



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento de uma metodologia para o pré-tratamento de biomassa florestal residual para fins energéticos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Samuel Pedro Carreira Valente

Orientadores

Doutor José Joaquim da Costa

Dra. Valéria Reva

Júri

Presidente	Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Vogais	Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Dra. Valéria Reva Investigadora da ADAI, Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Associação para o Desenvolvimento da
Aerodinâmica Industrial**

Coimbra, Julho, 2013

Agradecimentos

O presente trabalho não teria sido possível sem a colaboração e apoio de várias pessoas, às quais quero transmitir as minhas palavras de apreço e gratidão.

Aos coordenadores Professor Doutor José J. Costa e Dra. Valéria Reva pela disponibilidade, orientação e ajuda nos ensaios laboratoriais e no tratamento de dados.

Ao Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo por toda a disponibilidade para ajuda e esclarecimento de dúvidas.

Aos fundadores do Duecitânia Design Hotel, Dr. António Figueiro Pereira Maduro e Dra. Maria Helena Duarte Maduro pelo interesse e apoio dados ao projecto.

Ao Mestre Vítor Silva e Mestre Jorge Rafael Raposo pela ajuda nos ensaios laboratoriais.

À Mestre Manuela Ferraz, Técnica Florestal da Câmara Municipal de Penela, e ao Engenheiro João Ribeiro, Director da Associação de Produtores Florestais FLOPEN, pelo apoio dado na amostragem de biomassa florestal residual.

A todos os meus amigos por fazerem parte de mim.

À minha Joana por toda a ternura.

Pai e Mãe, obrigado por toda a paciência e esforço ao longo destes anos. Tó-Zé e Anita, obrigado pelo carinho e apoio incondicionais.

Resumo

O presente trabalho contribui para a demonstração do potencial de utilização de biomassa florestal residual para produção de bioenergia em pequena escala (<1MW) nomeadamente em sistemas de cogeração ou em caldeiras a biomassa em centrais industriais de pequena ou média dimensão, hospitais, hotéis e complexos escolares ou residenciais.

O objectivo do presente trabalho é desenvolver a metodologia de pré-tratamento de biomassa florestal residual a fim de posterior criação de um protótipo de equipamento de separação e secagem simultâneas que possibilite o uso directo deste tipo de biomassa para produção de energia em pequena escala.

Vários tipos de biomassa foram recolhidos a fim de abranger um espectro amplo da tipologia de biomassa utilizada em sistemas de combustão, nomeadamente biomassa florestal residual, *woodchips* e *pellets*. Foram realizados os seguintes grupos de ensaios: (i) separação das amostras de biomassa florestal residual por granulometria, (ii) determinação do poder calorífico, (iii) queima em calorímetro cónico, (iv) secagem em câmara climática e (v) secagem em túnel de vento.

A separação das amostras de biomassa florestal residual por granulometria indicou que cerca de 75% da amostra é apropriada para queima. Os valores de poder calorífico superior e de resíduos pós-queima permitiram averiguar a importância da homogeneidade e da tipologia da biomassa. Os ensaios de queima em calorímetro cónico evidenciaram a importância da homogeneidade das partículas e da densidade da biomassa na curva de libertação de calor e no valor máximo de calor libertado. A análise comparativa dos resultados dos ensaios de secagem em câmara climática e em túnel de vento evidenciou o efeito do escoamento forçado e do tamanho da partícula no tempo de secagem.

Os resultados obtidos permitiram especificar a dimensão de partículas de biomassa florestal residual e os parâmetros de separação e secagem a fim de desenvolver o equipamento de pré-tratamento de biomassa com um baixo gasto energético.

Palavras-chave: Biomassa florestal residual, produção de bioenergia, produção de energia em pequena escala, trituração, separação, secagem.

Abstract

The present study is a contribution to demonstrate the potential for using of forest residual biomass for small-scale bioenergy production comprising the installation of small (<1MW) co-generation systems or wood boilers by end-users, such as medium and small industrial plants, hospitals, hotels, and school or residential complexes.

The present study is aimed at developing the methodology of the pre-treatment of forest residual biomass for further development of a prototype of the equipment for simultaneous separation and drying, which enables direct use of this type of biomass in small scale bioenergy production systems.

Various types of biomass were collected in order to comprise a wide spectrum of the biomass typology used in combustion systems, such as residual forest biomass, woodchips and pellets. The following groups of tests were performed: (i) separation by particle size of forest residual biomass samples, (ii) determination of calorific value, (iii) burning in conical calorimeter, (iv) drying in climatic chamber and (v) drying in wind tunnel.

The separation by particle size of forest residual biomass indicated that about 75% of the sample is suitable for burning. Gross calorific values and quantity of post-burning residues showed the importance of biomass homogeneity and type. Burning tests conducted in cone calorimeter showed the impact of homogeneity and density of biomass particles on the heat release curve and on the peak of heat release. The comparative analysis of results of drying tests in climate chamber in a wind tunnel revealed the impact of forced flow and particle size on the drying time.

Obtained results allow specifying the particle size of forest residual biomass and parameters of separation and drying in order to develop the equipment of biomass pre-treatment with low energy consumption.

Keywords: Forest residual biomass, bioenergy production, small-scale production system, chipping, separation, drying.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	x
1. Introdução.....	11
1.1. Enquadramento geral do tema	11
1.2. Objectivo do trabalho.....	14
2. Capítulo 1 – Produção de bioenergia a partir de biomassa florestal	15
2.1. Caracterização de biomassa florestal como uma fonte de bioenergia	15
2.2. Produtos a partir de biomassa florestal	18
2.3. Recolha e preparação de biomassa florestal	23
2.4. Separação e secagem de biomassa florestal para uso industrial e doméstico	25
2.5. Caracterização de uma caldeira a biomassa.....	27
2.6. Descrição do processo de combustão de biomassa.....	28
3. Capítulo 2 – Materiais e métodos	30
3.1. Amostragem.....	30
3.2. Separação das amostras por granulometria.....	31
3.3. Ensaio de poder calorífico	31
3.4. Ensaio queima em calorímetro cónico	33
3.5. Ensaio de cinética de secagem em câmara climática	34
3.6. Ensaio de cinética de secagem em túnel de vento.....	35
4. Capítulo 3 - Resultados e discussão	38
4.1. Granulometria	38
4.2. Poder calorífico.....	43
4.3. Queima em calorímetro cónico.....	46
4.4. Cinética de secagem em câmara climática.....	48
4.5. Cinética de secagem em túnel de vento	55
5. Conclusões.....	67
Referências Bibliográficas.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Toros (a), estilha (b), <i>woodchips</i> (c), <i>pellets</i> (d) e <i>briquettes</i> (e)	22
Figura 2 – Representação esquemática de um destroçador tipo <i>tooth shredder</i> (Vankerkove & Van-Belle, 1998)	23
Figura 3 - Representação esquemática de um destroçador tipo <i>drum chipper</i> (Vankerkove & Van-Belle, 1998)	24
Figura 4 – Representação esquemática de um triturador em espiral (Knoef, 2005)	24
Figura 5 - Representação esquemática de um moinho de martelos (Knoef, 2005)	24
Figura 6 – Separadores de estilha por granulometria de disco (a), peneira ou grelha vibratório (b) e rotativo (c)	25
Figura 7 – Influência do teor de humidade da biomassa na eficiência da caldeira e no volume de gases produzidos na combustão (Liang, Khan, & Meng, 1996).....	26
Figura 8 – Representação esquemática (a) e do processo (b) de um secador de tambor rotativo (Meza, Gil, Cortés, & González, 2008)	27
Figura 9 – Processo de combustão de biomassa (Nussbaumer, 2003)	28
Figura 10 - Amostras de biomassa florestal residual recolhida em Cabeça Redonda (<i>Eucalyptus globulus</i>) (a) e FLOPEN (b), <i>woodchips</i> (c) e <i>pellets</i> (d)	30
Figura 11 - Ensaio e configuração do calorímetro cónico (a) e amostras para o ensaio: <i>woodchips</i> , estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$, e <i>pellets</i> (b).....	33
Figura 12 – Interior do túnel de vento	35
Figura 13 - Configuração do túnel de vento	35
Figura 14 – Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida na FLOPEN	40
Figura 15 - Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida em Cabeça Redonda	41
Figura 16 - Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida no Hotel Duecitânia	42
Figura 17 – Resíduos pós-queima de um ensaio de poder calorífico	43
Figura 18 – Variação da massa das amostras de <i>woodchips</i> e estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidos no Hotel Duecitânia e <i>pellets</i> nos ensaios de queima em calorímetro cónico	46
Figura 19 - Taxa de libertação de calor por unidade de massa de amostras de <i>woodchips</i> e estilha ($3 < d \leq 6\text{mm}$) recolhidas no Hotel Duecitânia e <i>pellets</i> em ensaios de queima em calorímetro cónico	47

Figura 20 – Valores de humidade de equilíbrio ($H_{b.s.eq}$) da amostra de biomassa residual recolhida na FLOPEN em função da temperatura (T) e da humidade relativa (H_r)	49
Figura 21 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha recolhidas em Cabeça Redonda em câmara climática com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%	52
Figura 22 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha recolhidas no Hotel Duecitània em câmara climática com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%	53
Figura 23 - Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidas no Hotel Duecitània em câmara climática com humidade relativa de 10% e temperaturas de 40 e 50°C	54
Figura 24 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidas no Hotel Duecitània com velocidades de escoamento de 1,3 e 2,3m/s	57
Figura 25 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de <i>woodchips</i> recolhidas no Hotel Duecitània com velocidades de escoamento de 1,3 e 2,3m/s	58
Figura 26 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidas no Hotel Duecitània com temperaturas de escoamento de 42 e 52°C	59
Figura 27 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de <i>woodchips</i> recolhidas no Hotel Duecitània com temperaturas de escoamento de 42 e 52°C	60
Figura 28 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm e <i>woodchips</i> recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=42^\circ\text{C}$, $v_{esc}=1,3\text{m/s}$)	62
Figura 29 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm e <i>woodchips</i> recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=42^\circ\text{C}$, $v_{esc}=2,3\text{m/s}$)	63
Figura 30 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm e <i>woodchips</i> recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=52^\circ\text{C}$, $v_{esc}=1,3\text{m/s}$)	64

Figura 31 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidas no Hotel Duecitânia em câmara climática e em túnel de vento ($T=40^\circ\text{C}$ e $T_{esc}=42^\circ\text{C}$)..... 65

Figura 32 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidas no Hotel Duecitânia em câmara climática e em túnel de vento ($T=50^\circ\text{C}$ e $T_{esc}=52^\circ\text{C}$)..... 66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de diversas espécies de madeira (Núñez-Regueira, Añón, & Castiñeiras, 1996) (Telmo, Lousada, & Moreira, 2010)	17
Tabela 2 – Composição química média das diversas espécies de madeira	17
Tabela 3 – Principais características de <i>pellets</i> (Knoef, 2005).....	21
Tabela 4 – Principais características de <i>briquettes</i> (Knoef, 2005)	21
Tabela 5. Classes de granulometria de biomassa e respectivos instrumentos de separação	31
Tabela 6 – Representatividade das granulometrias de biomassa.....	39
Tabela 7 - Valores de poder calorífico (PCS_{exp} , PCS_{res} e $PCS_{b.s.}$), resíduos pós-queima e humidade em base seca ($H_{b.s.}$) de biomassa de diferentes tipologias e granulometrias	45
Tabela 8 – Valores de energia libertada por amostras de <i>woodchips</i> e estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidos no Hotel Duecitânia e <i>pellets</i> no ensaio de queima em calorímetro cónico	48
Tabela 9 – Equações das curvas de velocidade de secagem em túnel de vento para estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm e <i>woodchips</i> recolhidos no Hotel Duecitânia	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

d – diâmetro da partícula [mm]

$H_{b.h.}$ – humidade em base húmida [%]

$H_{b.s.}$ – humidade em base seca [%]

$H^*_{b.s.}$ – humidade em base seca normalizada

$H_{b.s.eq}$ – humidade de equilíbrio em base seca [%]

H_{eq} – humidade de equilíbrio [%]

H_r – humidade relativa do ar [%]

$\dot{H}_{b.s.}$ – velocidade de secagem [%/min]

l – comprimento da partícula [mm]

m – massa da amostra [g]

m_a – massa de água da amostra [g]

m_{res} – massa de resíduos pós-queima da amostra [g]

m_s – massa seca da amostra [g]

m_{total} – massa total da amostra [g]

PCI – poder calorífico inferior [MJ/kg]

PCS – poder calorífico superior [MJ/kg]

$PCS_{b.s.}$ – poder calorífico superior em base seca [MJ/kg]

PCS_{exp} – poder calorífico superior medido experimentalmente [MJ/kg]

PCS_{res} – poder calorífico superior corrigido dos resíduos pós-queima [MJ/kg]

Q – energia total libertada [J]

\dot{Q} – taxa de libertação de calor [J/s]

R_i – réplica i do ensaio (onde $i=1,2$ ou 3)

T – temperatura do ar [°C]

t – tempo [min] ou [s]

T_{esc} – temperatura do escoamento [°C]

v_{esc} – velocidade do escoamento [m/s]

$\rho_{aparente}$ – densidade aparente [kg/m³]

$\rho_{madeira}$ – densidade da madeira [kg/m³]

$\rho_{partícula}$ – densidade da partícula [kg/m³]

$\rho_{pellets}$ – densidade dos *pellets* [kg/m³]

Φ – fluxo de calor [W/m²]

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral do tema

A energia é um factor muito importante para o crescimento económico de qualquer país. O desenvolvimento económico e o estilo de vida da sociedade moderna criaram a necessidade de um abastecimento constante de energia (Agbontalor, 2007).

A crise do petróleo, devida à sua crescente procura motivada especialmente pelo crescimento de economias emergentes e à limitação das reservas, tem levado os representantes europeus e mundiais a repensar a utilização dos recursos energéticos.

Um país como Portugal, dependente dos combustíveis fósseis, tem visto a sua factura energética aumentar anualmente. Isto deve-se ao progresso económico-social e à ineficiência energética. Consequentemente, o desequilíbrio na balança de pagamentos aumenta devido à compra de energia ao estrangeiro e o nosso país perde competitividade económica.

Do ponto de vista ambiental, a preocupação relativa à conservação do meio ambiente também tem aumentado, nomeadamente quanto à redução do efeito de estufa e aquecimento global, provocados pela emissão de gases poluentes. Tendo em conta que a utilização de combustíveis fósseis é uma das principais fontes de emissão de CO₂ para a atmosfera, houve a necessidade de dar respostas a este problema.

Uma delas foi o Protocolo de Quioto, 1997, que estabeleceu metas mundiais e nacionais a longo prazo para a emissão de gases poluentes. No âmbito deste tratado, Portugal comprometeu-se a garantir que as suas emissões de gases poluentes entre 2008-2012 não excederiam em mais de 27% os valores de 1990 (Resolução de Conselho de Ministros, 2005). Outra resposta foi a iniciativa europeia conhecida como “20-20-20” que tem como objectivos a redução das emissões de CO₂ em 20% relativamente aos valores de 1990, um aumento da eficiência energética de 20% e uma quota de energias renováveis de 20% até 2020. A nível nacional, a Estratégia Nacional para a Energia estipulou que em 2020 o consumo de energia final deverá diminuir em 20%, 60% de toda a electricidade consumida deverá ser de origem renovável, a dependência energética do país face ao exterior deverá ser reduzida para 74%, produzindo a partir de recurso endógenos o

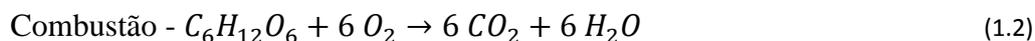
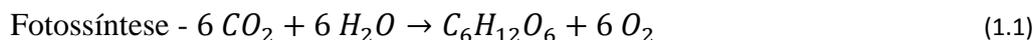
equivalente a 31% da energia final, que deverá ser instalada uma potência de 1500 MW de energia solar, entre outros (Assembleia da República, 2010).

Portugal vê-se simultaneamente obrigado a reduzir a factura energética e ao mesmo tempo a disponibilizar mais energia ao mercado. Isto tem levado à procura de fontes de energia alternativas e diversificadas, nomeadamente fontes de energia renováveis para reduzir a dependência energética dos combustíveis fósseis e produzir energia limpa.

Uma forma de produção de bioenergia é a biomassa, que representa a fracção biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da exploração florestal e das indústrias afins, incluindo a da pesca e da aquicultura, bem como a fracção biodegradável de resíduos industriais e urbanos (UE, 2009). Esta foi uma das primeiras fontes de energia a ser aproveitada pelo Homem e continuou até ao século 19 como a fonte primária de energia em todo o mundo. Depois disso, foi substituída pelo carvão, e pelo petróleo nos anos 60 (Hedley, 1986). Hoje em dia, como fonte de energia renovável, continua a apresentar um grande potencial, quer a nível industrial (média e grande escala), quer para uso doméstico (pequena escala). Tendo em conta que o nosso país tem 39% do seu território coberto por floresta e 22% por mato (Ministério da Agricultura, 2010) esse potencial assume uma dimensão ainda maior.

As vantagens da utilização de biomassa não são apenas económicas mas também de carácter social e ambiental. Estas são a sua elevada disponibilidade e o seu baixo preço relativamente aos combustíveis fósseis, a redução de emissões de gases poluentes e do risco de incêndios, a diminuição da dependência energética face ao exterior (diversificação das fontes de energia) e do défice da balança de pagamentos, a criação de postos de trabalho, a promoção da equidade inter-regional, estimulando o desenvolvimento rural, entre outros (Soliño, Prada, & Vázquez, 2008). A sua utilização permite também o aproveitamento e redução de resíduos e a redução do desperdício.

Relativamente à emissão de dióxido de carbono, esta fonte de energia apresenta uma grande vantagem em relação aos combustíveis fósseis porque é considerada uma fonte neutra de carbono: o carbono emitido durante a combustão é absorvido durante o processo de crescimento de novas plantas (The Japan Institute of Energy, 2008). As expressões (1.1) e (1.2) apresentam as reacções genéricas que caracterizam o ciclo fotossíntese-combustão.



No âmbito do presente trabalho, em foco encontra-se o aproveitamento de biomassa florestal residual, que se define como o material resultante da actividade da exploração florestal que é deixado no local por não apresentar valor comercial (ramos, folhas, bicadas de árvores, árvores sem valor comercial, casca e matos) (Ministério da Agricultura, 1998).

Uma forte motivação deste trabalho é a prevenção de incêndios florestais. Em Portugal tem constantemente sido registado um número de incêndios elevado. Em 2010 foram registados 22.026 incêndios florestais e a área ardida foi de 133090,7 hectares. Relativamente a 1980 (2.349 ocorrências e 44.251 hectares de área ardida), regista-se um aumento muito substancial destes números (Inst. da Conservação da Natureza e das Florestas, 2011). O risco de incêndio é cada vez maior em Portugal, o que põe em causa a competitividade e a viabilidade da floresta portuguesa. Isto deve-se, em parte, às condições climáticas mediterrânicas que são propícias para tal e à falta de limpeza e abandono de terrenos por todo o território nacional. O resultado é uma acumulação de combustível florestal no terreno, que facilmente se incendeia.

Os incêndios florestais, embora sejam uma componente importante do ciclo de carbono do planeta e constituam um dos principais mecanismos para a deslocação de carbono do solo para a atmosfera, têm consequências nocivas para o meio ambiente e para o Homem (Loehman, Reinhardt, & Riley, 2013). Entre elas estão a morte de grande número de plantas e de animais ou a sua deslocação e a mudança na estrutura biológica da floresta, do clima e do solo, podendo tornar-se infértil. Existe ainda a problemática da emissão de gases de efeito de estufa e das alterações climáticas consequentes (Zhong, Fan, Liu, & Li, 2003). Os incêndios podem ainda gerar perdas humanas e materiais.

A utilização de biomassa promove uma gestão mais eficiente das florestas nacionais, contribuindo para a redução dos riscos associados, nomeadamente de incêndio, bem como para a sua sustentabilidade (Assembleia da República, 2010).

Apesar de Portugal possuir uma grande quantidade de biomassa disponível, o investimento na limpeza de terrenos é actualmente pouco interessante, pois os custos são elevados e o retorno do investimento é difícil de conseguir, também devido aos elevados custos de transporte da biomassa recolhida.

É imprescindível despertar o interesse económico inerente à limpeza florestal e produção de bioenergia, promovendo o aproveitamento dos recursos disponíveis e a redução dos custos líquidos de limpeza. Isto passa pela implementação de centrais de produção de energia em pequena escala, i.e. instalação de pequenas (<1MW) centrais de cogeração junto de povoações ou zonas industriais, aproximando assim os pontos de recolha e de aproveitamento. Assim conseguir-se-ia uma gestão eficiente do risco dos incêndios florestais e a diversificação do uso de recursos florestais e energéticos pela valorização de um combustível até agora desaproveitado.

