

Tânia Vanessa de Jesus Ferreira

Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de peletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW

**Tese de Mestrado**

em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Professor Doutor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Professor Doutor João Luís Monney de Sá Paiva



## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da influência de diferentes tipos de peletes de *Cytisus multiflorus*, *Cytisus scoparius* e *Acacia dealbata* no rendimento térmico de uma caldeira doméstica a peletes. Previamente, a caldeira foi testada recorrendo a peletes comerciais de *Pinus pinaster*, que foram utilizados como comparação com os peletes referidos anteriormente. Os peletes de *Cytisus* e *Acacia* foram produzidos especificamente para este trabalho, enquanto os de pinho foram adquiridos a duas empresas de produção de peletes (pinho A e pinho B), sendo atualmente comercializados em Portugal.

Numa primeira fase, realizaram-se as várias etapas necessárias à produção dos peletes das espécies *Cytisus* e *Acacia*, sendo posteriormente efetuada a sua peletização. Foram realizados testes de qualidade aos peletes produzidos e aos peletes comerciais com vista à avaliação das suas características. De modo a ser possível a realização dos ensaios de queima foi necessário proceder à montagem da instalação experimental, que incluiu, para além da caldeira, vários componentes imprescindíveis nas medições necessárias durante os ensaios.

Avaliou-se o desempenho da caldeira para os cinco tipos de peletes, em três cargas térmicas distintas: “reduzida”, “média” e “alta”. O rendimento térmico da caldeira foi determinado pelo método direto e avaliado durante a fase de regime estacionário. As emissões de poluentes ( $O_2$ , CO,  $NO_x$  e  $CO_2$ ) foram medidas na fase de arranque e também em regime estacionário.

O aumento do caudal mássico de peletes levou a um aumento do rendimento térmico da caldeira e a uma diminuição das emissões de monóxido de carbono, constatando-se assim melhores condições de combustão na carga “alta”, quando comparada com as restantes. Em média, o rendimento térmico da caldeira foi muito semelhante com os cinco tipos de peletes. Relativamente às emissões, verificou-se que as emissões de CO foram extremamente elevadas na carga “reduzida” e em média, inferiores no caso dos peletes de pinho. As emissões de  $NO_x$  foram significativamente superiores no caso dos ensaios realizados com as espécies *Cytisus* e *Acacia*, tendo-se verificado que estas emissões são muito dependentes do conteúdo de azoto dos peletes.

Concluiu-se que o excesso de ar utilizado nas três cargas pré-definidas pelo fabricante era demasiado elevado pelo que, se estudou a influência da diminuição do excesso de ar no desempenho da caldeira no caso dos peletes de pinho A e giesta branca. Os resultados obtidos demonstraram que a diminuição do excesso de ar, para aproximadamente a mesma quantidade de combustível, permite um aumento do rendimento térmico da caldeira e uma significativa redução das emissões de poluentes.



## ABSTRACT

The present work aimed at studying the influence of different types of pellets *Cytisus multiflorus*, *Cytisus scoparius* and *Acacia dealbata* in the thermal efficiency of a domestic boiler burning pellets. The boiler was previously tested using commercial *Pinus pinaster* pellets, which were used as reference. The *Cytisus* and *Acacia* pellets were produced specifically for the present work, whilst pine pellets (“pine A” and “pine B”) were purchased from two companies producing pellets currently being marketed in Portugal.

Initially, the various steps required for the production of *Acacia* and *Cytisus* pellets species were undertaken to allow for the actual pelletization. Tests were conducted to evaluate pellets quality, both in-site produced and commercialized, as well as their characteristics. In order to be able to perform the combustion tests, an experimental setup that included, in addition to the boiler, various essential components for the measurements made during the tests, was prepared.

The performance of the boiler for the five types of pellet, in three different thermal loads, “reduced”, “average” and “high”, was evaluated. Its thermal efficiency was determined through the direct method with measurements made at steady state. Pollutant emissions ( $O_2$ , CO,  $NO_x$  and  $CO_2$ ) were measured at startup and at steady state.

When in “high” thermal load mode, increasing pellets mass flow rate led to better combustion conditions, diminishing carbon monoxide emissions and increasing thermal efficiency. On average, the boiler thermal efficiency was quite similar with the five types of pellets. Concerning emissions, CO levels were extremely high at “reduced” load and, on average, lower values were obtained when using pine pellets.  $NO_x$  emissions were significantly higher for pellets made of *Acacia* and *Cytisus*; these emissions are mostly a consequence on the nitrogen content of those species.

Excess air used in the three loads predefined by the manufacturer being too high, the effect in the boiler performance of decreasing the excess air when burning pellets made of “pine A” and white *Cytisus* was studied. The results revealed that decreasing excess air, for the same fuel mass flow rate, increases thermal efficiency and significantly reduces pollutant emissions.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho, pela partilha de conhecimento, pelos valiosos conselhos e pelo apoio e orientação prestados durante a realização deste trabalho.

Agradeço em segundo lugar ao meu coorientador, Professor João Luís Monney de Sá Paiva, pela oportunidade que me deu em poder realizar este trabalho. Agradeço ainda, a paciência, a partilha de conhecimento, a dedicação e a ajuda prestada.

À bolsreira de investigação Diana Almeida, quero agradecer o apoio, a ajuda e o bom ambiente de trabalho que proporcionou no laboratório.

Agradeço também, ao Professor Edmundo Marques pela ajuda, simpatia e boa disposição.

Agradeço ao Professor José Salgueiro, por gentilmente dimensionar e construir o mecanismo utilizado na medição do consumo de peletes.

Ao Engenheiro Nelson Santos, agradeço a construção dos Venturis, a ajuda e os ensinamentos dados na fase inicial da montagem da instalação experimental.

