendo sido, em 2012, o quarto país da União Europeia com maior incorporação de energias renováveis, sendo que mais de 80% da produção a partir de FER tem origem nas regiões Norte e Centro do país, nomeadamente nos distritos de Bragança, Braga, Porto, Viana do Castelo, Vila Real e Viseu.

A APREN (2015) indica que no primeiro trimestre de 2015 a produção de eletricidade a partir de FER em Portugal foi de 61,3%, bastante menor do que a contribuição em 2014 no mesmo período, que foi de 92%, justificado pela baixa pluviosidade e eolicidade irregular verificadas em 2015. Em 2014 a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis em Portugal foi responsável por 62,7% do total energia elétrica consumida, com um aumento de 10% em relação a 2013 (APREN, 2015). Considerando somente a produção nacional, a contribuição das renováveis estabeleceu um máximo, até abril do presente ano, de 63,8% (Figura 1.6).

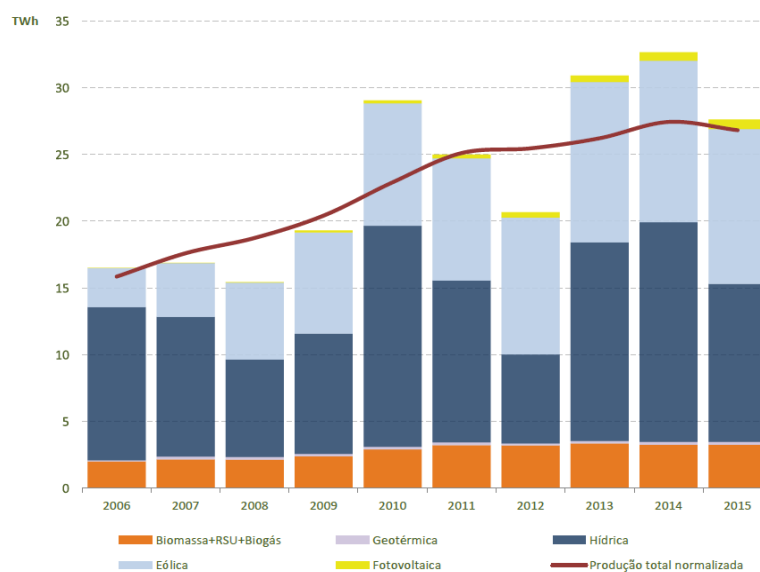


Figura 1.6 – Evolução da energia produzida de origem nas FER até abril 2015. Fonte: DGEG, 2015.

1. Introdução

Como se pode observar na Figura 1.7, em 2014, a percentagem de cada uma das FER na parte de energia elétrica produzida foi a seguinte.

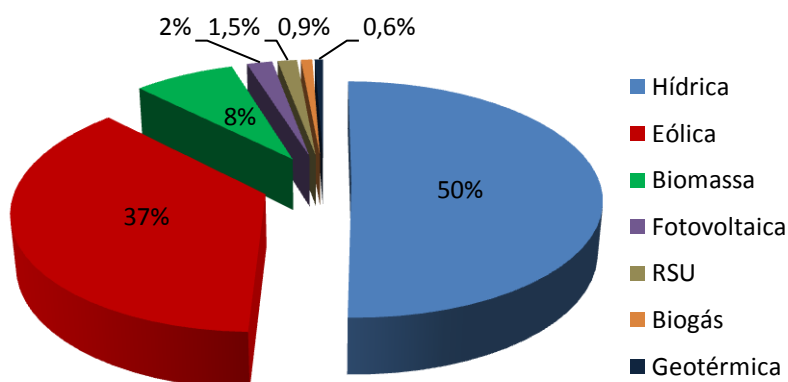


Figura 1.7 – Contribuição de cada FER para a energia elétrica produzida. Fonte: DGEG, 2015.

As estatísticas da DGEG (2015) mostram que, no final de dezembro de 2014, Portugal tinha 11.694 MW de capacidade instalada para produção de energia elétrica a partir de FER. No período entre janeiro de 2006 e dezembro de 2015 a tecnologia fotovoltaica apresentou o maior crescimento percentual, de uma potência instalada residual de 3 para 424 MW. A nível do valor de potência instalada, a que revela um maior aumento é a eólica, que passa de 1,7 para 4,9 GW. Para 2020, prevê-se, no contexto nacional, uma capacidade instalada para a produção de energia elétrica através da biomassa de 769 MW (Almeida, 2013); em 2014, foi de 713 MW no total, dos quais 498 em cogeração e 215 em centrais dedicadas (DGEG, 2015).

A evolução da dependência energética, que traduz o quociente entre a energia importada e a energia consumida, em Portugal entre 2005 e 2013, com previsão até 2030, é a seguinte (Figura 1.8).

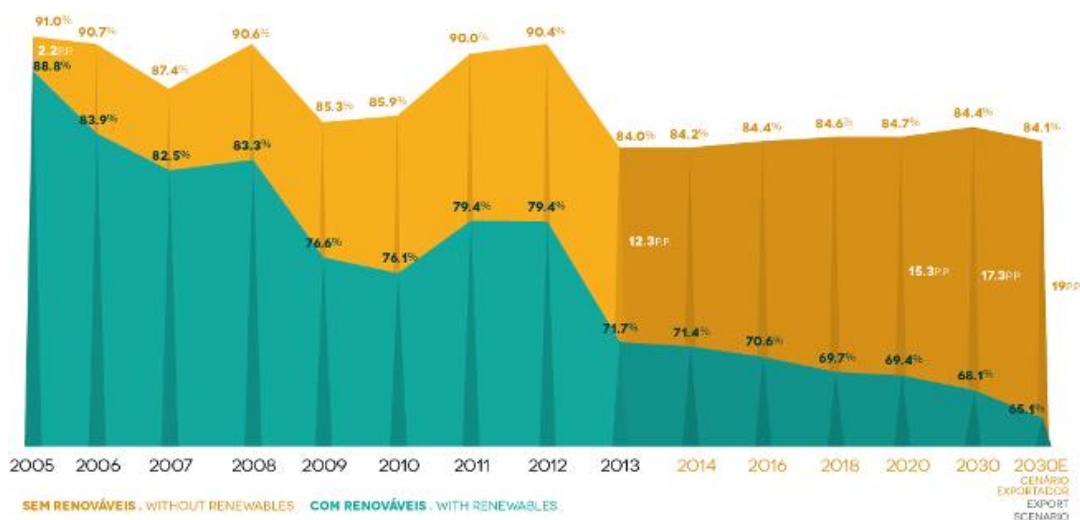


Figura 1.8 – Dependência energética de Portugal. Fonte: APREN, 2015.

Como se pode verificar, a tendência é a redução da dependência energética, com menos 17,1 pontos percentuais entre 2005 e 2013. Sem a contribuição das renováveis, a dependência energética seria cerca de 12 pontos percentuais acima do valor de 2013. O aumento do valor entre 2011 e 2012 pode justificar-se pela diminuição da produção de energia hídrica, devido à baixa pluviosidade de 2011 relativamente a anos anteriores (INE, 2013) e o consequente aumento da importação de eletricidade e carvão (APA, 2014).

2. Bioenergia

2.1 Biomassa

A biomassa é uma FER que está identificada como fonte de energia economicamente viável há milhares de anos. A utilização intensiva de carvão começou com o desenvolvimento das máquinas a vapor, o que desencadeou o início da Revolução Industrial no século XVIII. Até esse período, a biomassa era a maior fonte de energia consumida, representando 85% do consumo mundial, além do vento (navegação), animais (agricultura) e pequenas quantidades de carvão para aquecimento residencial (Goldemberg, 2009). No contexto atual, o controlo de matos, desbastes, podas e desramas, além de atuar como prevenção a incêndios, transformou um produto, aparentemente sem valor comercial, numa das FER em maior expansão (Projeto Enersilva, 2007).

A biomassa é um tipo de biocombustível que se define como todo o combustível não fóssil de origem biológica. Normalmente divide-se em três grupos, de acordo com a sua proveniência: floresta, agricultura e resíduos urbanos. Outros exemplos de biocombustíveis são o bioetanol (produzido a partir da fermentação do amido, açúcar ou celulose, do milho e da beterraba, por exemplo), o biodiesel (obtido a partir de óleos orgânicos, como dos óleos de soja e de colza) e o biogás (a partir da decomposição de resíduos orgânicos, como as lamas das estações de tratamento dos efluentes domésticos).

A diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, de 23 de abril, define a biomassa como: “a 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”.

O consumo de energia primária no mundo, proveniente da biomassa é, atualmente, de cerca de 10% (IEA, 2013), sendo a quarta fonte mais utilizada no mundo, a seguir ao petróleo, ao carvão e ao gás natural (REN 21, 2013). É uma fonte renovável para produção de energia sob a forma de eletricidade ou calor. Atualmente, há uma separação entre a biomassa tradicional e a biomassa moderna, de acordo com a sua aplicação: a tradicional é a usada no aquecimento e na preparação de alimentos, estando associada aos países menos desenvolvidos e a moderna utiliza-se na produção de eletricidade, no aproveitamento de biocombustíveis para a indústria, em edifícios e no setor dos transportes. O consumo de energia primária de biomassa tem vindo a crescer nos setores de produção de eletricidade, de calor e dos transportes, atingindo 57 EJ em 2013 (Figura 2.1), dos quais 60% referem-se à biomassa tradicional e os restantes à bioenergia.

2. Bioenergia

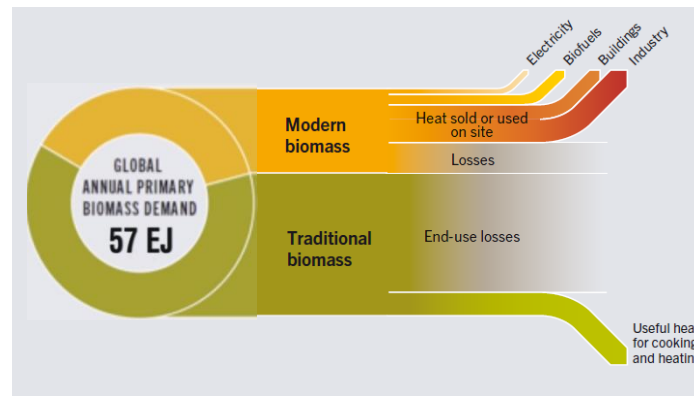


Figura 2.1 – Consumo global da energia de biomassa 2013. Fonte: REN 21, 2014.

Em Portugal, a produção de biomassa tem vindo a crescer; atualmente, cerca de 50% de toda a energia renovável produzida tem origem na biomassa, sendo que em 2013 teve uma influência de, respetivamente, 11 e 14% no consumo de energia primária e de energia final (DGEG, 2015).

Com a esperada diminuição de recursos fósseis e o aumento da população, calcula-se que a procura da biomassa aumente rapidamente nos países menos desenvolvidos. Devido às políticas e metas europeias, espera-se um aumento na ordem dos 50% da procura de biomassa até 2020 (Zuazo *et al.*, 2013), pelo que é essencial que o setor progrida, numa perspetiva de eficiência, tanto nas infraestruturas de produção de eletricidade e calor, como nos respetivos equipamentos de utilização.

A biomassa pode ser considerada uma forma de energia solar, uma vez que as plantas utilizam o mecanismo da fotossíntese (conversão de dióxido de carbono e água em glucose e oxigénio) para transformar a energia solar em energia química, a qual é libertada durante a combustão. Este aspeto confere um carácter único à biomassa, uma vez que ao contrário de outras formas de energia solar que dependem da intermitência da luz solar, o momento da combustão é decidido pelo utilizador (Tabak, 2009). A combustão de biomassa tem um papel neutro no balanço de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, uma vez que o CO₂ já foi absorvido anteriormente pela biomassa, aquando do seu crescimento; daí a sua grande importância, no contexto ambiental e como alternativa aos combustíveis fósseis. Desta forma, a queima de biomassa, desde que gerida numa base de sustentabilidade, conseguida através dum adequado plano de reflorestação de modo que as reservas não sejam consumidas até à exaustão, não altera a composição da atmosfera ao longo do tempo. O ciclo de carbono, processo que utiliza a radiação solar como fonte de energia, é responsável pela renovação da biomassa (Barbosa, 2008); de forma esquemática na Figura 2.2.

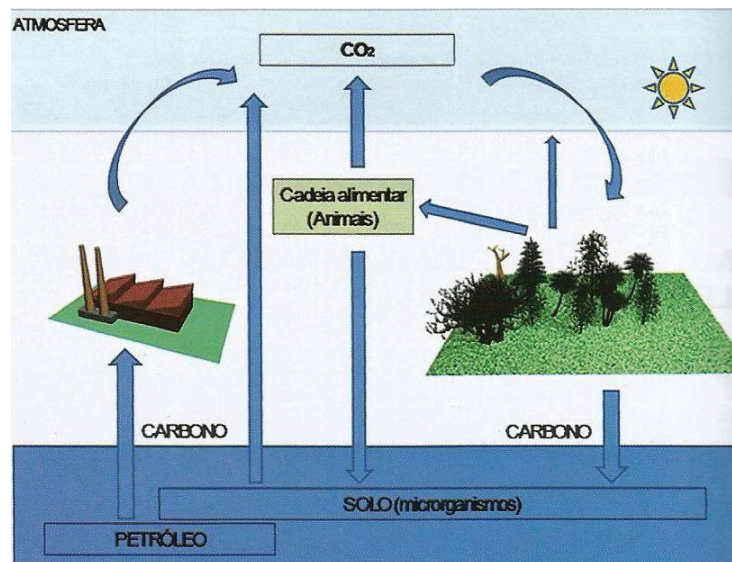


Figura 2.2 – Ciclo de carbono. Fonte: Barbosa,2008. Fonte: Barreto, 2008.

De acordo com Tabak (2009), esta visão não tem em linha de conta o CO₂ que é emitido nas atividades precedentes à combustão, como na produção e aplicação dos fertilizantes, na sementeira e na colheita, transporte e conversão da biomassa ou de qualquer outro tipo biocombustível, o que revela que ainda há muito por contabilizar neste tema.

2.2 Biomassa florestal

A definição de biomassa, já referida em parágrafos anteriores, engloba distintas vertentes mas, nesta dissertação, somente uma parte será abordada, a biomassa florestal primária, que se define como a fração biodegradável dos produtos gerados na floresta e que são processados para fins energéticos (Projeto Enersilva, 2007). Este subtipo de biomassa ficou estabelecido num projeto europeu de incentivo à utilização da biomassa florestal como fonte energética no sudoeste da Europa. Assim, a partir deste ponto do texto, sempre que for mencionada a biomassa subentende-se que se trata de biomassa florestal.

O sul da Europa apresenta extensas áreas florestais, o que permite uma vasta utilização dos seus produtos para diversos tipos de indústria, desde que haja uma gestão florestal sustentada na reflorestação, para que a recolha de forma continuada da biomassa não tenha efeitos negativos nos solos, como a suscetibilidade à erosão e a redução das camadas e matéria orgânica, os quais provocam uma diminuição dos nutrientes disponíveis para as restantes plantas. Por causa dos compromissos e metas europeias definidos nas últimas décadas, tornou-se necessário inovar na forma como se utilizam todos os produtos da floresta.

2. Bioenergia

Segundo o último Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2013) disponibilizado, ainda em versão provisória, uma vez que a versão final está prevista para o primeiro semestre de 2016, a floresta portuguesa, em 2010, ocupava 35,4% do território com 3,2 milhões de hectares, sendo a distribuição das espécies florestais a apresentada na Figura 2.3.

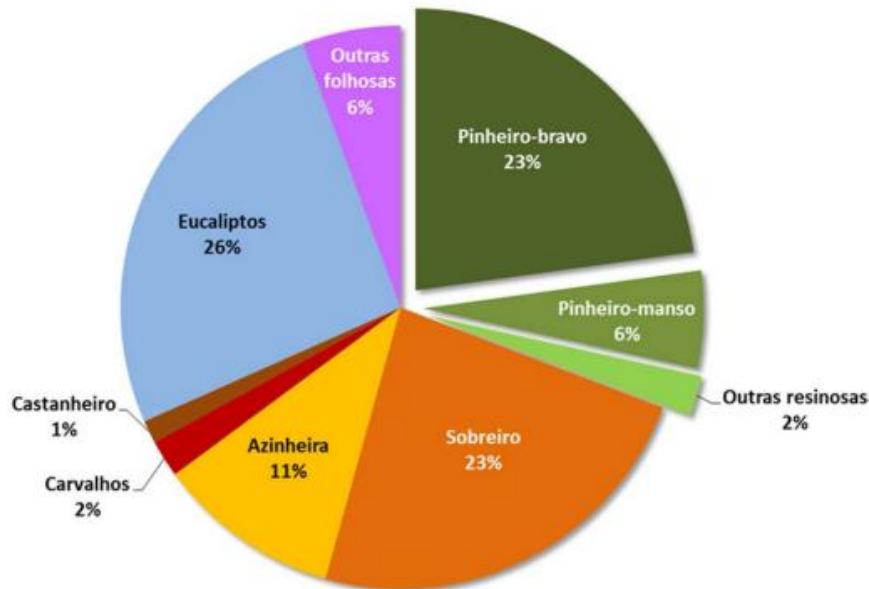


Figura 2.3 – Distribuição das espécies florestais em Portugal em 2010. Fonte: ICNF, 2013.

Segundo a mesma fonte, a espécie dominante é o eucalipto e representa a maior área do país (812.000 ha), o sobreiro a segunda (737.000 ha), seguida do pinheiro-bravo (714.000 ha).

No projeto *Enersilva* (2007), referem-se os fatores que têm maior influência na obtenção da biomassa:

- Disponibilidade do recurso.
- Explorabilidade da biomassa (características da biomassa no momento da sua obtenção).
- Geomorfologia do terreno (declives e altitude).
- Acesso a áreas florestais (rede viária).
- Restrições de ordem legal (Parques Naturais e Áreas Protegidas).

Algumas das vantagens e desvantagens, mais específicas, do uso da biomassa como fonte de energia renovável estão apresentadas na Tabela 2.1; Fontes: A – Confagri (2011), B – Teixeira (2009), C - Stupak *et al.* (2007) e D – Aiminho (2010).

Vantagens	Desvantagens
Redução da dependência energética relativamente a outros países ^A	A médio e longo prazo poderá colocar em risco a sustentabilidade do recurso ^A
Regularidade da produção e possibilidade de modulação (maior controlo na produção da eletricidade) ^A	Necessidade de armazenamento e custos elevados de transporte e manuseamento da biomassa ^A
Possibilidade de gestão integrada das florestas ^A	Poder calorífico inferior ao dos combustíveis derivados do petróleo ^A
Promove o desenvolvimento económico ^B	Maior probabilidade de emissão de partículas para a atmosfera ^A
Contribuição para a diversificação energética ^B	Custos de investimento elevados ^A
Maior rentabilidade dos proprietários florestais ^C	Carácter sazonal da biomassa ^D
Diminuição do risco e gravidade de incêndios ^C	Potenciais dificuldades e custos de recolha ^D
Melhorias na gestão dos espaços florestais ^C	Redução da disponibilidade devido à competitividade nas diferentes aplicações ^D

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da biomassa.

O potencial energético da biomassa pode ser traduzido pela massa seca disponível, mas a discrepância que existe entre o potencial e o que, de facto, é convertido em energia é um tema complexo, seja na vertente das variáveis associadas às características da biomassa como nas do processo de queima (Aiminho, 2010). São vários os fatores que afetam o desempenho da biomassa enquanto combustível, como a composição química, a massa volúmica, o poder calorífico, o teor de humidade, cinzas e matérias voláteis, zona da árvore de onde é extraída, características do solo e humidade do ar no local onde é cultivada, forma de recolha, manuseamento e armazenamento. Considera-se, contudo, que as propriedades com maior influência na biomassa, assim como na escolha do processo de conversão mais adequado, são:

- Composição química: os componentes variam em função da espécie, estágio de crescimento e as condições em que é cultivada (Khan *et al.*, 2009) e incluem, essencialmente, celulose, hemicelulose e lenhina. A hemicelulose e a celulose

compõem as paredes das fibras da madeira e a lenhina é um polímero que mantém as fibras unidas (Barreto *et al.*, 2008).

- Massa volúmica: geralmente o valor das diversas espécies de biomassas, quando comparado com o carvão, é mais reduzido. Por exemplo, a *Paulownia* tem um valor médio de 290 kg/m³ (ICNF, 2010) e o carvão betuminoso de 900 (Petrogal, 2014); este baixo valor tem consequências negativas em vários aspetos, como no poder calorífico por unidade de volume e nos custos de transporte, uma vez que o volume ocupado, e não a massa, é o fator decisivo na necessidade de espaço de armazenamento.
- Poder calorífico: define-se como a quantidade de energia, por unidade de massa, libertada na combustão. Se a medição for realizada antes da água evaporar nos produtos da combustão designa-se por Poder Calorífico Superior (PCs), se a água estiver na forma gasosa é medido o Poder Calorífico Inferior (PCi) (Çengel e Boles, 1994). A biomassa de origem lenhosa tem valores inferiores médios de PCi em relação ao carvão, 18 e 26 MJ/kg, respetivamente.
- Teor de humidade: na biomassa varia entre 70 e 10%. Quanto maior for o teor de humidade inicial da biomassa, uma maior quantidade de energia será necessária nas etapas anteriores, como a secagem, para a transformar num produto apropriado para queimar. Caso a biomassa contenha uma quantidade de água superior ao desejável no momento da combustão, o que vai ocorrer é que, além da ignição ser prejudicada, a energia necessária para evaporar a água do combustível será superior e, conseqüentemente, menor energia será direcionada para o objetivo.
- Teor de cinzas: após a combustão, restam as cinzas, que são a parte não combustível e inorgânica do combustível. O teor de cinzas varia muito entre os biocombustíveis, sendo de 1% nos derivados da madeira até 30-40% nos resíduos das estufas.
- Teor de matérias voláteis: a biomassa tem elevadas quantidades de substâncias voláteis, entre 80 a 85% (Nussbaumer, 2003), o que obriga a que a combustão se processe em condições e equipamentos diferentes dos do carvão, para que se queime o máximo possível de biomassa, aumentando a eficiência do processo e se lancem para a atmosfera o menor número possível de partículas poluentes. Um dos modos de o conseguir é manter a câmara de combustão a temperaturas elevadas durante mais tempo, no sentido de assegurar a combustão completa dos voláteis.

2.3 *Paulownia*

A *Paulownia*, também designada por *Princess Tree*, é uma planta originária da China, onde existem mais de 15 milhões de hectares plantados, num total de 1 bilião de exemplares (Kole *et al.*, 2012). Cresce de igual forma tanto em planícies como em regiões montanhosas até 2000 m de altitude. Em condições normais, uma árvore com 10 anos mede de 30 a 40

cm de diâmetro à altura do peito e tem um volume de madeira de 0,3 a 0,5 m³ (Zhu Zhao-Hua *et al.*, 1986).

É uma árvore com um crescimento muito rápido e, em condições favoráveis, pode atingir até 5 metros no primeiro ano. Utiliza uma fotossíntese altamente eficiente para fixar o carbono. O nível de carbono do solo aumenta nas plantações da *Paulownia* pela acumulação de matéria orgânica, como a queda das folhas e o sistema de raízes extenso tem um papel importante na captação do carbono. A *Paulownia* suporta gamas de temperatura ambiente entre os -20 e os 47 °C, mas a temperatura ótima para o crescimento é de 27 °C (Lawrence, 2011).

São conhecidas 23 espécies desta árvore (Zhu Zhao-Hua *et al.*, 1986), mas as 4 seguintes (Figura 2.4) são as principais:

- *Paulownia tomentosa* (a).
- *Paulownia elongata* (b).
- *Paulownia fortunei* (c).
- *Paulownia kawakamii* (d).

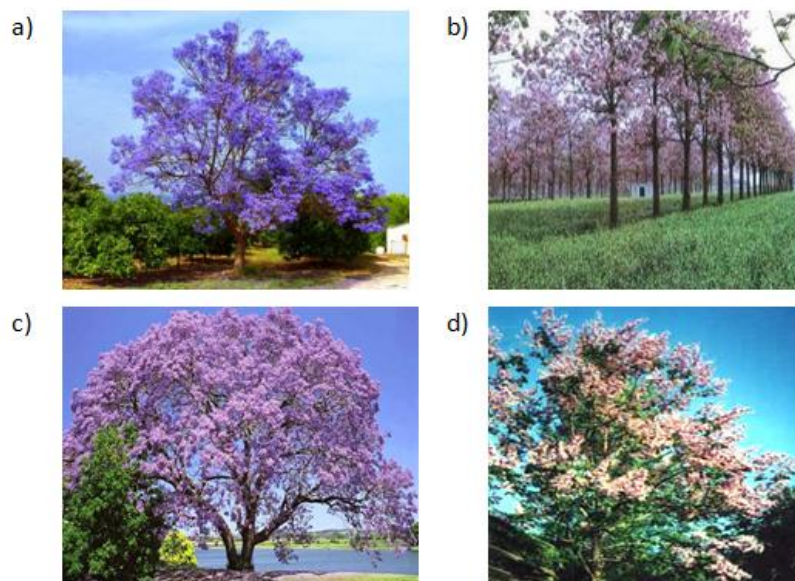


Figura 2.4 – Espécies de *Paulownia*. Fonte: *Paulownia*, 2015.

A *Paulownia*, tal como o Eucalipto, o Choupo ou o Salgueiro, está incluída no grupo das espécies lenhosas de curta-rotação (SRWC) com crescimento rápido. Estas espécies, assim como os seus híbridos, fornecem biomassa a uma taxa superior quando comparado com outras plantas cuja composição de lenhina tem um peso assinalável, possibilitando um fornecimento mais consistente devido à maior produção, reduzindo os custos de armazenamento e as perdas por deterioração da biomassa armazenada (Zuazo *et al.*, 2013).

2. Bioenergia

O relatório sobre Culturas Energéticas Florestais publicado pelo ICNF (2010), mostra alguns dados sobre o modelo silvícola da *Paulownia* e indica que esta planta se adapta a uma grande variedade de climas e solos:

- Crescimento muito rápido, de vários metros por ano.
- Altura de 20 m aos 4-5 anos. Porte reto, com poucos nós.
- Altura máxima pode ser superior aos 30 metros, com um tronco de 1 metro de diâmetro.
- Tem um ciclo de 3-4 anos até ao corte.
- Biomassa obtida aos 3 anos: 56-85 kg.
- Massa volúmica (teor humidade de 10%) - 290 kg/m³.
- Poder Calorífico Inferior: 16 MJ/kg (a 30% de teor de humidade) (ensaio realizado por Monteagudo e Martínez, 2009).
- pH do solo: 5,5 a 8 (ótimo é 7).
- Suporta temperaturas extremas (-18 a 45 °C).
- Apresenta repouso invernal (folhas caducas).
- Não é uma árvore invasora (Invasoras, 2014).
- A flor é muito chamativa e melífera. As folhas são grandes e bastante úteis como forragem.
- Árvore ornamental.
- Recuperação e estabilização de solos. Controlo da erosão.
- Resistente a condições moderadas de seca uma vez decorridos 1-2 anos.
- Alta capacidade de absorção de azoto.
- Incorpora bastante matéria orgânica no solo, enriquecendo-o.
- Regeneração depois do corte, até 6-7 rebentos.
- Rápido crescimento e rebentamento de toíça depois do corte.
- Tempo de secagem muito curto, 20-40 dias ao ar livre (até 12% de humidade).
- Muito resistente e relativamente livre de pragas e doenças.
- Aceita culturas intercalares de cereais e pastagens.
- Requer um tipo de solo com boa drenagem e não muito argiloso.
- O nível freático deve estar sempre a uma profundidade superior a 2,5 m.
- Necessita duma precipitação média de 500 mm, no mínimo.
- Densidade de plantação 1.600 árvores/ha.
- Limite de plantação 3 m x 2 m/2,5 m x 4 m.
- Rendimentos observados 35-45 t/ha/ano (30% de humidade).
- O terreno deve estar exposto ao sol e protegido de ventos fortes.
- Rega: 1º Ano: 6-8 vezes. 2º Ano: 4-6 vezes. 3ª Ano: não é necessário regar.

O ciclo de vida de *Paulownia* pode representar-se como se apresenta na Figura 2.5.

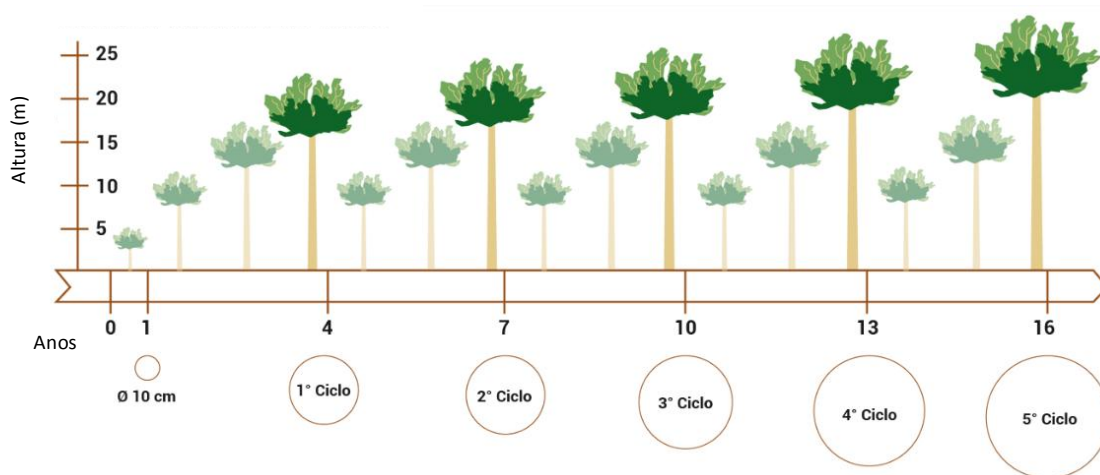


Figura 2.5 – Ciclo de vida de *Paulownia*. Fonte: Plantation, 2015.

O principal produto obtido da *Paulownia* é a madeira com aplicação na carpintaria em geral, instrumentos musicais, jogos, artesanato, molduras e paletes. Por ser resistente, leve, ignífuga, resistente ao fogo (temperatura de ignição varia entre 420 e 430 °C) e com baixa condutibilidade térmica a madeira de *Paulownia* é muito indicada para o mobiliário e revestimento de caravanas, aviões e embarcações ligeiras (Kole et al., 2012). Através da flor e da folha podem obter-se mel e cosméticos naturais, respetivamente.

2.3.1 Cruzamento de espécies de *Paulownia*

As espécies de *Paulownia* parecem ser suscetíveis de cruzamento e, por conseguinte, de melhorias nas suas características, tal como é referido por algumas empresas que se dedicam à plantação e comercialização de espécies híbridas desta planta. Foram desenvolvidas plantas geneticamente melhoradas, com um crescimento ainda mais rápido, como a *inVitro112*, a *X1*, a *L1* e a *Cotevisa 2*. Segundo as empresas produtoras, estas plantas absorvem mais CO₂ do que a espécie original e atingem a maturação ao fim de 4 anos, tempo ao fim do qual pode ser cortada perto da base, voltando a crescer. Assim, estas espécies podem produzir e maximizar a sua total capacidade num período relativamente curto. O processo torna-se mais económico do que a utilização da espécie pura, que demora cerca de 10 anos a atingir a maturação. As empresas que comercializam estas espécies são unânimes ao afirmar que é resiliente às adversidades climáticas. Resiste a insetos e pragas, assegurando uma colheita eficaz. Requer menor tratamento durante o crescimento, o que contribui para menores custos. Estas plantas híbridas estão a ser usadas em diversos países como Espanha, Alemanha, Itália, Brasil, Estados Unidos da América, México, Japão e Austrália, entre outros. A Figura 2.6 mostra uma plantação de *Paulownia* Cotevisa 2 com 8 meses na Alemanha.