1.2. Objectivo do trabalho

O processo de combustão é o processo mais simples e directo para converter biomassa em energia térmica ou eléctrica. Apesar de haver bastante investigação na área de produção de energia a partir de biomassa florestal por meio de combustão e da existência de uma ampla variedade de equipamento de exploração florestal e queima directa (destroçadores, caldeiras, alimentadores, etc.), continuam a existir muitos problemas relacionados com a utilização de biomassa florestal residual para fins energéticos. O principal problema consiste na preparação de biomassa para a sua queima.

O objectivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de metodologia e de um protótipo de equipamento para pré-tratamento (separação e secagem) de biomassa florestal residual para fins energéticos através de combustão numa caldeira a estilha. Para o efeito, serão estudados diversos tipos de biomassa, nomeadamente biomassa florestal residual, *woodchips* e *pellets*. A fim de caracterizar a tipologia das partículas, as propriedades de sorção e o potencial energético serão realizados os seguintes grupos de ensaios: (i) separação das amostras de biomassa florestal residual por granulometria, (ii) determinação do poder calorífico, (iii) queima em calorímetro cónico, (iv) secagem em câmara climática e (v) secagem em túnel de vento. A caracterização detalhada das propriedades de vários tipos de biomassa será a referência para a concepção de um equipamento de pré-tratamento de biomassa. Por outro lado, o conhecimento destas propriedades permitirá uma escolha de equipamentos adicionais adequados ao tipo de biomassa, tais como destroçador, sistema de alimentação da caldeira e própria caldeira.

2. CAPÍTULO 1 – PRODUÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL

2.1. Caracterização de biomassa florestal como uma fonte de bioenergia

A selecção de todo o equipamento envolvido no processo de conversão da biomassa em energia e dos parâmetros de projecto, operação, eficiência e planos de manutenção depende das propriedades da biomassa utilizada. Interessa, portanto, caracteriza-la segundo parâmetros físico-químicos de modo a garantir uma utilização eficiente do seu potencial energético com benefícios económicos e ambientais.

Do ponto de vista físico-químico, os combustíveis florestais podem ser classificados pelos parâmetros descritos seguidamente.

Densidade

Este parâmetro representa a massa de matéria por unidade de volume. É uma variável importante no que diz respeito ao transporte e manuseamento do material.

Tamanho das partículas

Este parâmetro diz respeito ao tamanho das partículas à entrada da caldeira, e depende do tipo de pré-tratamento utilizado e da tipologia da biomassa. Este condiciona as condições de combustão, isto porque há uma variação da razão área/volume. Um tamanho de partículas uniforme evita problemas na alimentação da caldeira e permite um processo com menos interrupções.

Humidade

O teor de humidade é um dos parâmetros que mais importa conhecer quando se lida com biomassa para fins energéticos, e define-se como a quantidade de água presente na biomassa. É expressa em percentagem mássica e há duas formas de representar o seu valor: (i) humidade em base húmida, que é expressa pela razão entre a massa de água e a massa total,

$$H_{b.h.} = \frac{m_a}{m_t} [\%], \quad (2.1)$$

e (ii) humidade em base seca, em que o denominador é a massa de biomassa seca, ou seja, não se entra em conta com a massa de água,

$$H_{b.s.} = \frac{m_a}{m_s} [\%]. \quad (2.2)$$

O teor de humidade ($H_{b.s.}$ e $H_{b.h.}$) engloba a humidade inerente (moléculas de água ligadas aos compostos químicos da biomassa) e a humidade superficial (associada à biomassa por meios físicos).

As características do combustível que afectam o teor de humidade são:

- Composição química
- Estrutura interna
- Propriedades físicas

Morfologicamente, a madeira é formada por celulose (44-55% do peso seco total), hemicelulose (15-25%), lenhina (15-30%) e extractivos (2-15%), que são resinas, açúcares e ácidos gordos. O teor de humidade depende igualmente da estrutura interna da madeira. Outro factor importante é se a madeira está morta ou viva. Para combustíveis vivos os factores que controlam o movimento da água são essencialmente a osmose, resultante das diferenças de concentração de água nas várias zonas, e as forças capilares, resultantes da transpiração da planta na sua superfície. Quanto às propriedades físicas, os aspectos condicionantes são a densidade do material, o tamanho e a forma das partículas e a presença de extractivos (Nelson Jr., 2001).

O teor de humidade influencia a combustão, sendo que quanto menor for o teor de humidade do combustível, maior é o seu poder calorífico inferior. Isto porque é gasta energia resultante da combustão na evaporação da água que entra na caldeira incorporada no combustível.

Um teor de humidade muito elevado dificulta a recolha, armazenamento, manuseamento e pré-processamento e também aumenta os custos de transporte. Este pode ser reduzido deixando a biomassa no terreno ou num sítio coberto durante algumas semanas ou secando-a artificialmente (Clarke & Preto, 2011).

O teor de humidade também influencia a quantidade de gases emitidos, o que será abordado mais à frente.

Composição química elementar

A composição química da biomassa é relativamente uniforme, como é demonstrado nas tabelas seguintes.

Espécie	N [%]	C [%]	H [%]	O [%]
<i>E. globulus labill</i>	2,11	46,65	12,42	38,68
<i>P. pinaster Aiton</i>	3,02	46,96	6,39	43,41
<i>P. aquilinum L.</i>	1,41	45,38	5,82	46,81
<i>Q. robur L.</i>	1,05	44,70	11,96	40,14
<i>S. scoparius (L.) Link</i>	2,01	50,55	7,04	40,03
<i>R. fruticosus L.</i>	1,73	47,22	6,13	44,58
<i>U. europaeus L.</i>	1,00	49,70	6,88	42,07
<i>C. sativa Miller</i>	0,86	45,60	5,89	47,49
<i>A. pseudoplanatus L.</i>	2,66	45,45	13,04	38,70
<i>Pinus pinaster</i>	0,10	48,30	6,00	45,30
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,20	47,60	5,90	45,80
<i>Cedrus atlântica</i>	0,20	50,30	5,60	43,60
<i>Castanea sativa</i>	0,20	47,10	4,90	47,70
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,20	46,20	5,80	47,20
<i>Fagus sylvatica</i>	0,20	46,70	5,90	46,80
<i>Quercus robur</i>	0,20	47,20	5,50	46,80
<i>Fraxinus angustifolia</i>	0,20	47,70	6,10	45,60
<i>Prunus avium</i>	0,20	48,60	5,80	45,30
<i>Salix babilónica</i>	0,40	47,20	5,60	44,40
<i>Populus euro-americana</i>	0,20	47,80	6,00	45,40
<i>Acer pseudoplanatus</i>	0,20	46,80	5,80	46,10
<i>Chlorophora excelsa</i>	0,20	50,70	6,00	40,40
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	0,30	47,80	5,80	45,10
<i>Gossweileredondron balsamiferum</i>	0,50	50,40	6,20	42,50
<i>Bowdichia nidita</i>	0,20	52,30	6,10	41,30
<i>Hymenaea courbaril</i>	0,20	48,30	5,70	45,10

Tabela 1 – Composição química de diversas espécies de madeira (Núñez-Regueira, Añón, & Castiñeiras, 1996) (Telmo, Lousada, & Moreira, 2010)

Média [%]	
N	0,76
C	47,82
H	6,70
O	44,09

Tabela 2 – Composição química média das diversas espécies de madeira

Os principais constituintes elementares dos combustíveis florestais são carbono, oxigénio, hidrogénio, azoto e enxofre. A composição da matéria condiciona, essencialmente, o poder calorífico e os níveis de emissão de gases poluentes.

Quantidade de cinzas

As cinzas definem-se como a parte não combustível (Clarke & Preto, 2011) ou a parte inorgânica do material (Sousa, 2009). Estas afectam negativamente o poder calorífico da biomassa e também a eficiência do sistema, ao provocarem problemas de entupimento na caldeira devido à fusão e deposição dos materiais que compõem a cinza. Por estas razões, baixos valores de contaminantes são desejáveis.

Poder calorífico

O poder calorífico define-se como a energia máxima que se pode extrair da combustão completa de um combustível por unidade de massa e pode ser expresso em MJ/kg. Pode ser determinado com base na composição elementar, teor de cinzas e humidade da biomassa, ou através da realização de ensaios laboratoriais. Identificam-se duas denominações diferentes, o poder calorífico superior (*PCS*), e o poder calorífico inferior (*PCI*). O *PCS* é o calor de combustão calculado assumindo que toda a água existente nos produtos condensou. Neste caso liberta-se uma maior quantidade de energia, daí a designação de superior. O *PCI* corresponde ao caso em que se assume que nenhuma água condensa. O valor de *PCS* é, portanto, superior ao valor de *PCI* (Carvalheira, 2012).

2.2. Produtos a partir de biomassa florestal

No contexto de produção de bioenergia, os principais produtos utilizados provenientes da biomassa florestal são os descritos seguidamente.

Toros

Toros são madeira (braças ou troncos) sem pré-tratamento ou com corte grosseiro (Figura 1a). É a forma mais tradicional e simples de preparar a madeira para ser queimada. O comprimento dos toros é variável, mas em geral nunca superior a 1m. As caldeiras são optimizadas em função das suas dimensões. Normalmente estes são também cortados longitudinalmente para aumentar a área de superfície para combustão e facilitar a secagem da madeira. O processo de corte pode ser feito manualmente ou com recurso a sistemas mecânicos de serras ou hidráulicos. Devido à falta de uniformidade, a caldeira não pode ser

alimentada automaticamente, portanto o seu uso é restringido a caldeiras com alimentação manual (GREENPRO, 2004).

Estilha

É obtida a partir da madeira através de cortadores mecânicos (destroçadores, trituradores ou *chippers*). As partículas constituintes têm habitualmente um comprimento entre 1 e 10 centímetros, e o seu diâmetro é inferior a 4 centímetros (Figura 1b). No seu estado bruto, a estilha normalmente contém pedras, metais e outros materiais como areia, devidos à forma de manuseamento ou à presença de inertes na casca das árvores.

A estilha é maioritariamente utilizada em sistemas de alimentação automáticos, portanto é essencial que o combustível tenha dimensões uniformes e um teor de humidade baixo para garantir uma alimentação sem bloqueios e formação de aglomerados. Um teor de humidade baixo também é indispensável para uma combustão eficiente.

O objectivo da produção de estilha é garantir uma maior homogeneidade no combustível e uma maior área de contacto com o oxigénio, para além de permitir uma alimentação automatizada. A estilha pode ser alimentada em todos os sistemas de combustão disponíveis, com várias gamas de potência (GREENPRO, 2004).

Woodchips

Woodchips também podem ser denominados por lascas de madeira (Figura 1c). Estes apresentam uma granulometria maior que a estilha, e provêm de madeira mais limpa e com um valor comercial maior. Têm menos quantidade de cascas, inertes e outros contaminantes. O comprimento das partículas é sensivelmente igual à da estilha, contudo o seu diâmetro é maior, a partir dos 2,5 centímetros.

Carvão vegetal

É produzido através de processos simples: aquecendo a madeira na ausência de oxigénio, ou queimando-a e depois retirando o oxigénio envolvente. O resultado é um resíduo maioritariamente de carbono, poroso e leve.

Para além de ser empregue como combustível tem também outras aplicações, nomeadamente filtros, medicamentos, materiais de abrasão, explosivos, lápis, entre outros.

A vantagem em relação à madeira bruta é que arde mais facilmente. Isto porque tem poder calorífico maior devido a uma maior pureza (maior teor de carbono) e um menor teor de humidade. Em contrapartida, emite mais monóxido de carbono (CO) e a sua produção é pouco eficiente.

Biomassa densificada

Os resíduos florestais e agrícolas têm uma massa volúmica baixa, de 50 a 200 kg/m³. Estes valores são muito baixos em relação aos do carvão, por exemplo (800 kg/m³). Isto provoca dificuldades no transporte e armazenamento. Para além disso, este tipo de biomassa apresenta um poder calorífico baixo e emissões de cinzas elevadas. Tudo isto faz com que seja economicamente pouco atractiva enquanto combustível.

Uma alternativa para contornar as desvantagens acima mencionadas pode ser a densificação de biomassa. O resultado final é um combustível com baixo teor de humidade (10 a 15%), granulometria adequada aos sistemas de alimentação, maior taxa de combustão, baixo teor de cinzas (<4%), maior uniformidade e menor emissão de componentes poluentes (Sousa, 2009).

Apesar destes aspectos favoráveis, o processamento do material provoca naturalmente um aumento do seu preço e um enorme gasto de energia. Isso demonstra-se no seguinte caso específico, em que a produção de 1 kg de *pellets* numa instalação na Nova Zelândia requer 4 kg de madeira queimada, e a energia consumida para a produção do produto final (16MJ/kg) corresponde a 80% do poder calorífico de uma madeira comum (Nielsen & Estcourt, 2003). Isto demonstra que o processamento de *pellets* é bastante dispendioso.

As matérias-primas utilizadas no processo de densificação são normalmente resíduos florestais e agrícolas, serradura, estilha, etc.

Actualmente, os produtos resultantes de densificação mais utilizados são *pellets* e *briquettes*.

- *Pellets*

Pellets são formas mecanicamente estáveis de pó de madeira (Figura 1d). O seu processo de produção requer um pré-condicionamento da matéria-prima, misturando-a com um adesivo para facilitar o processo de prensagem para melhorar o equilíbrio energético e a resistência abrasiva do produto, aumentando a sua temperatura por injeção de vapor, ou ambos (GREENPRO, 2004).

Como já foi referido, esta transformação permite um aumento da eficiência de combustão e a alimentação automática da caldeira.

O tamanho de *pellets* é normalizado e as principais características são referidas na Tabela 3.

d [mm]	6-12
l [mm]	10-30
$H_{b.s.}$ [%]	10-20
$\rho_{aparente}$ [kg/m ³]	600
$\rho_{partirula}$ [kg/m ³]	1120
PCI [MJ/kg]	18

Tabela 3 – Principais características de *pellets* (Knoef, 2005)

A produção de um metro cúbico de *pellets* requer 6 a 8 metros cúbicos de estilha ou serradura, previamente secos. A compactação acima dos 1000bar permite que estes se mantenham estáveis até à sua queima (GREENPRO, 2004).

- *Briquettes*

Briquettes de madeira também são prensados geralmente a partir de estilha e serradura, sendo que estes devem ser anteriormente secos até se obter um teor de água inferior a 10% (Figura 1e).

O processo pode ser executado a média ou alta pressão (1000 a 1500 bar) para produzir *briquettes* de alta densidade (800 a 1200 kg/m³) sem a necessidade de adição de adesivos, ou a baixa pressão produzindo *briquettes* de 400 a 600 kg/m³ com adição de adesivos. Se o aumento de temperatura associado à compressão for insuficiente para o processo de densificação, pode-se aquecer a biomassa (GREENPRO, 2004).

As principais características de *briquettes* são apresentadas na Tabela 4.

d [mm]	10-100
l [mm]	20-300
$H_{b.s.}$ [%]	10-15
$\rho_{partirula}$ [kg/m ³]	1000
PCI [MJ/kg]	18

Tabela 4 – Principais características de *briquettes* (Knoef, 2005)

Briquettes são indicados para sistemas de combustão pequenos alimentados manualmente, tais como fornos cerâmicos, queimadores de madeira e lareiras abertas (GREENPRO, 2004).



a



b



c



d



e

Figura 1 – Toros (a), estilha (b), woodchips(c), pellets (d) e briquettes (e)

2.3. Recolha e preparação de biomassa florestal

A mecanização das operações florestais possibilita um trabalho mais produtivo e seguro, com menos mão-de-obra. No âmbito deste trabalho, a máquina mais importante é o destroçador, triturador ou *chipper*, que converte braças ou troncos em estilha.

O destroçador é essencial porque reduz a dimensão da madeira, tornando o seu manuseamento e armazenagem mais fácil e criando um combustível mais homogêneo. A homogeneidade e granulometria do destroçamento condicionam fortemente os parâmetros de combustão da caldeira, para além de definirem o tipo de sistema de alimentação necessário. A frequência de paragem do mesmo devido a bloqueios ou aglomeração de matéria-prima também se relaciona com o destroçador. Misturas com granulometria mais uniforme levam a um melhor funcionamento do sistema de alimentação, evitando paragens da caldeira e reduzindo a periodicidade de inspeções por parte de operários.

Os principais tipos de destroçadores são caracterizados abaixo.

Tooth shredders

Possuem uma ou duas filas de cilindros com dentes, que rodam e cortam a madeira pressionada contra uma bigorna. Este tipo de equipamento é adequado para a pequena indústria (Vankerkove & Van-Belle, 1998).

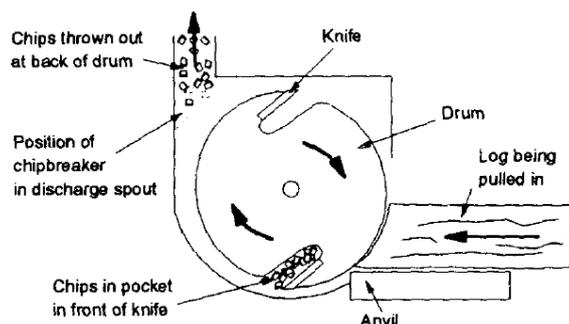


Figura 2 – Representação esquemática de um destroçador tipo *tooth shredder* (Vankerkove & Van-Belle, 1998)

Drum chippers

Moem troncos de madeira forçando a sua passagem por entre dois cilindros trituradores. Estes são geralmente utilizados na indústria de produtos florestais pela sua relação custo-benefício (Vankerkove & Van-Belle, 1998).

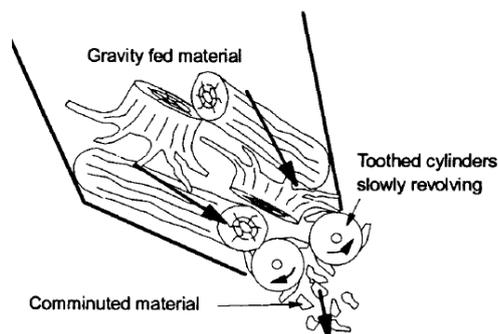


Figura 3 - Representação esquemática de um destoçador tipo *drum chipper* (Vankerkove & Van-Belle, 1998)

Trituradores em espiral

São eficazes na destroça de troncos de pinheiro e eucalipto (Knoef, 2005).

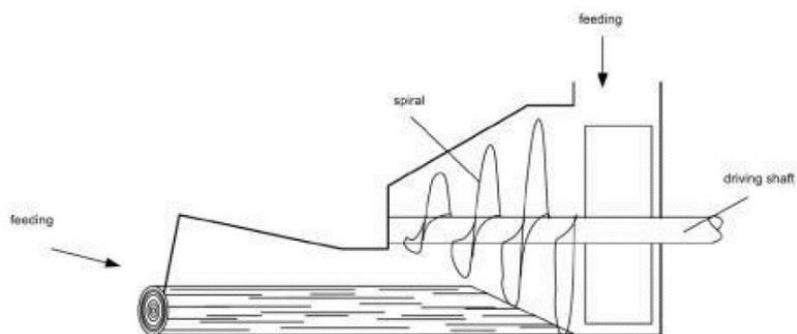


Figura 4 – Representação esquemática de um triturador em espiral (Knoef, 2005)

Moinhos de martelos

Recorre-se a estes especialmente no caso de os troncos ou ramos conterem terra ou pedras, pois este recolhe o material estranho (Knoef, 2005).

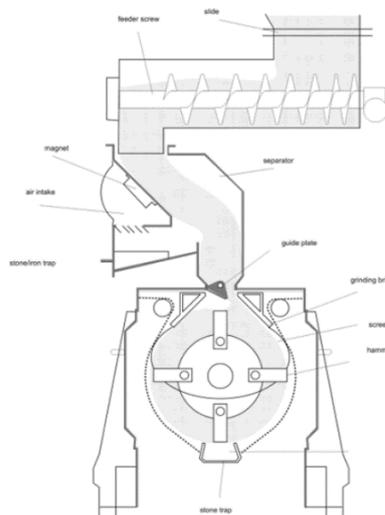


Figura 5 - Representação esquemática de um moinho de martelos (Knoef, 2005)

Em termos de transporte e manuseamento de biomassa, recorre-se a guindastes e veículos carregadores que movimentam grandes quantidades de material. A biomassa pode também ser transportada em distâncias mais pequenas em tapetes rolantes, por parafusos de Arquimedes ou por ventiladores, dependendo da sua granulometria (Sousa, 2009).

2.4. Separação e secagem de biomassa florestal para uso industrial e doméstico

Antes de a biomassa ser separada por granulometria, é necessário separá-la de corpos estranhos como pedras e partículas de metal. Isto exige a instalação de equipamento específico que remove estes corpos por efeito magnético ou por fluxo de ar (separação por densidade da partícula).

No que diz respeito aos separadores de estilha por granulometria, os principais tipos de equipamento são os separadores de disco e os de peneira ou grelha (rotativo ou vibratório). Nos separadores de disco (Figura 6a) a biomassa é conduzida sobre uma série de discos rotativos que separam a biomassa de acordo com o diâmetro da partícula. As granulometrias rejeitadas dependem das características dos discos. Os separadores de peneira ou grelha transportam a biomassa sobre uma superfície com orifícios. Esta pode ser horizontal e vibrar (Figura 6b) ou circular e rodar (Figura 6c), fazendo com que as partículas de dimensões inferiores às dimensões dos orifícios da superfície do separador sejam separadas do resto da estilha.

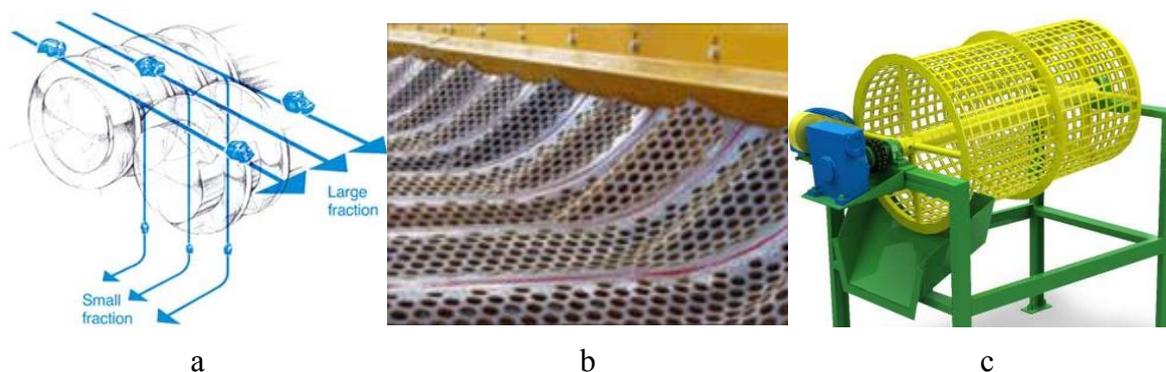


Figura 6 – Separadores de estilha por granulometria de disco (a), peneira ou grelha vibratório (b) e rotativo (c)

Relativamente à secagem de biomassa para queima, esta é importante pois aumenta a eficiência da caldeira, a produção de vapor e permite um melhor funcionamento da

caldeira (Roos, 2008). Para além disso, a combustão de biomassa com alto teor de humidade exige equipamento de maior dimensão para a converter em energia, o que implica um maior investimento quando nem sempre é necessário. Equipamento de menores dimensões também é mais sensível à variação de parâmetros de humidade (Liang, Khan, & Meng, 1996). O teor de humidade tem também impacto na emissão de gases.

Na caldeira, a humidade da biomassa tem de ser aquecida para evaporar, sendo desperdiçada uma grande quantidade de energia. Embora um secador também consuma energia para evaporar a humidade, a secagem ocorre mais eficientemente pois o equipamento é concebido especialmente para o efeito. A eficiência da secagem pode ainda ser aumentada se for recuperado calor dos gases de combustão da caldeira.

Para estilha com um teor de humidade de 45% ($H_{b.s.}=45\%$), a eficiência máxima da caldeira com equipamento convencional é de aproximadamente 74% (Roos, 2008). Já queimando estilha seca ($H_{b.s.}\approx 10\%$), a eficiência da caldeira pode ser de cerca de 80%, o que corresponde a um aumento de produção de vapor de 50 a 60% (Bruce & Sinclair, 1996). A Figura 7 mostra a influência do teor de humidade da biomassa na eficiência da caldeira e no volume de gases de combustão produzidos.

Se a biomassa estiver demasiado húmida, pode ser até impossível manter a chama acesa sem a utilização complementar de combustíveis fósseis. Para biomassa seca, a chama é mais quente (madeira seca arde a temperaturas de 1200 a 1400°C, húmida de 900 a 1000°C) e mais uniforme, proporcionando uma combustão completa (oxidação completa para CO_2 e NO_x), o que resulta numa redução da emissão de compostos voláteis orgânicos, da produção de cinzas (Roos, 2008) e de resíduos não-queimáveis (Chen, et al., 2010).

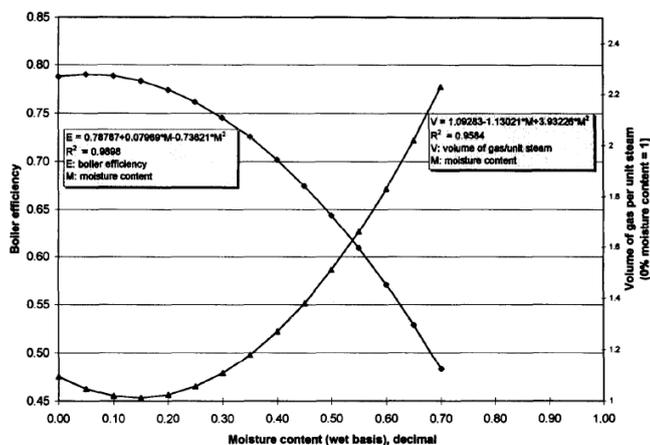


Figura 7 – Influência do teor de humidade da biomassa na eficiência da caldeira e no volume de gases produzidos na combustão (Liang, Khan, & Meng, 1996)

Relativamente à emissão de gases poluentes, a combustão de biomassa húmida aumenta as emissões de monóxido de carbono, azoto, amoníaco e partículas de carbono. (Chen, et al., 2010).

Apesar dos benefícios apresentados, a secagem de biomassa requer uma grande quantidade de energia. Para remover 1kg de água de biomassa comum, podem ser necessários 2,6MJ de energia, sendo que o PCS da biomassa varia entre 18 e 21MJ/kg e o seu teor de humidade em base seca pode ultrapassar os 100% (Svoboda, Pohorely, Martinec, Baxter, & Hunter, 2005).

Os secadores mais usados para secagem forçada de biomassa são os do tipo tambor rotativo e do tipo pneumático. Ambos funcionam frequentemente com recirculação de gases de combustão para aproveitamento energia. As temperaturas típicas de entrada do ar no secador são entre 200 e 500°C e as de saída entre 90 e 120°C (para prevenir a condensação do vapor).

O processo no secador do tipo tambor rotativo (Figura 8) consiste na passagem das partículas através de um escoamento de ar quente que remove a água das suas partículas. O canal de escoamento é um cilindro rotativo, para aumentar a área de contacto das partículas com o escoamento (Meza, Gil, Cortés, & González, 2008).

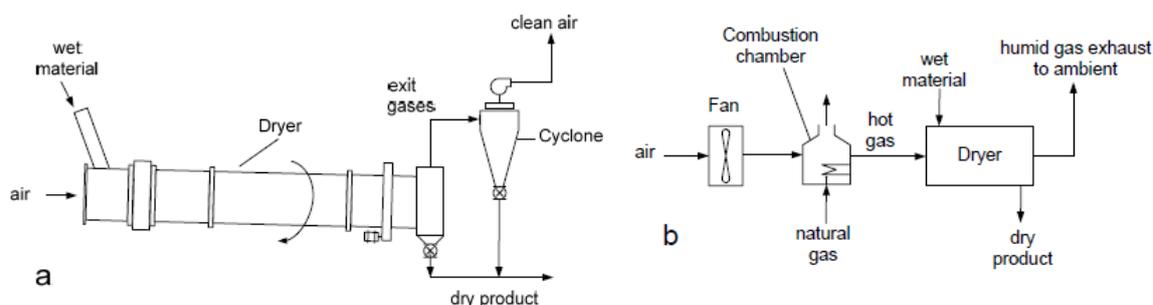


Figura 8 – Representação esquemática (a) e do processo (b) de um secador de tambor rotativo (Meza, Gil, Cortés, & González, 2008)

2.5. Caracterização de uma caldeira a biomassa

Os três componentes principais da caldeira são a câmara de combustão, o sistema de alimentação e o permutador de calor (Míguez, Morán, Granada, & Porteiro, 2012).

A câmara de combustão é desenhada para permitir a queima contínua do combustível. Esta pode ser realizada por pulverização (partículas até 5 mm de diâmetro),

em grelhas (partículas de 2 a 20 mm de diâmetro), ou em leito fluidizado (tamanhos variados). A entrada do ar pode dar-se através de leito estacionário ou de injectores. A remoção das cinzas pode ser feita na parte inferior da grelha (cinzeiro) ou através de ciclone ou filtro (Góis, 2013).

Relativamente ao sistema de alimentação da caldeira, o mais apropriado é um alimentador por parafuso sem-fim (Sousa, 2009). A sua configuração depende da distância entre o ponto de armazenamento e a caldeira, do regime de alimentação (contínuo ou descontínuo) e das características físicas do material (granulometria, morfologia, densidade e teor de humidade). A câmara de combustão pode ser alimentada pela parte inferior, superior ou horizontalmente (Míguez, Morán, Granada, & Porteiro, 2012).

O permutador de calor permite a troca de calor entre a chama e o fluido térmico. O permutador mais utilizado em caldeiras a biomassa é do tipo gastubular (Míguez, Morán, Granada, & Porteiro, 2012). Neste, dá-se a passagem dos produtos de combustão por tubos, à volta dos quais está fluido térmico (Góis, 2013). O tipo aquatubular, em que o fluido térmico está dentro dos tubos e os produtos de combustão na área envolvente aos tubos (Góis, 2013), é menos utilizado, mas ainda assim significativo para caldeiras a estilha (Míguez, Morán, Granada, & Porteiro, 2012).

2.6. Descrição do processo de combustão de biomassa

O processo de combustão de biomassa é um fenómeno complexo composto por várias fases nem sempre facilmente distinguíveis que depende de vários parâmetros. Genericamente, o processo divide-se em quatro fases: secagem, pirólise, gaseificação e combustão. O aspecto da curva de perda de massa e as fases correspondentes são apresentados na Figura 9.

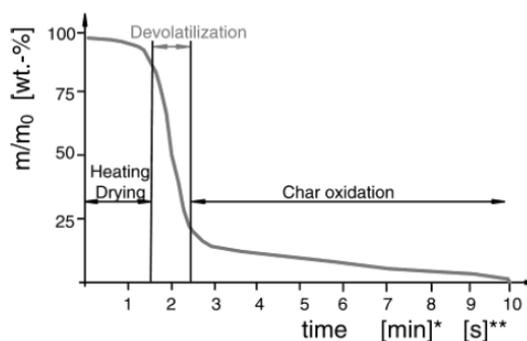


Figura 9 – Processo de combustão de biomassa (Nussbaumer, 2003)

Secagem:

Nesta fase da combustão, a água presente na biomassa (humidade) evapora a temperaturas inferiores a 100°C. Isto provoca um abrandamento da combustão, pois a energia utilizada para a evaporação é desperdiçada. É, portanto, importante reduzir o teor de humidade da biomassa antes de a queimar, pois uma grande quantidade de energia é dissipada na evaporação da água, o que equivale a uma redução do *PCI* efectivo do combustível (Loo & Koppejan, 2008). O teor de humidade da biomassa não deve ser superior a 50-60% (*H_{b.h.}*), para garantir que a combustão se mantenha (Knoef, 2005).

Pirólise

Este fenómeno define-se como desvolatilização na ausência de oxigénio e ocorre entre os 200 e os 500°C (Knoef, 2005). Neste, ocorre a decomposição das estruturas poliméricas do material e são produzidos elementos voláteis. Tal como na secagem, este processo consome energia, portanto é endotérmico (Loo & Koppejan, 2008).

Gaseificação

A gaseificação é uma fase exotérmica que acontece entre os 750 e os 900°C, que consiste na decomposição do material lenhoso em vapores condensáveis, alcatrões e carvões, em presença de oxigénio e de vapor de água. O gás resultante contém hidrogénio, monóxido e dióxido de carbono e metano (Knoef, 2005).

Carbonização

Esta é definida como a oxidação total dos carvões e condensados resultantes das fases anteriores, que reagem com o oxigénio (O₂) originando dióxido de carbono (CO₂) e libertando calor. São produzidos gases cuja energia pode ser recuperada (Loo & Koppejan, 2008).

3. CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Amostragem

Foram estudadas amostras de biomassa residual, *woodchips* e *pellets* (Figura 10). As amostras de biomassa residual foram recolhidas de um armazém de biomassa do Hotel Duecitânia e de dois parques de recolha de biomassa residual (FLOPEN e Cabeça Redonda) localizados em Penela, distrito de Coimbra. As amostras de *woodchips* foram recolhidas do armazém de biomassa do Hotel Duecitânia e a amostra de *pellets* foi recolhida dum saco *standard* de 10kg comercializado em supermercados (produtor *Pinewells*, S.A.). A recolha das amostras foi feita de modo a garantir a diversificação de material e, conseqüentemente, a abrangência dos resultados.



Figura 10 - Amostras de biomassa florestal residual recolhida em Cabeça Redonda (*Eucalyptus globulus*) (a) e FLOPEN (b), *woodchips* (c) e *pellets* (d)

A amostra de biomassa residual (2,423kg) recolhida de um parque de biomassa em Cabeça Redonda era constituída por uma única espécie, eucalipto (*Eucalyptus globulus*).

As amostras recolhidas no Hotel Duecitânia (1,245kg) e na FLOPEN (0,967kg) eram compostas por espécies diferentes não identificadas.

No parque de recolha de biomassa da FLOPEN são depositados, pelos proprietários florestais e agrícolas, resíduos provenientes de exploração florestal (ramos, cepos, etc.), desbastes e podas de árvores de fruto. A biomassa permanece no local durante muito tempo devido à necessidade de acumular material para rentabilizar custos com aluguer de equipamento de destroçamento. Disso resulta um menor controlo da qualidade da biomassa, e uma presença em grande quantidade de folhagem, casca e inertes.

No Hotel Duecitânia, onde está instalada uma caldeira a biomassa, verificou-se um controlo mais rigoroso de qualidade de biomassa residual. A biomassa proveniente de podas e cortes de árvores dos terrenos em redor do Hotel apresentava uma presença maior de material lenhoso, embora a qualidade de destroçamento não fosse tão elevada devido a problemas no destroçador.

3.2. Separação das amostras por granulometria

As amostras recolhidas foram separadas em seis classes de granulometria diferentes usando instrumentos diferentes (Tabela 5). O diâmetro da partícula (d) foi escolhido como parâmetro de classificação e definição de classes de granulometria.

Classe de granulometria	Instrumento utilizado na separação
$d \leq 1\text{mm}$	Rede de 1x1mm
$1 < d \leq 3\text{mm}$	Placa com furos de 3mm de diâmetro
$3 < d \leq 6\text{mm}$	Placa com furos de 6x15mm
$6 < d \leq 15\text{mm}$	
$15 < d \leq 25\text{mm}$	Régua (separação por partícula)
$d > 25\text{mm}$	

Tabela 5. Classes de granulometria de biomassa e respectivos instrumentos de separação

Estilha com partículas cujo comprimento era superior a 100mm foi considerada como estilha não diferenciada. Esta não entrou em análise nos ensaios posteriores. Tal dimensão das partículas causa problemas no alimentador, por isso a estilha com estas características deve ser destroçada novamente para diminuir o comprimento das partículas.

Após a separação pela granulometria, as amostras foram pesadas numa balança electrónica com precisão de 0,1g e foi calculada a percentagem mássica de cada classe de granulometria.

3.3. Ensaios de poder calorífico

Os ensaios de poder calorífico foram efectuados para cada tipo de granulometria usando um calorímetro de bomba *Parr 1341*, sendo determinado o poder calorífico superior (*PCS*) a volume constante. As amostras foram trituradas numa trituradora laboratorial *Retsch-Mühle* com grelha de 2mm.

O procedimento experimental foi realizado de acordo com a norma CEN/TS 14918. Para a realização dos ensaios, colocaram-se $2000 \pm 0,5$ g de água destilada no balde do calorímetro. Foi pesado $1 \pm 0,005$ g de amostra numa balança electrónica com precisão de 0,001g. Colocaram-se 100mm de fio de ignição (*Parr 45C10 nickel-chromium fuse wire*) em contacto com a amostra. Foi adicionado 1ml de água destilada no fundo da bomba, colocado o suporte com amostra dentro da bomba e fechada a tampa. A bomba foi pressurizada a 25bar e de seguida colocada dentro do balde do calorímetro. O agitador do equipamento foi ligado, assim como o equipamento de recolha de dados de temperatura. Durante 5 minutos, necessários para a temperatura da água estabilizar, não se efectuou o registo de temperaturas. Após esse período a temperatura foi registada a cada minuto, durante 5 minutos. Seguidamente foi feita a ignição e procedeu-se ao registo dos valores de temperatura de 15 em 15 segundos durante 3 minutos e depois a cada minuto. O registo foi terminado quando a temperatura se manteve constante durante 5 minutos, ou a sua variação foi constante.

O valor de PCS_{exp} determinado no ensaio corresponde ao valor da massa total da amostra que engloba massa de resíduos e massa de água:

$$m_{total} = m_s + m_{res} + m_a. \quad (3.1)$$

Assim sendo, foi feita a correcção do valor do PCS à massa de resíduos (PCS_{res}) e à massa da água ($PCS_{b.s.}$).

Para a correcção do valor de PCS à base seca foi utilizada uma fórmula proposta por Riley J. T. (2007) e presente também na norma CEN/TS-14918,

$$PCS_{b.s.} = PCS_{exp} * \frac{100}{100 - H_{b.s.}} \text{ [MJ/kg]}. \quad (3.2)$$

Para determinação da humidade da amostra (em base seca), esta foi colocada em estufa a 105°C durante 24h.

No cálculo de PCS não foi feita a correcção do valor de energia de formação de ácido nítrico e ácido sulfúrico.

Para cada amostra foram realizadas 3 réplicas para garantir a validade dos resultados. O valor médio das três réplicas foi assumido como o valor final do poder calorífico superior a volume constante da amostra.

3.4. Ensaio queima em calorímetro cónico

O objectivo destes ensaios foi analisar a variação da massa das amostras de diferentes tipos de biomassa ao longo da combustão e caracterizar as suas diferentes fases.

O calorímetro cónico utilizado é composto por uma resistência eléctrica posicionada debaixo de um cone metálico que fornece calor à amostra durante o ensaio (Figura 11a). O suporte para amostra encontra-se conectado a uma balança electrónica com precisão de 0,01g que faz aquisição e exportação de dados para suporte informático.



Figura 11 - Ensaio e configuração do calorímetro cónico (a) e amostras para o ensaio: *woodchips*, estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$, e *pellets* (b)

Antes da realização dos ensaios, procedeu-se à medição do fluxo de calor Φ [W/m^2] que o equipamento fornecia com a configuração definida. Para tal, recorreu-se a um disco de alumínio com a superfície pintada de preto, de modo a assemelhar-se a um corpo negro e absorver o máximo de radiação (Figueiredo & Costa, 2004). O disco foi exposto ao calor, e foi registada a sua temperatura durante 30 segundos com recurso a um *PICO TC-08* ligado a um computador para aquisição dos dados. O cálculo do fluxo de calor foi efectuado com recurso à expressão (3.3). Foram realizadas 3 medições e o valor médio calculado foi de $12904,4 \text{ W}/\text{m}^2$.

$$\Phi = \frac{m_{disco} * c_p * \frac{dT}{dt}}{A_{disco}} \text{ [W}/\text{m}^2] \quad (3.3)$$

A_{disco} – área do disco [m^2]

c_p – calor específico – c_p (alumínio) = $875\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$

Nos ensaios de calorímetro cónico foram usadas amostras de 50g de *woodchips* e biomassa residual de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidos no Hotel Duecitânia e *pellets* (Figura 11b). Para cada variedade de biomassa foram realizadas duas réplicas do ensaio.

Os ensaios foram realizados com chama piloto para facilitar a ignição. A amostra foi posicionada no suporte debaixo da resistência eléctrica e fez-se aquisição de dados de massa com intervalos de meio segundo. O ensaio foi dado como terminado quando a chama se extinguiu.

3.5. Ensaio de cinética de secagem em câmara climática

Os ensaios de análise da variação da humidade das amostras em resposta a determinados valores de temperatura (T) e humidade relativa do ar (H_r), foram realizados numa câmara climática *Fitoclima 300 EDTU*. Dois grupos de ensaios foram realizados.

O primeiro grupo de ensaios teve como objectivo a determinação de curvas de desorção. Nestes foi utilizada biomassa recolhida na FLOPEN. Os ensaios foram realizados com temperaturas de 15, 25 e 35°C (representativas de Inverno, Primavera/Outono e Verão, respectivamente) e humidades relativas do ar entre 80 e 20%. A massa inicial das amostras foi de cerca de 12g.

O segundo grupo foi efectuado para as amostras recolhidas no Hotel Duecitânia (biomassa diversa) e em Cabeça Redonda (*Eucalyptus globulus*) com o intuito de identificar a variação da humidade da amostra para valores de T e H_r estabelecidos. Ensaio para ambas as amostras não separadas pela granulometria foram realizados com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%. Ensaio para a amostra recolhida no Hotel Duecitânia de granulometria $3 < d \leq 6$ mm foram feitos com temperaturas de 50 e 40°C e humidade relativa de 10%. Estes parâmetros foram escolhidos tendo em conta os parâmetros dos testes em túnel de vento. Cada ensaio do segundo grupo teve a duração de 24h. Amostras de cerca de 25g foram colocadas dentro da câmara climática num suporte ligado a uma balança electrónica *KERN PRJ 320* com precisão de 0,001g. A massa da amostra foi registada em suporte informático a cada minuto.