Figura 2.6 – Plantação de Paulownia Cotevisa 2 na Alemanha com 8 meses. Fonte: Paulownia Germany, 2015.

A espécie de *Paulownia* utilizada nos ensaios da presente dissertação é a *Cotevisa 2*, a qual designa uma espécie híbrida criada em laboratório pela empresa *Cotevisa*, sediada em Valência e é um cruzamento, obtido em laboratório, entre duas espécies de *Paulownia*, a *P. elongata* e a *P. fortunei*. O cruzamento das espécies é realizado de modo controlado: recolhe-se o pólen da flor de *P. elongata* e deposita-se na flor de *P. fortunei*, resultando deste processo sementes que produzirão plantas híbridas. Assim que estejam germinadas, plantadas e tenham crescido, escolhem-se vários parâmetros de interesse que estejam presentes em algum destes exemplares híbridos. Seleciona-se, então, uma planta em concreto e produzem-se clones a partir dela. Esta espécie é estéril e, por essa razão, não se considera invasora, tal como se pode observar no certificado (Anexo A).

2.3.2 *Paulownia* como biomassa

O poder calorífico da biomassa de *Paulownia*, assim como o de outras espécies de biomassa, é pouco mais de metade do do carvão mas o baixo teor de poluentes, como o enxofre (mais baixo na *Paulownia* do que na maioria de outros tipos de biomassa) e o facto de ser uma fonte renovável disponível, aponta claramente para os seus benefícios ambientais.

A sua massa volúmica varia entre os 260 e 330 kg/m³, seca rapidamente ao ar e o seu teor de humidade varia entre 15 e 10% (Lawrence, 2011), o que significa que não é necessário utilizar sistemas de secagem artificial caros, permitindo entregar a sua biomassa às centrais termoelétricas a preços inferiores em comparação com outras espécies de biomassa.

Tal como para as plantas em geral, na plantação de *Paulownia* a luz solar é o mais importante para a fotossíntese, o que significa que, mesmo que não haja, em teoria, restrições na captação de água e nutrientes, o crescimento será limitado assim que as árvores se sobrepuserem e competirem excessivamente pela luz solar, pelo que é crítico planificar um modelo de plantação que tenha em linha de conta este aspeto.

Em muitos países já se utiliza a biomassa de *Paulownia* para produção de péletes, como é o caso do Japão, China, Estados Unidos da América, Polónia, Roménia, Rússia, Estónia, Austrália, Panamá e Espanha. Os estudos científicos são escassos no que diz respeito a dados energéticos sobre esta planta; todavia, as empresas europeias que têm realizado ensaios com fins comerciais, revelam que têm obtido resultados muito positivos. Segundo a empresa espanhola *Vicedex*, o cultivo da *Paulownia* em grande escala, para a produção de biomassa com fins energéticos, tem fundamento na grande produtividade obtida, na sua boa adaptação aos solos e ao favorável clima em algumas zonas da Península Ibérica, na ausência de doenças e na menor quantidade de água necessária em relação a culturas com a mesma produção.

Um estudo iniciado no outono de 2009 na Sardenha, Itália, revela que os primeiros resultados mostram que uma plantação de *Paulownia tomentosa* com 2 anos pode ser benéfico, levando a uma diminuição do carbono na atmosfera e a uma elevada produção de biomassa num curto período de tempo. Ao mesmo tempo, parece ter um grande potencial para outros serviços de ecossistemas específicos, como o abrandamento das inundações, redução da poluição difusa e erosão dos solos, proteção das colheitas e pecuária em relação aos perigos provocados pelas alterações climáticas, rede integrada de habitat e amenidade da paisagem (Puxeddu et al., 2012).

Segundo um estudo de Martín et al. (2009), a massa volúmica da madeira de *Paulownia* com 12% de teor de humidade é a seguinte (Tabela 2.2).

	Massa volúmica (12% teor de humidade) [kg/m ³]
<i>P. tomentosa</i>	245-290
<i>P. elongata x fortunei</i>	265-333

Tabela 2.2 – Massa volúmica de duas espécies de *Paulownia*. Fonte: Martín et al., 2009.

Em novembro de 2012 foi realizado um estudo com um clone de *Paulownia* designado por *inVitro112*, espécie criada em laboratório de uma fusão entre a *P. elongata* e a *P. fortunei*, com o objetivo de determinar a sua adequabilidade para a peletização (Alvarez, 2012). Os valores obtidos dos PCi situam-se na mesma gama de valores de outras espécies consideradas bioenergéticas, como o Pinho e o Eucalipto, cujos valores são, respetivamente, 18,7 e 18,3 MJ/kg na base seca (BIODAT, 2015). Algumas características do clone *inVitro112* são apresentadas na Tabela 2.3.

	Base seca	Base húmida		Unidades
Teor de humidade	-	20	30	% em massa
Massa volúmica aparente	-	167,51	-	kg/m ³
PCs	19,47	15,58	13,63	MJ/kg
PCi	18,25	14,11	12,04	MJ/kg

Tabela 2.3 – Características do clone *inVitro112*. Fonte: Alvarez, 2012.

A análise imediata tem por objetivo quantificar o teor de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo. A análise elementar, ao determinar o teor de carbono, hidrogénio, enxofre, oxigénio e azoto, permite quantificar a relação ar-combustível, com o objetivo de prever a composição dos gases na saída do processo de combustão (Barreto *et al.*, 2008). Os dados obtidos, no mesmo ensaio, são apresentados a seguir (Tabela 2.4).

	Base seca	Base húmida		Unidades
Humidade	-	20	30	% em massa
Análise imediata				
Teor de cinzas	1,29	1,03	0,90	% em massa
Teor de matéria volátil	82,79	66,23	57,96	% em massa
Carbono fixo	15,92	12,73	11,14	% em massa
Análise elementar				
Carbono	50,80	40,64	35,56	% em massa
Hidrogénio	5,61	6,72	7,28	% em massa
Azoto	0,26	0,20	0,18	% em massa
Enxofre	0,001	0,000	0,000	% em massa
Cloro	0,01	0,01	0,01	% em massa
Oxigénio	42,04	51,39	56,07	% em massa

Tabela 2.4 – Análise imediata e elementar do clone *in vitro*112. Fonte: Alvarez, 2012.

Nesta análise, concluiu-se que este clone de *Paulownia* é apropriado para a queima, devido ao seu baixo valor do teor de cinzas, de cloro e de baixas emissões de carbono, azoto e enxofre. Quanto ao valor do PCI, este é aproximado ao de outras espécies já utilizadas para este fim. O valor da percentagem cloro ser reduzida é importante, já que este provoca a corrosão nos equipamentos.

2.3.3 *Paulownia* em Portugal

A literatura existente sobre o comportamento de *Paulownia* em outros países parece mostrar que esta planta teria um crescimento ótimo em Portugal, tendo em conta as condições climáticas e gamas de temperatura, existindo diversos exemplares como árvore ornamental; contudo, não se conhece, até ao momento, qualquer tipo de estudo sobre a utilização desta espécie para fins energéticos.

A espécie *P. tomentosa* foi plantada em março de 2012, em Lisboa, no BioEnergISA mas, não resistiu às fortes geadas que ocorreram no período de inverno do mesmo ano, razão pela qual não se conseguiram obter dados. Em 2009, foi elaborado um projeto pela empresa Silvatec (agora Rural Mark) para a plantação de um cruzamento das espécies *P. tomentosa*, *P. fortunei* e *P. elongata* em Idanha-a-Nova, mas que não foi concretizado por questões legais, uma vez que a plantação de espécies híbridas para exploração florestal não é permitida.

O Decreto-Lei 565/99 de 21 de Dezembro refere que a introdução de espécies não indígenas “qualquer espécie, da flora ou da fauna, não originária de um determinado território e nunca aí registada como ocorrendo naturalmente e com populações autossustentadas durante os tempos históricos” na natureza, pode promover a concorrência com espécies indígenas, a negativa emissão de agentes patogénicos ou de parasitas e alterar a diversidade biológica, a economia ou a saúde pública. No entanto, tal como explicado no mesmo Decreto-Lei, a exploração de algumas espécies não indígenas revelou-se profícua na perspetiva do aumento da diversidade e da disponibilidade dos recursos alimentares, pelo que se tornou importante permitir mas, simultaneamente, regular a introdução destas espécies. A única espécie de *Paulownia* que é permitido cultivar em Portugal para fins florestais é a *tomentosa*, por ter interesse para a arborização, de acordo com o mesmo Decreto-Lei. Por outro lado, para exploração agrícola, é permitido plantar qualquer espécie, seja híbrida ou original, sem haver necessidade de solicitar autorização. No caso da *Paulownia*, poderia ser esta uma solução de curto prazo enquanto não há alterações da legislação, uma vez que ao fim de um ano (tempo de rotação destinado à exploração agrícola) a sua biomassa pode ser utilizada para a produção de péletes, tal como referido atrás, no texto. Em Espanha esta questão não se coloca, porque a legislação permite a plantação de cruzamento de espécies, daí já existirem várias plantações de *Paulownia*.

A Câmara Municipal do Fundão recebeu, de grupos brasileiros, um pedido de autorização de construção duma central de biomassa na área da biotecnologia, sustentada na plantação de 300 hectares de *Paulownia*. Pretendem estabelecer parcerias para concretizar este projeto, o qual inclui laboratórios e estufas, com o objetivo de abastecer o mercado energético e o farmacêutico. Os investimentos associados e o facto de serem criados novos postos de trabalho poderão induzir a alteração da legislação

Portugal tem 2853 hectares de matos e pastagens (ICNF, 2013), com pouco ou nenhum aproveitamento florestal ou agrícola, pelo que é urgente refletir sobre a forma como se gerem estas duas vertentes de aproveitamento de áreas abandonadas, para que se possa melhorar a nível de produtividade, competitividade e sustentabilidade. A introdução da *Paulownia* no país teria benefícios ao nível do aproveitamento destes terrenos que, atualmente, não estão a ser utilizados, seja por abandono ou por preocupações que o retorno não seja tão rápido quanto desejável.

Em Portugal, no panorama florestal, há uma grande resistência da parte das empresas de papel, de mobiliário ou de cortiça na utilização de espécies mais tradicionais como o Eucalipto, o Pinheiro ou o Sobreiro para fins diferentes das aplicações a que estas empresas se dedicam. Além da legislação aplicável, esta é uma das grandes limitações à introdução de novas áreas de negócio, com a floresta como matéria-prima. Sendo a *Paulownia* uma alternativa, por causa das suas características únicas, a exploração da biomassa desta espécie, não seria uma atividade concorrente, mas sim uma vertente paralela de aproveitamento florestal, assim como mais um recurso disponível para estas empresas.

2.4 Conversão energética

A conversão energética da biomassa tem por objetivo a produção de calor ou eletricidade. A conversão da biomassa em energia pode ocorrer através de processos físicos, físico-químicos, bioquímicos ou termoquímicos, conforme as características da biomassa e a aplicação pretendida. O esquema seguinte (Figura 2.7), apresenta os vários processos de conversão da biomassa e os produtos que se podem obter.

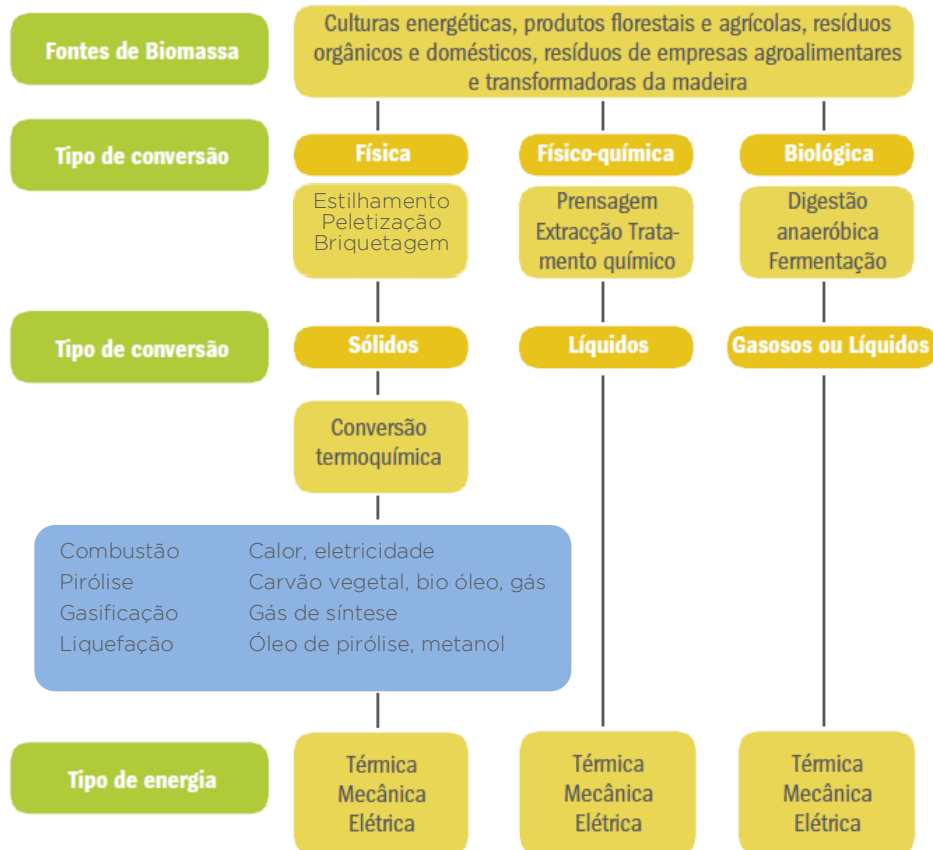


Figura 2.7 – Técnicas e produtos da conversão da biomassa. Fonte: Enersilva, 2007.

3. Tecnologias de conversão

3.1 Processos termoquímicos

Segundo o relatório do Grupo de Trabalho da Biomassa (CAM, 2013), a conversão termoquímica é o processo de conversão mais indicado para as características da biomassa existente em Portugal, podendo ser utilizada, atualmente, em:

- Fornos industriais e instalações de cogeração.
- Centrais termoelétricas.
- Unidades energéticas com base em tecnologias avançadas, como a gasificação e a liquefação.

Nas secções seguintes, será feita uma descrição mais completa sobre os processos de peletização e de combustão, uma vez que foram as tecnologias de conversão utilizadas nos ensaios da presente dissertação. Em seguida, apresenta-se uma breve caracterização dos restantes processos de conversão termoquímica:

- **Pirólise:** degradação térmica duma substância orgânica, na ausência de oxigénio. As condições de operação permitem a obtenção de biomassa em 3 frações diferentes: sólida (carbonização ou pirólise lenta – 300 °C), líquida (pirólise rápida – 600 °C) e gasosa (gasificação pirolítica – 1000 °C) (Onay e Kockar, 2003). Os fatores que mais influenciam os resultados do processo são a granulometria do material, a taxa de aquecimento, o fluido de trabalho e as características da biomassa (Lora e Venturini, 2012) mas, o mais importante é o balanço entre o tempo de residência e as temperaturas utilizadas (Sánchez e Campo, 2003).
- **Liquefação:** conversão da biomassa em produtos líquidos a altas pressões (100 a 200 bar) e baixas temperaturas (250 a 350 °C) (Loo e Koppejan, 2008). A liquefação pode ser direta (reação da biomassa triturada numa atmosfera de monóxido de carbono, de hidrogénio ou duma mistura entre os dois, recorrendo a catalisadores e solventes) ou indireta (acontece através da gasificação e, em seguida, convertendo o gás de síntese em metanol ou hidrocarbonetos, com recurso a catalisadores) (Rafael, 2012).
- **Gasificação:** decomposição térmica de um material sólido, com carbono na sua composição, num combustível gasoso através da oxidação parcial a temperaturas na ordem dos 800 a 1100 °C (Lora e Venturini, 2012). O produto final é composto por hidrogénio, monóxido e dióxido de carbono, azoto, vapor de água, metano e outros hidrocarbonetos mais pesados. Além das características da biomassa, as condições de operação que têm mais influência nos componentes da mistura final são a temperatura e pressão no gasificador (Basu, 2006).

3.2 Processo de peletização

Os processos de conversão física permitem ultrapassar as restrições que a biomassa apresenta, na sua forma original, para ser utilizada dum modo mais eficiente como combustível, melhorando as suas características para o transporte e o armazenamento. As limitações estão associadas à sua forma irregular, ao elevado teor de humidade, ao volume que ocupa e ao facto de se encontrar dispersa na natureza (Tumuluru *et al.*, 2010). Uma das formas de conversão é a densificação, em que as técnicas mais utilizadas são a peletização e a briquetagem. A peletização tem a grande vantagem de permitir utilizar biomassa com gamas mais alargadas de teor de humidade e maior nível de compactação, embora seja mais complexa, exija maior consumo de energia e envolva maiores custos (Khan *et al.*, 2009). Por outro lado, é forçoso reduzir a biomassa a um estado fibroso, ao contrário da briquetagem, em que só é necessário reduzir a estilha. O objetivo destas técnicas é obter um produto de qualidade duradoura, isto é, com baixo teor de humidade, poder calorífico na base volúmica elevado, tamanho e forma homogéneos (Oberberger e Thek, 2010), elevados valores de resistência mecânica e valores de massa volúmica aparente superiores aos da biomassa original (Tumuluru *et al.*, 2010).

A peletização consiste, assim, em transformar uma mistura de fibras e partículas, designada por ‘partículas’ a partir deste ponto do texto devido à facilidade de utilização do termo abreviado, de biomassa em cilindros de dimensão específica, através da prensagem a elevadas pressões e temperaturas que fazem com que lenhina se torne mais fluida e funcione como elemento aglomerante, não havendo necessidade de recorrer a outras substâncias (Barreto *et al.*, 2008). Dimensionalmente, o que se pretende obter no produto final é um pélete com um diâmetro de 6 ou 8 mm e um comprimento entre 3,15 e 40 mm (EPC, 2013). As etapas são apresentadas a seguir.

3.2.1 Secagem

O valor de teor de humidade da matéria-prima antes de ser peletizada deve estar entre 8 e 12% (bh); acima deste intervalo, a conservação estrutural dos péletes não é garantida e, abaixo, torna-se impossível produzir devido à forte fricção entre as partículas (Oberberger e Thek, 2010). Esta fase pode não ser necessária se a matéria-prima utilizada já contiver teores de humidade adequados, como é o caso de resíduos de outras aplicações para a madeira, previamente secos, como a serradura ou aparas de madeira. A secagem pode ser natural, através da indução de evaporação da água por exposição ao sol, ou forçada, através de secadores industriais, como é o caso dos tubulares a vapor sobreaquecido (Oberberger e Thek, 2010), ou a baixa temperatura, em estufas solares.

3.2.2 Destroçamento

Consiste na trituração da matéria-prima de forma a utilizar menos energia nos processos seguintes e obter um produto final com maior massa volúmica (Clark e Preto, 2011). Para

produzir péletes com um diâmetro de 6 mm (valor habitual para caldeiras até 100 kW), o diâmetro da partícula da matéria-prima não deve ser superior a 4 mm (Oberberger e Thek, 2010). Segundo os mesmos autores, o equipamento mais apropriado para esta tarefa é o moinho de martelos, porque se obtêm partículas homogêneas e finas.

3.2.3 Acondicionamento

Consiste na aplicação de vapor de água à biomassa destrozada mesmo antes de ser peletizada, o que favorece a libertação e ativação dos aglomerantes naturais (Clark e Preto, 2011). A adição do vapor de água, processo que deve durar entre 10 e 20 minutos, aumenta o teor de humidade em cerca de 2% (bh), pelo que é necessário considerar este facto na fase de secagem para se obter um produto final com um teor de humidade dentro dos valores adequados (Oberberger e Thek, 2010).

3.2.4 Peletização

Define-se pelo processo de extrusão em que a biomassa, no estado fibroso, é pressionada a sair através dos orifícios das matrizes, formatando os péletes em cilindros e, em seguida, cortando-os com lâminas, no comprimento requerido (Clark e Pedro, 2011). Existem dois tipos de peletizadoras, Plana e Anel, sendo esta última a mais utilizada: na plana, o material cai sobre a plataforma da matriz horizontal e é pressionado pelos rolos que estão posicionados no topo dessa matriz, através dos orifícios; o processo do tipo anel é idêntico, o material é introduzido numa matriz vertical que roda à volta de rolos fixos, posicionados lado a lado, que pressionam o material pelos orifícios (Oberberger e Thek, 2010). O exemplo de uma peletizadora tipo anel pode observar-se na Figura 3.1.

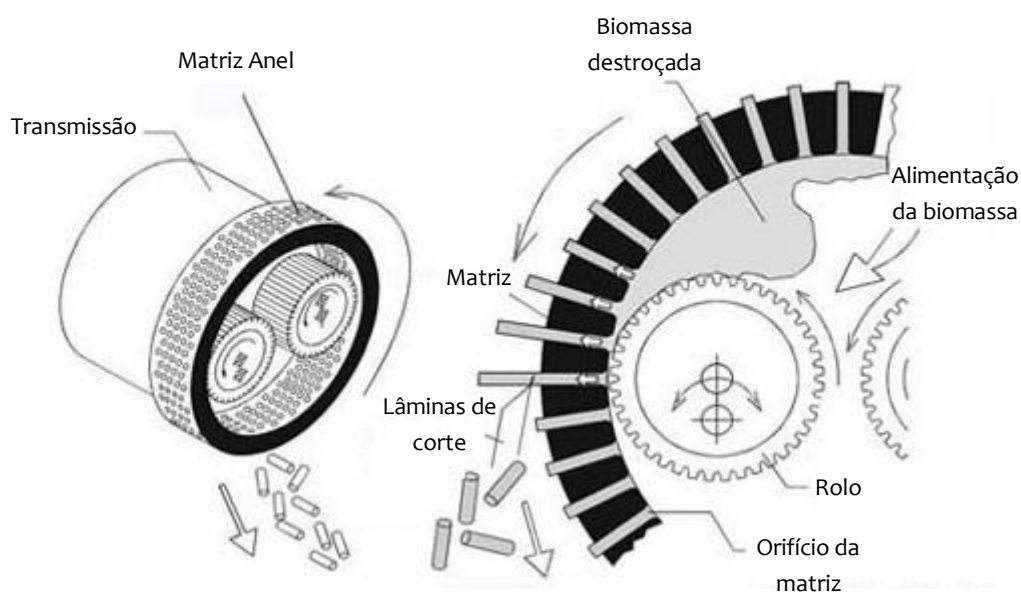


Figura 3.1 – Matriz tipo Anel de peletizadora. Fonte: Pellet Process, 2014.

3.2.5 Arrefecimento

O aumento da temperatura da biomassa, provocado pelo acondicionamento e peletização, obriga a arrefecer o produto final, para que a sua estabilidade estrutural e durabilidade não sejam comprometidas (Oberberger e Thek, 2010). Para tal, normalmente, são usados sistemas de arrefecimento aplicados imediatamente a seguir à densificação.

3.2.6 Separação de finos

Durante as fases de secagem, destroçamento e após o arrefecimento, há libertação de finos que é importante remover, quer seja para reentrarem no processo de peletização, ou para não influenciarem o processo de combustão (Oberberger e Thek, 2010). Na Figura 3.2, apresenta-se o esquema sequencial de operações da produção de péletes.

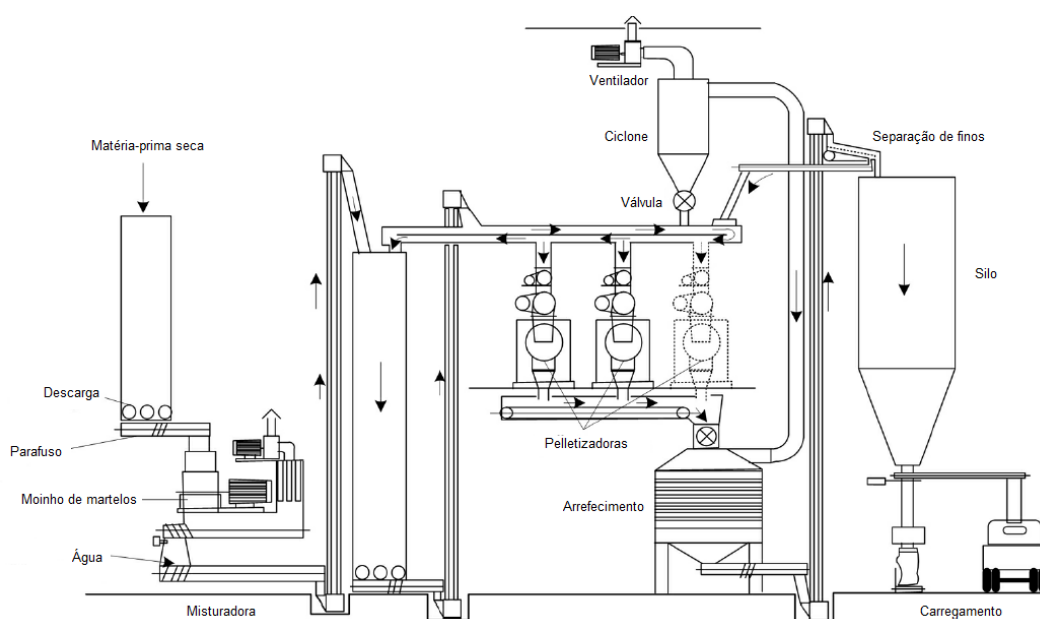


Figura 3.2 – Esquema de produção de péletes. Fonte: Buddekker, 2009.

3.2.7 Certificação de péletes

Em maio de 2013, o *European Pellet Council* (EPC) colocou em vigor a mais recente versão (2.0) da norma ENplus - *Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purposes* (EPC, 2013) que orienta a certificação de péletes na Europa. Esta norma é baseada na EN ISO 17225-2:2014. Nesta norma são diferenciados três classes de péletes, de acordo com as características da matéria-prima e requisitos de qualidade do produto final:

- ENplus-A1: péletes que cumprem os requisitos de qualidade mais exigentes, com baixa produção de cinzas. Para utilizar em caldeiras e outros equipamentos de queima domésticos. Matéria-prima: lenha e resíduos, não tratados quimicamente, da indústria madeireira.
- ENplus-A2: péletes que se utilizam em instalações de maior dimensão e geram maior quantidade de cinzas. Matéria-prima: lenha, resíduos e subprodutos não tratados quimicamente, da indústria madeireira.
- EN-B: destinam-se a uso industrial. Matéria-prima: oriunda da floresta e de plantações dedicadas, resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria madeireira, madeira usada mas não tratada quimicamente.

Na Tabela 3.1 apresentam-se os parâmetros principais e respetivos limites de acordo com as classes de péletes.

Propriedade	Unidades	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B	Normas
Diâmetro	mm	6 ou 8			EN 16127
Comprimento	mm	3,15 ≤ L ≤ 40			EN 16127
Teor de humidade	%	≤ 10			EN 14774-1
Teor de cinzas	%	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,0	EN 14775
Durabilidade mecânica	%	≥ 97,5		≥ 96,5	EN 15210-1
Finos (<3,15 mm)	%	< 1			EN 15210-1
Poder calorífico	MJ/kg	16,5 ≤ PC ≤ 19	16,3 ≤ PC ≤ 19	16,0 ≤ PC ≤ 19	EN 14918
Massa volúmica aparente	kg/m ³	≥ 600			EN 15103
Azoto	%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	EN 15104
Enxofre	%	≤ 0,03		≤ 0,04	EN 15289
Cloro	%	≤ 0,02		≤ 0,03	EN 15289
Comportamento de fusão das cinzas	°C	≥ 1200	≥ 1100		EN 15370

Tabela 3.1 – Norma ENplus: valores de referência das propriedades dos péletes. Fonte: EPC, 2013.

Em 2014 o número de empresas certificadas por esta norma era 203 em 31 países (AEBIOM, 2015a), 8 das quais em Portugal (ANPEB, 2015); a produção por produtores certificados perfez um total de 6,7 milhões de toneladas na União Europeia (AEBIOM, 2015a).

3.2.8 Péletes em Portugal

Portugal foi, em 2013, o segundo país mais exportador de péletes na Europa, só ultrapassado pela Letónia, enviando em especial para o Reino Unido, Dinamarca e Holanda um total de 776.736 toneladas (AEBIOM, 2015b). No final de 2013 existiam 26 unidades de

produção de péletes, mais concentradas na zona litoral do norte e centro do país, onde foram produzidas cerca de 900.000 toneladas de péletes (ANPEB, 2015).

A matéria-prima mais utilizada na produção de péletes foi o Pinho, representando cerca de 80% em 2012; outras espécies utilizadas para este fim são o Eucalipto, o Choupo, a Acácia e o Carvalho.

3.3 Combustão

Durante a fotossíntese, as plantas absorvem a energia solar, o dióxido de carbono e a água para produzir biomassa. A combustão pode ser compreendida como o processo inverso, uma vez que o oxigénio é misturado com a biomassa para produzir dióxido de carbono, água e energia térmica (Tabak, 2009).

A combustão tem sido o processo mais utilizado na conversão energética de biomassa; contudo, nem todas as espécies de biomassa são adequadas para sofrer o processo de combustão. Segundo Nussbaumer (2003), a biomassa cujos componentes principais não são o carbono, o hidrogénio e o oxigénio não são apropriadas para serem queimadas devido à influência desses elementos na formação de depósitos, na corrosão e na produção excessiva de cinzas.

A reação de combustão define-se pela associação do combustível ao oxigénio para produzir energia térmica, dióxido de carbono e água. A energia necessária para agregar os átomos que formam as moléculas do combustível e do oxigénio é superior à energia necessária para ligar os átomos das moléculas do dióxido de carbono e da água. A energia excedente é a térmica, ou seja, o calor produzido na combustão é a diferença entre a energia química dos reagentes e a dos produtos (Çengel e Boles, 1994). Os fenómenos que ocorrem durante o processo de combustão da biomassa são complexos e consistem em reações sequenciais (Coelho e Costa, 2007) que podem acontecer, em simultâneo, em zonas distintas da biomassa (Barreto *et al.*, 2008). De acordo com Khan *et al.* (2009), as propriedades da biomassa que mais afetam a duração e a taxa a que cada uma das fases da combustão tem lugar, são: a composição química, o teor de humidade, o tamanho médio de partícula e as percentagens de hemicelulose e lenhina. De acordo com informação do produtor, a espécie de *Paulownia* utilizada nesta dissertação tem entre 27 e 29% de lenhina, enquanto o Pinho e o Eucalipto apresentam, respetivamente, valores de 28 e 20% (Diniz, 2008). Nussbaumer (2003) e Khan *et al.* (2009) referem, ainda, que as temperaturas atingidas no leito de combustão e a taxa de excesso de ar são os que mais influenciam as condições de operação. O facto de a biomassa ter na sua composição um elevado teor de substâncias voláteis deve ser valorizado durante a fase de projeto dos elementos da caldeira, em concreto, da dimensão da câmara de combustão, a qual deverá assegurar uma mistura adequada entre as matérias voláteis e o ar, promovendo uma combustão mais eficiente (Nussbaumer, 2003). Apresenta-se esquematicamente (Figura 3.3), o processo de combustão de estilha de madeira e descrevem-se as fases da combustão.