O peso seco da amostra foi determinado após secagem em estufa durante 24 horas. Com base nos valores da massa total (m_{total}) e massa seca (m_s) foi determinada a humidade da amostra em base seca pela expressão (3.4).

$$H_{b.s.} = \frac{m_t - m_s}{m_s} [\%] \tag{3.4}$$

3.6. Ensaio de cinética de secagem em túnel de vento

Para a realização dos ensaios de secagem de biomassa foi utilizado um túnel de vento construído em polietileno extrudido de alta densidade com aproximadamente 30mm de espessura (Figuras 12 e 13). Na parte inferior do túnel foi incorporada uma estrutura metálica para colocação do suporte com biomassa, apoiada sobre uma balança electrónica *A&D FX 3000 (A&D Instruments)* a fim de permitir aquisição de massa em contínuo. Como suporte, foi utilizada uma rede com orifícios de 1x1mm.



Figura 12 – Interior do túnel de vento

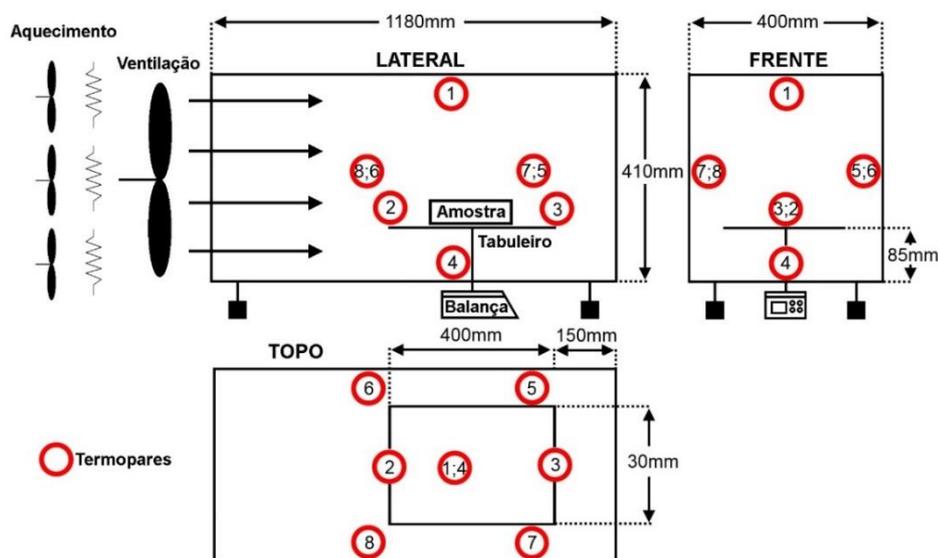


Figura 13 - Configuração do túnel de vento

Para alcançar a temperatura e a velocidade do escoamento necessárias foi utilizado equipamento de aquecimento (termoventiladores) e de ventilação (ventilador simples). Os equipamentos foram colocados à entrada do túnel de forma a permitir um perfil de temperatura e velocidade do ar homogêneos no seu interior.

Os ensaios de secagem em túnel de vento foram realizados com diferentes valores de temperatura do escoamento (T_{esc}), velocidade do escoamento (v_{esc}) e dimensão de partículas de biomassa (d). Foram fixados os seguintes parâmetros de temperatura e velocidade do escoamento:

- $v_{esc} = 1,3 \pm 0,1 \text{ m/s}; T_{esc} = 42 \pm 2^\circ\text{C}$
- $v_{esc} = 2,3 \pm 0,2 \text{ m/s}; T_{esc} = 42 \pm 2^\circ\text{C}$
- $v_{esc} = 1,3 \pm 0,1 \text{ m/s}; T_{esc} = 52 \pm 3^\circ\text{C}$

Foram escolhidos dois tipos de biomassa, estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ e *woodchips* recolhidos no Hotel Duecitânia. Ao longo do ensaio, os parâmetros de velocidade e temperatura do escoamento foram controlados de forma a minimizar a sua variação.

O controlo de temperatura do escoamento foi realizado utilizando 8 termopares conectados a uma interface *PICO TC-08*. A aquisição de valores de temperatura feito com uso do programa *Picolog Recorder*. Os termopares foram distribuídos da seguinte forma (Figura 13):

- 1 – parede superior do túnel por cima do suporte
- 2 – suporte a montante do escoamento
- 3 – suporte a jusante do escoamento
- 4 – parede inferior do túnel por baixo do suporte
- 5 – parede lateral esquerda do túnel a jusante do suporte
- 6 – parede lateral esquerda do túnel a montante suporte
- 7 – parede lateral direita do túnel a jusante do suporte
- 8 – parede lateral direita do túnel a montante suporte

A velocidade do escoamento dentro de túnel foi medida com recurso a anemómetros *AirMeter Test Tool 975* da *FLUKE* e *Kestrel 3000* da *Forestry Suppliers, Inc.*

Para estabilizar as condições ambientais da sala de ensaios (temperatura e humidade relativa do ar), o sistema de ventilação e aquecimento foi ligado antes de se iniciar o ensaio. Ao longo do ensaio foram registados os valores de temperatura e humidade relativa do ar por uma estação meteorológica *Oregon Scientific*, uma vez que estes demonstraram uma ligeira variação. Com base nestes valores e na carta psicrométrica para a pressão atmosférica foi identificado o valor de H_r ($\approx 10\%$) para a realização de testes em câmara climática com parâmetros de temperatura idênticos aos dos ensaios em túnel de vento, mas sem escoamento forçado.

Como preparação da amostra para o ensaio, a biomassa foi submersa em água quente durante 12 horas para assegurar o maior teor de humidade possível. Após a submersão, a amostra foi retirada do recipiente e o excesso de água eliminado com tecido absorvente de algodão. Para determinação da humidade da amostra (em base seca), esta foi colocada em estufa a 105°C durante 24 horas.

Para realização dos ensaios, seguiu-se um protocolo comum. Ligado o equipamento de aquisição de massa e temperatura, iniciou-se a aquisição de dados. Colocou-se o suporte para a biomassa sobre a balança e fixou-se o valor zero da massa. Ligou-se o equipamento de aquecimento e ventilação e registou-se o impacto destes na variação da massa. Colocou-se a biomassa no suporte (aproximadamente 290g) e procedeu-se à aquisição da massa da amostra. Os valores da massa da amostra foram registados em suporte informático com intervalos de 60 segundos. Os ensaios foram finalizados quando se observou uma estabilização da massa da amostra.

4. CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Granulometria

A presença de areia, terra, pedras pode causar problemas na caldeira devido à formação de resíduos que aderem ao fundo da câmara de combustão. As partículas com grande dimensão podem por sua vez causar obstrução do alimentador. Por estas razões a separação das amostras antes da queima é importante.

Os resultados da separação das amostras de biomassa por granulometria são apresentados na Tabela 6.

Foi considerada como apropriada para queima a biomassa de granulometrias correspondentes a $3 < d \leq 25\text{mm}$ pelas seguintes razões: (i) a biomassa de granulometrias de $d \leq 3\text{mm}$ apresenta elevada presença de resíduos (terra e casca); (ii) a biomassa de granulometrias de $d > 25\text{mm}$ teria de passar pelo destrojador novamente para diminuir o tamanho das partículas. De acordo com o acima exposto, aproximadamente 75% das amostras iniciais foi considerado como apropriada (Tabela 6).

As Figuras 14, 15 e 16 mostram os resultados da separação das amostras de biomassa residual provenientes da FLOPEN, Cabeça Redonda e Hotel Duecitània.

A amostra de FLOPEN era composta por 4% de pedras de grande dimensão (15-25mm), 21% de partículas de granulometria $d \leq 3\text{mm}$, 74% de partículas de granulometria $3 < d \leq 25\text{mm}$ (biomassa apropriada para queima directa) e 1% de partículas de granulometria $d > 25\text{mm}$ (biomassa que necessita de novo destrojamento). A forte presença de material de baixas granulometrias deve-se à forma como a biomassa foi depositada e manuseada e às condições do parque de recolha, nomeadamente à falta de controlo do material, como já referido em 3.1.

A amostra de Cabeça Redonda era composta por 18% de partículas de granulometria $d \leq 3\text{mm}$, 79% de partículas de granulometria $3 < d \leq 25\text{mm}$ e 4% de estilha não diferenciada. A elevada percentagem de granulometria $d \leq 3\text{mm}$ também se deve à falta de controlo da biomassa e pouco cuidado no seu manuseamento. É de realçar a significativa presença de casca de eucalipto na classe de granulometria $6 < d \leq 15\text{mm}$, pelo que seria preciso separa-la do material lenhoso.

Local de recolha	% da massa total da amostra							Estilha não diferenciada
	Pedras	$d \leq 1\text{mm}$	$1 < d \leq 3\text{mm}$	$3 < d \leq 6\text{mm}$	$6 < d \leq 15\text{mm}$	$15 < d \leq 25\text{mm}$	$d > 25\text{mm}$	
FLOPEN	4	17	4	47	16	11	1	0
				74*				
Cabeça Redonda	0	12	6	34	33	12	0	4
				79*				
Hotel Duecitânia	0	2	2	46	18	12	0	19
				76*				

* Biomassa de granulometrias $3 < d \leq 25\text{mm}$ considera-se apropriada para queima directa em caldeira de biomassa de pequena escala

Tabela 6 – Representatividade das granulometrias de biomassa

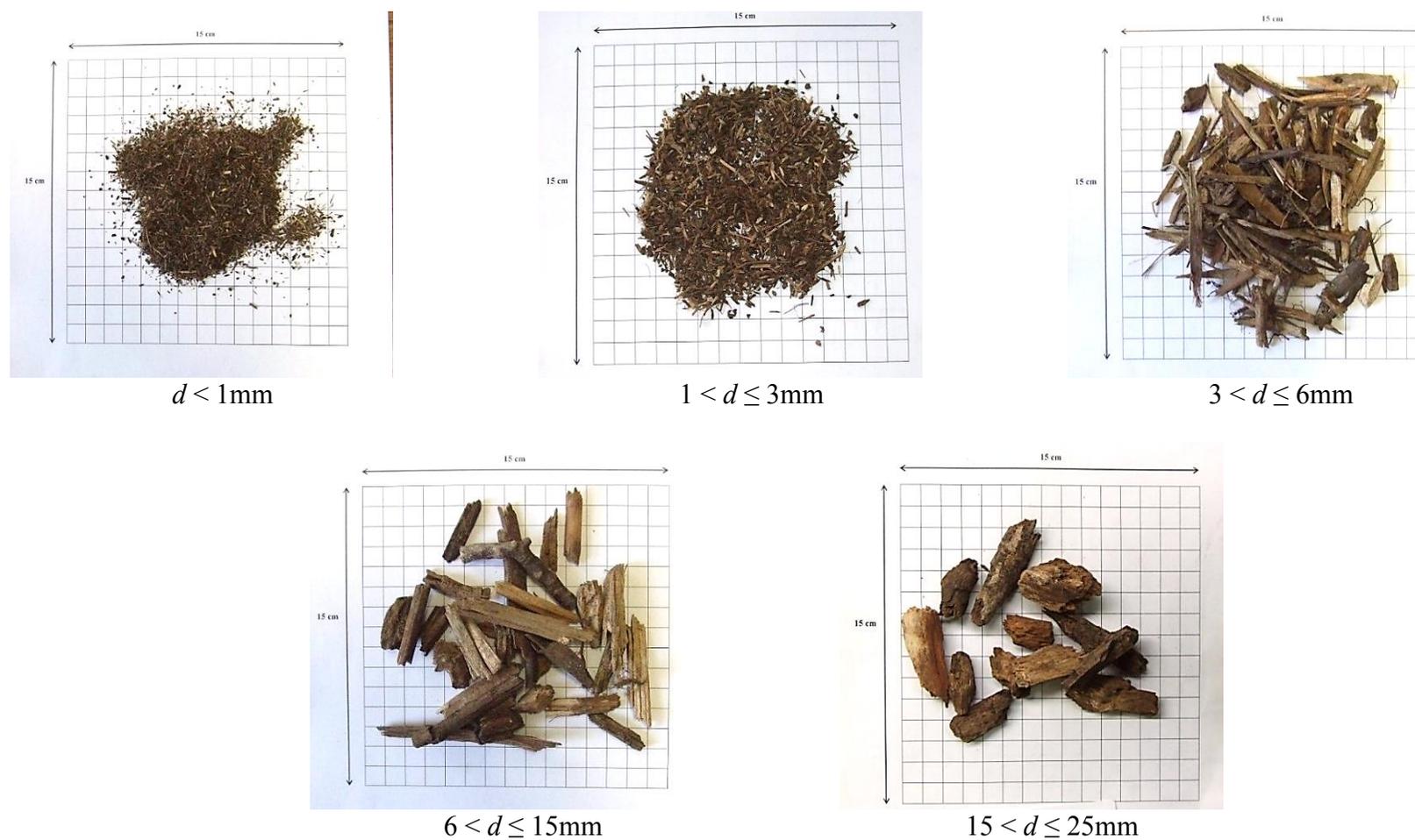


Figura 14 – Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida na FLOPEN

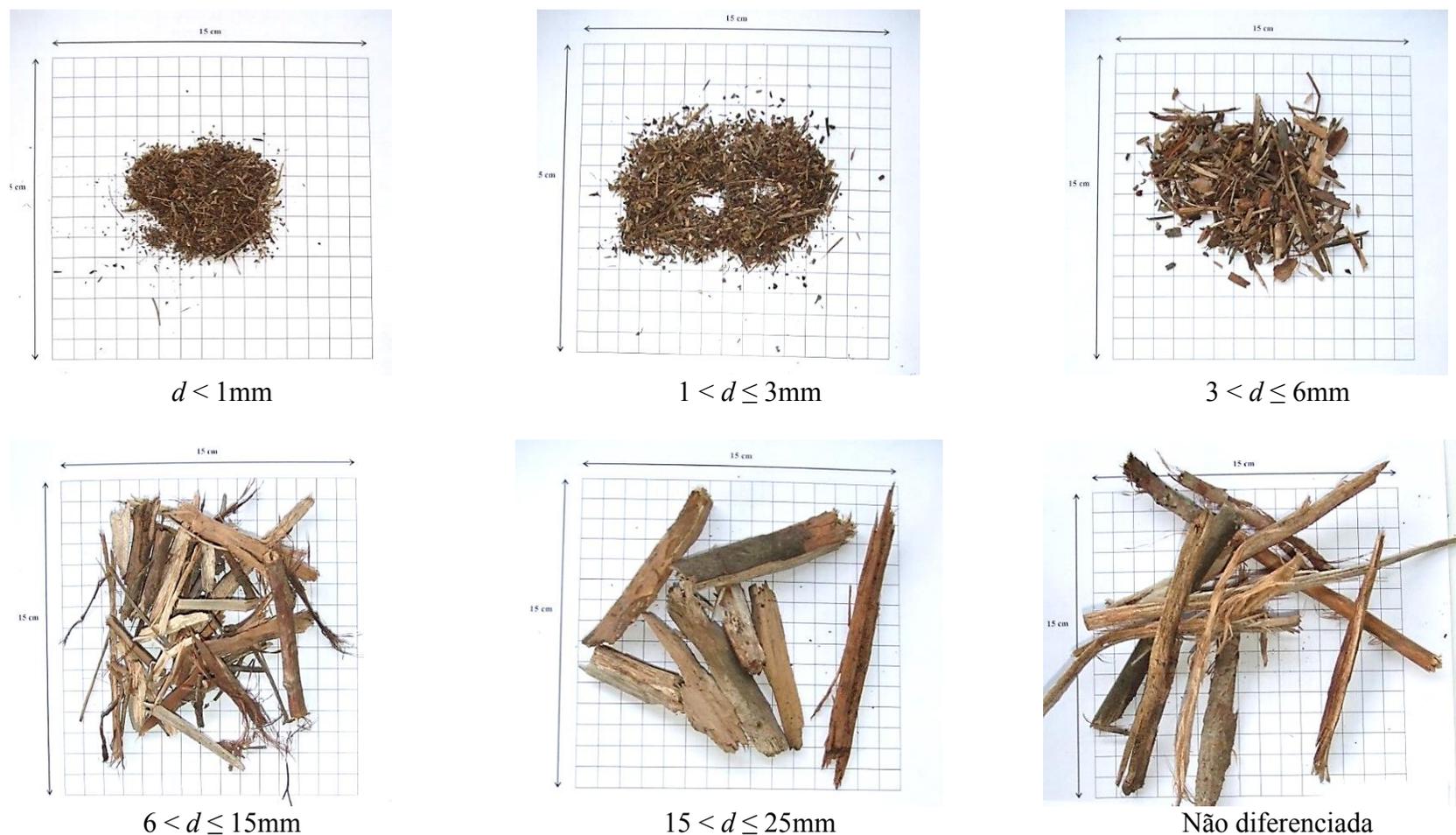


Figura 15 - Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida em Cabeça Redonda

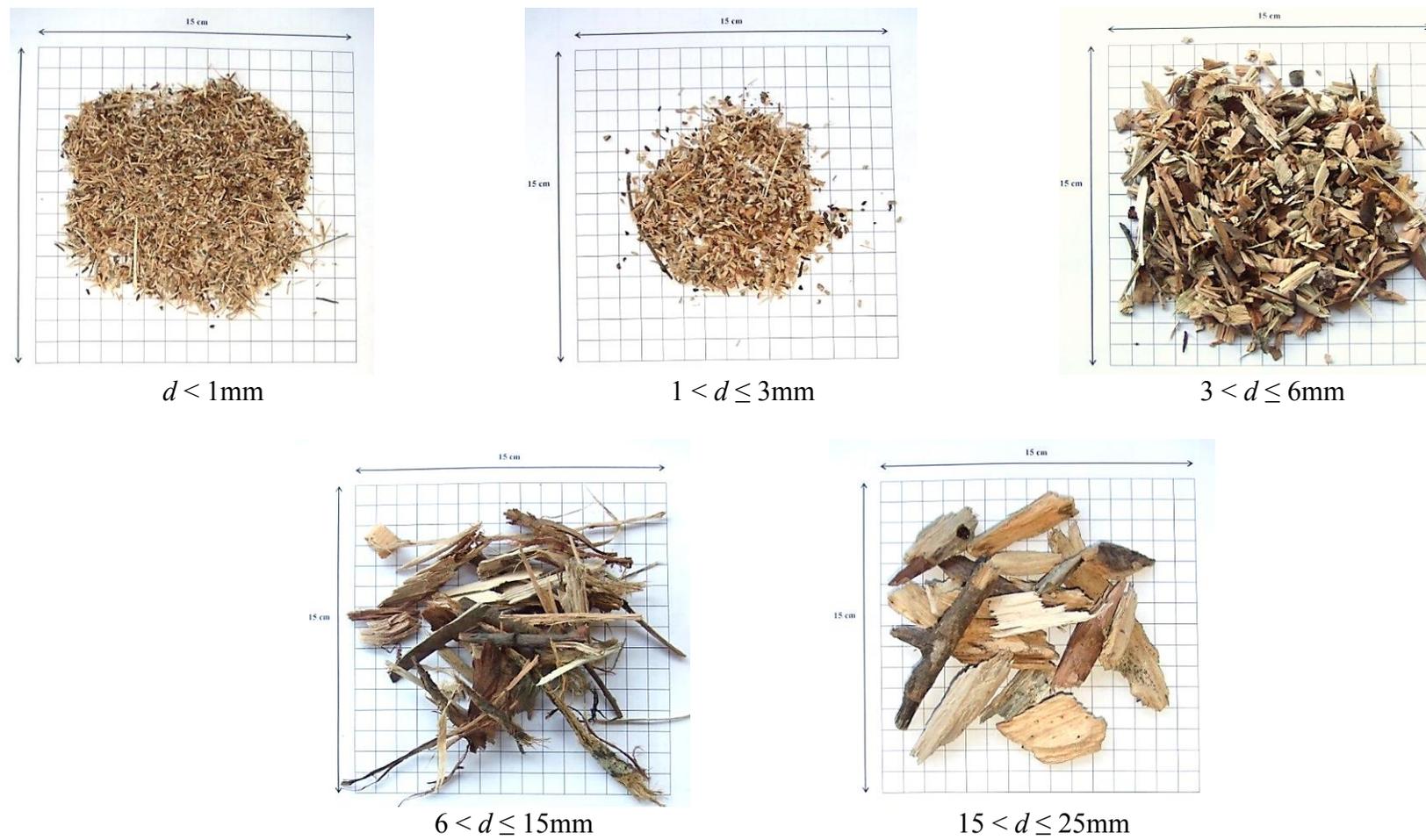


Figura 16 - Separação por granulometria da amostra de biomassa florestal residual recolhida no Hotel Duecitània

A amostra recolhida no Hotel Duecitània era composta por 4% de partículas de granulometria $d \leq 3\text{mm}$, 76% de partículas de granulometria apropriada para queima e 19% de estilha não diferenciada. A biomassa era de maior qualidade porque existiu um melhor controlo desta no manuseamento e armazenamento. A forte presença de estilha não diferenciada resultou de má manutenção do destroçador e afinação das lâminas.

Os resultados desta separação evidenciam a vantagem de controlo da matéria-prima (biomassa residual) e sua separação. A eliminação de partículas de pequena granulometria permitirá uma redução dos custos de manutenção da caldeira, a eliminação de partículas de grandes dimensões será favorável ao bom funcionamento do sistema de alimentação da caldeira, e a homogeneização da estilha favorecerá os parâmetros de combustão e a consequente rentabilidade da caldeira.

4.2. Poder calorífico

O principal objectivo dos ensaios de poder calorífico foi evidenciar as vantagens da separação da biomassa florestal residual por granulometria e dos cuidados no manuseamento da mesma.

O valor de resíduos pós-queima foi obtido pela pesagem do cadinho com os resíduos da queima e com os inertes que não foram queimados. Em alguns casos este valor chegou a cerca de 27% do peso total da amostra (Figura 17).



Figura 17 – Resíduos pós-queima de um ensaio de poder calorífico

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios realizados.

A amostra recolhida na FLOPEN é aquela em que se denota uma maior variação no poder calorífico (18,94-20,18MJ/kg). O PCS aumenta claramente com o aumento da granulometria, apesar de esta variação não ser muito acentuada em termos de valores

absolutos. Relativamente ao valor de resíduos pós-queima, para classes de granulometria $d \leq 1\text{mm}$ e $1 < d \leq 3\text{mm}$ foram verificados valores percentuais bastante elevados, 26,5 e 12,48%, respectivamente. Para classes de granulometria $3 < d \leq 25\text{mm}$ a percentagem de resíduos varia entre 1,76-2,53%. A presença de resíduos tem influência nos valores de PCS_{exp} , sendo este cerca de 3–5MJ/kg mais baixo para as granulometrias $d \leq 3\text{mm}$ em relação a granulometrias $3 < d \leq 25\text{mm}$. Depois das correções dos resíduos e à humidade esta diferença diminui, mas ainda assim é perceptível. O facto de esta amostra ter uma discrepância tão grande entre valores de resíduos pós-queima e PCS deve-se à forma de armazenamento e controlo da biomassa residual.

No que diz respeito à biomassa proveniente do Hotel Duecitânia, a diferença de poder calorífico entre granulometrias não é tão notória (19,96-20,63MJ/kg). A percentagem de resíduos varia entre 1,57 e 3,53%. A explicação para este facto é que a estilha era bastante homogénea e tinha grande quantidade de material lenhoso (Tabela 6). Houve um grande controlo da recolha e armazenamento da biomassa por parte do proprietário do Hotel. Todos estes factores fazem com que a biomassa tenha uma maior qualidade, o que se reflecte no seu poder calorífico, que para além de ser menos variável para as diferentes granulometrias, apresenta um valor mais alto em relação à amostra da FLOPEN.

Como valores de referência para comparação dos resultados obtidos para amostras recolhidas na FLOPEN e no Hotel Duecitânia foi usado o PCS das amostras de *woodchips* (22,53MJ/kg), biomassa não separada de eucalipto proveniente de Cabeça Redonda (20,15MJ/kg) e casca de eucalipto que foi tirada da amostra existente nas instalações da ADAI (19,08MJ/kg). Os valores referidos mais uma vez realçam a importância da presença de material lenhoso na biomassa para queima.

Local de recolha	Tipologia	Granulometria [mm]	PCS_{exp} [MJ/kg]	Resíduos pós-queima [% massa da amostra]	PCS_{res} [MJ/kg]	$H_{b.s.}$ [%]	$PCS_{b.s.}$ [MJ/kg]*
FLOPEN	Biomassa Diversa	$d \leq 1$	12,41	26,50	17,18	9,26	18,94
		$1 < d \leq 3$	15,94	12,48	18,08	8,48	19,76
		$3 < d \leq 6$	17,5	2,53	17,99	9,20	19,82
		$6 < d \leq 15$	18,09	1,76	18,2	9,51	20,11
		$15 < d \leq 25$	17,9	2,37	18,30	9,31	20,18
	<i>Woodchips</i>	-	19,61	2,76	19,99	11,27	22,53
	-	-	17,58	2,00	17,99	9,87	19,96
Hotel	Biomassa Diversa	$d \leq 1$	17,29	3,53	17,93	12,43	20,48
		$1 < d \leq 3$	17,54	1,57	17,75	12,28	20,23
		$3 < d \leq 6$	17,48	2,13	17,73	11,77	20,1
		$6 < d \leq 15$	17,53	2,36	17,87	12,09	20,33
		$15 < d \leq 25$	17,95	1,63	18,23	11,66	20,63
Cabeça Redonda	Eucalipto	-	17,75	2,83	18,2	9,69	20,15
-	Casca de Eucalipto	-	15,67	4,00	16,47	13,71	19,08

* Correção feita com base na fórmula da norma CEN/TS-14918

Tabela 7 - Valores de poder calorífico (PCS_{exp} , PCS_{res} e $PCS_{b.s.}$), resíduos pós-queima e humidade em base seca ($H_{b.s.}$) de biomassa de diferentes tipologias e granulometrias

4.3. Queima em calorímetro cónico

Na Figura 18 são apresentados os resultados dos ensaios de queima de três tipos de biomassa (*woodchips* e estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidos no Hotel Duecitânia e *pellets*) em calorímetro cónico com fluxo de calor incidente de 13 kW/m^2 .

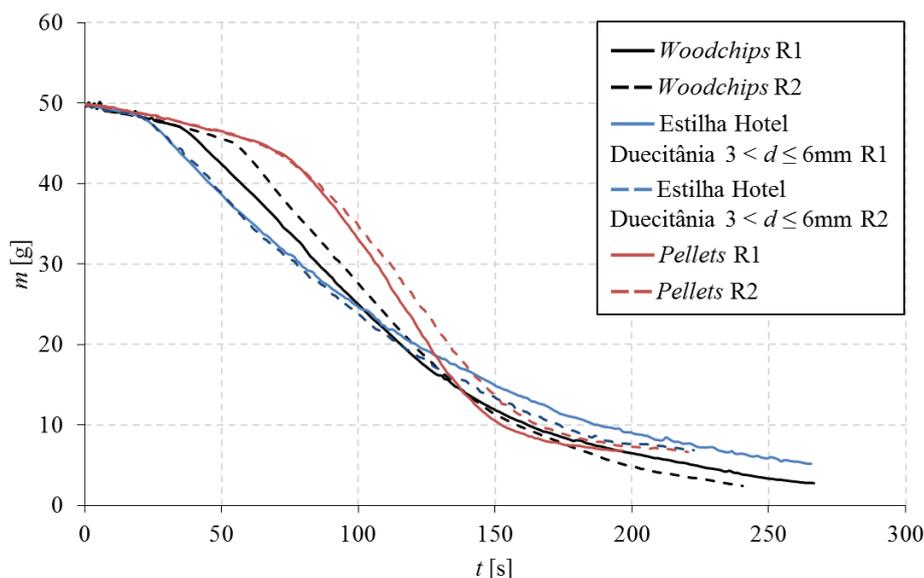


Figura 18 – Variação da massa das amostras de *woodchips* e estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidos no Hotel Duecitânia e *pellets* nos ensaios de queima em calorímetro cónico

A duração do ensaio foi mais curta para a amostra de *pellets* (220 segundos). A duração dos ensaios para as amostras de estilha e de *woodchips* foi praticamente idêntica (240 e 250, respectivamente).

A fase de secagem mais curta verificou-se para as amostras de estilha e de *woodchips*. No caso de *pellets*, essa fase foi mais longa. Este facto pode ser justificado pela densidade das partículas do material lenhoso ($\rho_{\text{pellets}}=1120\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{madeira}}=300\text{-}900\text{kg/m}^3$) que pode dificultar a evaporação da água.

No gráfico da Figura 18 pode ser observado o efeito da granulometria no processo de combustão. Tanto para as amostras de estilha como para as de *pellets*, as partículas têm dimensões muito homogêneas. Por essa razão, as curvas de perda de massa para dois ensaios de queima praticamente coincidem. O mesmo não se verifica para o caso de *woodchips*, pois as dimensões das partículas são muito diferentes (Figura 11b)

A massa final das amostras foi menor para *woodchips* ($\approx 2g$). As amostras de *pellets* e de estilha apresentaram uma massa final maior ($\approx 6g$). Isto pode ser explicado pela quantidade de cinzas e outros resíduos resultantes da combustão de cada material. A quantidade de material lenhoso e sua composição química contribuem para a formação de cinzas. Na produção de *pellets* utiliza-se, de grosso modo, 70% de material lenhoso de boa qualidade e 30% de resíduos florestais. Na amostra de estilha existem vestígios de casca. Tudo isto pode contribuir para o facto de estas amostras terem uma massa final maior.

A taxa de libertação de calor (\dot{Q}) ao longo do ensaio pode ser calculada através da expressão (4.1), e o gráfico da sua evolução ao longo do tempo para as diferentes amostras é apresentado na Figura 19 (Bryant & Mulholland, 2008).

$$\dot{Q}[W] = \frac{-dm}{dt} * PCI \quad (4.1)$$

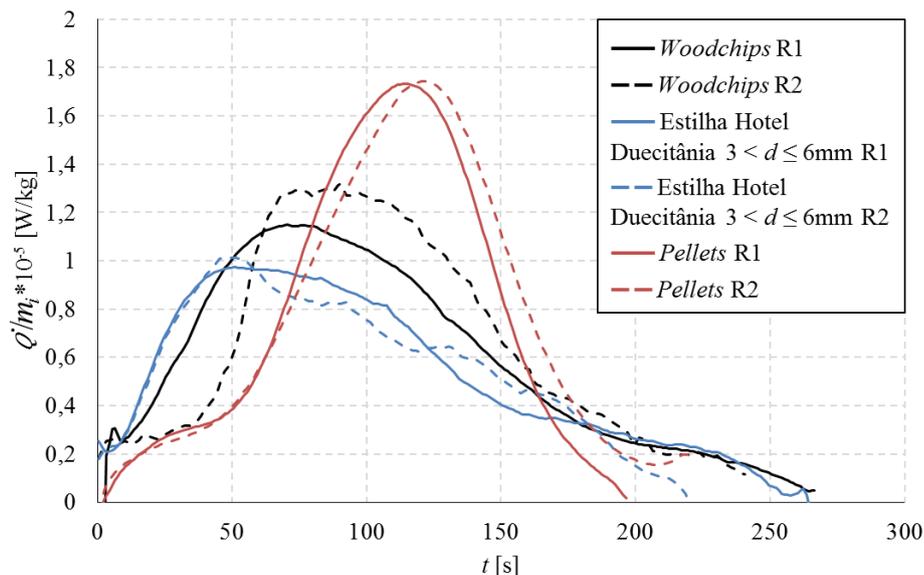


Figura 19 - Taxa de libertação de calor por unidade de massa de amostras de *woodchips* e estilha ($3 < d \leq 6mm$) recolhidas no Hotel Duecitânia e *pellets* em ensaios de queima em calorímetro cónico

O valor de *PCI* para *pellets* foi retirado de Knoef, 2005 (18MJ/kg). Os valores de *PCI* para *woodchips* (16,34MJ/kg) e estilha de granulometria $3 < d \leq 6mm$ (14,96MJ/kg) recolhidos no Hotel Duecitânia foram calculados com base na expressão (4.2),

$$PCI = [PCS - 212,2 * w(H)_s - 0,8(w(O)_s + w(N)_s)] * (1 - 0,01 * M) - 24,43 * M, \quad (4.2)$$

onde *PCS*, neste caso, corresponde ao valor de *PCS_{res}* obtido nos ensaios de poder calorífico, *M* ao valor de humidade da amostra (em base seca) também determinado

anteriormente, e $w(H)_s$, $w(O)_s$, e $w(N)_s$ ao teor destes elementos em base seca mássica. Como não é sabida a composição química exacta, calculou-se a média da composição para as três espécies mais presentes na região centro de Portugal, *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus* e *Quercus robur*: $w(H)_s=5,77\%$. $w(O)_s=46,43\%$ e $w(N)_s=0,17\%$ (Telmo, Lousada, & Moreira, 2010).

A amostra que verificou a perda de massa mais rápida na parte de gaseificação foi a de *pellets*, o que se pode relacionar com uma emissão de calor mais intensa (Figura 19). A estilha perdeu massa mais lentamente, portanto libertou calor mais uniformemente ao longo do tempo e menos intensamente. *Woodchips* apresentaram um comportamento intermédio.

A energia total libertada por uma amostra ao longo do ensaio pode ser calculada pela expressão (4.3).

$$Q[J] = \int_0^t \left[\frac{-dm}{dt} * PCI \right] dt = \Delta m * PCI = (m_i - m_f) * PCI \quad (4.3)$$

Os valores de energia libertada por cada amostra são apresentados na Tabela 8. Observa-se que *woodchips* libertaram sensivelmente a mesma energia que *pellets*. Embora *pellets* apresentem o mesmo valor de energia libertada, é de realçar que a sua densidade é bastante superior ao das outras amostras, portanto, para um mesmo volume, possuem uma quantidade de energia mais elevada. A amostra de estilha apresenta um comportamento intermédio entre *woodchips* e *pellets*.

Amostra	PCI [MJ/kg]	Q [MJ]
<i>Woodchips</i>	16,34	0,77
		0,78
Estilha Hotel Duecitânia 3 < d ≤ 6mm	14,96	0,67
		0,64
<i>Pellets</i>	18	0,78
		0,78

Tabela 8 – Valores de energia libertada por amostras de *woodchips* e estilha de granulometria 3 < d ≤ 6mm recolhidos no Hotel Duecitânia e *pellets* no ensaio de queima em calorímetro cónico

4.4. Cinética de secagem em câmara climática

O teor de humidade da madeira depende de vários factores, nomeadamente, da humidade relativa e da temperatura ambiente, da espécie, da tensão mecânica a que a

madeira está sujeita, do historial de secagem, da densidade e da percentagem de extractivos (Nelson Jr., 2001). Ainda assim, a temperatura (T) e a humidade relativa (H_r) do ar que rodeia a madeira são os parâmetros que exigem mais destaque. O valor de humidade torna-se constante e atinge o valor de equilíbrio (H_{eq}) se a madeira permanecer tempo suficiente num ambiente em que a temperatura e a humidade relativa permaneçam constantes. Então, a cada combinação de T e H_r está associado um valor de H_{eq} . Este aumenta com o aumento de H_r e com o decréscimo de T (Simpson, 1998).

O conhecimento dos valores de humidade e temperatura de um determinado local onde a madeira seja armazenada é importante, uma vez que permite prever com alguma precisão qual será o valor de H_{eq} da madeira armazenada nesse local (Simpson, 1998). Por outro lado, sabendo os valores de H_{eq} (que determinam as curvas de sorção), podem ser determinados T e H_r que são necessários garantir para que a amostra atinja o valor de H_{eq} pretendido quando exposta a essas condições.

Os ensaios de determinação de H_{eq} para a amostra recolhida na FLOPEN tiveram como objectivo demonstrar o comportamento de biomassa residual em resposta à variação de T e H_r . Na Figura 20 são apresentadas curvas de dessorção correspondentes aos resultados destes ensaios.

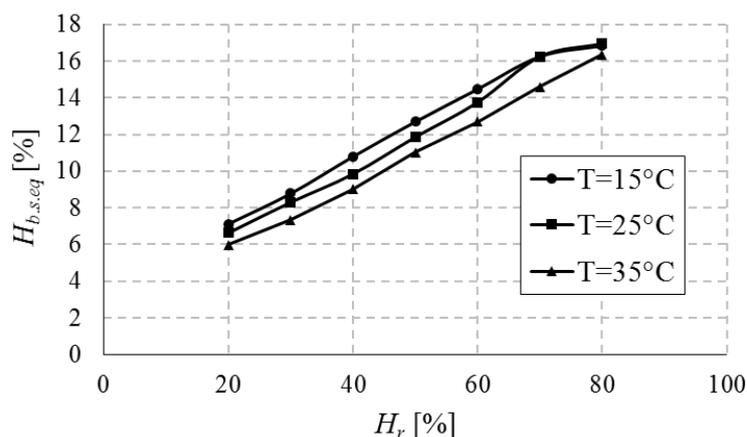


Figura 20 – Valores de humidade de equilíbrio ($H_{b.s.eq}$) da amostra de biomassa residual recolhida na FLOPEN em função da temperatura (T) e da humidade relativa (H_r)

O posicionamento das isotérmicas é análogo ao descrito em várias referências bibliográficas (Simpson, 1998; Nelson Jr., 2001). O valor de $H_{b.s.eq}$ aumenta com o aumento da humidade relativa e diminui com o aumento da temperatura. As curvas correspondentes a temperaturas mais baixas estão posicionadas acima das correspondentes

a temperaturas mais altas. Para cada valor H_r , verifica-se uma variação de cerca de 1% nos teores de humidade de equilíbrio correspondentes a temperaturas de 15 e 35°C. Para cada temperatura, uma variação do valor de H_r de 20 para 80% reflecte-se numa variação de cerca de 10% no teor de humidade de equilíbrio $H_{b.s.eq}$ da amostra.

Os ensaios com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30% realizados com amostras recolhidas no Hotel Duecitània (biomassa indiferenciada) e em Cabeça Redonda (*Eucalyptus globulus*), não separadas pela granulometria, tiveram como objectivo a avaliação da possibilidade de utilização de gases resultantes da queima de biomassa para o processo de secagem.

Os valores iniciais da massa da amostra registados pela balança nos primeiros 15-30 minutos de ensaio foram eliminados uma vez que a câmara climática demora esse período de tempo para estabilizar as condições de T e H_r .

No âmbito deste trabalho, a humidade em base seca da amostra ($H_{b.s.}$) é a grandeza mais importante. Para eliminar as disparidades dos ensaios relativamente à sua massa inicial, os dados foram normalizados de acordo com a seguinte fórmula:

$$H^*_{b.s.}(t) = \frac{H_{b.s.}(t)}{H_{b.s.}(i)}, \quad (4.4)$$

em que $H^*_{b.s.}(t)$ corresponde ao valor normalizado da humidade da amostra para um instante t , $H_{b.s.}(t)$ à humidade da amostra para um instante t , e $H_{b.s.}(i)$ à humidade inicial da amostra.

Uma grandeza que também tem interesse comparar é a velocidade de secagem, $\dot{H}_{b.s.}$ [%/min]. Esta corresponde ao simétrico da derivada da humidade em relação ao tempo,

$$\dot{H}_{b.s.} = -\frac{dH_{b.s.}}{dt} \text{ [%/min]}. \quad (4.5)$$

A análise dos gráficos das Figuras 21 e 22 permitiu as seguintes conclusões. O posicionamento das curvas de $H^*_{b.s.}$ é semelhante para parâmetros de H_r de 30 e 15% para ambas as amostras (Hotel Duecitània e Cabeça Redonda). Apenas a réplica 1 do ensaio com $T=70^\circ\text{C}$ e $H_r=15\%$ para a amostra de estilha recolhida em Cabeça Redonda e a réplica 3 do ensaio com $T=70^\circ\text{C}$ e $H_r=30\%$ para a amostra de estilha recolhida no Hotel Duecitània apresentaram um comportamento diferente. Este resultado pode ser explicado

pelo facto de terem sido usadas amostras de biomassa florestal residual não separada que é muito heterogénea em termos de presença de material lenhoso.

Para amostras recolhidas em Cabeça Redonda (*Eucalyptus globulus*), a velocidade inicial de secagem varia entre 0,2 e 0,3%/min (Figura 21). Em geral, verificou-se uma diferença na velocidade de secagem ao longo dos primeiros 100 minutos do ensaio sendo $\dot{H}_{b,s}$ para $H_r=15\%$ superior a $\dot{H}_{b,s}$ para $H_r=30\%$. No entanto, a curva de $\dot{H}_{b,s}$ da réplica 3 do ensaio com $H_r=30\%$ teve um comportamento diferente das curvas das réplicas 1 e 2.

Para amostras recolhidas no Hotel Duecitânia, a velocidade inicial de secagem varia entre 0,19 e 0,25%/min (Figura 22). As curvas de $\dot{H}_{b,s}$ para $H_r=15\%$ e 30% têm posicionamento semelhante para todas as réplicas respectivas.

Para ambas as amostras e todos os parâmetros de T e H_r , após 200 minutos do ensaio verificou-se a tendência de estabilização da massa da amostra, sendo a respectiva humidade a aproximar-se à humidade de equilíbrio. Assim sendo, pode-se assumir este valor como o tempo de secagem da biomassa para os parâmetros de T e H_r acima referidos.

Os resultados dos ensaios com os parâmetros de $T=50^\circ\text{C}$, $H_r=10\%$ e $T=40^\circ\text{C}$, $H_r=10\%$, efectuados para biomassa residual recolhida no Hotel Duecitânia de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$, são apresentados na Figura 23. Os resultados destes ensaios constituíram um ponto de referência para posterior comparação com os ensaios de secagem em túnel de vento ($T_{esc}=42^\circ\text{C}$ e $T_{esc}=52^\circ\text{C}$).

Comparando os gráficos da Figura 23 observa-se o efeito da temperatura na secagem de biomassa. Uma temperatura mais elevada ($T=50^\circ\text{C}$) dá origem a uma velocidade de secagem inicialmente superior que depois diminui devido ao facto de a amostra já ter perdido uma parte substancial da sua massa de água. A amostra cujo ensaio decorreu a 40°C apresenta uma variação da humidade menos acentuada. O tempo de secagem para estes ensaios, comparando com os ensaios com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%, é mais alargado (500min e 200min, respectivamente).