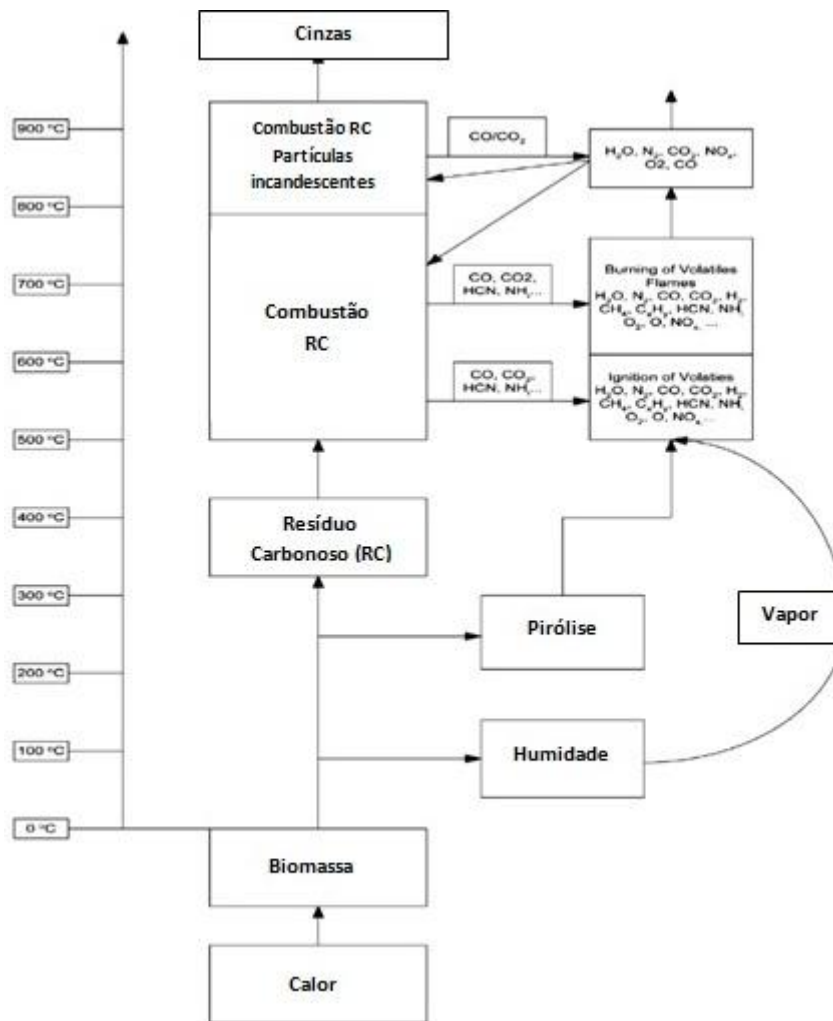


Figura 3.3 – Descrição esquemática do processo de combustão de estilha de madeira. Fonte: Khan *et al.*, 2009.

3.3.1 Ignição

Para que a combustão se inicie, é necessário colocar uma fonte térmica junto às partículas de biomassa, habitualmente através de uma chama piloto. A ignição forçada, só terá o resultado esperado se a quantidade de energia libertada pela fonte térmica for superior à barreira de ativação (a energia necessária para que a reação prossiga), o tempo de ignição for adequado e acontecer num volume mínimo de mistura de forma a propagar-se à restante mistura (Pinho, 2014).

3.3.2 Secagem

Esta fase não ultrapassa alguns segundos e ocorre a baixas temperaturas, entre 50 °C e 150 °C (Werther *et al.*, 2000). Uma parte da energia libertada durante a combustão é utilizada na libertação da humidade e evaporação da água contida no combustível, o que provoca uma diminuição da temperatura na câmara de combustão. A energia necessária à vaporização é dependente do teor de humidade da biomassa, razão pela qual este valor não deve ser muito elevado (até 65% na base húmida), caso contrário a temperatura da combustão diminui e a qualidade da combustão é afetada, sendo, inclusive, possível ser inferior ao necessário para manter a combustão (Werther *et al.*, 2000; Loo e Koppejan, 2008).

3.3.3 Pirólise

Esta etapa, também referida por alguns autores como volatização (Battin-Leclerc *et al.*, 2013) inicia-se a partir dos 200 °C e consiste na libertação das matérias voláteis existentes no combustível através da degradação térmica (Pinho, 2014). As substâncias voláteis distanciam-se, rapidamente, das partículas, misturam-se com o oxigénio do ar, sendo esta mistura inflamável (Barreto *et al.*, 2008). A percentagem e a composição dos produtos gerados durante a pirólise dependem, essencialmente, do tipo de biomassa, tamanho das partículas, temperatura no leito de combustão, pressão, taxa de aquecimento e tempo de reação (Loo e Koppejan, 2008). Como já foi referido neste capítulo, o elevado teor de voláteis da biomassa tem uma grande influência na eficiência da combustão e na formação de poluentes, sendo a sua queima a principal fonte de energia; assim, a pirólise é uma fase crítica no processo de combustão de biomassa.

3.3.4 Combustão do resíduo carbonoso

Após a libertação das matérias voláteis durante a pirólise, resta um resíduo carbonoso da biomassa original que é diferente na sua constituição química, porosidade e massa volúmica. Com o aumento da temperatura, desenvolve-se a combustão desse resíduo que é composto por carbono e cinzas, além de pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre (Khan *et al.*, 2009).

3.3.5 Poluentes

Durante o processo de combustão são gerados diferentes poluentes atmosféricos que afetam negativamente a saúde dos seres vivos e os equipamentos e agrava o efeito de estufa. Podem dividir-se em dois grupos:

- Não-queimados: surgem durante a combustão incompleta da biomassa. Embora a sua produção seja transversal à queima de qualquer combustível, os níveis de emissão são influenciados pelas condições de operação e modelo da caldeira. Incluem o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos não queimados ou

parcialmente queimados (HC), os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e as partículas de carvão (Khan *et al.*, 2009; Pinho, 2014).

- Produzidos na combustão: a sua emissão depende, essencialmente, das propriedades da biomassa utilizada. Nesta categoria encontram-se os óxidos de azoto (NO_x), os óxidos de enxofre (SO_x), os cloretos de hidrogénio (HCl), os metais pesados e as cinzas (Khan *et al.*, 2009; Pinho, 2014).

O caminho para mitigar as emissões de poluentes passa pela alteração de alguns fatores: aumentar as temperaturas de operação, utilizar uma mistura apropriada de combustível-comburente e ajustar o tempo de residência na região de altas temperaturas, obtendo uma queima mais eficiente (Werther *et al.*, 2000). A Tabela 3.2 mostra as fontes de emissão de poluentes durante a combustão de biomassa.

Combustível	Emissões
Toda a biomassa	CO, HC, condensados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, partículas
	NO_x , N_2O
	Cinzas
Madeiras urbanas, palha, ervas, culturas energéticas	HCl, SO_2 , KCl, K_2SO_4 , NH_4Cl
Biomassa com metais pesados	Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg, etc.

Tabela 3.2 – Fontes de emissões de poluentes na combustão de biomassa. Fonte: Werther *et al.*, 2000.

4. Instalação experimental

4.1 Instalação inicial

A instalação inicial permitia o aproveitamento de parte da energia térmica produzida durante a combustão dos péletes para aquecer a água existente no depósito de água quente da cantina, localizada numa sala da Manutenção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV). É constituída pela caldeira, conjunto do depósito de água e permutador de calor e os aparelhos de monitorização de temperaturas e caudal de água. O fluxograma da instalação é apresentado na Figura 4.1.

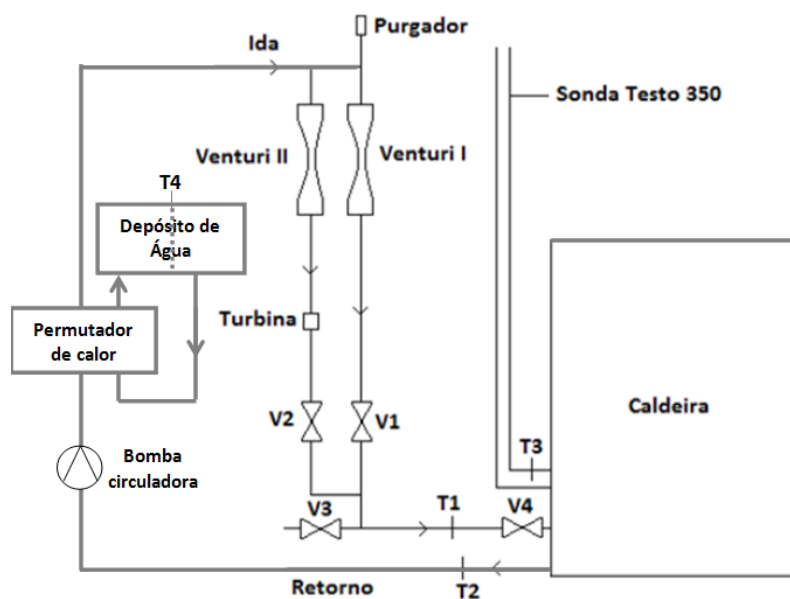


Figura 4.1 – Instalação experimental inicial. Fonte: Ferreira, 2013.

O circuito de água que passava no sistema de tubagens da caldeira e do permutador de calor compunham um sistema fechado. As temperaturas de entrada e saída de água da caldeira e a temperatura dos gases de combustão foram monitorizadas através de termopares tipo K. O depósito tinha instalado um termómetro analógico, tendo-se obtido a temperatura da água antes e depois do ensaio por observação direta. Para medição do caudal mássico de água, foram colocados dois Venturis e uma turbina. O caudal mássico médio de péletes foi obtido através de pesagens da massa antes e depois dos ensaios e com a informação do tempo de duração de cada ensaio.

Cada ensaio iniciava-se enchendo de água proveniente da rede de águas municipais, o circuito da instalação até este atingir o valor de pressão de funcionamento definido pelo fabricante da caldeira (1,5 bar), procedendo-se, então, ao fecho do circuito. Colocavam-se os péletes, previamente pesados, na caldeira e procedia-se ao arranque. O objetivo era obter dados suficientes durante um período de cerca de 30 minutos em regime aproximado ao regime permanente, uma vez que este só se verifica quando as propriedades do fluido

4. Instalação experimental

não variam com o tempo (Çengel e Boles, 1994). Sabendo-se que é impossível que um processo desta natureza ocorra nestas condições, fruto de flutuações na alimentação do combustível decorrentes do sistema existente, das irregularidades do comprimento dos péletes e falhas na uniformidade de composição dum material biológico, o objetivo era obter resultados depois de terminar a fase de aquecimento de toda a instalação, para uma dada carga, numa situação que, em termos médios e ao longo dum intervalo de tempo significativo, não apresentasse flutuações demasiado importantes. Assim sendo, referir-se-á este regime ‘aproximadamente permanente’, no âmbito deste trabalho, abreviadamente, por ‘regime permanente’.

Depois de se realizarem vários ensaios verificou-se que o sistema não atingia condições de regime permanente, observando-se um aquecimento progressivo e contínuo da água, o que provocava um aumento dos valores de pressão e temperatura acima dos de segurança, forçando a desligar a caldeira. Após análise aos vários elementos da instalação concluiu-se que a causa estaria relacionada com um incorreto funcionamento do permutador de calor. Contudo, como substituir este equipamento não se revelou possível, optou-se por modificar a instalação.

4.2 Instalação final

Ao alterar a instalação optou-se por fazer uma instalação semelhante à de Ferreira (2013) e, assim, comparar os valores obtidos nas duas instalações experimentais. Eliminou-se o circuito de aquecimento de água do depósito e efetuaram-se algumas simplificações no fluxograma da instalação, como se pode observar na Figura 4.2.

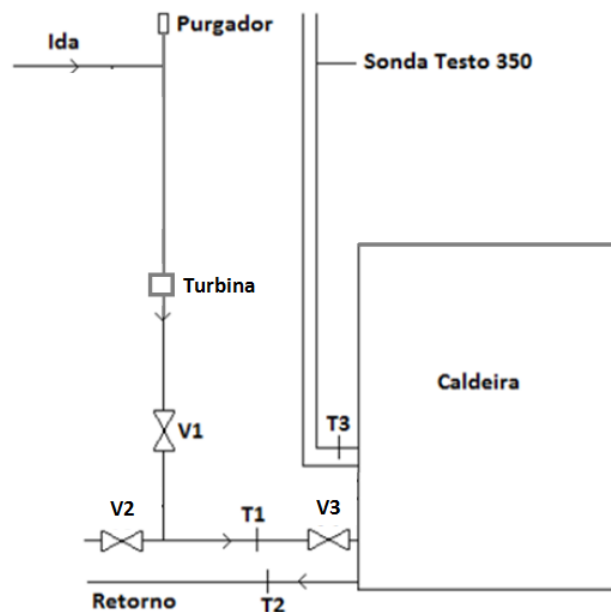


Figura 4.2 – Instalação experimental final. Fonte: Ferreira, 2013.

Nesta instalação, a água que entra na caldeira é da rede e a de saída não é aproveitada para qualquer fim.

4.3 Caldeira

A caldeira utilizada tem uma potência térmica de 20 kW e é o modelo *Aqualuxo*, da empresa *Metlor*, indicado para utilização doméstica. Foi fabricada em aço ao carbono e na parte frontal tem um vidro com dimensões de 690 x 355 mm. As suas dimensões exteriores são de 1060 x 625 x 625 mm de altura, largura e profundidade, respetivamente.

Os elementos principais que constituem a caldeira são a área de alimentação de péletes, o parafuso sem-fim, o permutador de calor e a câmara de combustão. A alimentação do depósito da caldeira é efetuada manualmente pelo topo, comportando, em média, 35 kg de péletes. O parafuso sem-fim, regulado por um motor elétrico, transporta os péletes para a zona de combustão. A Figura 4.3 mostra a caldeira e pormenor da câmara de combustão com e sem o depósito de péletes.

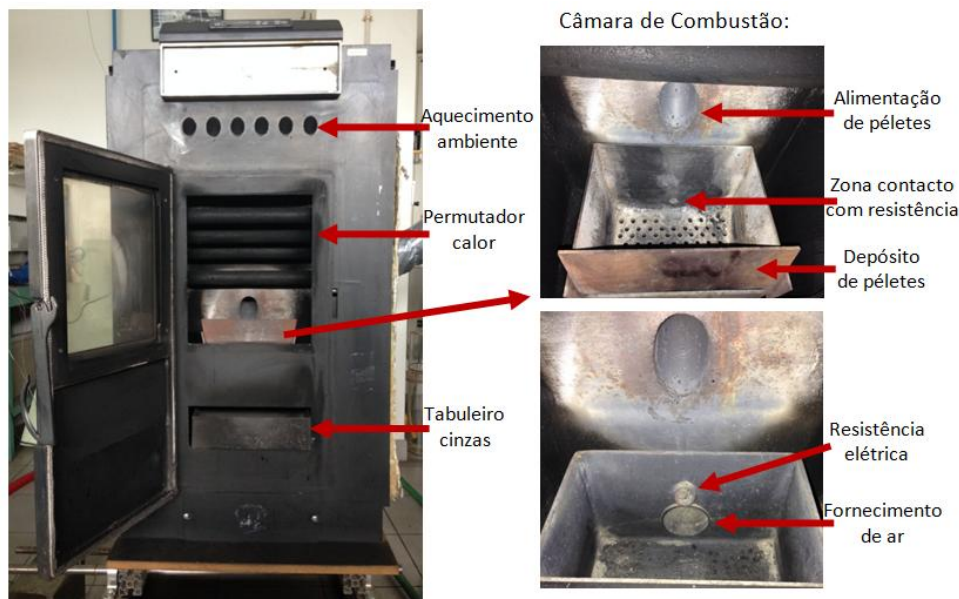


Figura 4.3 – Caldeira e câmara de combustão.

Os péletes são conduzidos, pelo parafuso sem-fim, para uma calha e deixados cair num depósito removível que contém orifícios para receber o ar fornecido à combustão, através do ventilador principal, pela zona inferior do mesmo. No início do processo, uma parte do combustível fica em contacto com uma resistência elétrica que provoca a ignição dos péletes naquela zona, propagando-se a frente de chama através da massa de péletes e ar. A energia gerada durante a combustão promove o aquecimento da água que circula nos tubos do permutador de calor e do ar ambiente; neste último caso, o ar aquecido é forçado a passar pelas aberturas posicionadas acima do permutador, por convecção forçada dum ventilador auxiliar que, no entanto, nunca foi acionado. As cinzas geradas durante o

4. Instalação experimental

processo são arrastadas das paredes laterais para um tabuleiro amovível por ação do ar fornecido. A tubagem por onde escoam os gases formados durante a combustão está ligada ao sistema de exaustão do Laboratório de Termodinâmica e Transferência de Calor (LTTTC), o qual era ligado nos minutos iniciais de cada ensaio e desligado apenas quando se finalizava o ensaio.

A primeira seleção efetuada no sistema de arranque e marcha da caldeira é o tipo de combustível, sendo que o modelo utilizado, está certificado, unicamente, para a combustão de péletes. É possível escolher entre cinco níveis de funcionamento, ou cargas, desde a potência mínima até à potência máxima. A diferença entre os níveis de potência reside no caudal de péletes e na velocidade do ventilador principal. O parafuso sem-fim funciona de modo intercalado, de modo a fornecer maior ou menor caudal de péletes à combustão, conforme a regulação do tempo de funcionamento e de pausa. O ventilador controla o fornecimento de ar à combustão. Na potência mais alta o tempo de alimentação dos péletes é maior, o tempo de pausa é menor e o caudal de ar é superior ao das potências mais baixas.

A caldeira controla automaticamente as quatro fases distintas que ocorrem durante combustão dos péletes: pré-carga, chama acesa, estabilização e limpeza. Ao ligar a caldeira ocorrem, simultaneamente, a fase de pré-carga dos péletes, que dura cerca de dois minutos e em que há uma alimentação constante de péletes, e o aquecimento da resistência elétrica durante cinco minutos. A fase de chama acesa tem uma duração de cerca de sete minutos, em que a alimentação dos péletes foi estabelecida, de acordo com o entendimento do fabricante, com o nível de potência escolhido e onde já se pode observar a chama da combustão. Quando a temperatura dos gases de combustão atinge 60 °C, inicia-se a fase de estabilização. A cada vinte minutos, o ventilador principal da caldeira opera na potência máxima durante vinte segundos para retirar as cinzas que se armazenam no depósito da câmara de combustão.

A caldeira possui um sistema de segurança que a desliga caso se ultrapassem valores estabelecidos da temperatura da água que circula na tubagem, da temperatura na câmara de combustão, da temperatura dos gases de combustão e da pressão no circuito.

4.4 Procedimento experimental

Esta secção consiste na descrição da forma de aquisição dos dados de temperatura, caudais mássicos e composição dos gases da combustão durante cada ensaio de queima de péletes na caldeira. Os instrumentos de medição utilizados foram, previamente, calibrados como se descreve no Anexo B, exceto o ventilador da caldeira, que se assumiu calibrado pelo trabalho experimental de Ferreira (2013). Todos os dados obtidos foram sujeitos a posterior tratamento estatístico para análise e comparação entre os ensaios.

Antes de iniciar cada ensaio, procurou-se que a caldeira se encontrasse em condições idênticas de temperatura da água e dos gases de exaustão. Depois de cada ensaio procedia-se, à extração total dos péletes não queimados e à limpeza das cinzas.

4.4.1 Temperaturas

Os termopares tipo K com bainhas de 3 mm de diâmetro foram os escolhidos para a medição das temperaturas da água e dos gases de combustão. Foram utilizados dois nos tubos de água da caldeira, um foi colocado na entrada e outro na saída. Foi ainda colocado um termopar na tubagem de exaustão dos gases. A placa de aquisição TC08 da Pico recebia os sinais analógicos dos três termopares e transmitia para um computador, via USB, utilizando o programa PicoLog da Pico Technology Ltd., registando valores a cada segundo.

4.4.2 Caudal mássico de péletes

A quantificação do caudal mássico médio foi obtida através da pesagem dos péletes, numa balança 6200 D da marca Precisa, antes de serem colocados no depósito da caldeira e da posterior pesagem dos que aí permaneciam após terminar o ensaio, e dividindo esta diferença pelo tempo que o ensaio demorava (Equação 4.1).

$$\dot{m}_p = \frac{m_{p_inicial} - m_{p_final}}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Para retirar os péletes que permaneciam no sistema de alimentação, colocava-se o sem-fim em rotação até não restar material. A caldeira tem esta opção de rotação constante do sem-fim, quando não está em funcionamento.

4.4.3 Caudal mássico de água

Para obter o caudal mássico de água foi instalado um medidor de caudal da turbina, modelo DFC.9000.100 da Parker. A turbina foi alimentada a 5 Volts e ligada a uma placa NI USB-6008 da National Instruments, sendo o transdutor diferencial de pressão, FC034 da Furness Control, alimentado através da fonte de alimentação MO177, da mesma marca, com 15 Volts. A placa NI USB-6008 enviava o sinal analógico para um computador onde, através do programa Labview 8.6 da National Instruments, se podia monitorizar o caudal mássico de água. Os valores foram registados a cada segundo.

4.4.4 Caudal mássico dos gases de combustão

Para obtenção deste caudal, foi feita uma medição diferencial de pressão, através da colocação dum toma de pressão antes e de outra depois do ventilador. Foram ligados, em paralelo, um manómetro diferencial de coluna de água e um transdutor diferencial de pressão, FC034 da Furness Control, semelhante ao anteriormente descrito. Foi ligado a uma placa NI USB-6008 da National Instruments que transmitia o sinal para um computador

4. Instalação experimental

utilizando o *Labview 8.6* da *National Instruments*. Mais uma vez, os valores foram registados a cada segundo.

4.4.5 Composição dos gases de combustão

Foi utilizado um analisador de gases da marca *Testo*, modelo 350, para determinar a composição dos gases de combustão. A sonda foi colocada no topo da tubagem de exaustão e foram medidos, a cada dez segundos, as concentrações molares de Oxigénio (O_2), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) e Óxidos de Azoto (NO_x). Depois de cada ensaio, ligava-se o analisador ao computador via USB e, através do *software EasyEmission* da *Testo*, eram obtidos os dados para posterior tratamento estatístico.

De forma a poder comparar os valores das emissões foi necessário convertê-los numa base comum de referência de teor de oxigénio. No caso da combustão de materiais lenhosos realizada em caldeiras, o fator de correção utilizado habitualmente é de 13% de O_2 na base seca. O valor da emissão de determinado poluente corrigido é calculado através da Equação 4.2.

$$[P]_{corr} = [P]_{med} \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2med}} \quad (4.2)$$

em que $[P]_{med}$ é a concentração de poluente medida, O_{2ref} o fator de correção (%), O_{2med} a concentração de O_2 medida (%) e o valor 21 a concentração de oxigénio no ar (%).

5. Pré-Tratamento de *Paulownia*

A empresa *Maderas Alvarez Oroza SL*, sediada na Galiza, colaborou com esta dissertação ao fornecer 200 kg de troncos da espécie *Cotevisa 2* de *Paulownia*. A plantação das árvores que deram origem a estes troncos ocorreu entre 2011 e 2012. Foi o primeiro corte destas árvores e, é expectável que ao voltar a rebentar, a planta tenha um crescimento maior. Os troncos foram cortados a 25 de fevereiro de 2014 e estiveram sobre piso de cimento, ao ar livre, sob as condições atmosféricas da época, até serem transportadas para a ESTGV três semanas depois. Uma das características desta espécie é ser oca, sendo o diâmetro correspondente tanto maior quanto mais rápido for o seu crescimento. Os troncos recebidos (Figura 5.1) tinham um comprimento, diâmetro exterior e interior médios de, respetivamente, 1100, 48 e 11 mm.



Figura 5.1 – Troncos de *Paulownia* tal como recebidos.

5.1 Secagem

De forma a obter os valores de teor de humidade adequados para peletizar, entre 8 e 12% (bh) segundo Obernberger e Thek (2010), foi necessário proceder à secagem da biomassa. Para tal, foi determinado o teor de humidade da matéria-prima tal como recebida, de acordo com a norma EN 14774-2:2009. Através da secagem em condições específicas, esta norma garante que a perda de massa das amostras é função, unicamente, da perda da água contida nas mesmas. Foram cortadas 3 amostras e colocadas numa estufa laboratorial, modelo *Venticell*, da *MM Group*, e secas à temperatura de 105 ± 2 °C. Entre a pesagem inicial e a pesagem final, a qual era assim determinada quando já não se verificavam alterações do valor da massa, foram realizadas inúmeras pesagens em que o procedimento era retirar as amostras da estufa, pesá-las numa balança digital, modelo 205ASCS, da *Precisa* e colocá-las de novo na estufa, caso ainda se observassem alterações de massa. Colocaram-se, em seguida, num exsiccador com sais de sílica, de forma a atingirem a temperatura ambiente sem absorverem a humidade presente no ar envolvente. Na Figura 5.2 mostra-se a estufa e o exsiccador com sais de sílica.

5. Pré-tratamento de *Paulownia*



Figura 5.2 – Estufa laboratorial e exsiccador com amostras de *Paulownia*.

O teor de humidade pode ser calculado na base húmida (Equação 5.1) ou na base seca (Equação 5.2), respetivamente:

$$H_{bh} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$H_{bs} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{final}} \times 100 \quad (5.2)$$

onde $m_{inicial}$ e m_{final} são, respetivamente, a massa inicial e final das amostras. O valor médio das três amostras foi o seguinte:

$$H_{bh} = 53,0\%$$

$$H_{bs} = 113,4\%$$

A partir deste momento da dissertação, sempre que houver referência ao teor de humidade, será na base húmida.

Para iniciar o processo de secagem foram cortados alguns troncos, no departamento de Madeiras da ESTGV, em tiras de, aproximadamente, 400x20 mm, num total de 115 kg. Foram realizados três ciclos de secagem distintos, de forma a aproveitar tanto a capacidade da estufa solar existente no telhado da ESTGV como as condições atmosféricas no período em causa.

Como as amostras com casca apresentavam um teor de humidade inicial superior, optou-se por calcular o teor de humidade de modo diferenciado. Periodicamente, eram retiradas duas amostras de cada, cortadas em pedaços mais pequenos, determinando-se então o teor de humidade, tal como explicado em parágrafos anteriores.

5.1.1 Ciclo A

Em meados de março de 2014 foram distribuídos 23 kg de tiras de matéria-prima, numa estufa solar (Figura 5.3) com uma capacidade de cerca de 30 kg (Paiva, 2009).



Figura 5.3 – Estufa solar da ESTGV com *Paulownia*.

O objetivo de utilização da estufa era acelerar o processo de secagem em comparação com a secagem ao ar livre, num período de chuva, de temperaturas baixas e humidades elevadas, em condições passíveis de monitorização da temperatura, da humidade e da irradiação. Tal foi alcançado através de, respetivamente, três termopares tipo T colocados na parte inferior, intermédia e superior da estufa, dois sensores de humidade, modelo *HH 4000* da *Honywell*, colocados na parte inferior e superior, e de dois piranómetros *SP 215* colocados no interior e no exterior da estufa.

A aquisição do sinal dos termopares foi feita através de uma placa *TC08* da *Pico*, ligada a um computador via *USB*. Os sinais dos sensores de humidade foram transmitidos à placa de aquisição *ADC-20* da *Pico Technology Ltd*. Para estes dois parâmetros os valores foram registados a cada minuto, utilizando o programa *PicoLog* da *Pico Technology Ltd*. A placa *NI USB-6008 DAQ* da *National Instruments* recebia o sinal dos piranómetros, registando os respetivos valores a cada 10 segundos no programa *Labview 8.6* da *National Instruments*.

O material tal como recebido apresentava um teor de humidade médio de 53,0%; no entanto, por ter estado algum tempo no exterior, no momento em que foi colocado na estufa apresentava um valor médio de 65,3 e 55,9% com e sem casca, respetivamente. A variação dos valores de teor de humidade ao longo de 19 dias é apresentada na seguinte tabela e de forma gráfica (Figura 5.4).

5. Pré-tratamento de *Paulownia*

Tempo Secagem [h]		0	72	120	168	240	288	336	408	456
Teor de Humidade [%]	Com casca	65,3	50,2	46,3	37,7	44,7	40,6	35,0	28,6	11,9
	Sem casca	55,9	38,5	9,1	11,0	15,5	14,7	13,8	8,9	7,3

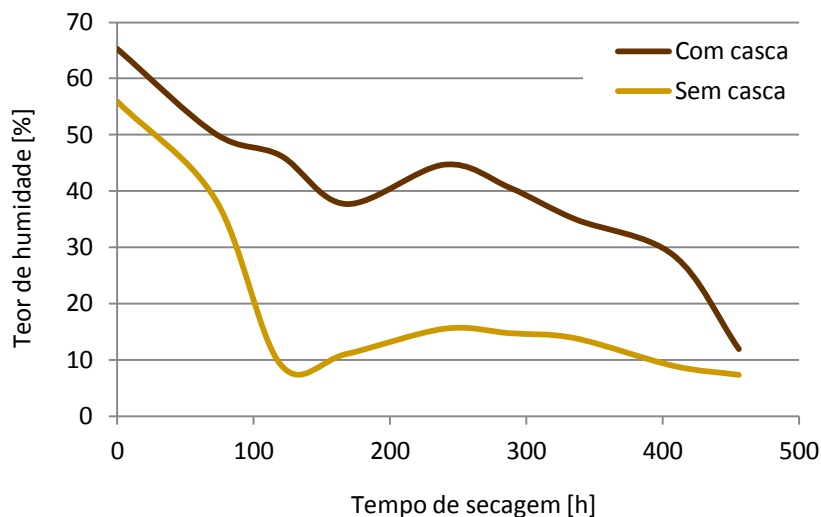


Figura 5.4 – Ciclo A: variação do teor de humidade de amostras de *Paulownia*.

Pode observar-se uma diminuição contínua do teor de humidade das amostras, sendo mais acentuada nas 120 horas iniciais, uma vez que os maiores valores de teor de humidade das amostras conduzem a taxas superiores de transferência de massa com o ar envolvente desde que as condições de temperatura e humidade sejam favoráveis, o que ocorreu. Entre as 130 e as 250 horas verificou-se uma inversão no comportamento do teor de humidade, devido à ocorrência de chuva nesses dias, facto que se pode comprovar na Figura 5.5 pelo aumento da humidade relativa, durante o período referido.

A aquisição dos sinais permitiu conhecer os valores de humidade (Figura 5.5), temperatura (Figura 5.6) e irradiação (Figura 5.7), nos diferentes posicionamentos dos termopares na estufa. A sua evolução é apresentada nas figuras seguintes.

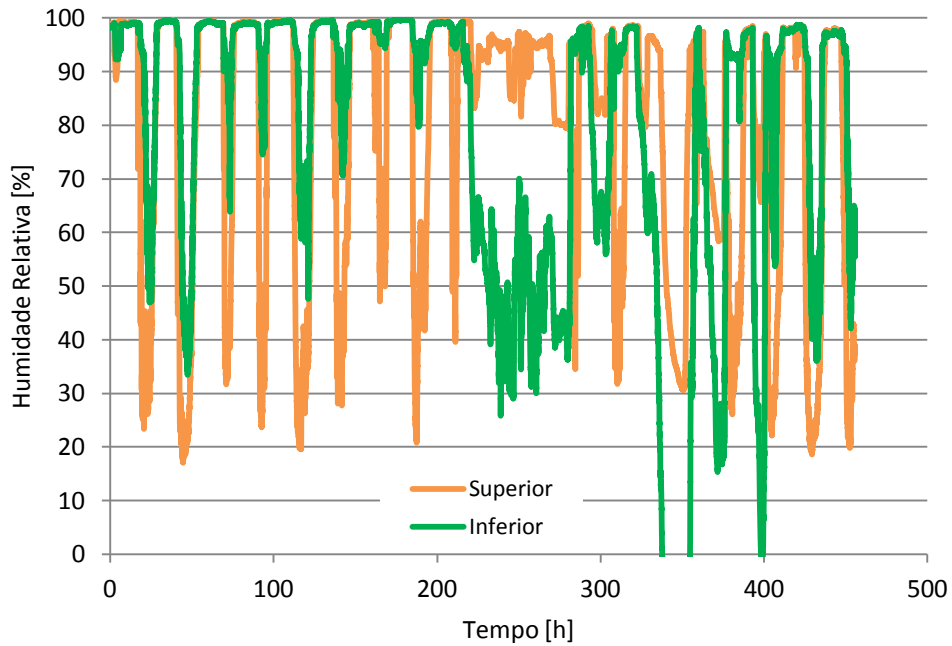


Figura 5.5 – Variação da umidade relativa no interior da estufa solar.

No período entre as 215 e a 401 horas podem observar-se algumas irregularidades, tanto nos valores de umidade relativa da zona inferior como da zona superior. Como foi um período de ocorrência de chuva, é provável que, ao entrar água na estufa, as células dos sensores tenham permanecido em contacto com o líquido, provocando temporariamente, alteração dos valores.

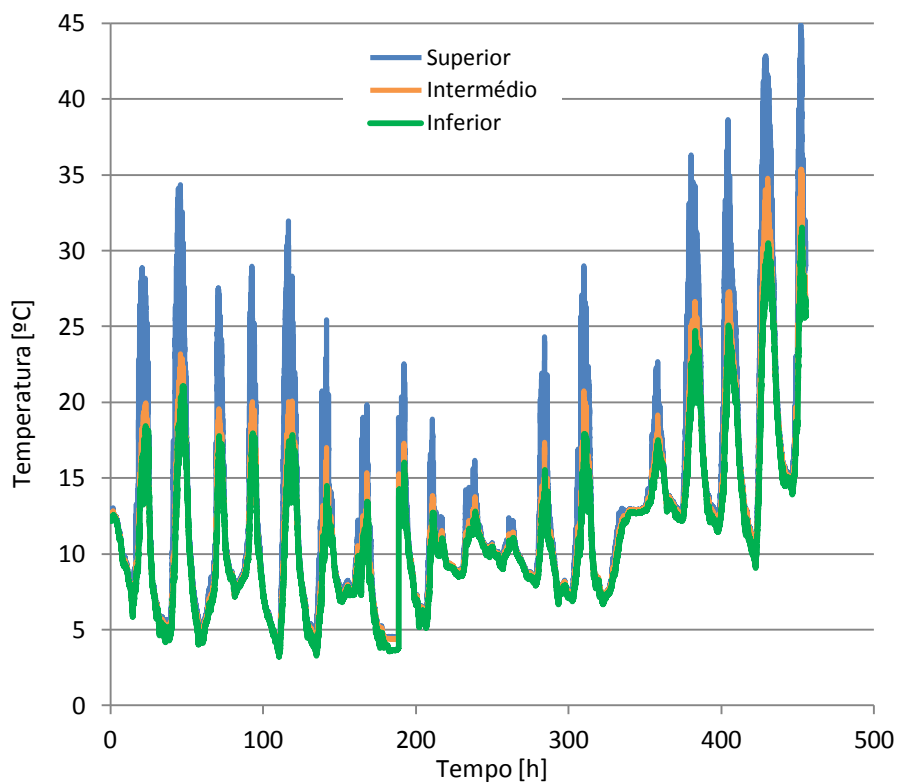


Figura 5.6 – Variação da temperatura no interior da estufa solar.

Ao observar os valores de temperatura verificou-se a tendência inversa do verificado nos valores do teor de humidade, tal como era esperado, uma vez que uma temperatura inferior causa uma diminuição da taxa de remoção de humidade.

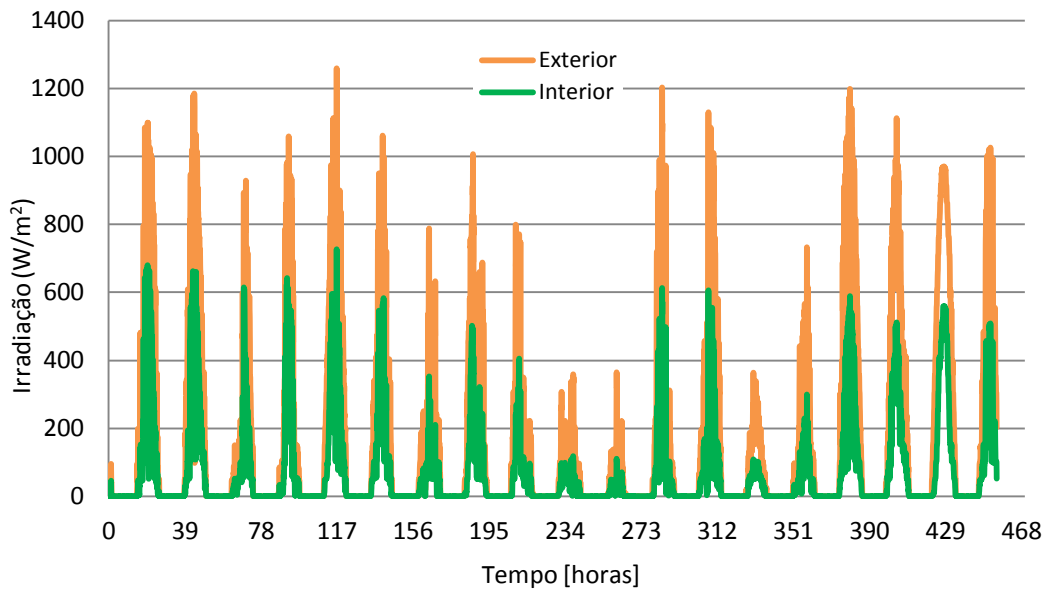


Figura 5.7 – Variação da irradiação no exterior e interior da estufa solar.

5.1.2 Ciclo B

Estava previsto realizar-se o ciclo B de secagem na estufa solar mas, devido à indisponibilidade da estufa, uma vez que estava a ser utilizada para outro projeto, e o facto das condições atmosféricas serem favoráveis à secagem ao ar livre, optou-se por esta solução. No início de abril colocaram-se 52 kg de *Paulownia* com teores de humidade com e sem casca de, respetivamente, de 58,9 e 47,2% sobre plásticos no telhado da ESTGV (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Secagem ao ar livre de *Paulownia*.

O objetivo era manter o material nas mesmas condições até que fossem atingidos os valores de humidade requeridos; contudo, devido à ocorrência de chuva, quatro dias depois, foi necessário retirar o material que, naquele momento, pesava 24 kg, e colocá-lo em sacos até que fosse permitido utilizar uma estufa eléctrica de ventilação forçada, o que só aconteceu nove dias depois. Como os valores do teor de humidade das amostras sem casca já apresentavam os valores ideais para o destroçamento, optou-se por colocar, somente, o material com casca na estufa. A variação dos valores de teor de humidade é apresentada na seguinte tabela e de forma gráfica (Figura 5.9).

Tempo Secagem [h]		0	24	96	Colocação em sacos	288	Colocação na estufa eléctrica	324
Teor de Humidade [%]	Com casca	58,9	45,1	30,7		16,8		8,8
	Sem casca	47,2	22,6	6,9	10,5	10,5		

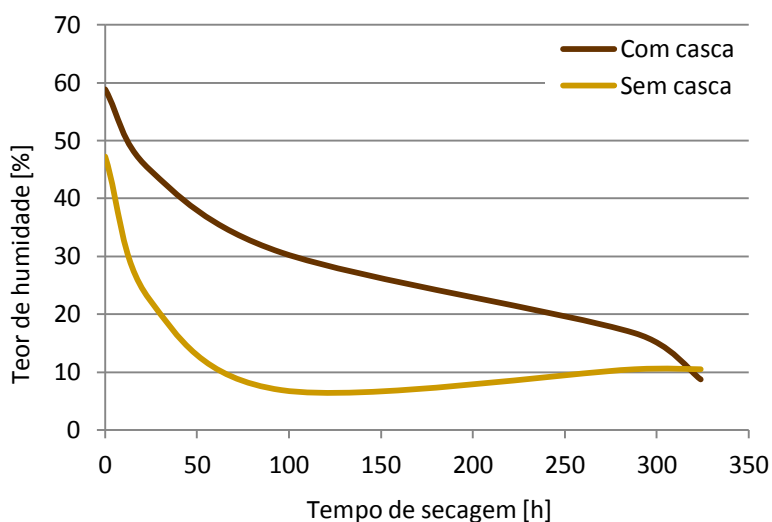


Figura 5.9 – Ciclo B: variação do teor de humidade de amostras de *Paulownia*.

Nas amostras com casca verificou-se uma diminuição contínua do teor de humidade, mais acentuada nas primeiras 96 horas devido ao facto do teor da humidade apresentar os valores mais altos neste período e, portanto, ocorrer uma maior perda de água contida nas amostras através de uma maior transferência de massa para o ar envolvente. Observa-se, também, um declive superior da reta quando são colocadas na estufa eléctrica a partir das 288 horas, em comparação com o período em que estão dentro de sacos, uma vez que a convecção forçada da estufa potenciou a perda da humidade contida nas amostras. As amostras sem casca apresentam uma elevada perda de humidade durante o período que se encontram ao ar livre; no entanto, por terem atingido um valor significativamente baixo (6,9%), ao serem colocadas em sacos absorvem alguma humidade do ar exterior, verificando-se um aumento do seu valor.

5.1.3 Ciclo C

A secagem neste ciclo manteve-se, somente, na estufa elétrica devido às condições atmosféricas não permitirem a secagem ao ar livre e também por ser necessário acelerar o processo para se proceder ao destroçamento. No fim de abril foram colocados 41 kg de *Paulownia* com teores de humidade com e sem casca, respetivamente, de 40,1 e 28,8% (Figura 5.10).

Tempo Secagem [h]		0	36
Teor de Humidade [%]	Com casca	40,1	26,1
	Sem casca	28,8	7,3

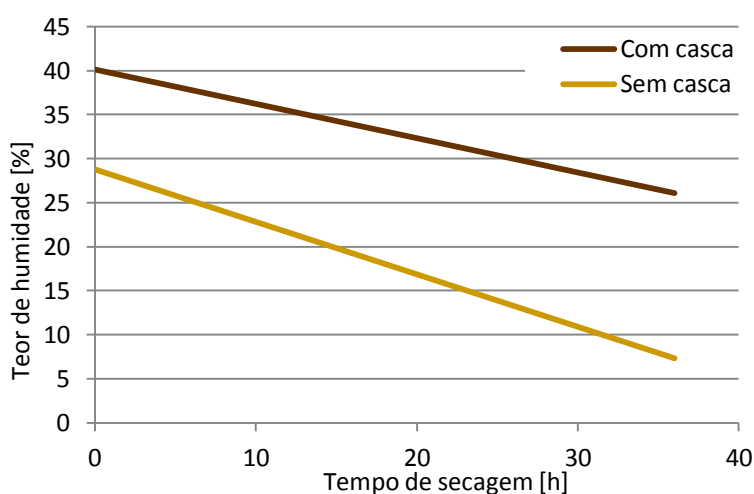


Figura 5.10 – Ciclo C: variação do teor de humidade de amostras de *Paulownia*.

Neste ciclo, verificou-se uma diminuição do teor de humidade a uma taxa constante, uma vez que o valor de temperatura para o qual a estufa elétrica estava programada não se alterou.

5.2 Destroçamento

Ao longo dos ciclos de secagem, o material foi organizado de modo a agrupar amostras com teores de humidade aproximados. Durante o destroçamento foi adotado o mesmo critério, tanto no decurso do procedimento como na colocação do serrim em sacos. O destroçamento do material foi realizado num moinho de martelos, GKLC-19 PK2010 existente na empresa *Transagri, Lda.*, em Mangualde (Figura 5.11). Foi utilizado um crivo com um diâmetro médio de 6 mm.



Figura 5.11 – Moinho de martelos e crivo no interior.

5.3 Caracterização da espécie

5.3.1 Teor de humidade

Do material destroçado foram retiradas várias amostras para determinar o teor de humidade, tal como explicado na secção 5.1, tendo os valores variado entre 9,6 e 14,2%. Os valores mais altos de teor de humidade devem-se à mistura com o material com casca pertencente ao ciclo C, cujo valor do teor de humidade final foi de 26,1%. Todavia, como se esperava uma diminuição do teor de humidade durante a peletização, não se considerou que os valores obtidos iriam perturbar a qualidade dos péletes.

5.3.2 Análise granulométrica

A determinação da distribuição estatística das dimensões das partículas foi conseguida através de peneiração, que se define como a separação das partículas por diferentes tamanhos através da utilização de peneiros com espaçamentos de malha diferentes. Os peneiros são encaixados uns nos outros por ordem crescente de espaçamento de malhas, calibradas de acordo com a norma ASTM, formando uma coluna de peneiração. A coluna foi colocada no equipamento vibratório *AS 200 control* da *Retsch* (Figura 5.12), que produz movimentos de alta frequência verticais e horizontais em simultâneo. Ao fim de um tempo estabelecido ocorre a separação das partículas.



Figura 5.12 – Agitador de peneiros.

A norma ASTM C136/C136M-14:2014 indica que o ensaio deve ser realizado até que a massa que passa em qualquer um dos peneiros não ultrapasse 1% da massa total da amostra durante 1 minuto. O fabricante sugeriu efetuar o ensaio durante 5 minutos a uma amplitude de 1,5 mm e, então, realizar de minuto a minuto até se observar a condição da norma. Concluiu-se que 10 minutos é o tempo adequado para realizar cada ensaio de peneiração. No final do ensaio, o somatório das massas retidas nos peneiros não pode ser inferior a 0,5% da massa inicial, caso contrário o ensaio deve ser repetido; tal não foi necessário, uma vez que esta exigência foi respeitada em todos os ensaios. Foram realizados ensaios com três amostras do material após o destroçamento, com um teor de humidade médio de 11,1%. As massas retidas em cada peneiro foram, então, pesadas numa balança *Precisa*, modelo 6200 D, e obteve-se a distribuição mássica.

O passo seguinte tinha por objetivo determinar o diâmetro médio das partículas, o qual se calculou através da Equação 5.3 (Kunii e Levenspiel, 1969).

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{dp_i}} \quad (5.3)$$

onde x_i é a fração mássica das partículas do material retido no intervalo i e dp_i a média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros consecutivos (m).

Do cálculo obteve-se um diâmetro médio de $827 \pm 65 \mu\text{m}$ das três amostras de *Paulownia*. Na Figura 5.13, apresenta-se a representação granulométrica da amostra 1, sendo a distribuição das amostras 2 e 3 mostradas no Anexo C.

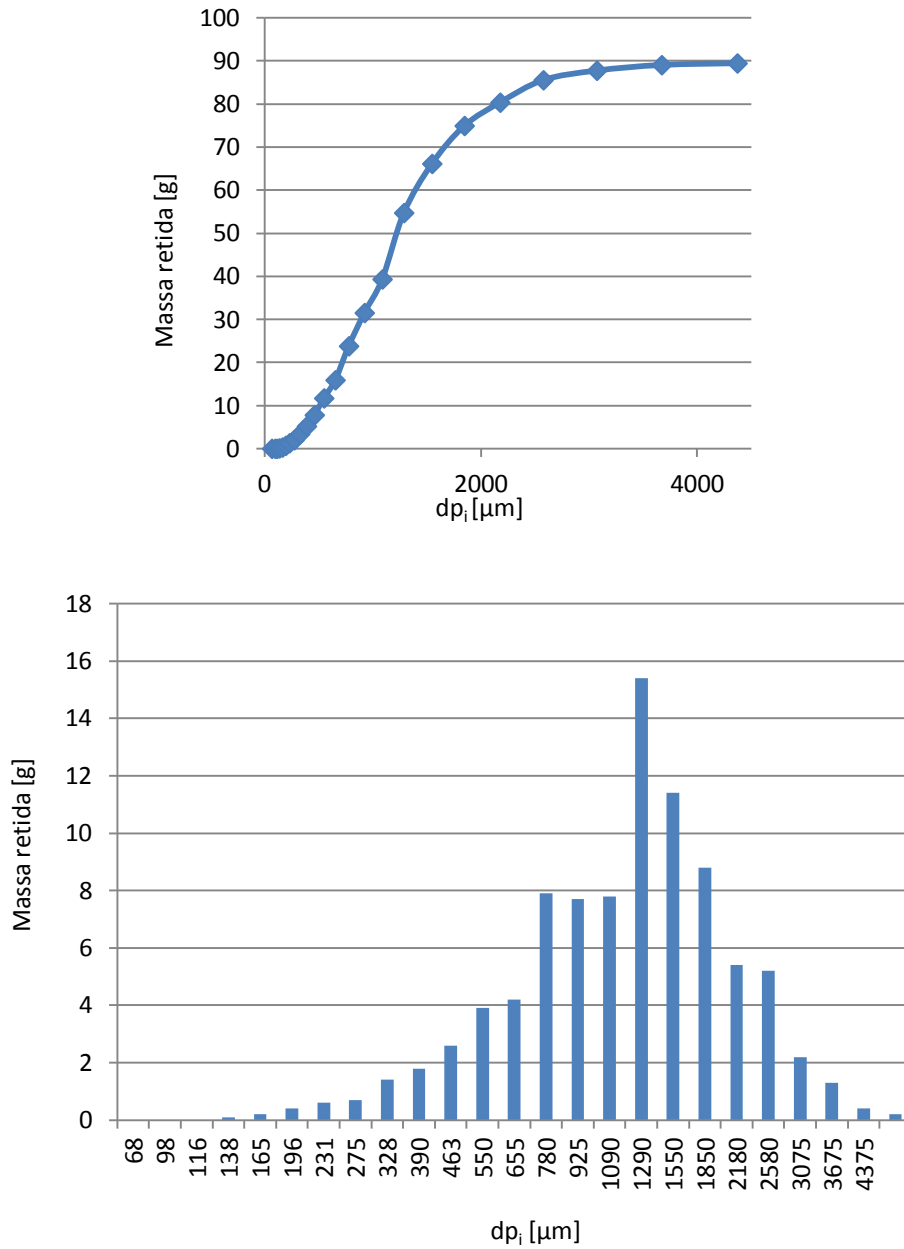


Figura 5.13 – Distribuição granulométrica da amostra 1 de *Paulownia*.

6. Peletização

A peletização foi realizada no LTTC, recorrendo a uma peletizadora modelo GK5500 da AGP International (Figura 6.1), utilizando um crivo de 6 mm para produzir péletes com esse diâmetro.



Figura 6.1 – Peletizadora do LTTC.

Inicialmente, a peletizadora foi alimentada com serrim de outra espécie até se obter a temperatura e pressão adequadas ao funcionamento, o que podia ser verificado através do aspeto e resistência à quebra dos péletes. Colocou-se, então, o serrim de *Paulownia*, a uma taxa de alimentação de 51 kg/h. Seguiu-se o período de estabilização, tendo os péletes sido distribuídos por superfícies planas e arrefecidos expostos ao ar ambiente durante 24 horas, como apresentado na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Péletes de *Paulownia*.

Dos cerca de 115 kg de troncos cortados em tiras, após a secagem, o destroçamento e a peletização obtiveram-se 35 kg de péletes. A diferença de massa deve-se, na maior parte, à diminuição significativa do teor de humidade da espécie e, marginalmente, ao material que se perdeu no corte e no manuseamento durante as restantes etapas.

Antes da embalagem em sacos, foi necessário proceder à separação entre os finos produzidos durante o processo de peletização e os péletes, através de uma peneiração com um crivo de 3,35 mm.

Seguiu-se a realização de testes de qualidade aos péletes para comparação com os valores estabelecidos na norma EN ISO 17225-2:2014, a qual descreve as especificações para péletes de madeira para uso não industrial, tal como referido na Tabela 3.1.

6.1 Testes de Qualidade

6.1.1 Dimensões

No sentido de determinar o comprimento e diâmetro médios dos péletes, retiraram-se aleatoriamente três amostras de 20 unidades cada e mediram-se as grandezas referidas com um paquímetro. Calculou-se a média aritmética obtida nos três ensaios e os valores obtidos foram:

- Comprimento: 39,7 mm
- Diâmetro: 6,1 mm

A norma indica que o valor de comprimento deve situar-se entre 3,15 e 40 mm, o que significa que o valor de comprimento médio respeita a norma. O valor do diâmetro médio cumpre os valores definidos de 6 ou 8 mm.

6.1.2 Massa volúmica

O valor médio de massa volúmica foi calculado através do método proposto por *Rabier et al.* (2006), o qual relaciona a massa do pélete com o volume respetivo, considerando a amostra um cilindro.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (6.1)$$

O valor da massa foi obtido através da pesagem dos péletes utilizados para determinar o comprimento e diâmetro. Obteve-se uma massa volúmica de 1164 kg/m³.

6.1.3 Teor de humidade

O destroçamento de *Paulownia* deu origem a dez sacos de serrim, calculando-se o teor de humidade, com recurso à Equação 5.1, para cada um deles para posterior agrupamento de

acordo com a semelhança do valor desta grandeza, o que gerou três grupos. Ao proceder-se à peletização, separaram-se os péletes de acordo com o grupo correspondente para se obter o teor de humidade respetivo. A Tabela 6.1 apresenta a diferença entre o teor de humidade do serrim e dos péletes de cada grupo.

	Serrim	Péletes
Teor de Humidade [%]	14,2	5,3
	10,4	6,2
	9,6	7,2

Tabela 6.1 – Comparação teor de humidade entre serrim e péletes.

O teor de humidade dos péletes de *Paulownia* variou entre 5,3 e 7,2%, valores que estão dentro dos limites estabelecidos pela norma, a qual indica que tem que ser igual ou inferior a 10%.

6.1.4 Teor de finos

A norma ISO 3310-1:2000, que orienta os ensaios de peneiração, recomenda a utilização dum peneiro de 3,15 mm; no entanto, por não estar disponível, utilizou-se o peneiro com o espaçamento mais aproximado. O teor de finos foi determinado de acordo com a norma EN 15210-1:2009, recorrendo a um peneiro com 3,35 mm de espaçamento de malha, com o qual se peneiraram manualmente três amostras. Após a peneiração, pesou-se o material não retido no peneiro e determinou-se o teor de finos através da seguinte expressão (Equação 6.2).

$$\text{Teor Finos} = \frac{m_{\text{finos}}}{m_{p_inicial}} \times 100 \quad (6.2)$$

onde m_{finos} representa a massa não retida no peneiro e $m_{p_inicial}$ a massa total do ensaio pesada antes da peneiração. O valor obtido foi de 0,81%, o qual cumpre o limite máximo definido de 1%.

6.1.5 Durabilidade mecânica

A durabilidade mecânica define a capacidade do material se manter intacto durante o manuseamento e transporte. A norma ASAE S269.5:2012 descreve o equipamento a utilizar que permite determinar esse valor. Colocam-se 500 ± 10 g de péletes numa caixa metálica com dimensões de 300 x 300 x 1259 mm e um defletor com 230 x 50 mm e deve fazer-se rodar o recipiente a uma velocidade de 50 ± 2 rpm (Temmerman *et al.*, 2006). Fizeram-se três ensaios com amostras diferentes e rodou-se o conjunto 500 vezes durante 10 minutos. Tal como referido no ponto anterior, recomendava-se a peneiração recorrendo a um peneiro de 3,15 mm mas, pela mesma razão, utilizou-se o de 3,35 mm. Antes de cada teste,

6. Peletização

peneiraram-se 500 g de péletes e pesou-se a massa retida no peneiro; o mesmo procedimento foi realizado após o ensaio. A durabilidade obteve-se a partir da Equação 6.3.

$$Durabilidade = \frac{m_{p_final}}{m_{p_inicial}} \times 100 \quad (6.3)$$

em que m_{p_final} e $m_{p_inicial}$ designam, respetivamente, as massas pesadas antes e após o ensaio. O valor médio obtido foi de 98,7%, valor superior ao mínimo exigido pela norma, que é de 97,5.

6.1.6 Composição química

Para obter a composição imediata e elementar de *Paulownia* recorreu-se ao Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia (LNEG). Por uma questão de comparação futura, apresenta-se também a composição química de péletes de Pinho comerciais certificados, dados fornecidos pela empresa onde foram obtidos. Os valores apresentados na Tabela 6.2 são de análises efetuadas na base seca.

	Unidades	<i>Paulownia</i>	Pinho
Análise Imediata			
Teor de Cinzas	% (m/m)	1,2	0,68
Teor de Matéria Volátil	% (m/m)	82,9	n.d.
Carbono Fixo	% (m/m)	15,9	n.d.
Análise Elementar			
Carbono Total	% (m/m)	49,1	50,6
Hidrogénio	% (m/m)	6,0	6,4
Azoto	% (m/m)	<1,0	<0,005
Enxofre	% (m/m)	0,031	0,01
Cloro	% (m/m)	0,023	<0,005
Oxigénio	% (m/m)	43,6	42,9
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	18,30	18,79

Tabela 6.2 – Análise imediata e elementar aos péletes de *Paulownia* e de Pinho.

Caso se considere a norma ENplus-A1 como referência, a amostra de *Paulownia* não cumpre o requisito da composição máxima do teor de cinzas e azoto; contudo, encontra-se dentro dos limites no que diz respeito às condições definidas pelas normas ENplus-A2 e EN-B. Os péletes de Pinho por serem certificados pela ENplus-A1 cumprem todos os requisitos.

7. Resultados e discussão

O objetivo principal era avaliar a influência da biomassa de *Paulownia* na forma peletizada em relação à emissão de poluentes e rendimento térmico da caldeira passando, para o efeito, por uma comparação com resultados obtidos anteriormente (Ferreira, 2013). Embora as duas instalações sejam, praticamente, idênticas e já tivesse sido estabelecida uma comparação entre péletes de Pinho (comerciais) e de outras espécies (Giesta e Mimosa) e, assim sendo, já houvesse dados de ensaios experimentais para comparar com os obtidos nesta dissertação, optou-se por realizar novos ensaios com os péletes de Pinho, repetindo-os portanto, de certo modo, com a preocupação de que os valores a comparar fossem o mais possível obtidos nas mesmas condições. Esses resultados constarão deste trabalho.

7.1 Procedimento de cálculo

Para o cálculo do rendimento térmico da caldeira foram utilizados os dados obtidos em condições de funcionamento próximas de regime permanente. Para simplificação de cálculos, considera-se a partir deste instante que se trata, de facto, de regime permanente. Nos ensaios realizados consideraram-se as situações em que o valor de temperatura de saída da água não apresentava alterações significativas, o que ocorria cerca de 30 minutos após o arranque da caldeira.

Para determinar o rendimento térmico da caldeira recorreu-se à Equação 7.1.

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{\dot{Q}_{\text{transferidaÁgua}}}{\dot{Q}_{\text{fornecida}}} \times 100 \quad (7.1)$$

em que $\dot{Q}_{\text{transferidaÁgua}}$ é a energia térmica transferida por unidade de tempo para a água durante o ensaio (kW) e $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$ a que foi libertada durante a combustão dos péletes (kW).

Para determinar a energia térmica transferida para a água foi realizado um balanço de massa e de energia ao volume de controlo.