Os resultados destes ensaios forneceram informação sobre o comportamento da biomassa (secagem) para uma certa gama de temperaturas em condições de ausência de escoamento.

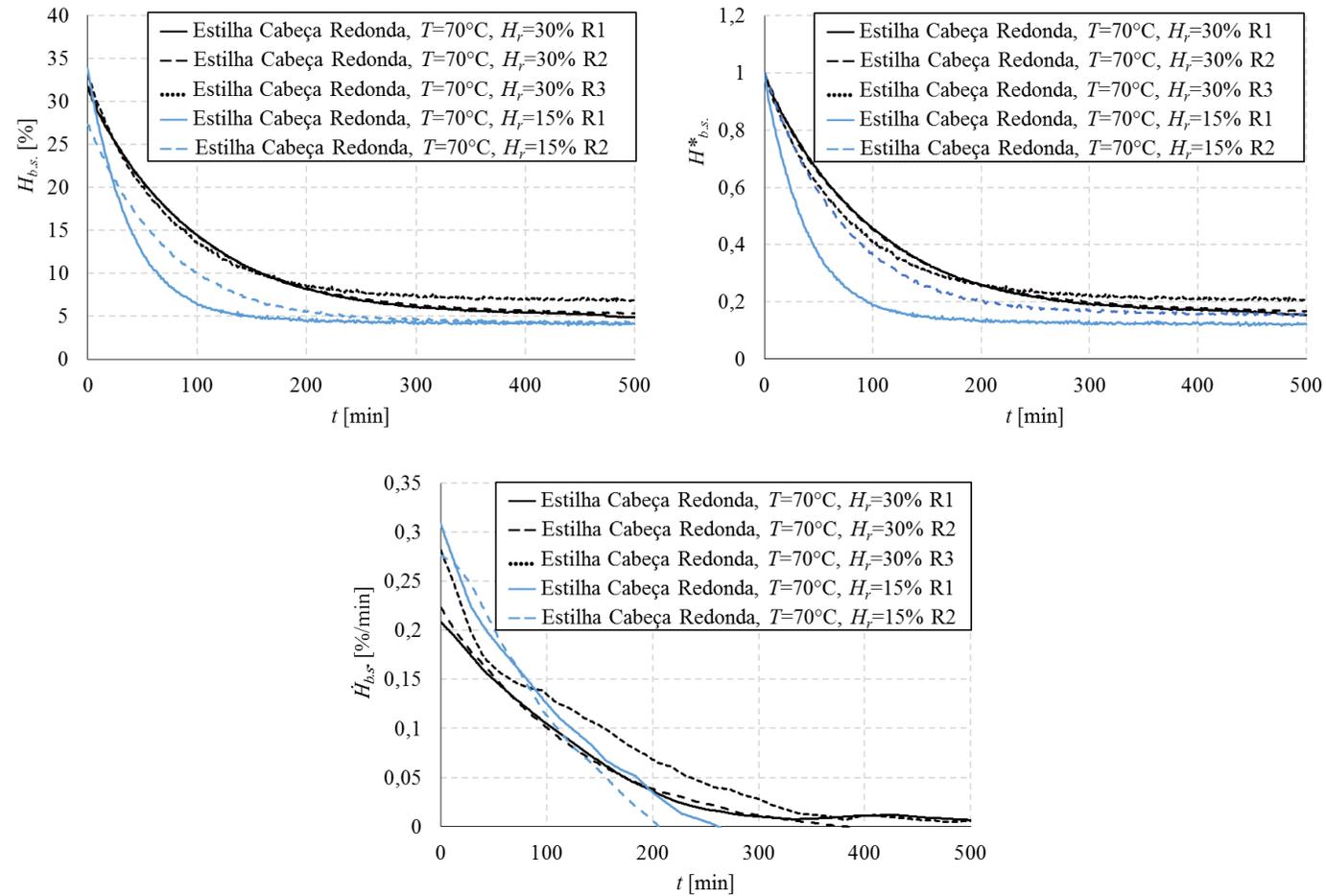


Figura 21 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha recolhidas em Cabeça Redonda em câmara climática com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%

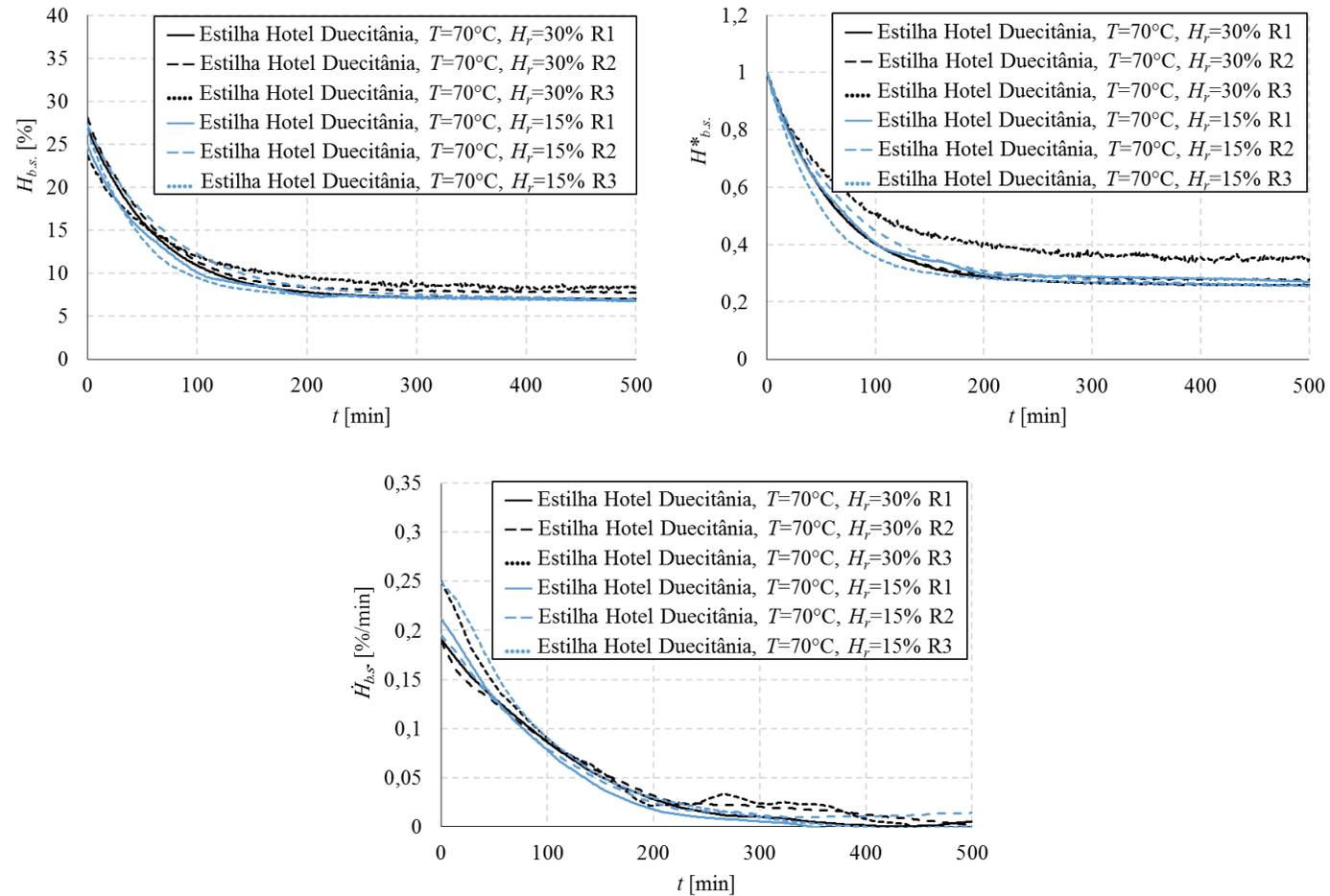


Figura 22 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha recolhidas no Hotel Duecitânia em câmara climática com temperatura de 70°C e humidades relativas de 15 e 30%

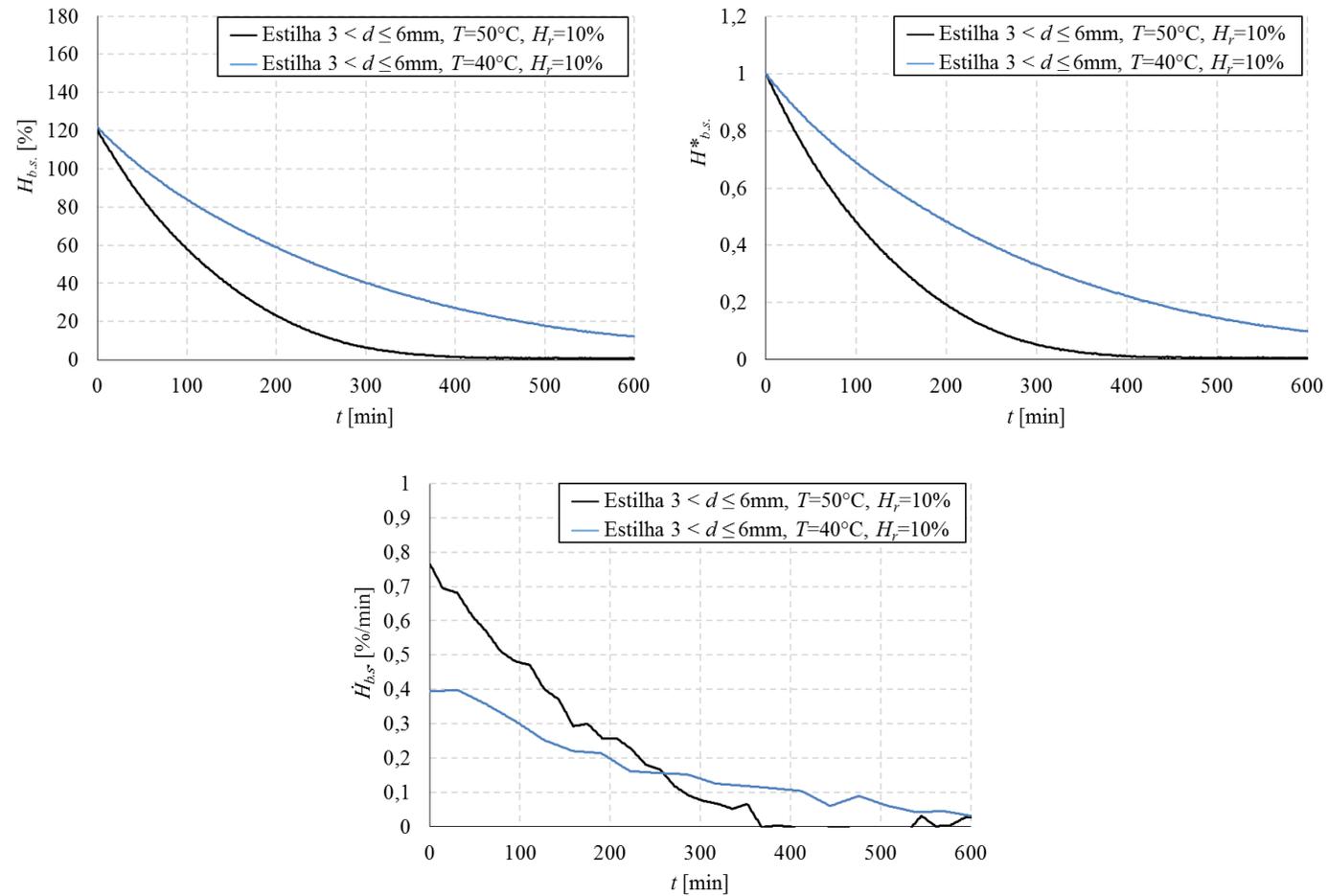


Figura 23 - Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidas no Hotel Duecitània em câmara climática com humidade relativa de 10% e temperaturas de 40 e 50°C

4.5. Cinética de secagem em túnel de vento

Na análise dos resultados dos ensaios em túnel de vento, tal como nos resultados dos ensaios de secagem em câmara climática, as grandezas a comparar são a humidade em base seca ($H_{b.s.}$), a humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e a velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$).

Os resultados dos ensaios de secagem em túnel de vento foram comparados entre si e com os resultados dos ensaios de secagem em câmara climática para analisar o efeito da presença de **escoamento forçado**, da **velocidade do escoamento** (v_{esc}), da **temperatura do escoamento** (T_{esc}) e da **granulometria da amostra** (d) na velocidade e no tempo de secagem de biomassa.

Procurou-se estabelecer um modelo que descrevesse a velocidade de secagem de biomassa residual. Entre várias funções analisadas, a função exponencial

$$\dot{H}_{b.s.} = A * e^{-B*t} \tag{4.6}$$

permitiu um bom ajuste aos dados dos ensaios realizados ($R^2 \approx 1$). As equações obtidas para os ensaios realizados são apresentadas na Tabela 9. Estas equações foram usadas para apresentação dos resultados dos ensaios.

Amostra	T_{esc} [°C]	v_{esc} [m/s]	Equação	R^2
Estilha Hotel Duecitània $3 < d \leq 6\text{mm}$	42	1,3	$y = 2,611 * e^{-0,0189*t}$	0,989
			$y = 2,292 * e^{-0,0172*t}$	0,993
	52	2,3	$y = 3,674 * e^{-0,0270*t}$	0,988
			$y = 3,666 * e^{-0,0243*t}$	0,997
Woodchips	42	1,3	$y = 3,040 * e^{-0,0220*t}$	0,997
			$y = 1,461 * e^{-0,0162*t}$	0,998
	52	2,3	$y = 2,157 * e^{-0,0225*t}$	0,983
			$y = 1,581 * e^{-0,0173*t}$	0,978
	52	1,3	$y = 1,745 * e^{-0,0194*t}$	0,989
			$y = 1,513 * e^{-0,0172*t}$	0,995

Tabela 9 – Equações das curvas de velocidade de secagem em túnel de vento para estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ e woodchips recolhidos no Hotel Duecitània

Nas Figuras 24 e 25 são apresentados os resultados de ensaios de secagem com **velocidades do escoamento** 1,3 e 2,3m/s. Tanto para amostras da estilha como para amostras de *woodchips* observa-se uma ligeira diferença na velocidade inicial de secagem para as velocidades de escoamento de 1,3 e 2,3m/s. Para a estilha, a velocidade de secagem para escoamento de 2,3m/s é superior à de 1,3m/s nos primeiros 50 minutos. O mesmo verifica-se para *woodchips* porém para um período de tempo ligeiramente superior. Os efeitos acima referidos podem ser o resultado de diferenças de movimento da água no interior da partícula para estilha de pequena granulometria e *woodchips*. Pode ser concluído que as amostras alcançaram a humidade de equilíbrio com os parâmetros de temperatura e velocidade do escoamento definidos após 150 minutos no caso de estilha e 250 minutos no caso de *woodchips*.

Nas Figuras 26 e 27 são apresentados os resultados dos ensaios de secagem em túnel de vento com **temperaturas do escoamento** de 42 e 52°C. A influência da variação da temperatura do escoamento na velocidade inicial de secagem não é tão pronunciada como no caso da variação da velocidade do escoamento. Uma maior diferença observa-se para estilha, possivelmente devido à sua granulometria mais pequena. Nos primeiros 30 a 40 minutos a velocidade de secagem é superior para a curva correspondente à temperatura mais elevada. Depois disso as curvas intersectam e trocam a sua posição relativa. As amostras de estilha alcançaram a humidade de equilíbrio com os parâmetros de temperatura e velocidade do escoamento definidos após 150 minutos e as de *woodchips* após 250 minutos. Os tempos de secagem de estilha e *woodchips* obtidos para a variação de temperatura do escoamento coincidem com os resultados obtidos para a variação da velocidade do escoamento.

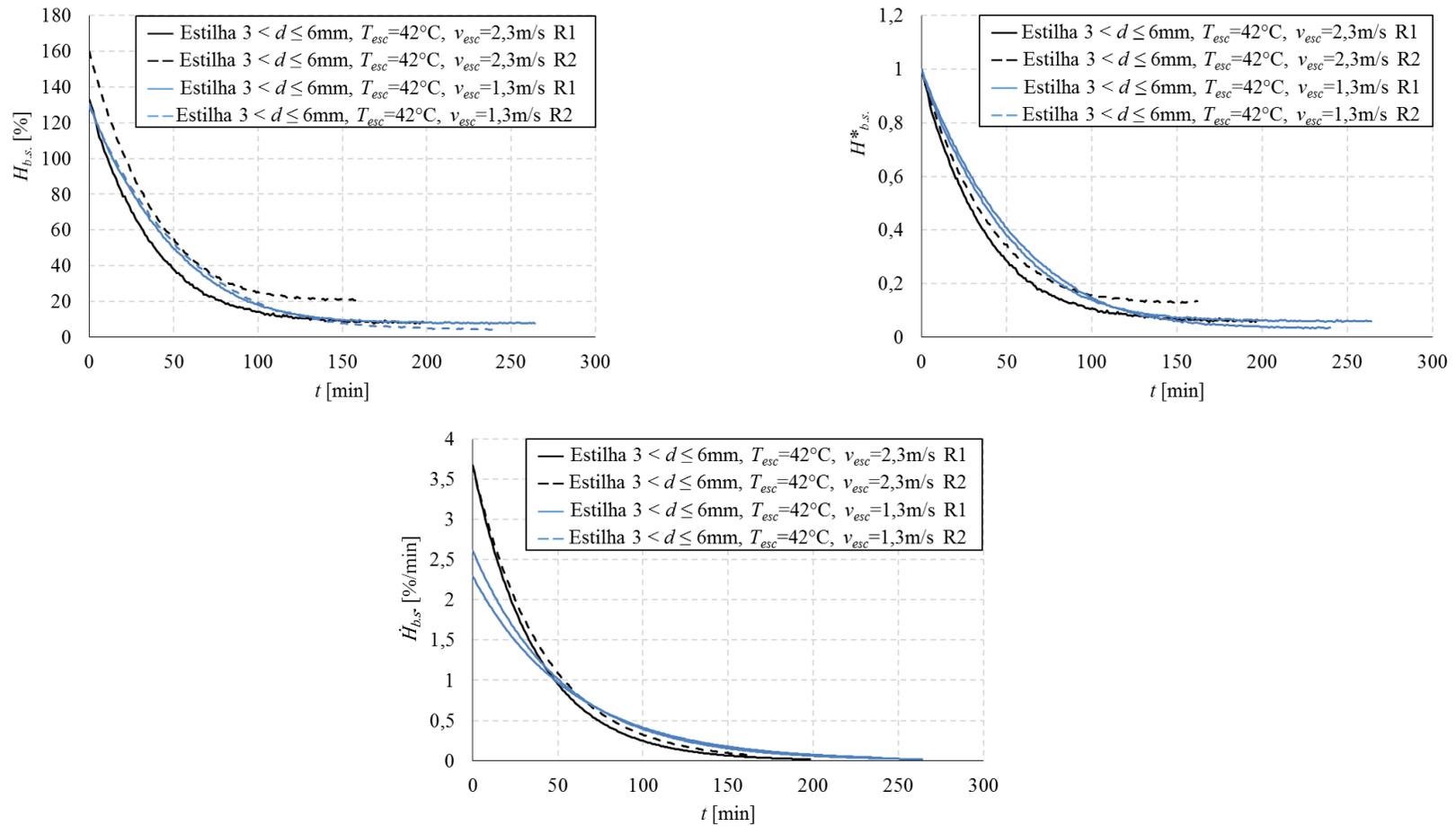


Figura 24 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidas no Hotel Duecitània com velocidades de escoamento de 1,3 e 2,3m/s