O princípio de conservação da massa estabelece que:

$$\left[\begin{array}{c} \text{massa que entra} \\ \text{num volume de controlo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{massa que sai} \\ \text{dum volume de controlo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{variação da massa} \\ \text{nesse volume de controlo} \end{array} \right] \quad (7.2)$$

Considerando uma secção com uma área elementar dA que é atravessada por um fluxo de massa $\frac{dm}{dA}$:

$$\int_A \frac{dm}{dA} dA = \int_A \rho |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| dA \quad (7.3)$$

em que o módulo do produto escalar $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$, entre o vector da velocidade e o versor da direcção perpendicular ao plano da secção dA , representa o valor da velocidade do escoamento segundo a normal àquela secção. Esse valor é obtido a partir do limite, quando o intervalo de tempo tende para zero, do produto entre a velocidade, $\Delta L/\Delta t$, e o cosseno do ângulo que esta faz com a normal à área dessa secção,

$$|\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta L}{\Delta t} \cos\theta \right) \quad (7.4)$$

A variação da massa no volume de controlo será igual a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} dm \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho dV \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \frac{dV}{v} \right) \quad (7.5)$$

Designando as áreas das secções de entrada e de saída do volume de controlo por A_{ent} e A_{sai} , respetivamente, teremos, substituindo as Equações 7.3 e 7.5 na Equação 7.2:

$$\int_{A_{ent}} \rho |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| dA - \int_{A_{sai}} \rho |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV \quad (7.6)$$

e, para várias entradas e saídas,

$$\sum_{entradas} \left(\int_{A_{ent}} \rho |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| dA \right) - \sum_{saídas} \left(\int_{A_{sai}} \rho |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}| dA \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho dV \right) \quad (7.7)$$

ou, de forma abreviada,

$$\sum_{ent} \left(\int_{A_{ent}} d\dot{m} \right) - \sum_{sai} \left(\int_{A_{sai}} d\dot{m} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho dV \right) \quad (7.8)$$

Considerando que: (i) a velocidade e a massa volúmica são uniformes através de todas as secções de entrada e saída e (ii) o vector da velocidade, em cada uma delas, é sempre normal a essas mesmas secções, a Equação 7.8 pode escrever-se:

$$\sum_{ent} (\rho \vartheta A) - \sum_{sai} (\rho \vartheta A) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho dV \right) \quad (7.9)$$

em que ϑ é a velocidade ($\vartheta = |\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}|$). Para uma única entrada e saída e para regime permanente,

$$(\rho \vartheta A)_{ent} - (\rho \vartheta A)_{sai} = 0 \quad (7.10)$$

ou seja,

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sai} \equiv \dot{m} \quad (7.11)$$

O princípio de conservação da energia estabelece que a massa que entra, escoando através do volume de controlo e sai, transporta consigo energia. O balanço de energia realizado entre as entradas e as saídas terá de ser igual à variação da energia no interior desse volume de controlo, incluindo as interações de energia do ou para o exterior, através da fronteira desse volume de controlo, sob a forma de calor e trabalho. Assim,

$$\left[\begin{array}{l} \text{energia que entra} \\ \text{num volume de controlo} \\ \text{associada à massa e sob} \\ \text{a forma de calor ou trabalho} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{energia que sai} \\ \text{dum volume de controlo} \\ \text{associada à massa e sob} \\ \text{a forma de calor ou trabalho} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{variação da} \\ \text{energia} \\ \text{nesse} \\ \text{volume de controlo} \end{array} \right] \quad (7.12)$$

Retomando a Equação 7.7, multiplicando ambos os membros pela energia específica (energia por unidade de massa, $e = E/m$), obter-se-á:

$$\int_{A_{ent}} e\rho|\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}|dA - \int_{A_{sai}} e\rho|\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}|dA + \delta\dot{Q} - \delta\dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e\rho dV \quad (7.13)$$

segundo a convenção relativa ao trabalho negativo quando fornecido ao volume de controlo. Esta expressão equivale, como visto anteriormente, Equação 7.8, para uma única entrada e saída, a:

$$\int_{A_{ent}} e d\dot{m} - \int_{A_{sai}} e d\dot{m} + \delta\dot{Q} - \delta\dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} e\rho dV \right) \quad (7.14)$$

Voltando a efetuar as simplificações relativas à uniformidade de propriedades e à direção do vetor velocidade, para uma única entrada e saída, fica,

$$(e\rho\vartheta A)_{ent} - (\rho e\vartheta A)_{sai} + \dot{Q} - \dot{W} = \left(\int_{VC} e\rho dV \right) \quad (7.15)$$

Dissociando o trabalho ou energia de escoamento, Pv , do termo genérico, \dot{W} , pode escrever-se:

$$[(e + Pv)\rho\vartheta A]_{ent} - [(e + Pv)\rho\vartheta A]_{sai} + \dot{Q} - \dot{W} = \left(\int_{VC} e\rho dV \right) \quad (7.16)$$

Considerando que se está em presença de regime aproximado ao permanente,

$$[(e + Pv)\rho\vartheta A]_{ent} - [(e + Pv)\rho\vartheta A]_{sai} + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (7.17)$$

e considerando pouco importantes, no contexto do trabalho que agora se apresenta, as variações de energia cinética e de energia potencial, entre a única entrada e a única saída, dada a mesma dimensão da secção de entrada e de saída e a pequena variação de cota entre as mesmas, bem como a inexistência de qualquer forma de trabalho, pode escrever-se:

$$[(u + Pv)\rho\vartheta A]_{ent} - [(u + Pv)\rho\vartheta A]_{sai} + \dot{Q} = 0 \quad (7.18)$$

onde u é a energia interna e v o volume, ambos específicos, ou seja, por unidade de massa. Substituindo na Equação 7.18 a soma da energia interna com a energia de escoamento pela entalpia específica, h , pode escrever-se

$$(h\rho\vartheta A)_{ent} - (h\rho\vartheta A)_{sai} + \dot{Q} = 0 \quad (7.19)$$

A consideração de regime permanente feita na Equação 7.11 permite ainda escrever,

$$(h_{ent} - h_{sai})\dot{m} + \dot{Q} = 0 \quad (7.20)$$

7. Resultados e discussão

Tratando-se de água líquida, no estado de líquido incompressível, pode explicitar-se a entalpia como o produto entre o calor específico e a temperatura:

$$[(cT)_{ent} - (cT)_{sai}] \dot{m}_{\text{água}} + \dot{Q} = 0 \quad (7.21)$$

e, face às variações de temperatura entre a entrada e a saída, o que permite utilizar um valor de calor específico médio, \bar{c} , em função da média aritmética dessas duas temperaturas,

$$\bar{c}(T_{ent} - T_{sai}) \dot{m}_{\text{água}} + \dot{Q} = 0 \quad (7.22)$$

ou de outra forma,

$$\dot{Q}_{\text{transferidaÁgua}} = \dot{m}_{\text{água}} \times \bar{c}_{\text{água}} \times (T_{sai} - T_{ent}) \quad (7.23)$$

onde $\dot{m}_{\text{água}}$ é o caudal mássico médio de água debitado durante o ensaio (kg/s), $\bar{c}_{\text{água}}$ o calor específico da água na base mássica obtido à temperatura média entre o valor de entrada e o de saída (kJ/(kg·K)) e, T_{sai} e T_{ent} , respetivamente, a temperatura média na secção de saída e de entrada da tubagem de alimentação de água para aquecimento da caldeira (°C).

A energia fornecida à caldeira foi calculada através da Equação 7.24.

$$\dot{Q}_{\text{fornecida}} = \dot{m}_p \times PCi_p \quad (7.24)$$

em que \dot{m}_p refere-se ao caudal mássico de péletes durante o ensaio (kg/s) e PCi_p o poder calorífico inferior, na base seca, do material de que são feitos os péletes (kJ/kg). A temperatura durante a combustão dos péletes é elevada, o que faz com que os produtos da combustão se encontrem na forma gasosa, razão pela qual se usa o valor do PCi e não do PCs . Por outro lado, utilizou-se o valor do PCi na base seca uma vez que, assim, se assegura que a comparação entre os diferentes péletes é realizada numa referência comum de teor de humidade.

Uma parte da energia térmica libertada através da queima dos péletes foi transferida para a água; contudo, outra parte foi perdida pela chaminé, para o ar ambiente e para a envolvente, por convecção e radiação, pelo que a potência térmica fornecida à caldeira pode traduzir-se pela seguinte expressão (Equação 7.25).

$$\dot{Q}_{\text{fornecida}} = \dot{Q}_{\text{transferidaÁgua}} + \dot{Q}_{\text{chaminé}} + \dot{Q}_{\text{conv+rad}} \quad (7.25)$$

onde $\dot{Q}_{\text{transferidaÁgua}}$ designa a potência transferida para a água (kW), $\dot{Q}_{\text{chaminé}}$ a energia por unidade de tempo associada ao produto do caudal mássico pela variação de entalpia sensível (e latente, no caso da água) dos gases desde que deixam o corpo da caldeira até que são libertados para a atmosfera e $\dot{Q}_{\text{conv+rad}}$ as perdas por convecção e radiação do corpo da caldeira para o ar ambiente e para a envolvente (kW).

As perdas pela chaminé, durante o processo de combustão, deveriam incluir também as perdas provocadas por não-queimados (PNQ) mas, como não se dispunha de equipamentos que permitissem a sua contabilização, foram incluídas nas perdas por convecção e radiação, no fecho do balanço.

As perdas provocadas pela corrente dos produtos de combustão calculam-se por meio da Equação 7.26.

$$\dot{Q}_{gases} = \left[(nM\bar{c}_p)H_2O + (nM\bar{c}_p)CO_2 + (nM\bar{c}_p)CO + (nM\bar{c}_p)O_2 + (nM\bar{c}_p)N_2 \right] \cdot \dot{m}_p(T_{gases} - T_{amb}) \quad (7.26)$$

onde n é o número de kilomol do produto em causa por quilograma de péletes (kmol/kg), M a massa molecular (kg/kmol), \bar{c}_p o calor específico a pressão constante na base mássica (kJ/(kg·K)), obtido à temperatura média $(T_{gases} + T_{amb})/2$, onde se utiliza, respetivamente, a temperatura média dos gases de exaustão e a do ambiente (°C) e \dot{m}_p o caudal mássico de péletes (kg/s). A água incluída na equação é relativa à formada durante a combustão.

As perdas térmicas provocadas pelos não-queimados, referem-se, essencialmente, à formação de CO durante a combustão e foram calculadas por meio da Equação 7.27.

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{m}_{CO} \times PCI_{CO} \quad (7.27)$$

em que \dot{m}_{CO} designa o caudal mássico de CO presente nos produtos da combustão (kg/s) e PCI_{CO} o poder calorífico inferior do CO na base mássica (kJ/kg).

As perdas relativas à humidade presente no combustível foram calculadas pela Equação 7.28.

$$\dot{Q}_{humidade} = \dot{m}_p \alpha \left[\bar{c}_{H_2O}(100 - T_{amb}) + h_{lv} + \bar{c}_{H_2O}(T_{gases} - 100) \right] \quad (7.28)$$

onde \dot{m}_p refere-se ao caudal mássico dos péletes (kg/s), α a fração de água dos péletes, \bar{c}_{H_2O} o calor específico da água na base mássica obtido à temperatura média (kJ/(kg·K)), h_{lv} a entalpia latente de vaporização da água (kJ/kg) e, T_{gases} e T_{amb} , respetivamente, a temperatura média dos gases de exaustão e do ambiente (°C).

7.2 Ensaios experimentais

Não se considerou haver necessidade de realizar os ensaios nos cinco níveis de potência da caldeira, optou-se por utilizar o nível mínimo, médio e máximo, uma vez que os ensaios de Ferreira (2013) foram realizados nestes três níveis, sendo tal apropriado para a comparação de resultados e observou-se o mesmo procedimento em outros trabalhos (Rabaçal et al., 2013; Obaidullah et al., 2014). Foram realizados três ensaios de Pinho para cada nível de potência em condições de operação idênticas para aferir a regularidade dos resultados. O comprimento muito superior dos péletes de *Paulownia* (valor médio de 39,7 mm) em

comparação com os de Pinho (valor médio de 20 mm), fator provocado por uma posição não adequada da lâmina de corte no momento da peletização da espécie, interfere no caudal mássico de péletes em jogo na combustão, o que, por um lado, promove uma combustão menos eficiente e, por outro lado, não permite comparar com os resultados de Pinho; razões pelas quais foi necessário procurar a obtenção de caudais idênticos entre as duas espécies. Este processo poderia realizar-se de duas formas: pelo ajuste do tempo de funcionamento e pausa do sem-fim da caldeira ou pelo corte dos péletes com um comprimento idêntico ao do Pinho. Testou-se a primeira opção, no entanto, não se obtiveram caudais passíveis de serem comparados; estes ensaios não foram incluídos neste capítulo da dissertação mas, são apresentados no Anexo D. Observou-se, ainda, que a ignição do combustível demorava mais tempo a ocorrer devido a uma menor área dos péletes sujeita à combustão. Na perspetiva da influência da razão área/volume dos péletes na combustão, quando se aumenta o comprimento, esta razão diminui, resultando numa taxa de queima inferior, o que explica, tanto o maior tempo necessário à ignição, como a diminuição da potência transferida para a água, tornando o processo menos eficiente. No trabalho de Sikanen e Vilppo (2012) verificou-se que o aumento de comprimento dos péletes provocou uma diminuição da temperatura de combustão e que a utilização de péletes com comprimento superior a 20 mm influenciava negativamente a regularidade do caudal e, conseqüentemente, a chama da combustão apresentava maiores oscilações. Procedeu-se, então, ao corte manual dos restantes péletes, de forma que o seu comprimento fosse, aproximadamente, de 20 mm, valor médio obtido após medição dos péletes de Pinho de acordo com o método apresentado em 6.11. Os resultados apresentados neste capítulo foram realizados com os péletes alterados.

No processo de ajuste do caudal mássico, foram realizados outros testes, reduzindo, deste modo, a disponibilidade de péletes de *Paulownia*, razão pela qual se realizou, somente, um ensaio de *Paulownia* para cada nível de potência. Devido à coerência demonstrada nos resultados dos testes com péletes de Pinho e de *Paulownia*, é possível assegurar que os resultados dos ensaios de *Paulownia* não se distanciam do que seria obtido com mais ensaios, embora, caso tivesse sido possível realizá-los, este trabalho ficaria enriquecido. Os primeiros ensaios foram realizados com péletes de Pinho comerciais da empresa *Pinewells*, referenciados na tese de Ferreira (2013) como Pinho A e só depois com os de *Paulownia*.

Para se proceder a uma comparação válida, tanto na perspetiva de comparar os resultados entre Pinho e *Paulownia*, como comparar os resultados de Pinho da presente dissertação com os de Ferreira (2013), era necessário que o caudal de água fosse idêntico em todos os ensaios e aos ensaios realizados por Ferreira (2013) e que o caudal de péletes fosse semelhante aos ensaios realizados por Ferreira (2013). O ideal seria realizar os ensaios com caudais iguais, mas tal foi impossível uma vez que a água apresenta pequenas flutuações de caudal características da própria rede e o caudal de péletes é gerido pela caldeira; contudo, considerou-se que estas pequenas diferenças não interferem na validade das comparações, uma vez que a influência destas diferenças sobre os resultados não é significativa.

Para estabelecer que tipo de válvula se utilizaria para regular o caudal de água foi calculada a perda de carga do circuito, uma vez que seria necessário utilizar uma válvula de precisão, em substituição da existente, caso a perda de carga fosse superior à indicada para este tipo de equipamento (10 kPa) e, portanto, influenciasse significativamente o valor do caudal de água durante a combustão. De acordo com o procedimento explicado no Anexo E, o valor calculado foi de 7,49 kPa, pelo que se manteve a válvula, previamente, instalada no circuito. Em relação aos péletes é a própria caldeira que faz a gestão do caudal através do tempo de funcionamento e pausa do parafuso sem-fim, tal como explicado anteriormente, pelo que, tal como seria de esperar, uma vez que foram utilizados os mesmos tempos nas duas dissertações, os caudais obtidos foram aproximados ao verificado nos ensaios com Pinho A.

Os ensaios foram realizados com a caldeira a operar segundo os parâmetros indicados pelo fabricante, relativamente ao caudal de alimentação de péletes e ao caudal de ar fornecido à combustão. A seguir, apresentam-se os valores médios obtidos em regime permanente para cada potência térmica, com as seguintes especificações (Tabela 7.1).

- Pinho AF: péletes de Pinho A - valores retirados da tese de Ferreira (2013);
- Pinho A1: péletes de Pinho A;
- *Paulownia* A1: péletes de *Paulownia*.

	Potência térmica [kW]	Caudal péletes [kg/h]	Potência útil [kW]	Caudal água [l/min]	Rendimento térmico [%]
Potência Mínima					
Pinho AF	6,29	1,21	2,92	8,08	46,41
Pinho A1	6,01	1,15	3,01	9,44	50,06
<i>Paulownia</i> A1	5,70	1,12	2,94	9,51	51,58
Potência Média					
Pinho AF	9,86	1,89	5,69	9,84	57,71
Pinho A1	9,66	1,85	5,59	9,33	57,89
<i>Paulownia</i> A1	9,13	1,80	5,86	9,51	64,13
Potência Máxima					
Pinho AF	19,59	3,75	12,65	9,88	64,58
Pinho A1	17,68	3,39	11,40	9,51	64,44
<i>Paulownia</i> A1	15,57	3,06	10,33	9,50	66,30

Tabela 7.1 – Ensaios experimentais.

Como se pode observar, os valores de caudais de péletes em cada nível de potência mantiveram-se aproximados entre si e o valor do caudal de água é idêntico em todos os ensaios; ambos são aproximados aos utilizados nos ensaios de Pinho AF. A diferença dos valores de rendimento entre Pinho AF e Pinho A1 é reduzida, o que, aparentemente, comprova a regularidade de funcionamento da caldeira. Como esperado, de acordo com os resultados observados nos ensaios de Ferreira (2013) e Rabaçal *et al.* (2013) o rendimento da caldeira aumenta com o aumento da potência térmica nas duas espécies, sendo que o maior aumento verifica-se entre a potência mínima e a média em qualquer um dos ensaios. Entre a potência mínima e a máxima observou-se, nas duas espécies, um aumento de cerca de 15 pontos percentuais no valor do rendimento. Os péletes de *Paulownia* apresentaram um rendimento muito aproximado ao do Pinho, embora um pouco superior, sendo a diferença maior na potência média (6 pontos percentuais).

Os resultados de Pinho AF e Pinho A1 nas três potências são muito semelhantes, o que se traduz em valores de rendimento idênticos, pelo que se pode aferir a continuidade de resultados obtidos, não havendo necessidade de continuar a utilizar sistematicamente os resultados dos ensaios do Pinho AF como termo de comparação; proceder-se-ão, não obstante, a algumas comparações nas análises seguintes, em situações específicas, justificadamente.

7.2.1 Fase de arranque

Nos ensaios iniciais, registaram-se as emissões de poluentes na fase de arranque; no entanto, devido a emissões muito altas de CO, o analisador disparava o alarme e era desligado imediatamente, como forma de evitar que se danificasse. Assim, optou-se por fazer leituras pontuais e, apenas, em condições de regime permanente.

Quanto às temperaturas dos gases de exaustão, assim como com a temperatura de entrada e saída de água, os respetivos valores eram medidos a partir do instante em que a caldeira era iniciada. A Figura 7.1 apresenta a evolução das temperaturas dos gases de exaustão para o Pinho A1 e *Paulownia* A1 nas três potências.

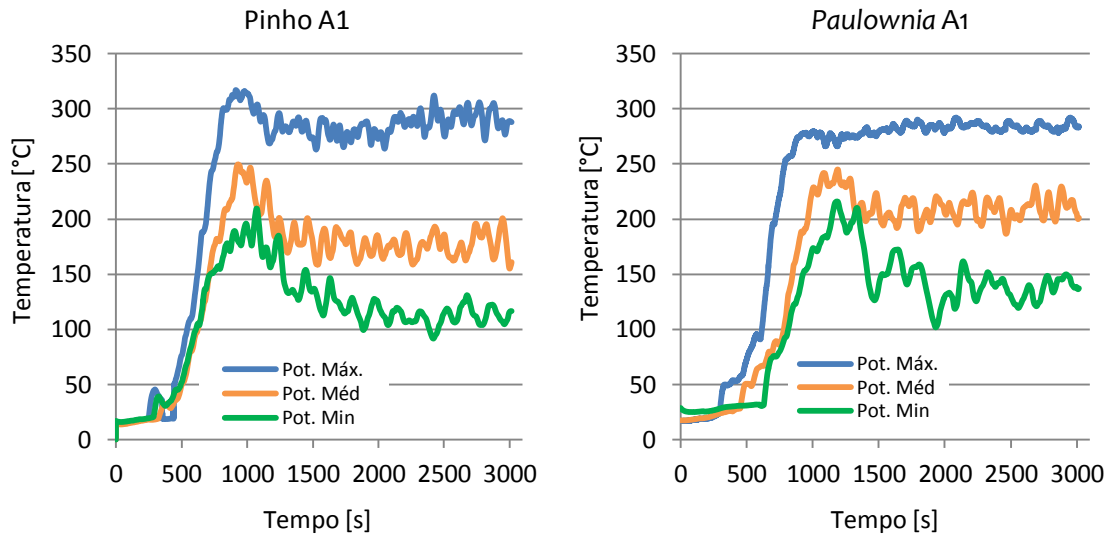


Figura 7.1 – Temperatura dos gases de exaustão na fase de arranque.

Numa fase inicial, em que ocorre a pré-carga de péletes em simultâneo com o aquecimento da resistência que provoca a ignição do combustível, não ocorre qualquer alteração da temperatura dos gases de exaustão. No instante em que começa a ocorrer a combustão com presença de chama acesa, observava-se uma subida, primeiro, lenta e gradual e depois, rapidamente. Ao atingir o pico, a temperatura começava a descer até se manter no mesmo valor, aproximadamente, o que demonstrava que o processo se encontrava em condições próximas do regime permanente. A chama da combustão não era constante, observava-se uma oscilação, igualmente refletida na temperatura dos gases de exaustão, motivada pela presença de maior ou menor quantidade de péletes no respetivo depósito, consequência da seleção dos tempos de funcionamento e pausa do sem-fim. Esta oscilação era mais perceptível na potência mínima e menos na máxima, como se pode observar pelo comportamento da temperatura nos gráficos anteriores, uma vez que o tempo de pausa diminui ao aumentar-se o nível de potência.

É possível observar um paralelismo entre o aumento do caudal de combustível e a subida da temperatura dos gases de exaustão devido a uma menor disponibilidade de ar na combustão à medida que o caudal mássico aumenta, a qual provoca uma subida da temperatura na câmara de combustão, afetando, de modo idêntico a de exaustão. O valor máximo da temperatura dos gases de exaustão é diferente para cada nível de potência, sendo mais alto na máxima e mais baixo na mínima, devido ao crescente caudal mássico de péletes. O valor mais alto na fase de arranque foi obtido no ensaio de Pinho A1 na potência máxima, atingindo um valor 317,08 °C.

7.2.2 Regime permanente

Depois do processo atingir o regime permanente, mantinha-se o ensaio a decorrer durante cerca de 30 minutos. Como já foi referido, a leitura das emissões foi realizada em períodos

homólogos da combustão em regime permanente. A Tabela 7.2 apresenta os valores médios das emissões, corrigidas para 13% O₂, tal como descrito em 4.4.5, em cada potência, assim como da temperatura dos gases de exaustão para os ensaios com Pinho A1 e *Paulownia* A1.

	Caudal péletes [kg/h]	Temperatura GE [°C]	O ₂ [% volume seco]	CO [ppm volume seco]	CO ₂ [% volume seco]	NO _x [ppm volume seco]
Pinho A1	1,15	115,67	19,35	3485,18	7,16	45,27
	1,85	177,41	17,89	1248,28	7,22	67,89
	3,39	287,01	14,89	201,71	7,37	78,52
<i>Paulownia</i> A1	1,12	137,26	18,62	4865,27	7,04	173,41
	1,80	210,94	15,42	1558,89	7,00	171,02
	3,06	284,67	14,34	1535,65	7,19	151,79

Tabela 7.2 - Ensaios experimentais nas três potências.

Tal como já se tinha verificado na fase de arranque, conforme o caudal dos péletes aumenta, também a temperatura dos gases de exaustão aumenta, sendo as temperaturas de *Paulownia* superiores às do Pinho, o que poderá estar relacionado com o facto do teor de humidade inicial dos péletes de *Paulownia* ser inferior ao do Pinho ou com uma possível maior facilidade de fratura dos péletes de *Paulownia*. Ambos os fatores promovem uma temperatura superior no leito da combustão por razões diferentes: o primeiro deve-se ao facto da energia na zona da reação de combustão se manter superior porque a parte desta energia que é utilizada para remover a humidade dos péletes é menor; o segundo está relacionado com a área superficial de contacto entre os péletes e o ar ser maior, facilitando a mistura, reduzindo, desta forma o tempo de difusão na combustão.

A concentração de O₂ e de CO diminui com o aumento de caudal de péletes, sendo que as duas espécies testadas apresentaram os valores mínimos de CO na potência máxima e os máximos na mínima, o que vai ao encontro do comportamento esperado, de acordo com os resultados obtidos por Ferreira (2013). Observa-se que a formação de CO₂ tem um comportamento idêntico nas duas espécies em relação à potência térmica, não apresentando variações significativas. Em termos da composição química das duas espécies, o valor de teor de azoto de *Paulownia* é superior ao do Pinho, como se pode observar na Tabela 6.2, o que poderá justificar a diferença dos valores de NO_x medidos entre as duas espécies. A influência do teor de azoto do combustível na formação de NO_x foi, igualmente, observada nos trabalhos de Rabaçal *et al.* (2013) e Vicente *et al.* (2014).

Em seguida, apresenta-se o modo como o oxigénio e o excesso de ar, a emissão de poluentes, o rendimento térmico e as perdas térmicas são influenciados. Nas comparações seguintes é referida a potência térmica e o caudal mássico de combustível mas, como estas são grandezas proporcionais, a influência da potência térmica pode expressar-se como a influência do caudal mássico.

7.2.3 Oxigénio e excesso de ar

Influência da potência térmica

A Figura 7.2 mostra a variação do oxigénio e excesso de ar em função do caudal mássico de péletes.

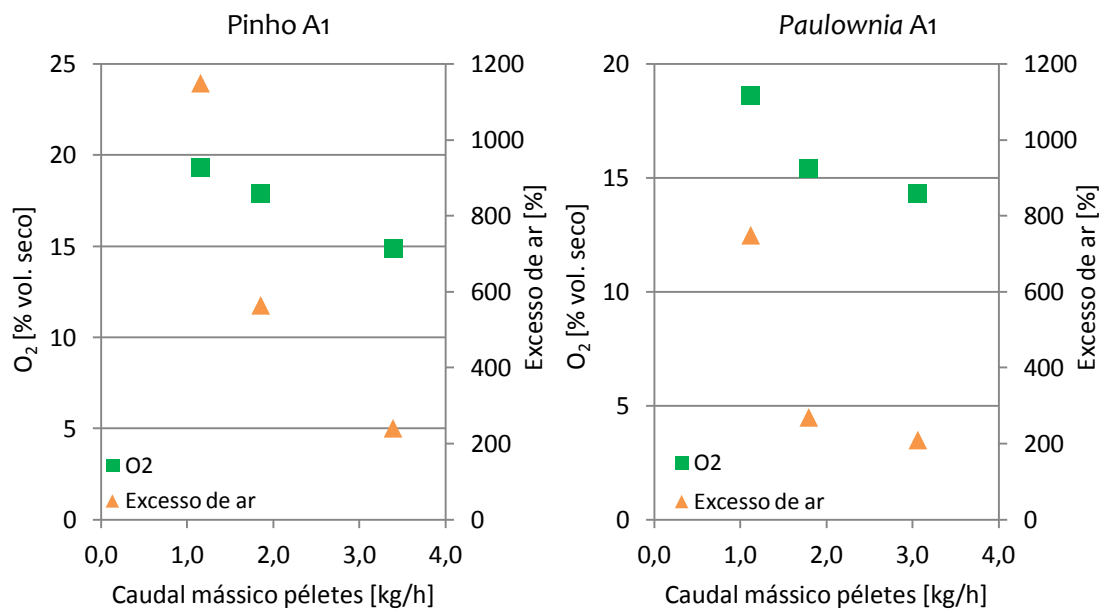


Figura 7.2 – Efeito do caudal de combustível na concentração de O₂ e excesso de ar.

Estabelecendo uma comparação tanto entre os níveis de potência de cada espécie, assim como entre as duas espécies, observa-se uma diminuição de O₂, tal como do excesso de ar, uma vez que este é dependente do teor de oxigénio disponível, o qual está relacionado com um crescente valor de caudal mássico de péletes e de temperatura da combustão. O mesmo comportamento foi observado nos trabalhos de Rabaçal *et al.* (2013), Sippula *et al.* (2007) e Dias *et al.* (2004). O que ocorre na caldeira é que o caudal de ar aumenta em cada nível de potência, não o suficiente, todavia, para existir uma quantidade de ar adequada ao caudal de péletes respetivo, uma vez que a caldeira não ajusta automaticamente o caudal de ar ao caudal de combustível.

7.2.4 Emissão de poluentes

Influência da potência térmica

A Figura 7.3 apresenta a variação da emissão de poluentes com o caudal de péletes.

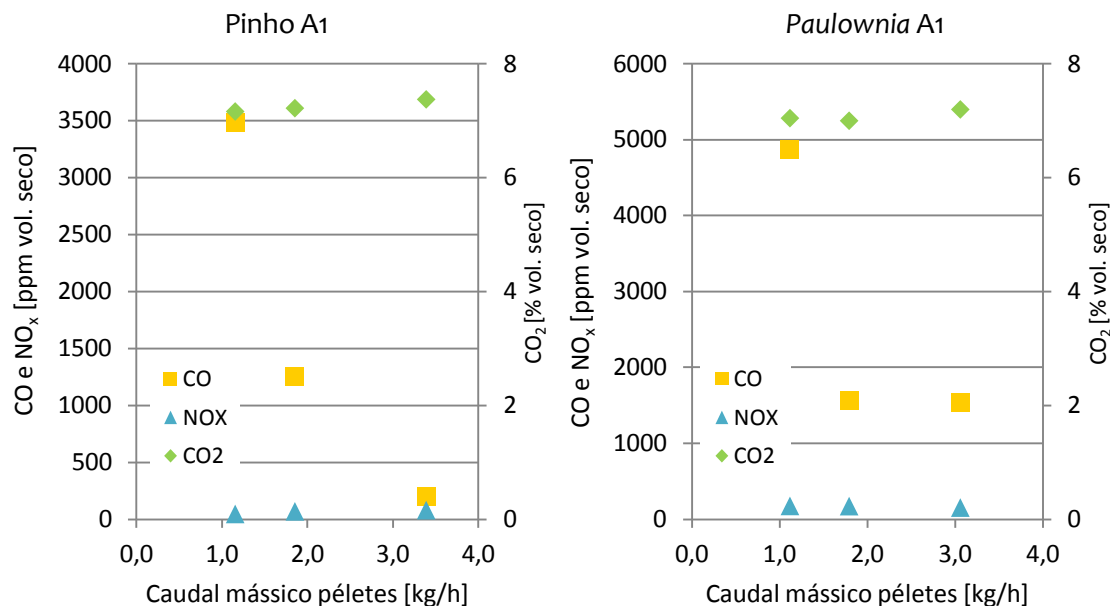


Figura 7.3 – Efeito do caudal de combustível na concentração de poluentes.

Uma maior concentração de CO nas emissões é, geralmente, indicador de uma combustão incompleta e, por isso, menos eficiente (Loo e Koppejan, 2008). Em relação às duas espécies, observa-se que as concentrações de CO diminuem com o aumento do caudal de péletes, o que sugere que as condições de potência máxima da caldeira são as mais propícias a uma combustão mais eficiente, uma vez que é nesta potência que o teor de CO é menor em comparação com os resultados obtidos nas potências inferiores. Os teores de CO de *Paulownia* são cerca de 1,4, 1,2 e 7,6 vezes superiores às de *Pinho*, em ordem crescente de potência. Relativamente aos resultados obtidos por Ferreira (2013), os resultados dos dois trabalhos são concordantes ao mostrar que é na potência máxima que se apresenta a menor concentração de CO. Por outro lado, todas as espécies do estudo referido revelaram uma diminuição mais acentuada neste nível de potência, sendo o comportamento de *Paulownia* um pouco diferente. Observa-se na potência máxima um caudal de péletes de *Paulownia* inferior ao de *Pinho* o que influenciou as condições de combustão, em especial, a temperatura e, conseqüentemente, o excesso de ar, o qual tem um grande impacto nas emissões de CO. A análise do efeito do oxigénio é apresentada no ponto seguinte.

Pode, também, observar-se que a formação de NO_x apresenta uma variação pouco expressiva com o aumento do caudal de combustível, o que indica que a potência térmica não tem muita influência na formação de NO_x na queima de qualquer uma das espécies. A *Paulownia* apresenta valores superiores aos dos do *Pinho*, o que era de prever, uma vez que

o conteúdo de azoto de *Paulownia* é um pouco superior, tal como se pode observar na composição química das duas espécies na Tabela 6.2.

A influência do caudal de combustível nas emissões de CO_2 não é significativa, contudo pode observar-se que estas são superiores para a *Paulownia*

Influência do oxigénio

A Figura 7.4 apresenta a variação das emissões de CO, NO_x e CO_2 em função do teor de oxigénio.

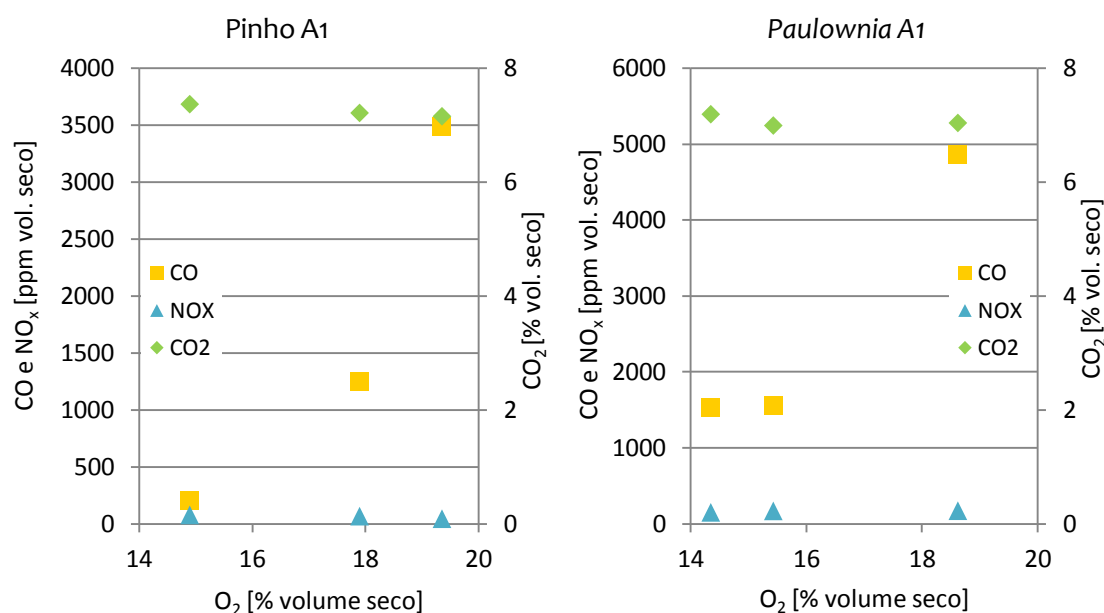


Figura 7.4 – Influência do oxigénio nas emissões poluentes.

A literatura refere que o fator que mais influencia o teor de CO é o excesso de ar presente na combustão, resultante de temperaturas baixas no leito da combustão, dum mistura pouco eficiente entre o combustível e o ar e dum tempo de residência curto desta mistura inflamável na câmara de combustão (Loo e Koppejan, 2008). Durante a combustão, ocorre a oxidação de CO em CO_2 , a qual apenas acontece se existir ar disponível, sendo a taxa a que esta conversão se realiza dependente, essencialmente, da temperatura na câmara de combustão (Loo e Koppejan, 2008). Caso haja um excesso de ar reduzido, a quantidade de ar disponível será inferior e, caso o excesso de ar seja demasiado elevado, a temperatura na câmara de combustão diminui. As duas situações influenciam, negativamente, a conversão de CO em CO_2 , não promovendo a benéfica diminuição de emissões de CO (Loo e Koppejan, 2008).

Tal como observado no ponto anterior, o comportamento de *Paulownia*, relativamente às emissões de CO diverge um pouco do do Pinho na potência máxima. Observando a evolução da temperatura dos gases de exaustão na Tabela 7.2, verifica-se que a temperatura da *Paulownia* é relativamente superior à do Pinho (21,6 e 33,5 °C na potência

mínima e na média, respetivamente), exceto na potência máxima, em que o valor das duas espécies é semelhante, verificando-se uma diferença de $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a *Paulownia*, sugerindo que a baixa temperatura na potência máxima é o fator que mais influencia o excesso de ar e, conseqüentemente, a redução de CO, muito menos acentuada na *Paulownia*.

Verifica-se que um aumento de O_2 provoca um aumento das concentrações de CO nos ensaios com Pinho; onde se verifica maior teor de CO_2 e menor de CO é na potência máxima, porque, embora sejam os ensaios em que há menor excesso de ar, deverá ser um valor, ainda, demasiado alto.

A emissão de NO_x diminui com o aumento do O_2 , nos ensaios de Pinho, tendo esta relação, também sido observada nos resultados obtidos nos ensaios com péletes comerciais de Petrocelli e Lezzi (2014). Em relação à *Paulownia*, o comportamento foi inverso, tal como verificado nos ensaios de Ferreira (2013) com as espécies Giesta e a Mimosa. No entanto, as diferenças apresentadas são muito reduzidas, pelo que, tal como verificado na influência da potência térmica, o O_2 não tem uma influência expressiva nas emissões de NO_x , sendo o teor de azoto inicial do combustível o fator mais significativo.

Influência do combustível

A Figura 7.5 apresenta a emissão de poluentes das duas espécies nas potências mínima, média e máxima em função do tipo de combustível.

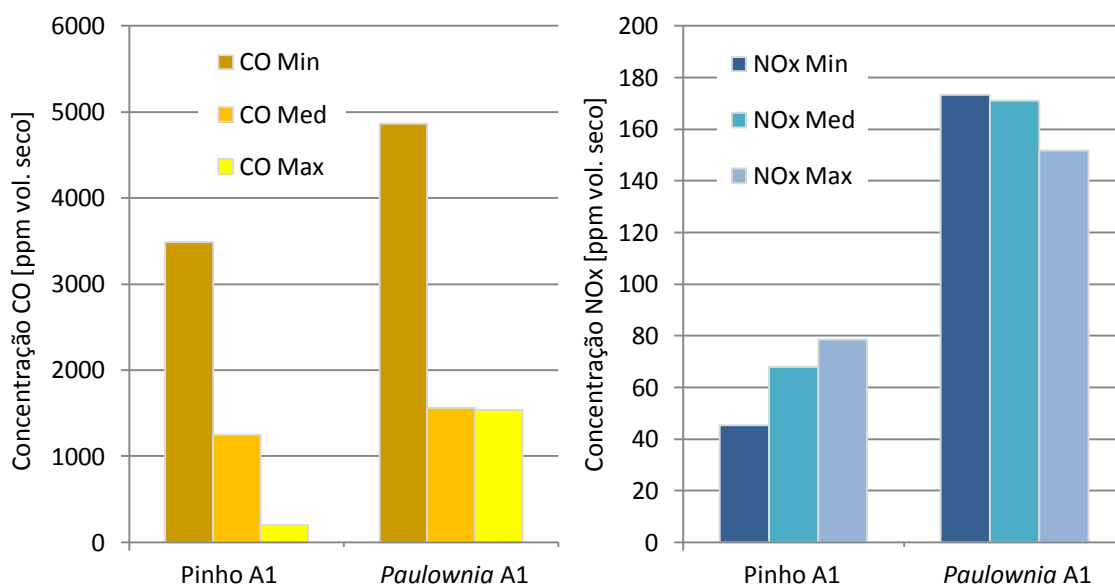


Figura 7.5 – Influência do tipo de combustível nas emissões de CO e NO_x .

Tal como já foi observado nos pontos anteriores, o teor de CO tem uma relação inversa com a potência térmica, sendo superior na *Paulownia*, em qualquer uma das potências. As caldeiras são ajustadas para a utilização de péletes comerciais, daí as condições de queima não serem as ideais para péletes de outras espécies, cuja composição química e

comportamento durante condições idênticas do processo é diferente. Para aferir uma esperada diminuição da concentração de CO, seria necessário realizar ensaios nos três níveis de potência com os péletes de *Paulownia* utilizando valores de excesso de ar diferentes dos de Pinho, uma vez que a redução de excesso de ar, desde que não seja ao ponto de reduzir excessivamente a disponibilidade do ar, provou ser o fator que mais influenciou a diminuição das emissões de CO.

A norma europeia EN 14785:2006 define os requisitos de projeto, desempenho, segurança e emissões de poluentes que este tipo de caldeiras domésticas têm que cumprir para serem comercializadas. Relativamente aos limites de emissões de CO, a norma estabelece que, para as potências mínima e máxima, os limites não devem ser superiores a 600 e 400 ppm a 13% O₂, respetivamente. Nos ensaios realizados durante este estudo, para a potência mínima estes valores não são respeitados mas, para a máxima, o Pinho cumpriu o estabelecido.

Verificou-se um aumento de NO_x com o aumento da potência térmica no Pinho e o comportamento inverso na *Paulownia*, tal como observado nos ensaios de Ferreira (2013), apresentando, no entanto, as espécies alternativas desse estudo, emissões de NO_x muito superiores às de *Paulownia*, em concreto, conforme a potência as emissões variavam entre 217 e 534 ppm, enquanto as de *Paulownia* não ultrapassaram 174 ppm. Contudo, a maior diferença residiu na comparação entre Pinho e *Paulownia*, uma vez que as emissões são muito superiores nesta última. A formação de NO_x pode surgir através da formação de NO_x combustível, devido à existência de compostos de azoto no combustível libertados a baixas temperaturas, de NO_x térmico, por causa de temperaturas de chama elevadas e NO_x imediato (Pinho, 2014), cujo processo de formação ainda é pouco compreendido. O NO_x térmico e o imediato não são relevantes na combustão de biomassa porque ocorrem a temperaturas mais elevadas (1300 °C) e misturas ricas, respetivamente (Loo e Koppejan, 2008); portanto, nestes ensaios a formação de NO_x, dever-se-á ao NO_x combustível.

A norma não refere limites para o azoto, provavelmente porque a formação deste nas gamas de temperatura a que ocorre a combustão em caldeiras domésticas, é maioritariamente influenciada pelo teor de azoto inicialmente presente nos péletes e esse valor máximo já está assegurado pelo cumprimento das normas EN-plus a que os péletes comerciais estão sujeitos.

7.2.5 Rendimento da caldeira

Influência da potência térmica e do combustível

Recorrendo aos valores da Tabela 7.1, expõe-se de que forma o caudal mássico influencia o rendimento da caldeira nos ensaios em cada nível de potência (Figura 7.6).

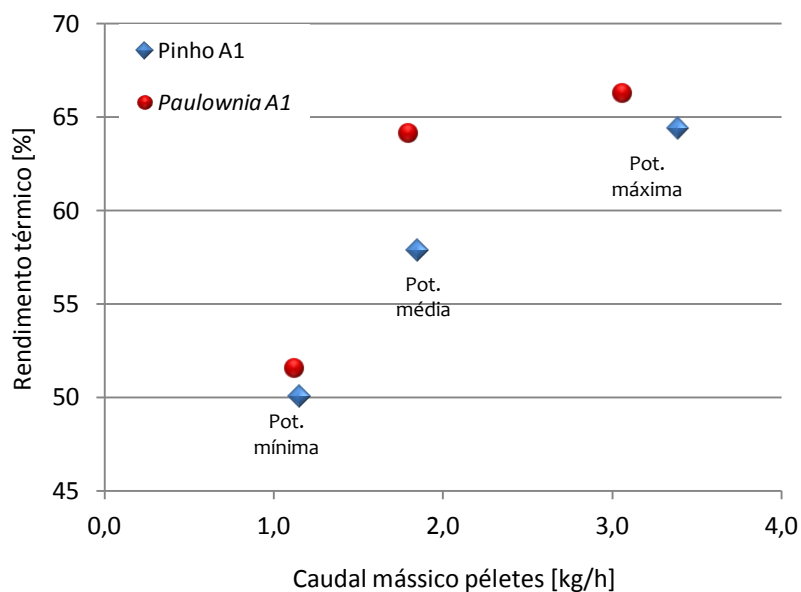


Figura 7.6 – Influência do caudal de combustível no rendimento térmico.

O que se conclui, em primeiro lugar, é que o caudal mássico de pélletes tem grande influência sobre o rendimento da caldeira, aumentando este 14 pontos percentuais no Pinho e 15 na *Paulownia* entre a potência mínima e a máxima. Utilizando os pélletes de *Paulownia*, obteve-se um rendimento superior ao do Pinho em mais 1,5, 6 e 1,9 pontos percentuais, respetivamente, do menor para o maior caudal de pélletes consumido.

Já se tinha estabelecido, no item que apresenta a influência da potência térmica, que a concentração de CO diminui com o aumento da potência térmica e uma menor concentração de CO nas emissões é indicador de uma combustão mais completa e, por isso, mais eficiente (Loo e Koppejan, 2008), o que se pode comprovar pelos valores de rendimento. A diminuição da concentração de CO, entre a potência mínima e a média, acompanhou o aumento do rendimento em 7,8 pontos percentuais nos ensaios de Pinho e 12,5 nos de *Paulownia*. Na potência máxima, embora a concentração de CO tenha apresentado uma diminuição pouco expressiva com os pélletes de *Paulownia*, o rendimento aumentou o seu valor em 2,2 pontos percentuais, devido ao aumento da potência térmica. Os ensaios com os pélletes de Pinho na potência máxima apresentaram o valor mínimo de CO, com um aumento do valor de rendimento de 6,6 pontos percentuais.

Relativamente aos limites de rendimento para caldeiras domésticas, a norma europeia EN 14785:2006 define que, para as potências mínima e máxima, os valores não devem ser inferiores a 70 e 75%, respetivamente. No que diz respeito à utilização da caldeira com as indicações do fabricante, nenhuma das espécies cumpre os requisitos.

Influência do excesso de ar e da qualidade do isolamento

Após realização dos ensaios com Pinho e *Paulownia* em condições idênticas e, no sentido de observar o efeito no rendimento térmico, refizeram-se novos ensaios com valores inferiores de excesso de ar. Para tal, alterou-se, em cada ensaio e, progressivamente, o fornecimento de ar à combustão, para determinar o valor de excesso de ar com o qual se obtinha o valor máximo de rendimento. Em alguns destes ensaios verificou-se a diminuição da temperatura na câmara de combustão ao ponto dos produtos da combustão atingirem a temperatura de ponto de orvalho, provocando a interrupção da combustão pelo sistema de segurança da caldeira. Existe uma sonda de temperatura colocada no na tubagem dos gases de exaustão e, caso a temperatura medida seja inferior a 60 °C na fase de estabilização, a caldeira desliga-se automaticamente; este procedimento existe para precaver a falta de combustível na caldeira. Para ser possível realizar os ensaios e reduzir as perdas por convecção e radiação e, obter simultaneamente, um maior valor de rendimento através do aumento da potência útil, resultante do aumento da temperatura na câmara de combustão e o conseqüente aumento da temperatura de saída da água, foi necessário isolar termicamente a caldeira. Aplicaram-se placas de poliuretano injetado com 40 mm de espessura em todas as suas faces, com exceção do vidro frontal, onde era colocada manta isoladora de lã de vidro com 40 mm de espessura, como pode observar-se na Figura. 7.7.



Figura 7.7 – Isolamento da caldeira.

Devido à limitação de disponibilidade de péletes de *Paulownia*, a maioria dos ensaios realizou-se com Pinho e, assim que se obtinha um valor máximo de rendimento, repetia-se o ensaio com *Paulownia* dentro das mesmas gamas de excesso de ar. Pretenderam-se, também, medir as emissões de poluentes, mas o facto de, enquanto não se tinha uma percepção do ponto de funcionamento, se estar a queimar com teores de CO, sobretudo,

muito para além da gama admitida pelo analisador utilizado, sendo que, nessas situações, se desligava automaticamente, impediram o registo em contínuo de todos os valores.

O efeito isolado do excesso de ar, desde que não seja tão reduzido ao nível de permitir que os produtos da combustão atinjam a temperatura de ponto de orvalho nem que as emissões de CO se tornem muito altas, mostrou provocar um aumento acentuado do valor de rendimento. Com a aplicação do isolamento obteve-se um ligeiro aumento do rendimento mas à custa de emissões demasiado elevadas de CO. A Tabela 7.3 apresenta os valores médios obtidos, em regime permanente para cada potência térmica, com as seguintes especificações.

- Pinho A1: péletes de Pinho A, caldeira não isolada e parâmetros do fabricante;
- Pinho A2: péletes de Pinho A, caldeira não isolada, menor excesso de ar/rendimento máximo;
- Pinho A3: péletes de Pinho A, caldeira isolada, menor excesso de ar/rendimento máximo;
- *Paulownia* A1: péletes de *Paulownia*, caldeira não isolada e parâmetros do fabricante.
- *Paulownia* A3: péletes de *Paulownia*, caldeira isolada, menor excesso de ar/rendimento máximo.

	Potência térmica [kW]	Caudal péletes [kg/h]	Potência útil [kW]	Caudal água [l/min]	Rendimento térmico [%]
Potência Mínima					
Pinho A1	6,01	1,15	3,01	9,44	50,06
Pinho A2	5,69	1,17	4,26	9,38	74,88
Pinho A3	5,86	1,20	4,60	9,53	78,51
Paulownia A1	5,70	1,12	2,94	9,51	51,58
Paulownia A3	6,61	1,09	5,02	9,42	75,97
Potência Média					
Pinho A1	9,66	1,85	5,59	9,33	57,89
Pinho A2	9,64	1,85	7,11	9,67	73,70
Pinho A3	9,28	1,78	7,20	9,52	77,65
Paulownia A1	9,13	1,80	5,86	9,51	64,13
Paulownia A3	9,40	1,85	6,97	9,52	74,21
Potência Máxima					
Pinho A1	17,68	3,39	11,40	9,51	64,44
Pinho A2	18,09	3,47	12,53	9,54	69,29
Pinho A3	16,66	3,19	12,90	9,45	77,45
Paulownia A1	15,57	3,06	10,33	9,50	66,30
Paulownia A3	14,29	2,81	11,94	9,50	83,54

Tabela 7.3 – Ensaios experimentais em diferentes condições.

O valor do caudal de água manteve-se idêntico em todos os ensaios e os valores de caudais de péletes mantiveram-se aproximados nas duas espécies em cada nível de potência para permitir a comparação de resultados. Apresenta-se, a seguir, de forma gráfica, a influência de menor valor de excesso de ar (Figura 7.8) e isolamento da caldeira (Figura 7.9) no rendimento obtido nos ensaios de Pinho.

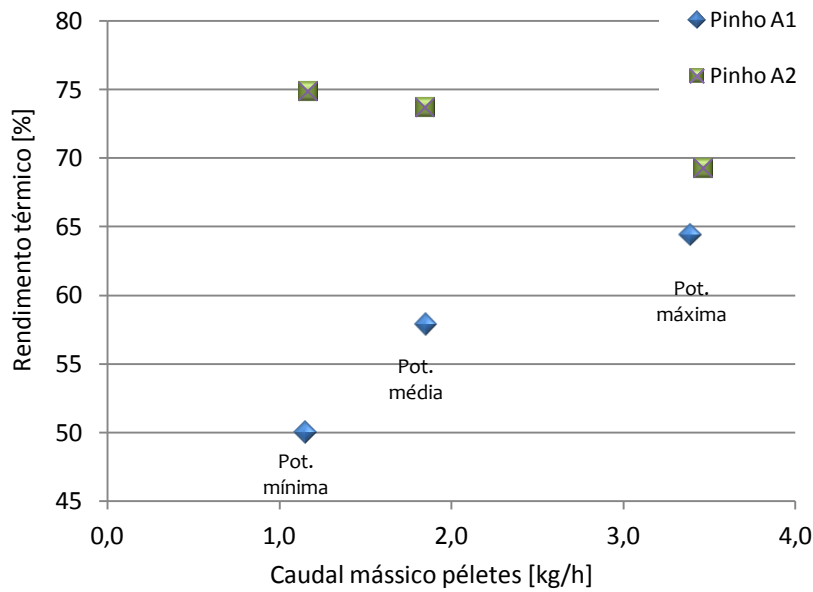


Figura 7.8 – Pinho: efeito do excesso de ar no rendimento térmico.

O que se conclui, em primeiro lugar, é que a diminuição do excesso de ar influencia, muito significativamente, o rendimento em todos os ensaios realizados. Na potência mínima, é evidente que a diminuição do excesso de ar teve consequências no rendimento da caldeira, com um incremento de 24,8 pontos percentuais. O comportamento na potência média é idêntico ao observado na potência mínima, com o rendimento da caldeira a aumentar 15,8 pontos percentuais. No nível máximo de operação da caldeira, o aumento não é tão evidente relativamente ao que se registou nos outros níveis, com um aumento de 4,8 pontos percentuais. Comparando os valores obtidos com o efeito do excesso de ar entre a potência média e a máxima, observa-se uma diminuição do valor do rendimento em 4,4 pontos percentuais, que se deve ao facto do aumento do caudal de péletes em conjunto com o caudal de ar utilizado não ter promovido uma combustão tão eficiente. Verifica-se a tendência de aproximação dos resultados de rendimento da caldeira utilizando o valor de excesso de ar indicado pelo fabricante e o menor excesso de ar conforme se aproxima da potência máxima, o que indica que a redução do valor de excesso de ar tem mais influência nas potências mínima e média, provavelmente porque o menor caudal de combustível presente nestas potências necessita de uma menor quantidade de ar, do que o estava estipulado pelo fabricante, para obter valores superiores de rendimento.

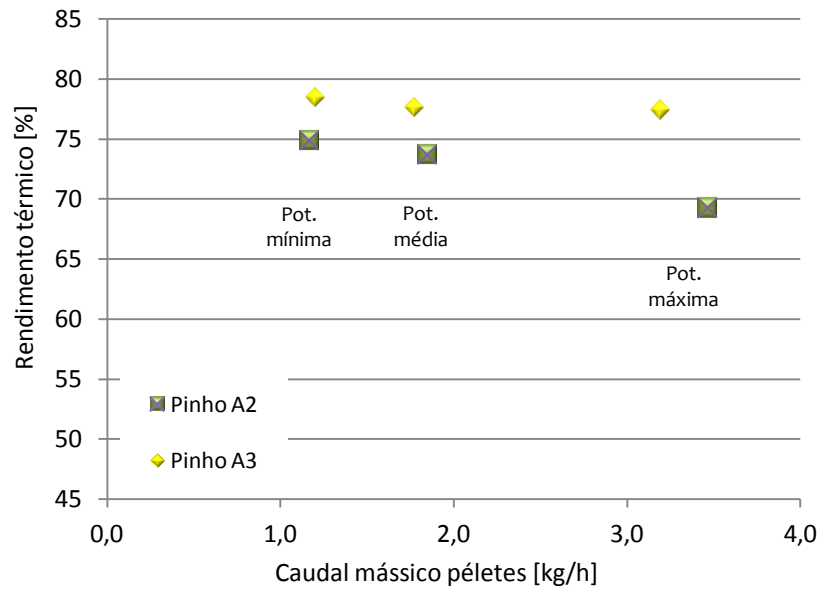


Figura 7.9 – Pinho: efeito do isolamento no rendimento térmico.

A aplicação do isolamento aproxima o comportamento desta caldeira de testes ao duma caldeira na sua aplicação doméstica e, embora os valores de excesso de ar sejam inferiores aos designados pelo fabricante, observa-se que se respeitam os valores de rendimento estabelecidos pela norma EN 14785:2006. Verifica-se um incremento do valor do rendimento em todos níveis de potência, sendo de 3,6 pontos percentuais para a mínima, 3,9 para a média e 8,2 para a máxima. A influência do isolamento é mais significativo na potência máxima, uma vez que é nesta que se verificavam os maiores valores de perdas por convecção e radiação e a existência do isolamento induziu a redução destas perdas e um consequente aumento da potência útil.

Apresenta-se, a seguir (Figura 7.10), a variação do rendimento da caldeira utilizando péletes de *Paulownia*, neste caso, com o efeito conjunto do isolamento e menor excesso de ar, uma vez que não foi possível fazer ensaios avaliando cada um dos efeitos devido à reduzida disponibilidade de péletes.

7. Resultados e discussão

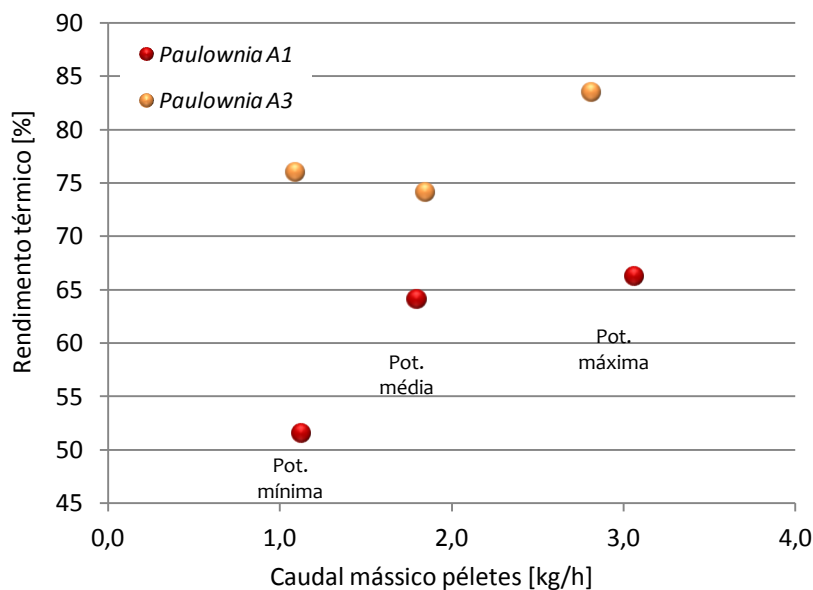


Figura 7.10 – *Paulownia*: efeito do excesso de ar e do isolamento no rendimento térmico.

Os valores e tendência do rendimento de Pinho e de *Paulownia* são aproximados em cada nível de opera o da caldeira, pelo que se pode extrapolar que o efeito do excesso de ar e do isolamento seja idêntico nas duas espécies. Na potência mínima, o rendimento aumentou cerca de 24 pontos percentuais e na média cerca de 10. O valor do rendimento de A3 na potência máxima, 83,5%, é o que mais se destaca, observando-se um aumento de 17,2 pontos percentuais quando comparado com o de A1. De forma análoga ao Pinho, os valores de rendimento cumprem o valor mínimo estipulado pela norma.

Comparando os resultados entre Pinho A3 e *Paulownia* A3, verifica-se que os valores de rendimento de *Paulownia* são um pouco inferiores em rela o ao Pinho, 2,5 e 3,4 pontos percentuais abaixo, na potência mínima e média respetivamente, exceto na potência máxima, na qual se verifica a maior diferença, cerca de 6,1 superior. Observa-se que, na potência máxima, o caudal mássico de *Paulownia* apresenta um valor um pouco inferior ao Pinho, tanto nestes ensaios com menor excesso de ar como nos realizados com os parâmetros do fabricante. Como já foi referido, os péletes de *Paulownia* tinham um comprimento superior, pelo que foi necessário ajustar a alimenta o de péletes na caldeira, de forma a obter caudais aproximados. Nas potências mínima e média obtiveram-se caudais aproximados mas, na potência máxima, a tarefa revelou-se mais difícil e, embora tenham sido realizados vários ensaios para tentar obter a proximidade de valores, tal não foi alcançado como se pretendia, uma vez que não   possível definir um caudal mássico específico na caldeira. No entanto, têm se pode verificar que, embora o caudal seja um pouco menor, isso não impediu o aumento do rendimento em rela o ao Pinho, uma vez que o menor valor de caudal não foi suficiente para baixar o valor do rendimento, contrabalançando com o efeito positivo do menor excesso de ar e a influência do isolamento na diminui o de perdas por convec o e radia o, tal como já se tinha observado no Pinho.

7.2.6 Perdas térmicas na caldeira

Ainda que o valor das perdas por convecção e radiação seja um valor mínimo (a sua porção no total das perdas varia entre 1,3 e 9%), quando comparado com os restantes valores em jogo, admitiu-se que as perdas deste tipo representem a diferença que permite fechar o balanço térmico. A Tabela 7.4 reflete os valores de perdas e respetivo contributo no total das perdas para as três potências.

	Potência térmica [kW]	Perdas chaminé [kW]	Perdas conv+rad [kW]	Rendimento térmico [%]	% Perdas chaminé [%]	% Perdas conv+rad [%]
Potência mínima						
Pinho A1	6,01	2,54	0,46	50,06	42,26	7,68
Paulownia A1	5,70	2,25	0,51	51,58	39,45	8,97
Potência média						
Pinho A1	9,66	3,41	0,66	57,89	35,30	6,81
Paulownia A1	9,13	2,54	0,74	64,13	27,81	8,05
Potência máxima						
Pinho A1	17,68	5,89	0,40	64,44	33,31	2,25
Paulownia A1	15,57	5,04	0,21	66,30	32,36	1,34

Tabela 7.4 – Perdas térmicas.

Os ensaios na potência mínima são os que apresentam valores de perdas pela chaminé inferiores, em termos absolutos, mas as maiores percentagens de perdas dos três níveis de potência. Tal era esperado devido à temperatura inferior dos gases de exaustão na potência mínima, valores apresentados na Tabela 7.2 Nos ensaios com Pinho, tal como com *Paulownia*, na potência mínima, a percentagem de perdas pela chaminé é a mais alta, atingindo um valor de 42,3% e 39,4%, respetivamente. Estes valores elevados são provocados por um valor de excesso de ar demasiado alto, o qual provoca uma diminuição da potência útil, tendo em conta o caudal de péletes utilizado; o que vai ao encontro do facto do valor de rendimento ser o mais baixo de todos os ensaios realizados.

O valor percentual das perdas por convecção e radiação na potência média diminui ligeiramente quando comparado com a redução que a potência máxima apresenta. Já as perdas pela chaminé mostraram uma redução percentual muito significativa, 7 pontos percentuais para o Pinho e 11,6 para a *Paulownia*, comparando entre a potência média e a mínima, o que se pode explicar pelo facto da energia transferida para a água ser superior o suficiente para contrabalançar o aumento da temperatura dos gases de exaustão.

Na potência máxima, a redução da percentagem de perdas por convecção e radiação é mais acentuada do que a das perdas pela chaminé. Nos ensaios de *Paulownia* verificou-se, até, um aumento nos valores percentuais de perdas pela chaminé, o que se pode explicar por uma baixa transferência de energia para a água, tal como se pode verificar pelo valor do rendimento. O facto dos valores de rendimento térmico não serem tão elevados como era esperado, vai ao encontro da constatação de valores altos de perdas térmicas, indicando que as condições em que a combustão se realizou não conduziram à obtenção de uma eficiência aceitável para o processo. O aumento da potência térmica leva a que haja menor excesso de ar disponível na combustão, o que por sua vez provoca um aumento da temperatura na câmara de combustão, assim como da dos gases de exaustão, daí os valores absolutos de perdas térmicas pela chaminé (parte das perdas com maior influência) aumentarem com o aumento da potência térmica. Por outro lado, o aumento da temperatura na câmara de combustão beneficia uma maior transferência de energia para a água. O balanço entre estas duas grandezas define se ocorre uma diminuição das perdas e aumento do rendimento ou o contrário.

Um dos objetivos era determinar o valor das perdas térmicas nos ensaios com diferentes valores de excesso de ar e isolamento da caldeira, apresentados no item anterior, onde se observou um grande aumento do rendimento provocado, por um lado, pela diminuição das perdas por convecção e radiação e, por outro lado, pelos valores superiores de potência útil devido ao menor excesso de ar presente na combustão. Todavia, o cálculo destas perdas exige que se conheça a concentração das emissões de poluentes para a quantificação das PNQ e, como a emissão de CO foi demasiada elevada para a gama permitida pelo analisador, sendo que, o analisador era desligado nessas condições, não foi possível registar os valores de forma permanente e comprovar uma expectável diminuição significativa dos valores das perdas.

Influência da potência térmica

A Figura 7.11 apresenta as perdas pela chaminé em comparação com a temperatura dos gases de exaustão, em função do caudal de péletes de Pinho e *Paulownia*.