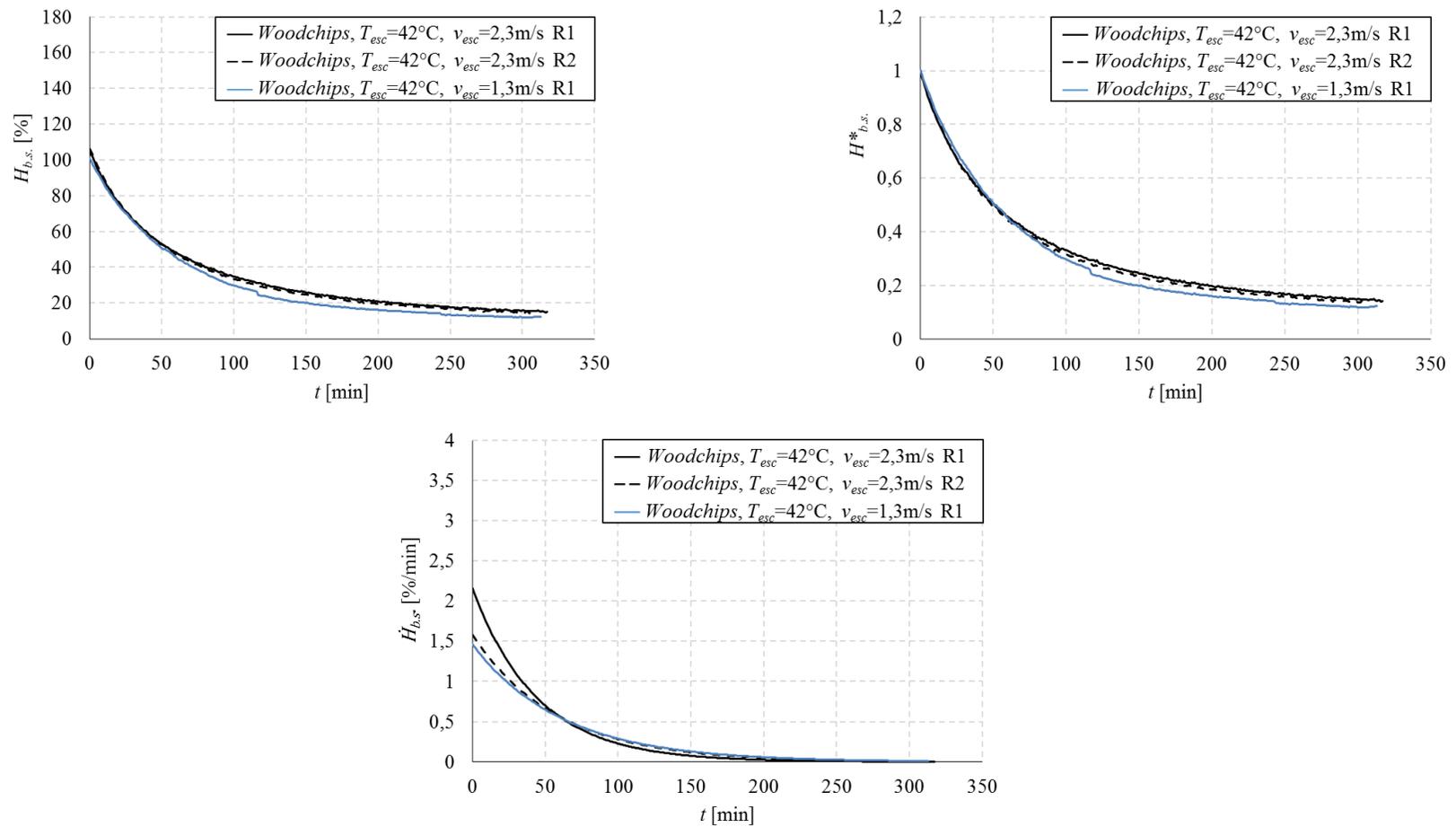


Figura 25 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de *woodchips* recolhidas no Hotel Duecitània com velocidades de escoamento de 1,3 e 2,3m/s

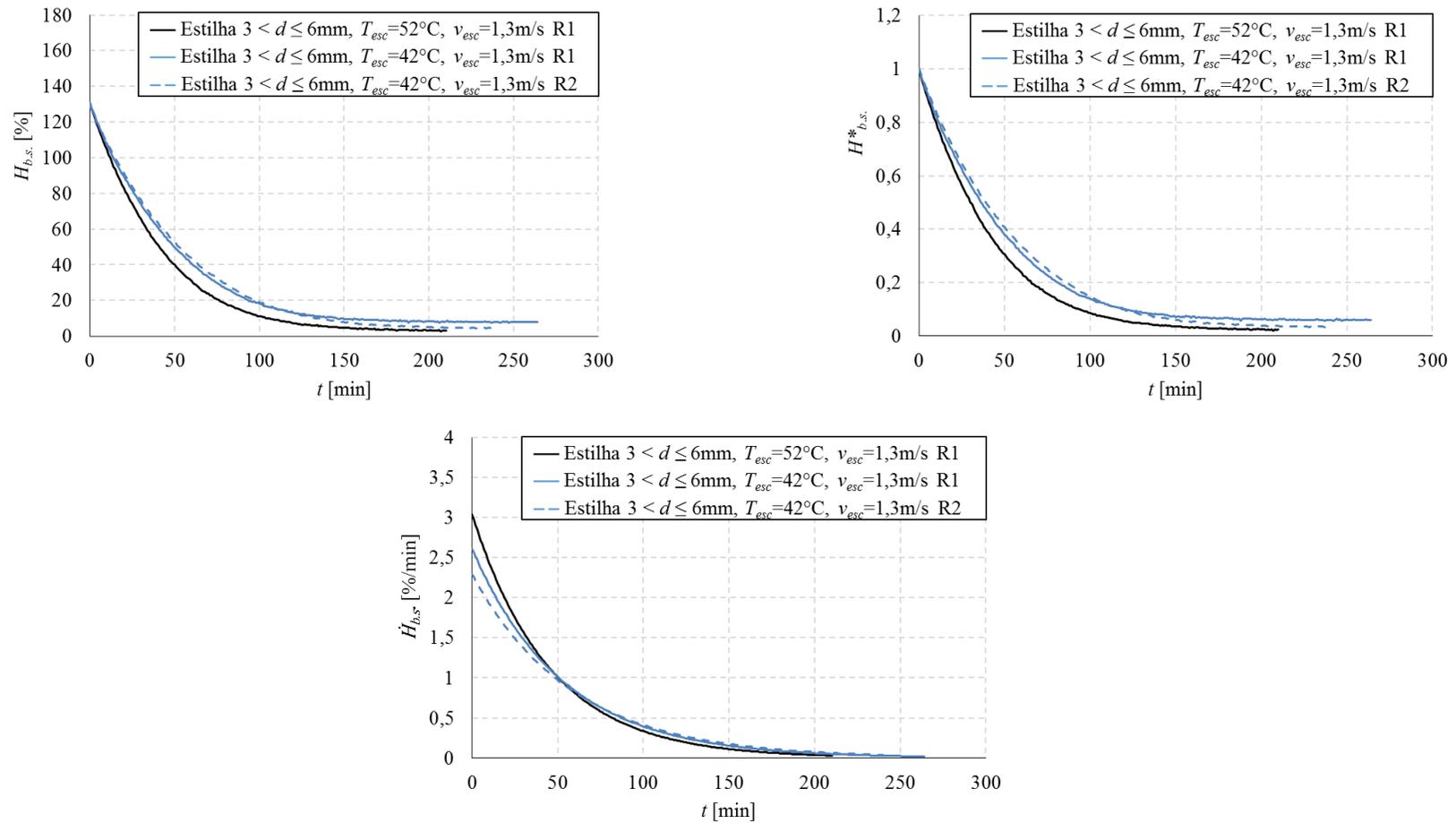


Figura 26 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm recolhidas no Hotel Duecitània com temperaturas de escoamento de 42 e 52°C

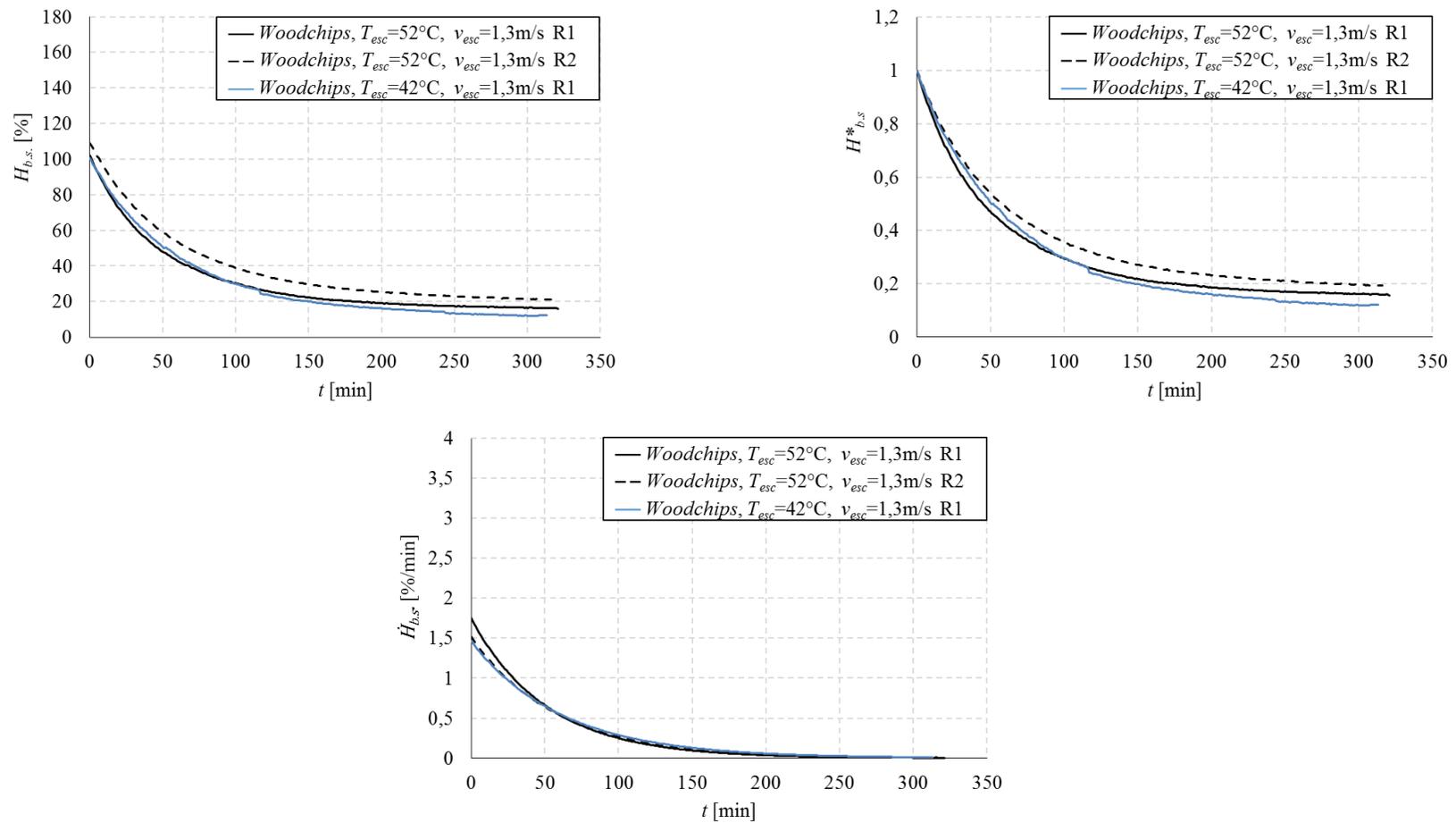


Figura 27 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de *woodchips* recolhidas no Hotel Duecitània com temperaturas de escoamento de 42 e 52°C

As **granulometrias das amostras** em análise representam os casos extremos da biomassa apropriada para queima em relação ao tamanho das partículas. Nas Figuras 28, 29 e 30 são apresentados os gráficos de velocidade de secagem da estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ e *woodchips* para vários parâmetros de temperatura e velocidade do escoamento. Para todos os casos, o efeito da granulometria na velocidade de secagem é notório. Em todos ensaios, a estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ apresenta um valor de velocidade de secagem bastante superior no início do ensaio e um tempo de secagem inferior em relação a *woodchips*.

Os resultados dos ensaios realizados em câmara climática com os parâmetros de $T=40^{\circ}\text{C}$ ou $T=50^{\circ}\text{C}$ e $H_r=10\%$ foram comparados com os resultados dos ensaios em túnel de vento com temperaturas de 42 e 52°C , respectivamente (Figuras 31 e 32). Observa-se um forte efeito do **escoamento forçado** na secagem de biomassa. A existência deste reflecte-se numa diferença muito significativa no tempo de secagem: 150min em túnel de vento e 600min em câmara climática para $T=40-42^{\circ}\text{C}$, e 150min em túnel de vento e 400min em câmara climática para $T=50-52^{\circ}\text{C}$. As velocidades de secagem no início dos ensaios são também muito maiores para os ensaios efectuados em túnel de vento comparando com a câmara climática.

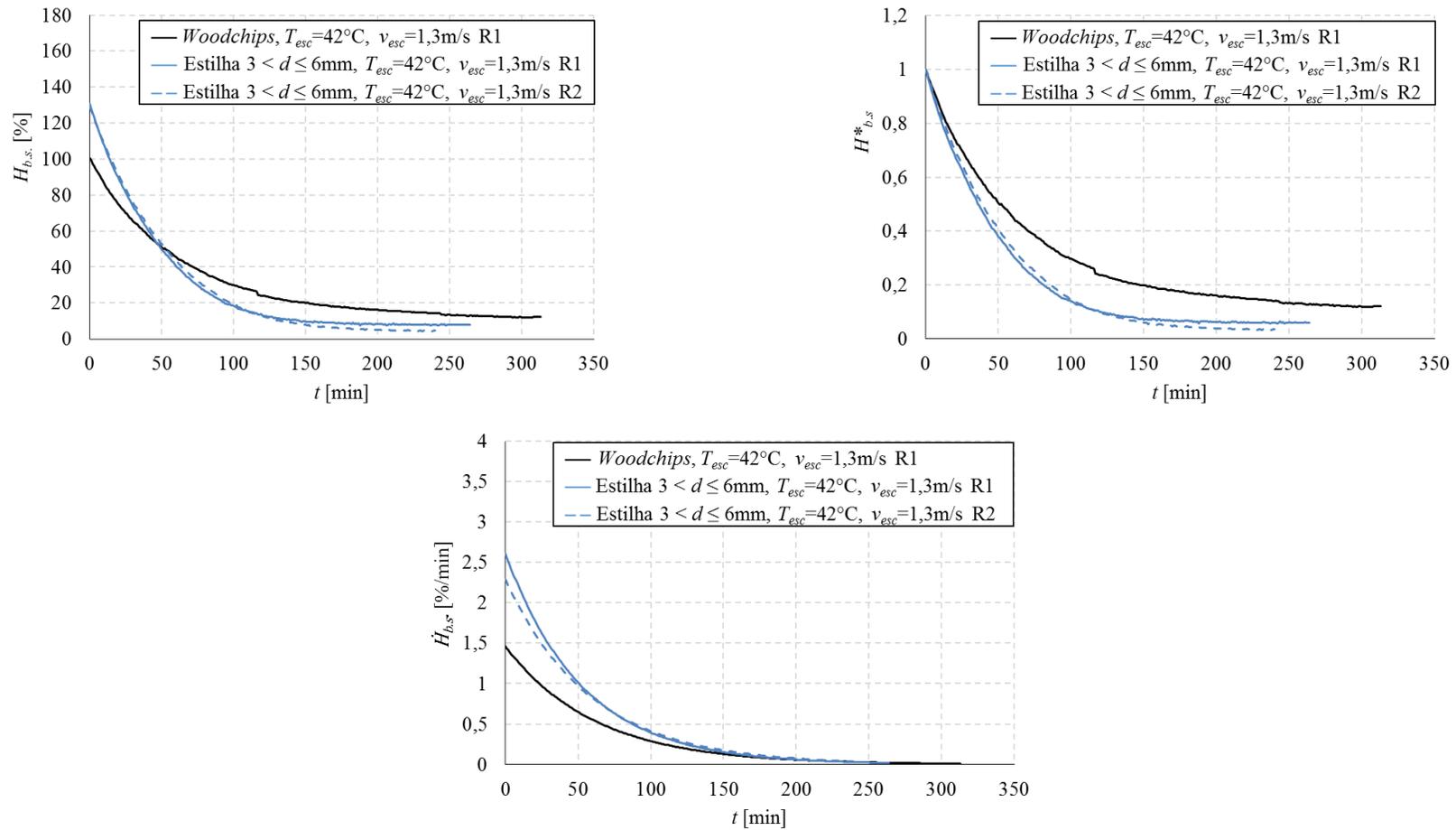


Figura 28 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ e *woodchips* recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=42^{\circ}\text{C}$, $v_{esc}=1,3\text{m/s}$)

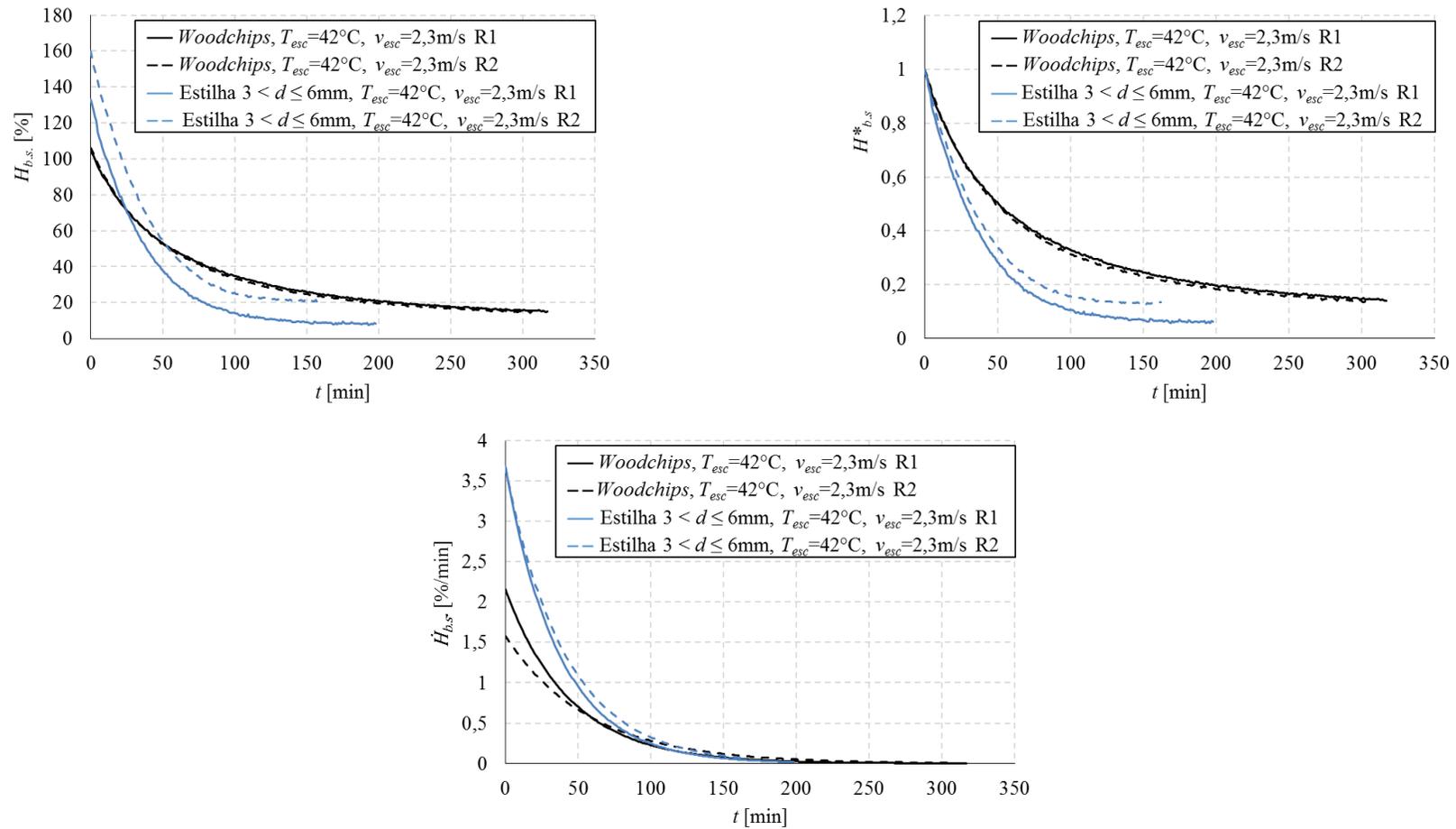


Figura 29 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ e woodchips recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=42^\circ\text{C}$, $v_{esc}=2,3\text{m/s}$)

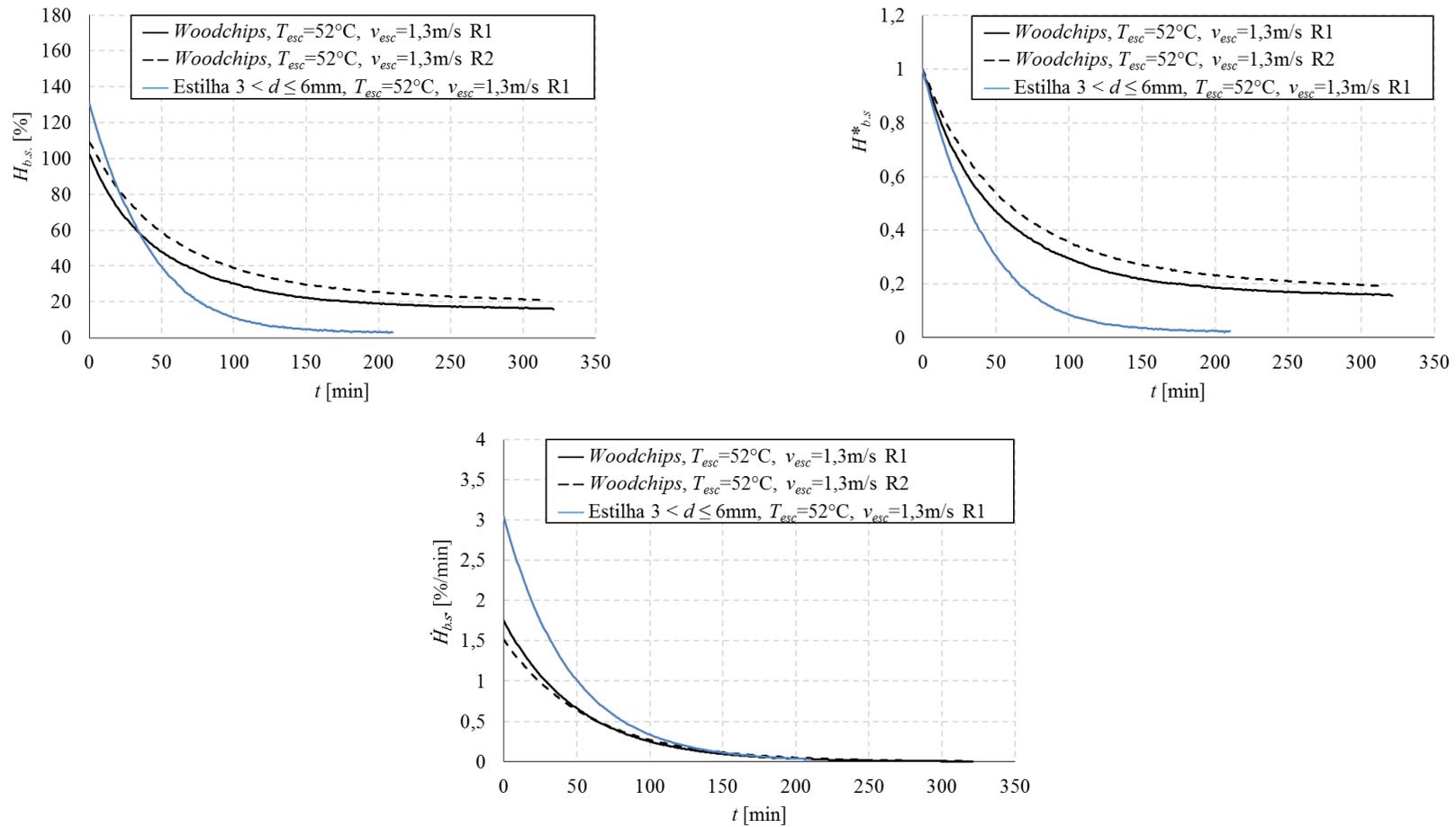


Figura 30 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6$ mm e woodchips recolhidas no Hotel Duecitània ($T_{esc}=52^\circ\text{C}$, $v_{esc}=1,3\text{m/s}$)

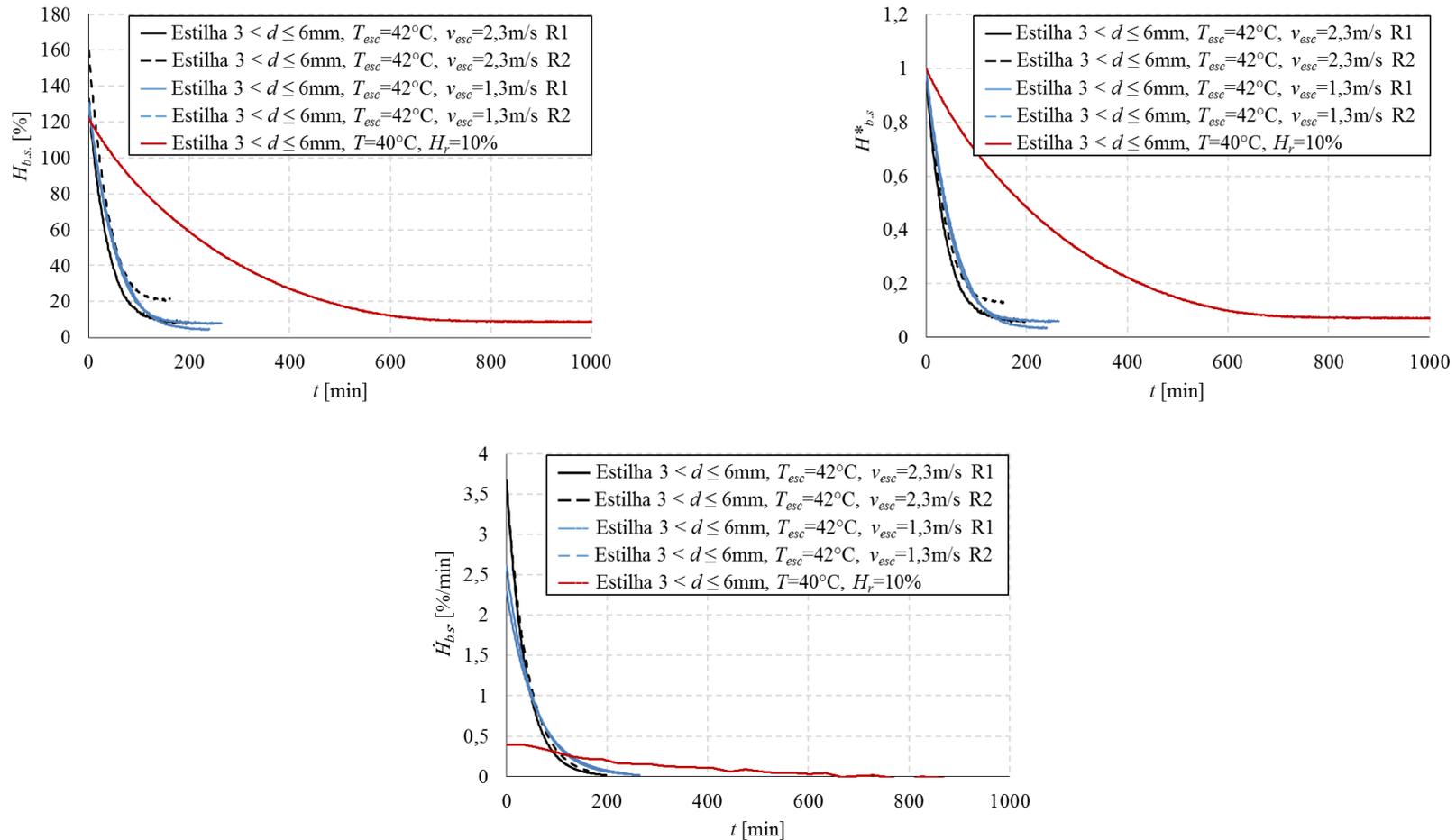


Figura 31 – Humidade em base seca ($H_{b,s}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b,s}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b,s}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidas no Hotel Duicitânia em câmara climática e em túnel de vento ($T=40^\circ\text{C}$ e $T_{esc}=42^\circ\text{C}$)

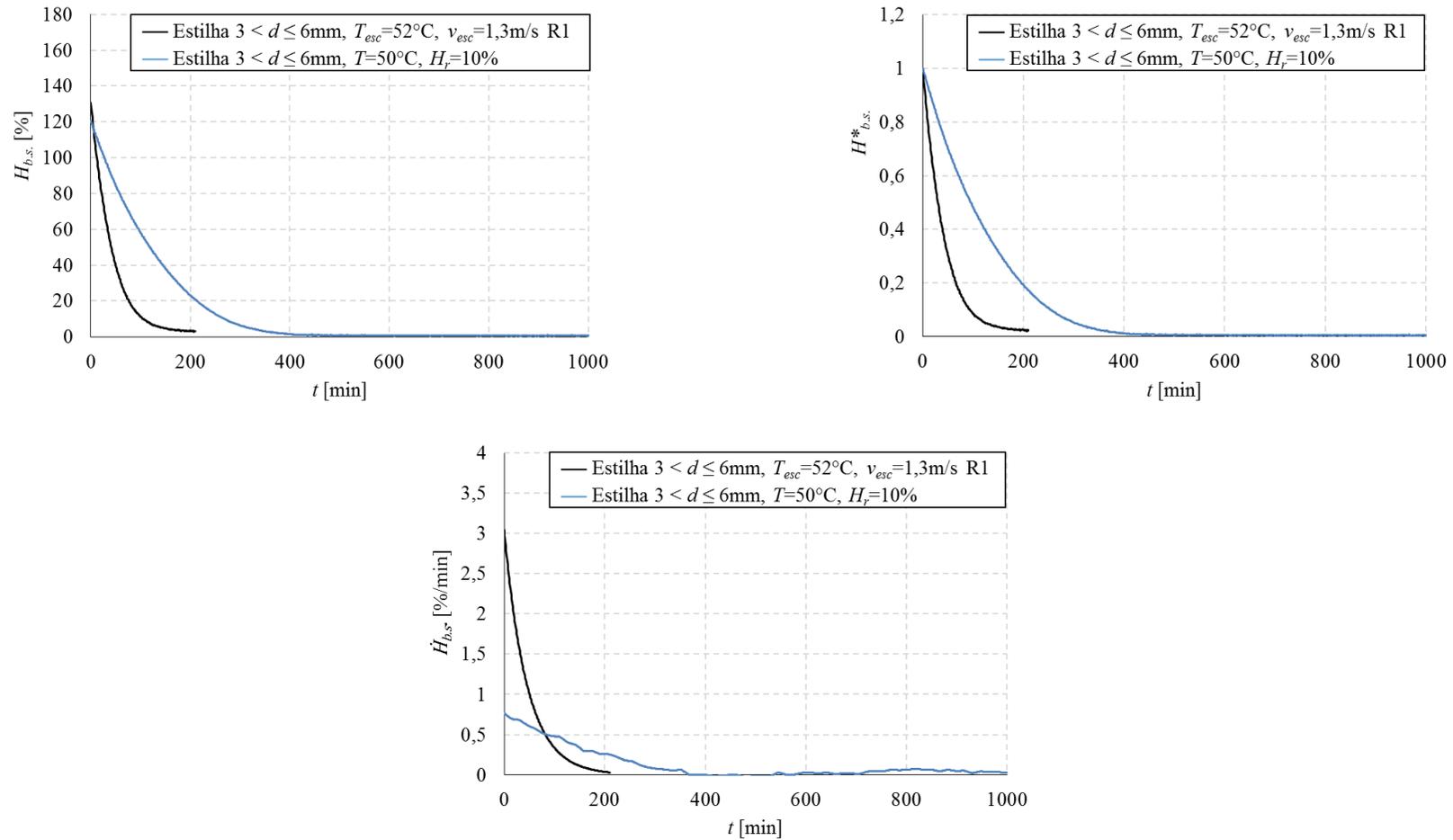


Figura 32 – Humidade em base seca ($H_{b.s.}$), humidade em base seca normalizada ($H^*_{b.s.}$) e velocidade de secagem ($\dot{H}_{b.s.}$) de amostras de estilha de granulometria $3 < d \leq 6\text{mm}$ recolhidas no Hotel Duecitânia em câmara climática e em túnel de vento ($T=50^{\circ}\text{C}$ e $T_{esc}=52^{\circ}\text{C}$)

5. CONCLUSÕES

Fontes de energia renovável para reduzir a dependência energética dos combustíveis fósseis e produzir energia limpa constituem o ponto-chave das actuais políticas energéticas europeias e mundiais. Neste contexto, particular atenção é dada ao uso de biomassa florestal. As vantagens da utilização de biomassa florestal, e particularmente biomassa florestal residual, são de carácter económico, social e ambiental, entre as quais um baixo preço relativamente aos combustíveis fósseis, a redução de emissões poluentes e do risco de incêndios, o estímulo ao desenvolvimento rural e a criação de postos de trabalho.

A biomassa florestal residual tem particular interesse no contexto de produção de bioenergia em pequena escala, que pressupõe a instalação de unidades de produção de energia com potência instalada inferior a 1MW. O uso directo deste tipo de biomassa neste tipo de sistemas de produção de bioenergia requer o seu pré-tratamento.

O presente trabalho visa o desenvolvimento da metodologia de pré-tratamento de biomassa florestal residual a fim de posterior criação de um protótipo de equipamento de separação e secagem simultâneas. Foram estudados vários tipos de biomassa, nomeadamente biomassa florestal residual, *woodchips* e *pellets*. Foi realizada uma ampla gama de ensaios a fim de caracterizar a tipologia das partículas, as propriedades de sorção e o potencial energético da biomassa em estudo.

Para todas as amostras de biomassa florestal residual recolhidas, cerca de 75% do material foi considerado como apropriado para queima. Nas granulometrias mais pequenas ($d \leq 3\text{mm}$) verificou-se uma forte presença de casca e terra. Numa das amostras, foram identificadas algumas partículas com dimensões excessivas, fruto de uma má manutenção do destroçador. A presença deste tipo de partículas implica a repetição do procedimento de trituração.

Detectou-se uma grande quantidade de resíduos pós-queima em algumas amostras e uma discrepância grande entre valores de PCS_{exp} , o que realça a importância da separação da biomassa por granulometria e os cuidados a ter no seu manuseamento e armazenamento.

No que diz respeito à secagem, a temperatura e a velocidade do escoamento têm um efeito visível contudo pouco relevante no tempo de secagem e na velocidade inicial de

secagem da biomassa. Por outro lado, a granulometria da biomassa tem um efeito preponderante. Conclui-se que a granulometria das amostras para os casos estudados de secagem de biomassa é o parâmetro que mais condiciona a sua secagem.

Concluiu-se que biomassa com granulometria mais uniforme apresenta uma perda de massa e uma conseqüente libertação de calor mais homogêneas, o que pode facilitar no ajuste dos parâmetros da caldeira. Este tipo de biomassa também é benéfico para o funcionamento do sistema de alimentação da caldeira. Concluiu-se que biomassa do tipo *pellet* demora mais tempo até incendiar mas tem um pico de libertação de calor mais elevado. Biomassa do tipo *woodchip* liberta a mesma quantidade de energia, apesar de menos intensamente, e incendeia mais facilmente.

Assim sendo, verificou-se que uma melhor preparação e selecção da biomassa resultam num combustível de maior qualidade em termos de homogeneidade da dimensão e humidade das partículas, presença de inertes e casca e potencial energético.

O estudo pormenorizado das características de biomassa é fundamental para proceder à concepção do equipamento de separação e secagem simultâneos de biomassa florestal residual. A escolha das temperaturas de secagem nos ensaios em câmara climática e túnel de vento teve como intuito a criação de equipamento de secagem a baixas temperaturas com custo inicial e consumo energético possivelmente baixos. A concepção deste protótipo e a análise detalhada do seu desempenho constituem os objectivos do trabalho futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (s.d.).
- Agbontalor, E. a. (2007). *Overview of Various Biomass Energy Conversion Routes*. Ibadan, Nigéria: Department of Forest Resources Management, University of Ibadan.
- Assembleia da República. (15 de Abril de 2010). Diário da República, 1.^a série — N.º 73. Portugal.
- Batista, F. B. (2006). Biomassa Florestal - Uma nova oportunidade para a Floresta e para os Proprietários Florestais Portugueses. Porto, Portugal: Faculdade de Letras da Universidade do Porto.
- Bruce, D. M., & Sinclair, M. S. (Dezembro de 1996). Thermal Drying of Wet Fuels: Opportunities and Technology. Finland: H.A. Simons, LTD.
- Bryant, R. A., & Mulholland, G. W. (2008). A guide to characterizing heat release rate measurement uncertainty for full-scale fire tests. *Fire and Materials*. Gaithersburg, Estados Unidos da América: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Carvalho, P. d. (2012). Aulas Teóricas da Disciplina de Combustão. Coimbra, Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Chen, L.-W. A., Verburg, P., Shackelford, A., Zhu, D., Chow, R. S., & Watson, J. G. (Julho de 2010). Moisture effects on carbon and nitrogen emission from burning of wildland biomass. Copernicus Publications.
- Clarke, S., & Preto, F. (2011). Biomass Burn Characteristics. Ontario, Estados Unidos da América: Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Figueiredo, A. R., & Costa, J. J. (2004). Experimental analysis of the use of wet porous media for thermal protection against high intensity heat fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Portugal: Elsevier ScienceDirect.
- Góis, J. C. (2013). Equipamentos de queima em caldeiras - Apontamentos teóricos das aulas de Projeto de Sistemas Energéticos. Coimbra, Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- GREENPRO, P. (2004). Bioenergia - Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação. Comissão Europeia, Instituto Superior Técnico.
- Hedley, D. (1986). World energy : the facts and the future. Londres, Grã-Bretanha: Euromonitor Publications.
- Inst. da Conservação da Natureza e das Florestas. (2011). Estatística Anual do Número de Ocorrências e Área Ardida. Portugal.
- Knoef, H. (2005). Handbook on Biomassa Gasification. Enschede, Holanda: BTG biomass technology group B.V.
- Liang, T., Khan, M. A., & Meng, Q. (1996). Spatial and Temporal Effects in Drying Biomass for Energy. *Biomass and Bioenergy Vol. 10*. Elsevier ScienceDirect.
- Loehman, R. A., Reinhardt, E., & Riley, K. L. (2013). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees – A cross-scale assessment of wildfire

- and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *Forest Ecology and Management*. Elsevier ScienceDirect.
- Loo, S. v., & Koppejan, J. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. Londres, Inglaterra: EARTHSCAN.
- Meza, J., Gil, A., Cortés, C., & González, A. (Junho de 2008). Drying Costs of Woody Biomass in a Semi-Industrial Experimental Rotary Drier. *16th European Conference & Exhibition on Biomass for Energy, Biomass Resources*. Saragoça, Espanha: Centre of Research for Energy Resources and Consumption.
- Míguez, J., Morán, J., Granada, E., & Porteiro, J. (30 de Abril de 2012). Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. Vigo, Espanha: Elsevier ScienceDirect.
- Ministério da Agricultura, A. F. (1998). Inventário Nacional Florestal. Portugal.
- Ministério da Agricultura, A. F. (2010). Inventário Nacional Florestal. Portugal.
- Nelson Jr., R. M. (2001). *Water Relations of Forest Fuels*. Missoula, Montana, Estados Unidos da América: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Services Laboratory.
- Nielsen, P. S., & Estcourt, G. (2003). *Pellets - Processing into a Pellet Fuel, Short Rotation Crops for Bioenergy*. Rotorua, Nova Zelândia: Forest Research.
- Norma CEN/TS-14918. (s.d.).
- Núñez-Regueira, L., Añón, J. A., & Castiñeiras, P. (1996). *Calorific Values and Flammability of Forest Species in Galicia. Coastal and Hillside Zones*. Santiago de Compostela, Espanha: TERBIPROMAT, Departamento de Física Aplicada, Faculdade de Física, Universidade de Santiago de Compostela.
- Nussbaumer, T. (2003). *Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction*. Zurique, Suíça: Energy & Fuels.
- Protocolo de Quioto. (1997). Quioto, Japão.
- Resolução de Conselho de Ministros. (2005). Portugal.
- Roos, C. J. (Setembro de 2008). *Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power*. Washington, Estados Unidos da América: Northwest CHP Application Center.
- Simpson, W. T. (Agosto de 1998). *Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide*. Estados Unidos da América: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Soliño, M., Prada, A., & Vázquez, M. (2008). Green electricity externalities: Forest biomass in an Atlantic European Region. *Biomass and Bioenergy*.
- Sousa, P. L. (2009). *Desenvolvimento Tecnológico do Aproveitamento Energético da Biomassa a Nível Industrial*. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Svoboda, K., Pohorely, M., Martinec, J., Baxter, D., & Hunter, C. (Maio de 2005). Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimalization of organic compounds. *32nd International Conference of SSCHE*. Eslováquia.
- Telmo, C., Lousada, A., & Moreira, N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. Elsevier - ScienceDirect.
- The Japan Institute of Energy. (2008). *The Japan Institute of Energy - The Japan Institute of Energy*. Japão.

- UE. (2009). Directiva Comunitária 28/2009.
- Vankerkove, R., & Van-Belle, J. F. (Janeiro de 1998). Biomass in EC: Summarized technical state of the art, some policies and EC programmes. Israel: Joule-Thermie.
- Zhong, M., Fan, W., Liu, T., & Li, P. (2003). Statistical analysis on current status of China forest fire safety. *Fire Safety Journal* 38 . Elsevier ScienceDirect.

WEBSITES

- Arran Woodfuels, <http://www.arranwoodfuels.co.uk/images/WOODCHIPS.jpg>
- Bridgat, www.bridgat.com/files/Oak_Round_Wood_Logs_firewood_for_sales.jpg
- Continental Biomass Industries, Inc., <http://www.cbi-inc.com/our-equipment/screening-systems.aspx>
- European Commission - The EU climate and energy package, http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm
- Hubpages, <http://fakrulsuman.hubpages.com/hub/Charcoal-for-energy-production-Charcoal-has-as-of-late-become-more-attractive-as-fuel-for-energy-production>
- Jeffrey Rader, http://www.jeffreyrader.com/screening_processing/disc_screen.cfm
- LIPPEL, <http://www.lippel.com.br/br/classificadores-e-peneiras/peneiras-rotativas/clr-700-x-1000-peneira-rotativa-para-biomassa-lippel.html#fotos>
- Martos & C^a, http://www.martos.pt/files/produtos/imagens/71_img1_foto0345.jpg
- Resilience, <http://www.resilience.org/stories/2012-09-03/charcoal>
- Wood First, http://www.woodfirst.pt/sites/www.woodfirst.pt/files/u2/foto_briquetes.jpg