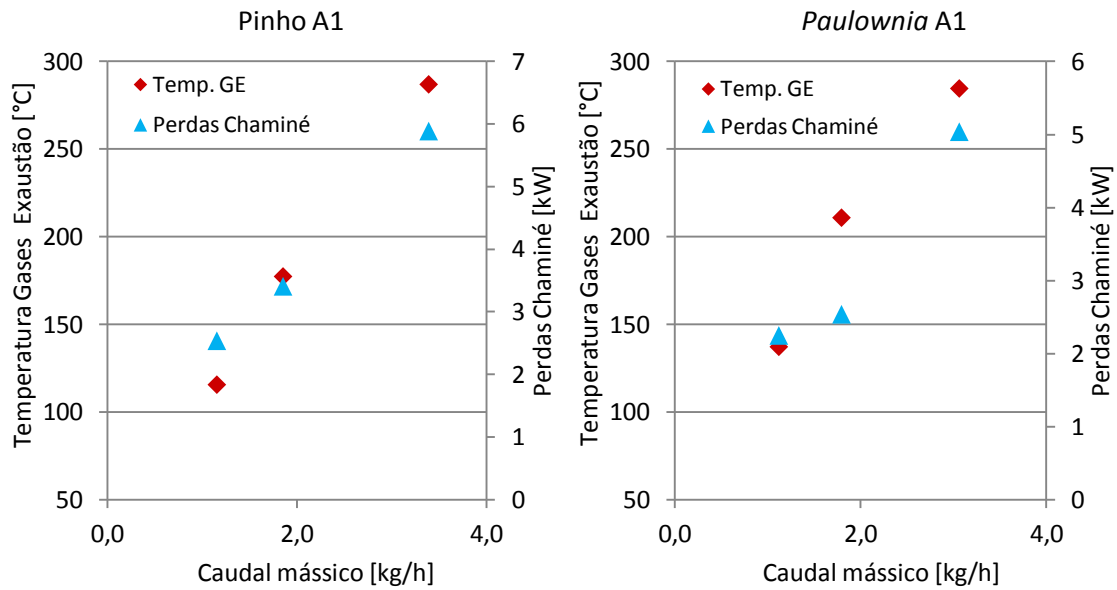


Figura 7.11 – Influência do caudal de combustível nas perdas pela chaminé e TGE.

A *Paulownia* apresenta, em todas as potências térmicas, valores de perdas pela chaminé inferiores às do Pinho. Pode observar-se que as perdas térmicas são influenciadas de forma direta pelo caudal mássico, tal como a temperatura dos gases de exaustão. O excesso de ar diminui com o aumento da potência térmica, o que provoca um aumento da temperatura na câmara de combustão e, conseqüentemente, da dos gases de exaustão, como se pode verificar na Figura 7.2, devido à menor disponibilidade de ar. As perdas térmicas pela chaminé aumentam devido ao aumento da temperatura dos gases de exaustão.

8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este estudo pretendia avaliar a biomassa de *Paulownia* enquanto combustível na forma peletizada, na perspetiva do desempenho energético e ambiental numa caldeira doméstica. A espécie *Paulownia* foi escolhida por apresentar características de interesse idênticas às espécies comercialmente utilizadas para produzir péletes, por ser de crescimento muito rápido e por revelar que teria um desenvolvimento ótimo em Portugal. Além dos de *Paulownia*, foram testados péletes comerciais de Pinho, no sentido de estabelecer comparações entre as duas espécies e com os resultados apresentados na tese de Ferreira (2013). Para tal, preparou-se uma instalação experimental que consistia numa caldeira doméstica e nos instrumentos do sistema de monitorização das temperaturas de entrada e saída de água da caldeira e dos gases de exaustão, do caudal de água e da composição dos gases de exaustão. Foram realizados ensaios para cada uma das espécies em três níveis de potência distintos, mínimo, médio e máximo, que se diferenciavam pelo crescente caudal mássico de péletes e pela quantidade de ar fornecida à combustão. Analisou-se o comportamento das duas espécies na fase de arranque e em condições aproximadas ao regime permanente.

A primeira dificuldade apresentou-se na obtenção de biomassa de *Paulownia* e, uma vez que em Portugal não se encontraram produtores, foi necessário contactar diversas empresas espanholas até surgir uma que se mostrasse disponível a apoiar este trabalho, foi o caso da *Maderas Alvarez Oroza SL*, sediada na Galiza. Esta empresa forneceu 200 kg, em forma de troncos, da espécie *Cotevisa 2* que é um cruzamento, obtido em laboratório, entre duas espécies de *Paulownia*, a *P. elongata* e a *P. fortunei*, e que se caracteriza por ser híbrida, não invasora e estéril. Após o corte em formatos mais pequenos, pretendia-se realizar a secagem de toda a matéria-prima na estufa solar existente no telhado da ESTGV, contudo, devido ao facto da estufa ser necessária para outros trabalhos e às condições meteorológicas desfavoráveis desse período, foi necessário recorrer, também, à exposição ao ar ambiente e a uma estufa laboratorial a convecção forçada. Procedeu-se, então, ao destroçamento e verificou-se que as amostras apresentavam teores de humidade entre 9,6 e 14,2%, com diâmetro médio de partículas de $827 \pm 65 \mu\text{m}$. A peletização foi realizada numa peletizadora laboratorial onde se obtiveram péletes com um diâmetro médio de 6,1 mm, com um comprimento médio de 39,7 mm, teores de humidade que variavam entre 5,3 e 7,2% e com uma durabilidade mecânica de 98,7%. O comprimento dos péletes, embora dentro dos limites exigidos pela norma, era muito superior ao dos péletes de Pinho, o que dificultou a tarefa de obter caudais de combustível idênticos entre as duas espécies, obrigando a um gasto maior do que era previsto. Este facto provocou uma redução na eficiência do processo, devido à influência da razão área/volume dos péletes e da irregularidade do caudal. Por estes motivos, optou-se por quebrar os péletes manualmente, de forma a terem um comprimento aproximado aos de Pinho, cerca de 20 mm. A análise dos resultados nesta dissertação recai sobre a queima de péletes após o corte.

8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Entre o início dos testes na caldeira e a instalação final ocorreram diversas questões que impediram uma progressão linear do presente trabalho: fugas de água que obrigaram a refazer as ligações entre os tubos e a realizar diversos ensaios até que o sistema se encontrasse nas condições apropriadas, testes efetuados na instalação inicial para aquecimento de água do depósito que provocaram pequenas inundações de água no LTTC, medições erradas dos termopares devido ao seu posicionamento incorreto na tubagem, substituição de termopares com as consequentes recalibrações, deterioração da turbina inicial, obrigando à sua substituição e a refazer a calibração e todas as dificuldades subsequentes do diferente comprimento de péletes de *Paulownia*.

Estava previsto o aproveitamento de parte da energia térmica gerada durante a combustão para o aquecimento da água do depósito, tendo sido a instalação da caldeira e instrumentos de monitorização preparados para o efeito. Após a realização de inúmeros ensaios, observou-se em todos eles, um continuado aumento da temperatura da água, obrigando a parar o processo por questões de segurança. Assim, o objetivo de atingir as condições de regime permanente não foi possível, razão pela qual foi necessário alterar a instalação, de forma que a água que entrava na caldeira não sofresse qualquer aproveitamento.

Durante a etapa de arranque, a emissão de poluentes, em especial de CO, era de tal forma elevada, que não foi possível medi-las com o analisador utilizado, para além de haver sempre o receio de o danificar de cada vez que ficava exposto a situações de saturação. Observava-se uma oscilação da chama de combustão, cuja visibilidade diminuía ao aumentar o nível de potência, uma vez que o tempo de pausa do sem-fim na alimentação do combustível diminuía. Verificou-se um acompanhamento do aumento da temperatura dos gases de exaustão com o incremento do caudal de péletes.

No regime permanente, avaliou-se o modo como o oxigénio e o excesso de ar, a emissão de poluentes, o rendimento térmico e as perdas térmicas variavam. Observou-se que as temperaturas dos gases de exaustão do Pinho são inferiores às de *Paulownia*, o que poderá ter sido motivado por um teor de humidade inicial e/ou por uma maior facilidade de quebra dos péletes de *Paulownia*, ambos os fatores fomentando uma temperatura superior na câmara de combustão.

Revelou-se que a potência térmica é inversamente proporcional à disponibilidade de oxigénio e, conseqüentemente, ao valor do excesso de ar. Ao aumentar a potência térmica, ou o caudal mássico, o caudal de ar da caldeira, definido pelo fabricante, aumenta, mas não ao ponto, no entanto, de permitir que essa quantidade de ar seja ajustada ao caudal de combustível respetivo.

As emissões de CO na queima de *Paulownia* e de Pinho demonstraram que estas diminuem com o aumento da potência térmica e que as de *Paulownia* são 1,4, 1,25 e 7,6 vezes superiores às de Pinho, analisando da potência mínima para a máxima. Verificou-se, nos

ensaios de *Paulownia*, uma redução muito ligeira das emissões de CO na potência máxima, facto provavelmente influenciado pelo menor caudal de combustível, relativamente ao do Pinho, obtido nesta potência, o que provocou uma diminuição da temperatura de combustão. De facto, verificou-se que a temperatura dos gases de exaustão da *Paulownia* é ligeiramente inferior à do Pinho na potência máxima, o que se desvia do comportamento nos outros níveis de potência onde é significativamente superior, indicando que a temperatura inferior na potência máxima é o fator que mais influencia este comportamento. A influência do tipo de combustível nas emissões de CO poderá estar relacionada com o facto de as condições de queima, neste tipo de caldeiras domésticas, estarem mais ajustadas às espécies habitualmente utilizadas para produzir péletes do que a outras alternativas. Pela norma que define os limites máximos de emissões de CO para caldeiras domésticas, os valores das duas espécies na potência mínima (600 ppm a 13% O₂) não cumprem os requisitos; a queima de péletes de Pinho respeita esses limites na potência máxima (400 ppm a 13% O₂).

Observou-se que, tanto a potência térmica como o teor de oxigénio apresentam uma influência reduzida na formação de NO_x, sendo o teor de azoto presente no combustível, através da formação de NO_x combustível, o fator mais preponderante. Neste sentido, foi possível comprovar que a *Paulownia*, cujas emissões foram superiores às de Pinho, apresenta um teor de azoto superior ao do Pinho, pela análise à composição química de cada espécie.

Foi possível observar a influência da potência térmica no rendimento da caldeira não isolada termicamente, que aumentou de 50,1 para 64,4% no Pinho e de 51,6 para 66,3% na *Paulownia*, sendo o rendimento desta superior em todos os ensaios. A diminuição das emissões de CO acompanhou o aumento de rendimento das duas espécies. Os valores mínimos de rendimento estabelecidos pela norma para a potência mínima (70%) e para a máxima (75%) não são cumpridos por nenhuma das espécies.

Em alguns ensaios realizados com menores valores de excesso de ar, observou-se uma diminuição da temperatura no leito de combustão, de tal forma que os produtos da combustão atingiram a temperatura de ponto de orvalho. No sentido de possibilitar a realização destes ensaios, isolou-se a caldeira por forma a diminuir as perdas por convecção e radiação. Não foi ainda assim possível, no entanto, medir as emissões de poluentes porque, os valores elevados obrigavam a desligar o analisador. Já com o Pinho foi possível analisar os efeitos do excesso de ar e isolamento, separadamente. Observou-se que o excesso de ar, ou a sua redução, influencia muito significativamente o rendimento da caldeira, obtendo-se um incremento de 24,8, 15,8 e 4,8 pontos percentuais nas potências mínima, média e máxima, respetivamente. Com a aplicação do isolamento, verificou-se um aumento do rendimento de 3,6, 3,9 e 8,2 pontos percentuais, na mesma ordem de potências. No caso da *Paulownia* analisou-se o efeito combinado dos dois fatores e observou-se um aumento de cerca de 24, 10 e 17 pontos percentuais mas, devido à tendência similar entre as duas espécies, é possível extrapolar que o excesso de ar é o fator

8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

mais preponderante nas diferenças apresentadas. Os valores de rendimento de 78,5 e 76% de Pinho e de *Paulownia*, respetivamente, na potência mínima, e de 77,4 e 83,5% de Pinho e de *Paulownia*, respetivamente, na potência máxima, cumprem os limites mínimos estabelecidos pela norma.

A análise às perdas térmicas recaiu sobre os resultados dos ensaios de Pinho e *Paulownia* antes da aplicação do isolamento e da variação do excesso de ar, uma vez que nestes não foi possível conhecer o valor das emissões e, portanto, não se calcularam as respetivas perdas. Verificou-se que conforme a potência térmica aumenta a proporção das perdas por convecção e radiação e pela chaminé diminui, o que vai ao encontro do aumento registado do valor do rendimento. É na potência mínima que as perdas apresentam maiores percentagens, devido a um valor de excesso de ar elevado, o que influencia negativamente a potência útil transferida para a água. Na potência máxima, os valores de rendimento são afetados pelo aumento de perdas térmicas, sendo possível obter uma eficiência superior do processo desde que se consiga reduzir esse efeito.

De acordo com os resultados obtidos e com as dificuldades encontradas, apresentam-se em seguida algumas sugestões para trabalhos futuros.

Durante a etapa de produção de péletes, garantir que as dimensões dos péletes em análise são aproximadamente constantes.

Avaliar, de forma detalhada, os elementos do sistema que permite o aquecimento da água do depósito de água quente da cantina, para que seja possível o aproveitamento energético em futuras utilizações da caldeira.

Realizar ensaios com diferentes valores de excesso de ar e caudal mássico de combustível, no sentido de determinar os que promovem o rendimento máximo acompanhado de emissões de poluentes mínimas, recorrendo a espécies comerciais ou alternativas.

Conceber um isolamento térmico na caldeira que permita a aplicação de diferentes instrumentos de medição e, simultaneamente, seja funcional no modo de utilização enquanto instalação experimental.

Alterar o modo ou tempos de alimentação do combustível de forma a diminuir o efeito negativo que o sistema de alimentação atual tem na combustão.

9. Referências

- AEBIOM (2015a), *Annual Report 2014*, <<http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/2009/11/Low-Quality-AEBIOM-Annual-Report-2014.pdf>>, consultado a 5 de abril de 2015.
- AEBIOM (2015b), *European Bioenergy outlook 2014*, <<http://www.aebiom.org/wp-content/uploads/2014/11/Presentation-Statistical-Report-2014.pdf>>, consultado a 5 de abril de 2015.
- Aiminho (2010), *Guia de orientação para a utilização das energias renováveis nas empresas*, <http://www.aiminho.pt/imgAll/file/Sustentar/Guia_de_Orientacao_para_a_utilizacao_das_Energias_Renovaveis.pdf>, consultado a 4 de janeiro de 2015.
- Almeida, T. (2013), *Os biocombustíveis sólidos em Portugal*, Centro da Biomassa para a Energia.
- Alvarez, A. (2012), *Estudio de peletizado de Paulownia*, Grupo de Combustibles y Motores de la Universidad de Castilla-La Mancha, Sección Biomasa del Instituto de Investigación en Energías Renovables, Parque Científico y Tecnológico de Albacete.
- ANPEB (2015), <<http://www.anpeb.pt>>, consultado a 27 de março de 2015.
- APA (2014), *Relatório do Estado do Ambiente 2014*, <http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/REA/rea2014.pdf>, consultado a 14 de fevereiro de 2015.
- APREN (2015), <<http://www.apren.pt>>, consultado a 14 de abril de 2015.
- ASAE S269.5:2012 - *Densified Products for Bulk Handling -- Definitions and Methods*.
- ASTM C136/C136M-14: 2014 - *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- Barbosa, M. (2008), *Análise da utilização de biomassa*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Barreto, J., Rendeiros, G. e Nogueira, M. (2008), *Combustão e gasificação de biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*, Programa Luz para Todos, Ministério de Meio Ambiente.
- Basu, P. (2006), *Combustion and gasification in fluidized beds*, CRC Taylor & Francis, pp. 69. 173.
- Battin-Leclerc, F., Simmie, J., e Blurock, E. (2013), *Cleaner Combustion: Developing Detailed Chemical Kinetic Models*, Springer-Verlag, London

9. Referências

- BIODAT (2015), <<http://www.biodat.eu>>, consultado a 2 de janeiro de 2015.
- BP (2014), *Energy Outlook 2035*, <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/Energy-Outlook/Energy_Outlook_2035_booklet.pdf>, consultado a 7 de fevereiro de 2015.
- Buddekker, F. (2009), *Experimental evaluation of the performance domestic a pellets-fired boiler*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- CAM (2013), *Relatório do Grupo de Trabalho da Biomassa*, <http://www.parlamento.pt/ArquivoDocumentacao/Documents/colecoes_relatorio-bio2013-2.pdf>, consultado a 15 de janeiro de 2015.
- CELPA (2014), *Boletim Estatístico 2013*, <<http://www.celipa.pt/FileGet.aspx?FileId=4465>>, consultado a 18 de Janeiro de 2015.
- Clarke, S., Preto, F. (2011), *Biomass densification for energy production*, Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Coelho, P. e Costa, M. (2007), *Combustão*, Edições Orion.
- Coleman, H. W. e Steele, W.G. (2009), *Experimentation and uncertainty analysis for engineers*, 3ª edição, John Wiley & Sons.
- Confagri (2011), *Aproveitamento de biomassa agrícola em Portugal – Situação de referência*, <http://www.confagri.pt/download/biomassa_resumo.pdf>, consultado a 4 de janeiro de 2015.
- Çengel, Y. e Boles, M. (1994), *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 2ª edição, McGraw-Hill.
- DGEG (2015), <www.dgeg.pt>, consultado a 20 de abril de 2015.
- Dias, J., Costa, M. e Azevedo, J.L.T. (2004), *Test of a small domestic boiler using different pellets*, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 27, pp 531-539.
- Diniz, D. (2008), *Produção de álcool etílico utilizando como matérias primas resíduos florestais e agrícolas*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- EC (2015), <http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm>, consultado a 12 de janeiro de 2015.
- EIA (2013), *International Energy Outlook 2013*, <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)>, consultado a 2 de janeiro de 2015.

- EN ISO 3310-1:2000 - *Test sieves - Technical requirements and testing-Part 1: Test sieves of metal wire cloth*. Genebra. International Organization for Standardization.
- EN ISO 17225-2:2014 – *Solid biofuels – Fuel specifications and classes Part 2: S: Graded wood pellets*. Genebra. International Organization for Standardization.
- EN 14785:2006 - *Residential space heating appliances fired by wood pellets e requirements and test methods*. Brussels. European Committee for Standardization.
- EN 14774-2:2009 - *Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method. Part 2: Total moisture - Simplified method*. Brussels. European Committee for Standardization.
- EN 15210-1:2009 - *Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets*. Brussels. European Committee for Standardization.
- EPC (2013), *ENplus - Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes*, Renewable Energy House.
- Ferreira, T. (2013), *Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de peletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW*, Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia de Viseu.
- Goldemberg, J. (2009), *Biomassa e Energia*, *Química Nova*, Vol 32, 3, pp. 582-587.
- ICNF (2013), *IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental. Resultados preliminares*, <<http://www.icnf.pt/portal/florestas/ifn/resource/ficheiros/ifn/ifn6-res-prelimv1-1>>, consultado a 18 de janeiro de 2015.
- ICNF (2010), *Culturas Energéticas Florestais - Primeira abordagem do levantamento da situação actual*, <<http://www.icnf.pt/portal/florestas/fileiras/biomassa-solid/resource/docs/biomassa-texto-gtce-junho-2010-v30-06-2010>>, consultado a 18 de outubro de 2014.
- IEA (2013), *World Energy Outlook 2013*, <<http://www.iea.org/>>, consultado a 25 setembro de 2014.
- INE (2014), *Indicadores Económico-ambientais – Conta das Emissões Atmosféricas 1995-2012*, <<http://www.ine.pt>>, consultado a 14 de abril de 2015.
- Invasoras (2014), <<http://invasoras.pt/>>, consultado a 20 de abril de 2015.
- Kasamaki, P. (2007), *La Paulownia sp. como base de los cultivos energéticos*, <<http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>> consultado a 13 de janeiro de 2015.
- Khan, A., Jong, W., Jansen, P. e Spliethoff, H. (2009), *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*, *Fuel Processing Technology*, 90, pp. 21-50.

9. Referências

- Kole C, Joshi CP e Shonnard DR. (2012), *Handbook of Bioenergy Crop Plants*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 671-686.
- Kunii, D. e Levenspiel, O. (1969), *Fluidization Engineering*, Robert E. Krieger Publishing Company.
- Lawrence, J. (2011), *Paulownia biomass production*, <<http://www.toadgully.com.au/files/Paulownia%20Biomass%20Production.pdf>> consultado a 11 de abril de 2014.
- Loo, S. e Koppejan J. (2008), *The handbook of biomass combustion and Co-firing*, Earthscan.
- Lora, E. e Venturini, O. (2012), *Biocombustíveis*, Volume 1, Editora Interciência, pp.411 – 493.
- Martín, F. M., Monteagudo, B. L., Osado, I. I. e Castaño, C. P. (2009), Uso energético de la Paulownia en España, *Agricultura*, abril, pp. 272-274.
- Monteagudo, B. L. e Martínez, J. R. (2009), Caracterización energética de la biomasa de *Paulownia* sp. Procedente de plántulas cultivadas de una savia, *Ciência Técnica*, 98, pp. 78-82.
- Nussbaumer, T. (2003), *Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction*, *Energy & Fuels*, 17, pp. 1510-1521.
- Obaidullah, M., Dyakov, I. V., Thomassin, J. D., Duquesne, T., Bram, S., Contino, F. e De Ruyck, J. (2014), *Study on co emissions and performance analysis of a pellet stove*, 23rd Journées d'Etude, Belgian Section of the Combustion Institute, Bruxelas, 27-28 Maio.
- Obernberger, I. e Thek, G. (2010), *The Pellet Handbook - The production and thermal utilization of biomass pellets*, Earthscan, Washington DC.
- Onay, O. e Kockar, O. (2003), Slow, fast and flashpyrolysis of rapeseed, *Renewable Energy*, 28, pp. 2417 –2433.
- Paiva, J. M. (2009), <<http://bioestufasolar.blogspot.pt/>>, consultado a 10 de fevereiro de 2014.
- Paulownia (2015), <<http://paulownia-brazil.blogspot.pt/p/variedades-de-paulownia-vantagem-de.html>>, consultado a 4 de janeiro de 2015.
- Paulownia Germany (2015), <<http://www.paulowniagermany.de/de/wachstumstempo-1.html>>, consultado a 5 de janeiro de 2015.
- Pellet Process (2014), <http://www.pelletprocess.de/?page_id=20&lang=en>, consultado a 3 de fevereiro de 2014.

- Petrocelli, D. e Lezzi, A. M. (2014), CO and NO emissions from pellet stoves: an experimental study, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 501, Edição 1, Artigo id. 012036.
- Petrogal (2014), <<http://www.petroenergia.com.br/coque.html>>, consultado a 20 de janeiro de 2014.
- Pinho, C. (2014), *Sebenta de Combustão*, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Plantation (2015), <<http://www.paulowniaplantation.it/>>, consultado a 12 de janeiro de 2015.
- Projeto Enersilva (2007), *Promoção do uso da Biomassa Florestal para fins energéticos no sudoeste da Europa*, <<http://enersilva.navegantes.info/areasubir/resultados/Enersilva%20Portugues.pdf>>, consultado a 12 de novembro de 2014.
- Puxeddu, M., Marras, G. e Murino, G. (2012), Tree Planting in Sardinia (Italy) and Its Evaluation for Agroforestry Systems and Sustainable Land Use, *Journal of Environmental Science and Engineering B1*, 20 de outubro, pp. 1192–1195.
- Rabaçal, M., Fernandes, U. e Costa, M. (2013), *Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones*, *Renewable Energy*, 51, pp. 220-226.
- Rabier, F., Temmerman, M., Bohm, T., Hartmann, H., Jensen, P., Rathbauer, J., Carrasco, J. e Fernandez, M. (2006), *Particle density determination of pellets and briquettes*, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 954-963.
- Rafael, S. (2012), *A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a Qualidade do Ar*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- REN 21 (2014), *Renewables 2014 - Global status report*, <http://www.ren21.net/portals/0/documents/resources/gsr/2014/gsr2014_full%20report_low%20res.pdf>, consultado a 9 de março de 2015.
- REN 21 (2013), *Renewables 2013 - Global status report*, <http://www.ren21.net/portals/0/documents/resources/gsr/2013/gsr2013_lowres.pdf>, consultado a 9 de março de 2015.
- Sánchez, C. e Campo, E. (2003), *Tecnologia da Gaseificação*, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, pp. 5-1 – 5.17.
- Santo, F. (2009), *Energia – Uma necessidade e um grave problema*, *Ingenium*, 112.
- Santos, M. (2013), *O Trilema Energético Mundial*, *OJE*, <<https://view.publitas.com/p222-3946/trilema-energetico-mundial/>>, consultado a 2 de janeiro de 2015.

9. Referências

- Sikanen, L. e Vilppu, T. (2012), *Small scale pilot combustion experiments with wood pellets– the effect of pellet length*, The Open Renewable Energy Journal, 5, pp. 1-6.
- Sippula, O., Hytönen, K., Tissari, J., Raunemaa, T. e Jokiniemi, J. (2007), *Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove*, Energy and Fuels, Vol. 21, pp 1151-1160.
- Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Karlton, E., Lunnan, A., Mizaraite, D., et al. (2007), *Sustainable utilization of forest biomass for energy – Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries*, Biomass & Bioenergy 31, pp. 666-684.
- Tabak, J. (2009), *Biofuels*, Energy and the Environment, Nova Iorque, Facts on File, Inc.
- Teixeira, L. A. (2009), *Opções de utilização da biomassa florestal no contexto energético de Portugal*, Tese de Mestrado, Universidade do Porto.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P., Hartmann, H. and Bohm, T. (2006), *Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes*, Biomass and Bioenergy, 30, pp. 964-972.
- Tumuluru, J., Wright, C., Kenny, K. e Hess, J. (2010), *A review on biomass densification technologies for energy application*, Idaho National Laboratory.
- Vicente, E., Duarte, M., Nunes, T., Tarelho, L. e Alves, C. (2014), *Particulate and gaseous emissions from residential pellet combustion*, SPEIC14 – Towards Sustainable Combustion, Lisboa, 19-21 Novembro.
- WEC (2014), *World Energy Trilemma*, <<http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/11/20141105-Main-report.pdf>>, consultado a 20 de março de 2015.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E., Ogada, T. e Siagi, Z., *Combustion of agricultural residues*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26.
- Zhu Zhao-Hua, Chao Ching-Ju, Lu Xin-Yu e Xiong Yao Gao (1986), “*Paulownia in China: cultivation and utilization*”, Asian Network For Biological Sciences And International Development Research Centre.
- Zuazo, D., Bocanegra, J., Torres, F., Pleguezelo, C. e Martínez, J. (2013), *Biomass Yield Potential of Paulownia trees in a semi-arid Mediterranean environment (Spain)*, International Journal of Renewable Energy Research, Volume 3, 4, pp. 789-793.

Anexos

Anexo A – Espécie não invasora: certificado de *Paulownia Cotevisa 2*

 <p>GENERALITAT VALENCIANA CONSELLERIA D'INFRAESTRUCTURES, TERRITORI I MEDI AMBIENT</p>	<p>Dirección General del Medio Natural</p>	<p>CIUTAT ADMINISTRATIVA 9 D'OCTUBRE – TORRE 1 C/ Castán Tobeñas, 77 - 46018 VALÈNCIA - Tel. 012</p>
--	--	--

La Consellería de Infraestructuras, Territorio y Medioambiente de la Generalitat Valenciana está llevando a cabo un proyecto dentro del marco del proyecto PROFORBIOMED, en el que se han realizado varias plantaciones experimentales en la provincia de Valencia de diversos clones del género *Paulownia* sp. con el fin de evaluar su idoneidad como especie bioenergética y/o maderera. Entre otros clones, se ha experimentado con el clon:

- Cotevisa 2 (Híbrido de *Paulownia elongata* x *Paulownia fortunei*)

Don Emilio González López, Jefe de Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de dicha Consellería y como responsable del citado proyecto, **CERTIFICA o EXPONE:**

Que en ningún caso se ha observado la aparición de regenerado por semilla en las parcelas estudiadas, así mismo, tampoco se detecta un carácter invasor del clon puesto que no ha habido colonización en las parcelas adyacentes o cercanas a las de la experimentación. De lo observado se puede concluir que **SE TRATA DE CLONES ESTÉRILES, SU SEMILLA NO ES VIABLE**, por lo que no supone ningún riesgo de colonización y desplazamiento de la flora autóctona.

Y para que surta los efectos oportunos, firmo la presente, en Valencia, a 6 de mayo de 2013.



Fdo.: Emilio González López

Figura A.1 – Certificado de *Paulownia Cotevisa 2* como não invasora.

Anexo B – Calibração

No sentido de assegurar a validade dos valores das grandezas monitorizadas, foram efetuadas calibrações aos instrumentos de medição: ao medidor de caudal da turbina e aos três termopares.

B.1 - Medidor de caudal da turbina

Para a calibração da turbina foi necessário estabelecer uma relação entre o caudal mássico de água que escoava na turbina e o respetivo sinal de frequência. Ligou-se a turbina à rede de água municipal e o sinal analógico de saída da turbina era transmitido para um computador através da placa *NI USB-6008*, com recurso ao programa *Labview 8.6* da *National Instruments*. O método utilizado foi o das pesagens, medindo a massa de água que escoava na turbina num determinado intervalo de tempo, determinava-se o caudal mássico, o qual podia ser relacionado com uma frequência média da turbina no mesmo intervalo de tempo.

Abria-se a válvula que permitia a passagem de água pela turbina e quando se observava, no programa *Labview 8.6*, que o caudal de saída não apresentava alterações, a água era dirigida para um recipiente, pesado previamente e, simultaneamente, iniciava a contagem do tempo. Assim que a quantidade de água fosse razoável, ao mesmo tempo, encaminhava-se o sistema por onde escoava a água para um outro recipiente de apoio e a contagem de tempo cessava. Pesava-se o recipiente com a massa de água na balança *6200 D* da marca *Precisa* e registava-se a duração do ensaio. Este recipiente era esvaziado e, mais uma vez, pesado para utilizar no ensaio seguinte. O ângulo de abertura da válvula foi aumentando à medida que os ensaios foram decorrendo, tendo o cuidado de os realizar no intervalo de valores de caudal mássico utilizados no presente trabalho.

O caudal mássico de água que escoava através da turbina foi calculado através da Equação B.1.

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{m_{\text{água}}}{\Delta t} \quad (\text{B.1})$$

em que $m_{\text{água}}$ é a massa de água medida e Δt o intervalo de tempo, em cada ensaio.

A curva de calibração, obtida em 10 ensaios realizados, é a apresentada na Figura B1.

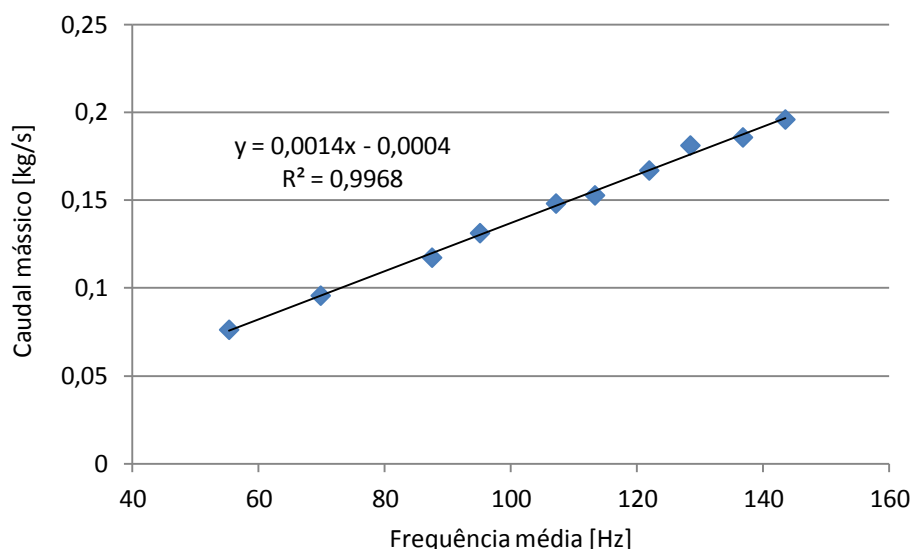


Figura B.1 – Curva de calibração do medidor de caudal da turbina.

B.2 – Termopares

A calibração dos três termopares tipo K com 3 mm de diâmetro, utilizados para monitorizar a temperatura de entrada e saída de água da caldeira e dos gases de exaustão, foi realizada através da exposição destes a temperaturas conhecidas e estabelecendo a respetiva relação. Utilizou-se a temperatura de ebulição da água e a de água no estado de gelo (0 °C) para o efeito. Para tal foi necessário determinar a temperatura em que a água entrava em ebulição à pressão atmosférica do local onde se estava a realizar o ensaio. Através dum barómetro existente no LTTC, que registava 99,7 kPa e com recurso à tabela de vapor saturado da água (Çengel e Boles, 1994), determinou-se que a temperatura de ebulição era de 99,52 °C. A placa de aquisição TCo8 da Pico recebia os sinais analógicos dos termopares e transmitia para um computador, via USB, utilizando o programa PicoLog da Pico Technology Ltd.

Os ensaios com gelo foram efetuados em primeiro lugar. Colocaram-se inúmeras pedras de gelo e uma pequena quantidade de água num recipiente de vidro e, através dum termómetro digital calibrado, assim que se media 0 °C na mistura, os termopares eram colocados na água. Caso os valores se mantivessem inalterados, iniciava-se o registo durante cerca de 1 minuto.

Realizaram-se, posteriormente, os ensaios com água em ebulição, através duma placa elétrica de aquecimento e dum recipiente metálico onde se colocou água. Ao verificar-se a ebulição da água, colocava-se o sistema de termopares num ponto central, afastado das paredes e do fundo do recipiente. Assim que o sinal do termopar se mantinha constante registavam-se os valores durante cerca de 1 minuto.

As curvas de calibração dos termopares apresentam-se na Figura B.2.

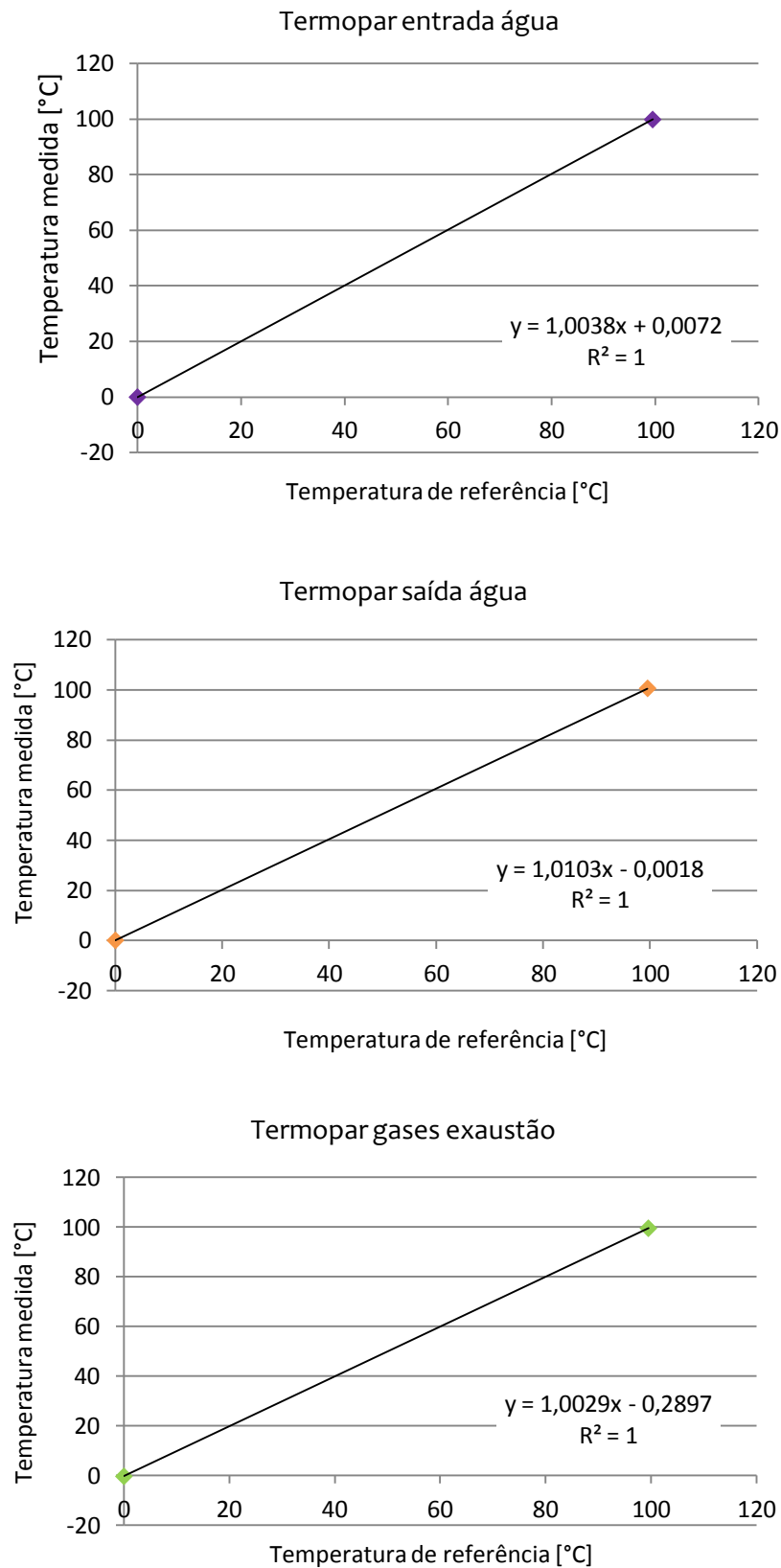


Figura B.2 – Curvas de calibração dos termopares.

Anexo C – Distribuição de partículas

C.1 - Análise granulométrica Amostra 2

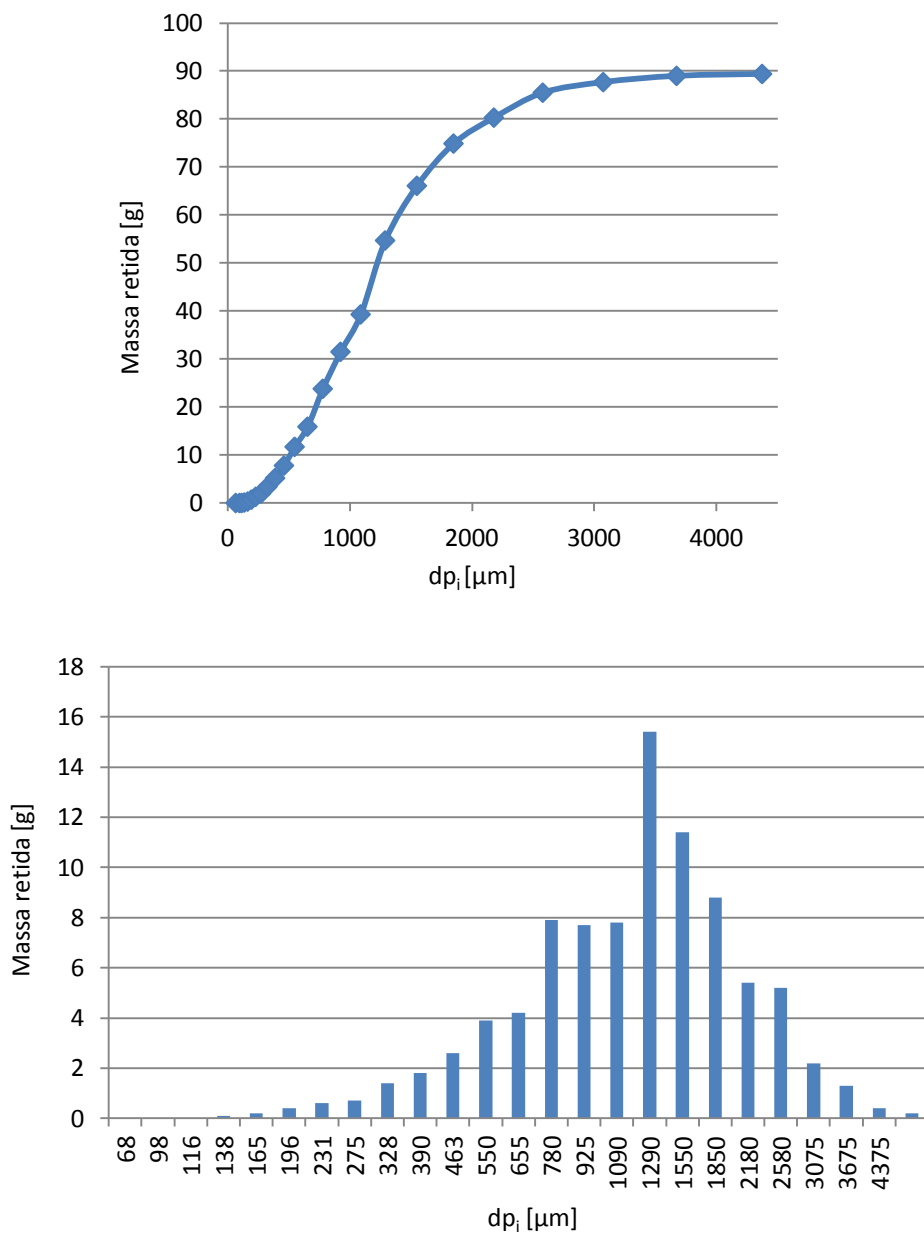


Figura C.1 – Distribuição granulométrica da amostra 2 de *Paulownia*.

C.2 - Análise granulométrica Amostra 3

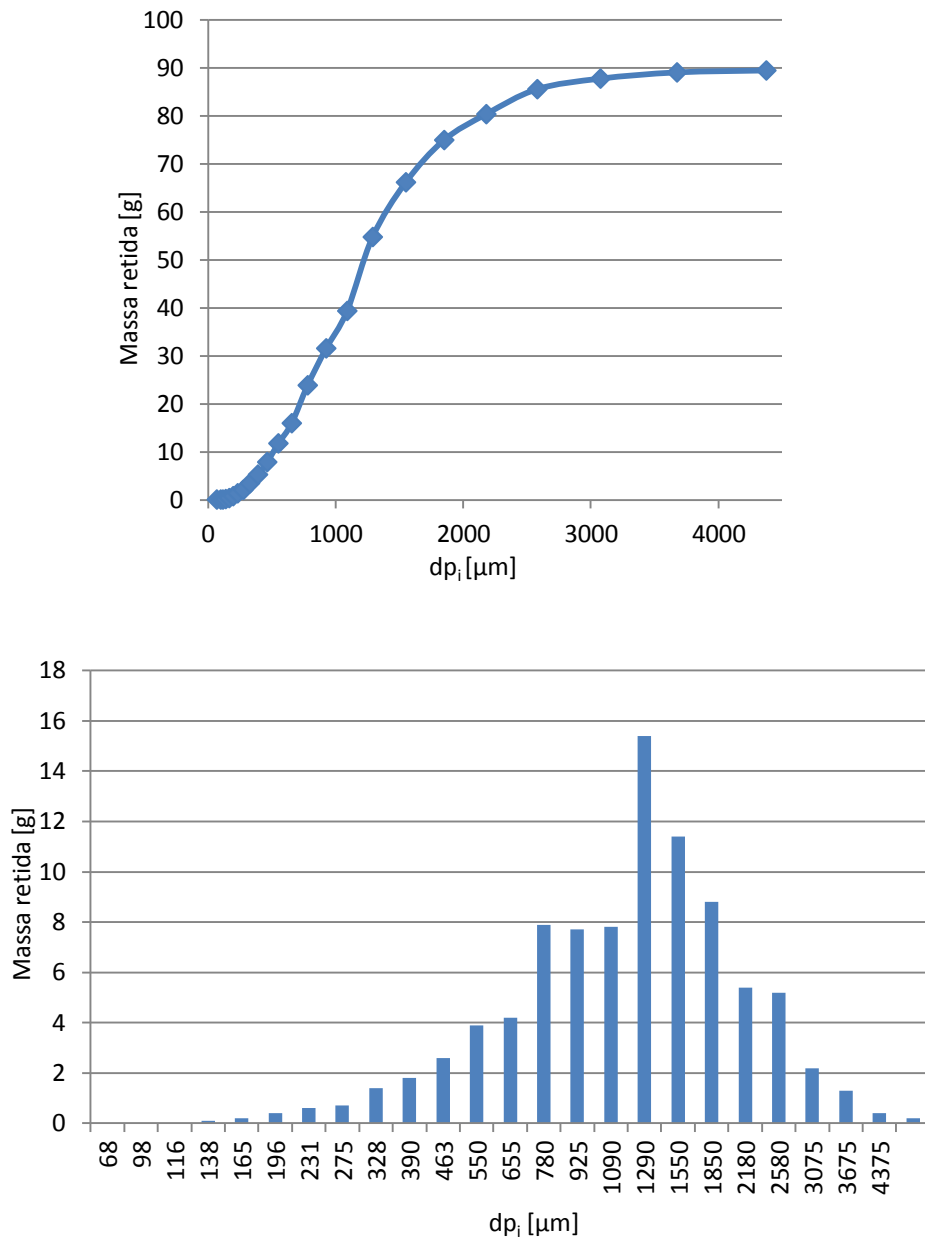


Figura C.2 – Distribuição granulométrica da amostra 3 de Paulownia.

Anexo D – Outros ensaios

Na Tabela D.1 são apresentados os dados obtidos nos ensaios que não foram utilizados no presente trabalho por o caudal mássico não estar dentro da gama adequada (80, 82, 83 e 91), por o valor de excesso de ar não promover o maior valor de rendimento (57, 58, 60, 61, 62, 63, 65 e 67) ou por não ter sido possível medir as emissões de poluentes (84, 85 e 94).

	Referência Ensaio	Potência térmica [kW]	Caudal péletes [kg/h]	Potência útil [kW]	Caudal água [l/min]	Rendimento térmico [%]
Potência Mínima						
Pinho	57	6,07	1,16	4,19	9,53	68,92
	58	6,04	1,16	4,09	9,61	67,65
Paulownia	91	7,63	1,50	3,42	9,52	44,85
Potência Média						
Pinho	60	9,41	1,80	6,33	9,62	67,26
	61	9,44	1,81	7,03	9,70	74,51
Paulownia	80	8,17	1,61	5,35	9,83	65,54
Potência Máxima						
Pinho	62	17,27	3,31	11,03	9,56	63,84
	63	16,13	3,09	10,13	9,44	62,78
	65	18,88	3,62	12,52	9,55	66,31
	67	17,94	3,44	12,20	9,29	68,03
Paulownia	82	11,73	2,31	8,15	9,62	69,48
	83	14,05	2,76	10,13	9,62	72,10
	84	17,76	3,49	11,99	9,48	67,51
	85	16,90	3,33	11,91	9,48	70,48
	94	15,89	3,13	10,35	9,53	65,10

Tabela D.1 – Resultados obtidos com outros ensaios.

Anexo E – Cálculo da perda de carga

Para determinar a perda de carga do sistema, era necessário estabelecer uma relação entre esta e o caudal mássico de água e, através desta expressão, calcular a perda de carga para o caudal mássico médio de água dos ensaios. Para tal, ligaram-se tomas de pressão existentes na entrada e na saída de água da caldeira a um manómetro diferencial de coluna de água, através de dois tubos.

O procedimento consistia em abrir a válvula que permitia o escoamento de água na tubagem da caldeira e registar a diferença provocada no manómetro. Simultaneamente, o sinal analógico de saída da turbina era transmitido para um computador através da placa *NI USB-6008*, utilizando o programa *Labview 8.6* da *National Instruments*, onde, através do sinal medido e da equação de calibração, determinada no Anexo B.1, foi possível calcular o caudal mássico de água que escoava na turbina em cada ensaio; foi determinado por meio da expressão E.1.

$$\dot{m}_{\text{água}} = 0,0014x - 0,0004 \quad (\text{E.1})$$

em que x é o valor do sinal analógico transmitido pela turbina.

A perda de carga foi calculada através da equação E.2.

$$\Delta P = \rho_{\text{água}} g \Delta h \quad (\text{E.2})$$

onde $\rho_{\text{água}}$ designa a massa volúmica da água, g a aceleração da gravidade e Δh a diferença de altura observada no manómetro.

Para validar os valores da perda de carga calculados, foram realizados três ensaios com diferentes caudais de água mas, aproximados aos utilizados durante os ensaios deste trabalho. Os valores obtidos e calculados são apresentados a seguir (Figura E.1).

Caudal de água [l/min]	Diferença de altura [m]	Perda de carga [kPa]
6,91	0,75	7,35
8,31	0,76	7,43
10,18	0,77	7,54

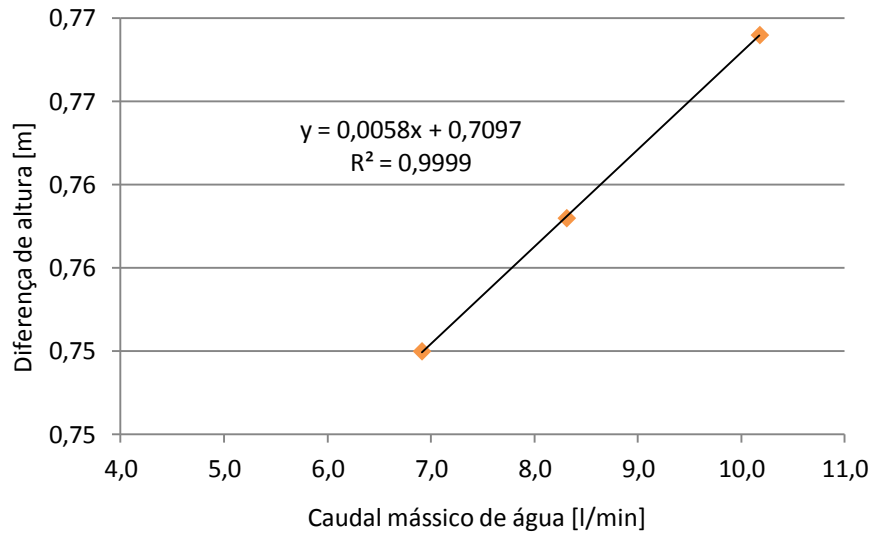


Figura E.1 – Relação entre a diferença de altura e o caudal mássico de água.

Utilizando a expressão apresentada na Figura E.1 e sabendo que o caudal de água médio durante os ensaios foi de 9,4 l/min, determinou-se que 0,76 m era a diferença de altura correspondente. Através da expressão E.2 calculou-se que uma perda de carga de 7,49 kPa.

Anexo F – Análise de incertezas

A análise de incertezas tem por objetivo estabelecer a influência dos erros gerados na medição de uma variável. O método proposto por Coleman e Steele (2009) consiste na determinação de erros de ordem sistemática (ou fixos) e aleatória (ou de precisão/repetibilidade).

A incerteza total associada à medição, com um nível de confiança de 95%, de uma variável X , obtém-se através da seguinte expressão (Coleman e Steele, 2009).

$$U_X = \sqrt{B_X^2 + P_X^2} \quad (\text{F.1})$$

em que U_X designa a incerteza total associada à medição da variável X e B_X e P_X a incerteza sistemática e aleatória, respetivamente, relativa à variável X .

Comummente, não é possível determinar o valor de uma grandeza r apenas com recurso à medição direta, mas sim através da medição de diferentes variáveis relacionadas pela equação de redução.

$$r = (X_1, X_2, \dots, X_j) \quad (\text{F.2})$$

Para tal, utiliza-se a equação de propagação de incertezas que se traduz pela Equação F.3 relacionada com a incerteza sistemática e pela Equação F.4 associada à aleatória.

$$B_r^2 = \sum_{i=1}^j \theta_i^2 B_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{k=i+1}^j \theta_i \theta_k B_{ik} \quad (\text{F.3})$$

$$P_r^2 = \sum_{i=1}^j \theta_i^2 P_i^2 \quad (\text{F.4})$$

em que B_i e P_i referem-se às incertezas sistemáticas e aleatórias da variável X_i , B_{ik} o estimador de covariância e $\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i}$.

Calcularam-se os valores de incerteza do caudal mássico de péletes e de água, da temperatura da água e da dos gases de exaustão e da concentração dos gases de exaustão, para o Pinho e para a *Paulownia*. Considerando que algumas variáveis medidas apresentavam resultados com diferenças significativas entre cada nível de potência térmica, optou-se por calcular, nestas condições, as incertezas diferenciadas por nível de potência.

Para simplificação de apresentação dos capítulos seguintes, apresenta-se a seguir (Tabela F.1) a exatidão e resolução dos equipamentos de medição utilizados.

	Exatidão	Resolução
Balança	0,1 g	0,05
Medidor caudal turbina	± 2%	± 1%
Sistema aquisição dados	± 0,2% leitura ± 0,5 °C	0,1 °C
Termopar K	1,1% leitura	0,1 °C
Medidor O ₂	± 0,2% (vol.)	0,01% (vol.)
Medidor CO	± 10 ppm (0 a 99 ppm) ± 5% leitura (100 a 1999 ppm) ± 10% leitura (restante gama)	1 ppm
Medidor CO ₂	± 0,3% (vol.) ± 1% leitura (0 a 25% (vol.)) ± 0,5% (vol.) ± 1,5% leitura (restante gama)	0,01% (vol.)
Medidor NO	± 5 ppm (0 a 9 ppm) ± 5% leitura (100 a 1999 ppm) ± 10% leitura (restante gama)	1 ppm

Tabela F.1 – Exatidão e resolução dos equipamentos de medição.

F.1 – Incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes

O caudal mássico foi obtido através da medição da massa dos péletes antes de serem colocados no depósito da caldeira e da dos que restavam, após terminar o ensaio, dividido pelo tempo que o ensaio durava (Equação F.5).

$$\dot{m}_p = \frac{m_{p_inicial} - m_{p_final}}{\Delta t} \quad (F.5)$$

Relativamente à medição do tempo do ensaio, estabeleceu-se que a exatidão foi de 0,1 s em 1 hora. A incerteza sistemática associada à medição da massa foi igual ao valor da exatidão da balança, portanto, 0,1 g; a sistemática associada ao tempo, considerando que cada ensaio durou em média 4424 segundos para o Pinho e 3323 para a *Paulownia*, foi de 0,12 e 0,09 s, respetivamente; a aleatória relativa à massa foi de 0,05 g.

A equação de propagação de incertezas permitiu calcular a incerteza sistemática (Equação F.7) e a aleatória (Equação F.9) associadas à medição do caudal mássico de péletes.

$$B_{\dot{m}_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{m_{p_inicial}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{m_{p_final}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t} B_{\Delta t}\right)^2} \quad (F.6)$$

Quando se substituem as derivadas e ao dividir pelo caudal mássico (\dot{m}_p), fica,

$$\frac{B_{\dot{m}_p}}{\dot{m}_p} = \sqrt{\left(\frac{B_{m_{p_inicial}}}{m_{p_inicial}}\right)^2 + \left(\frac{B_{m_{p_final}}}{m_{p_final}}\right)^2 + \left(\frac{B_t}{\Delta t}\right)^2} \quad (F.7)$$

$$P_{\dot{m}_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} P_{m_{p_inicial}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} P_{m_{p_final}}\right)^2} \quad (F.8)$$

Mais uma vez, substituindo as derivadas e dividindo pelo caudal mássico (\dot{m}_p),

$$\frac{P\dot{m}_p}{\dot{m}_p} = \sqrt{\left(\frac{P_{m_p_inicial}}{m_{p_inicial}}\right)^2 + \left(\frac{P_{m_p_final}}{m_{p_final}}\right)^2} \quad (F.9)$$

A incerteza total foi calculada através da Equação F.10.

$$\frac{U\dot{m}_p}{\dot{m}_p} = \sqrt{\left(\frac{P\dot{m}_p}{\dot{m}_p}\right)^2 + \left(\frac{B\dot{m}_p}{\dot{m}_p}\right)^2} \quad (F.10)$$

Os valores das incertezas são apresentados na Tabela F.3.

	t [s]	m_{p_inicial} [g]	m_{p_final} [g]	$\frac{B\dot{m}_p}{\dot{m}_p}$ [%]	$\frac{P\dot{m}_p}{\dot{m}_p}$ [%]	$\frac{U\dot{m}_p}{\dot{m}_p}$ [%]
Pinho						
Mínima	4470	2610	1180,0	0,0097	0,0047	0,0108
Média	4459	3267	975,6	0,0110	0,0053	0,0123
Máxima	4344	4567	477,7	0,0212	0,0105	0,0237
Paulownia						
Mínima	3023	2000	1100	0,0108	0,0052	0,0120
Média	3439	2500	800	0,0134	0,0066	0,0149
Máxima	3508	3100	147	0,0682	0,0341	0,0762

Tabela F.2 – Incertezas associadas à medição do caudal mássico de péletes.

F.2 – Incerteza associada à medição do caudal mássico de água

Para calcular a incerteza sistemática e aleatória utilizou-se, respetivamente, o valor da exatidão e resolução do medidor de água da turbina. Através da equação F.1 obteve-se a incerteza total relativa à medição do caudal mássico de água da turbina; os valores são apresentados na Tabela F.3.

	$\dot{m}_{\text{água}}$ [l/min]	B_{turb} [l/min]	P_{turb} [l/min]	U_{turb} [l/min]	$\frac{U_{turb}}{\dot{m}_{\text{água}}}$ [%]
Pinho	9,4	0,1886	0,0943	0,2109	2,2361
Paulownia	9,5	0,0950	0,1900	0,2124	2,2361

Tabela F.3 – Incertezas associadas à medição do caudal mássico de água.

F.3 – Incerteza associada à medição das temperaturas da água

Para a obtenção das temperaturas de entrada e saída de água da caldeira, recorreu-se a dois termopares tipo K ligados a um sistema de aquisição de dados. Estabeleceu-se que a incerteza sistemática, tanto do sistema de aquisição de dados (B_{sa}) como dos termopares (B_{tK}), era igual ao respetivo valor de exatidão. No que diz respeito à aleatória, considerou-se metade da resolução de cada equipamento.

Para calcular a incerteza sistemática global, aplicou-se a Equação F.11.

$$B_T = \sqrt{B_{sa}^2 + B_{tK}^2} \quad (\text{F.11})$$

A incerteza total associada à medição das temperaturas da água foi calculada com recurso à Equação F.1. Os valores de incerteza relativos à medição da temperatura de entrada e saída de água são apresentados nas Tabelas F.4 e F.5, respetivamente.

	T_{ent} [°C]	B_{sa} [°C]	B_{tK} [°C]	B_T [°C]	P_T [°C]	U_T [°C]	$\frac{U_T}{T_{ent}}$ [%]
Pinho	11,30	0,52	0,12	0,54	0,05	0,54	4,77
Paulownia	16,80	0,05	0,53	0,18	0,56	0,57	3,37

Tabela F.4 – Incertezas associadas à medição da temperatura de entrada de água.

	T_{sai} [°C]	B_{sa} [°C]	B_{tK} [°C]	B_T [°C]	P_T [°C]	U_T [°C]	$\frac{U_T}{T_{sai}}$ [%]
Pinho							
Mínima	16,30	0,53	0,18	0,56	0,05	0,56	3,46
Média	19,50	0,54	0,21	0,58	0,05	0,58	2,99
Máxima	28,40	0,56	0,31	0,64	0,05	0,64	2,25
Paulownia							
Mínima	21,30	0,05	0,54	0,23	0,59	0,59	2,78
Média	25,60	0,05	0,55	0,28	0,62	0,62	2,43
Máxima	32,20	0,05	0,56	0,35	0,67	0,67	2,08

Tabela F.5 – Incertezas associadas à medição da temperatura de saída de água.

F.4 – Incerteza associada à medição da temperatura dos gases de exaustão

A forma de obtenção desta temperatura foi com recurso ao mesmo sistema de aquisição de dados do das temperaturas da água e utilizando, igualmente, um termopar tipo K. Determinou-se que a incerteza sistemática, tanto do sistema de aquisição de dados (B_{sa}) como dos termopares (B_{tK}), era de acordo com o respetivo valor de exatidão; considerou-se metade da resolução do equipamento na incerteza aleatória. Utilizando as equações F.11 e F.1, calculou-se, respetivamente, a incerteza sistemática global e a incerteza total associada à medição da temperatura dos gases de exaustão; os valores são apresentados a seguir (Tabela F.6).

	T_{GE} [°C]	B_{sa} [°C]	B_{tK} [°C]	B_T [°C]	P_T [°C]	U_T [°C]	$\frac{U_T}{T_{GE}}$ [%]
<i>Pinho</i>							
Mínima	115,7	0,7313	1,2723	1,4675	0,0500	1,4684	1,2695
Média	177,4	0,8548	1,9515	2,1305	0,0500	2,1311	1,2012
Máxima	287,0	1,0740	3,1571	3,3348	0,0500	3,3352	1,1620
<i>Paulownia</i>							
Mínima	137,3	0,0500	0,7746	1,5103	1,6974	1,6981	1,2368
Média	210,9	0,0500	0,9218	2,3199	2,4963	2,4968	1,1839
Máxima	284,7	0,0500	1,0694	3,1317	3,3093	3,3096	1,1625

Tabela F.6 – Incertezas associadas à medição da temperatura dos gases de exaustão.

F.5 – Incerteza associada à medição da concentração dos gases de exaustão

As incertezas aleatórias e sistemáticas foram calculadas de acordo com metade do valor da resolução e o valor da exatidão do equipamento, respetivamente; são apresentadas na Tabela F.7 e F.8.

	P_{O_2} [%vol.]	P_{CO} [%vol.]	P_{CO_2} [%vol.]	P_{NO} [%vol.]
Pinho	0,005	0,00005	0,005	0,00005
Paulownia				

Tabela F.7 – Incertezas aleatórias associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.

	B_{O_2} [%vol.]	B_{CO} [%vol.]	B_{CO_2} [%vol.]	B_{NO} [%vol.]
Pinho				
Mínima	0,2000	0,0349	0,3716	0,0005
Média	0,2000	0,0062	0,3722	0,0005
Máxima	0,2000	0,0010	0,3737	0,0005
Paulownia				
Mínima	0,2000	0,0487	0,3704	0,0005
Média	0,2000	0,0078	0,3700	0,0005
Máxima	0,2000	0,0077	0,3719	0,0005

Tabela F.8 – Incertezas sistemáticas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.

Recorrendo à Equação F.1, obtiveram-se os seguintes valores de incerteza total relativa à medição dos gases de exaustão (Tabela F.9).

	U_{O_2} [%vol.]	U_{CO} [%vol.]	U_{CO_2} [%vol.]	U_{NO} [%vol.]
Pinho				
Mínima	0,2001	0,0349	0,3716	0,0005
Média	0,2001	0,0062	0,3722	0,0005
Máxima	0,2001	0,0010	0,3737	0,0005
Paulownia				
Mínima	0,2001	0,0487	0,3704	0,0005
Média	0,2001	0,0078	0,3700	0,0005
Máxima	0,2001	0,0077	0,3720	0,0005

Tabela F.9 – Incertezas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.