À Luisa Cruz de Juan, agradeço a ajuda e o apoio incondicional.

Ao André Guimarães, agradeço o apoio e compreensão, sobretudo nestes últimos meses em que a minha ausência foi muitas vezes sentida.

À Ana Cristina Dias e à Mariana Rocha, agradeço a amizade.

Finalmente, agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto PTDC/AGR-CFL/114826/2009 financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.



# Índice

|   |      |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | xiii |
| LISTA DE TABELAS .....  | xvii |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....   | xix  |
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 1    |
| 1.1 Situação energética.....                                      | 2    |
| 1.2 A biomassa .....  | 5    |
| 1.2.1 Características da biomassa .....                           | 7    |
| 1.3 A floresta em Portugal .....                                  | 8    |
| 1.3.1 <i>Acacia dealbata</i> Link .....                           | 10   |
| 1.3.2 <i>Cytisus multiflorus</i> e <i>Cytisus scoparius</i> ..... | 10   |
| 1.4 Processo de Peletização.....                                  | 12   |
| 1.4.1 Secagem .....   | 12   |
| 1.4.2 Destroçamento.....  | 13   |
| 1.4.3 Acondicionamento .....                                      | 13   |
| 1.4.4 Peletização .....   | 13   |
| 1.4.6 Remoção de finos.....                                       | 14   |
| 1.5 Mercado dos peletes .....                                     | 14   |
| 1.6 Certificação de peletes .....                                 | 16   |
| 1.7 Tecnologia das caldeiras a peletes.....                       | 17   |
| 1.7.1 Normalização.....   | 19   |
| 2 COMBUSTÃO DA BIOMASSA .....                                     | 21   |
| 2.1 Tecnologias de conversão.....                                 | 21   |
| 2.1.1 O processo de combustão.....                                | 22   |
| 2.1.1.1 Ignição .....   | 23   |
| 2.1.1.2 Secagem .....   | 23   |
| 2.1.1.3 Pirólise .....  | 23   |
| 2.1.1.4 Combustão do resíduo carbonoso .....                      | 24   |
| 2.1.1.5 Poluentes resultantes da combustão.....                   | 24   |
| 3 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA COMERCIAL.....                  | 27   |
| 3.1 Teor de humidade.....   | 27   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | Análise granulométrica .....                                     | 28 |
| 4     | PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES <i>CYTISUS</i> E <i>ACACIA</i> ..... | 33 |
| 4.1   | Recolha do material .....  | 33 |
| 4.2   | Secagem .....  | 34 |
| 4.2.1 | Secagem do <i>Cytisus scoparius</i> .....                        | 35 |
| 4.2.2 | Secagem da <i>Acacia dealbata</i> .....                          | 36 |
| 4.2.3 | Secagem do <i>Cytisus multiflorus</i> .....                      | 39 |
| 4.3   | Destroçamento .....  | 43 |
| 4.4   | Caracterização das espécies .....                                | 44 |
| 4.4.1 | Teor de humidade .....   | 44 |
| 4.4.2 | Análise granulométrica .....                                     | 44 |
| 5     | PELETIZAÇÃO E PÓS-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES .....                  | 49 |
| 6     | TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES .....                  | 53 |
| 6.1   | Teor de humidade .....   | 53 |
| 6.2   | Dimensões .....  | 53 |
| 6.3   | Massa .....  | 55 |
| 6.4   | Massa volúmica .....   | 55 |
| 6.5   | Quantidade de finos .....  | 56 |
| 6.6   | Durabilidade .....   | 57 |
| 6.7   | Composição química .....   | 59 |
| 7     | INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL .....                                    | 61 |
| 7.1   | Descrição da instalação .....                                    | 61 |
| 7.2   | Descrição da caldeira .....                                      | 62 |
| 7.3   | Metodologia experimental .....                                   | 64 |
| 7.3.1 | Medição do consumo de peletes .....                              | 64 |
| 7.3.2 | Medição das temperaturas .....                                   | 64 |
| 7.3.3 | Medição do caudal mássico de água .....                          | 65 |
| 7.3.4 | Medição do caudal mássico de gases de combustão .....            | 65 |
| 7.3.5 | Composição dos gases de combustão .....                          | 66 |
| 8     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                     | 67 |
| 8.1   | Metodologia de cálculo .....                                     | 67 |
| 8.2   | Ensaios experimentais .....                                      | 69 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.2.1 Fase de arranque.....   | 71  |
| 8.2.2 Regime permanente.....  | 78  |
| 8.2.2.1 Influência do tipo de peletes e do caudal mássico .....   | 81  |
| 8.2.2.2 Concentração de oxigénio e excesso de ar .....  | 84  |
| 8.2.2.3 Influência do tipo de peletes e da carga térmica nas emissões .....   | 85  |
| 8.2.2.4 Influência da concentração de oxigénio nas emissões .....   | 89  |
| 8.2.2.5 Influência do caudal mássico de peletes nas perdas térmicas pela chaminé e na temperatura dos gases de exaustão ..... | 90  |
| 8.2.2.6 Análise das perdas térmicas na caldeira .....   | 91  |
| 8.2.2.7 Ensaios de pinho e giesta branca com menor excesso de ar.....   | 93  |
| 9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....  | 97  |
| 10 REFERÊNCIAS .....  | 101 |
| ANEXOS.....   | 109 |
| Anexo A - Distribuição de partículas.....   | 109 |
| Anexo B - Calibrações .....   | 127 |
| Anexo C - Análise de incertezas .....   | 137 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1: Consumo mundial de energia primária entre 1990 e 2040 (IEA, 2013).....   | 2  |
| Figura 1.2: Consumo de energia primária mundial em função do tipo de combustível (IEA, 2013). .....  | 3  |
| Figura 1.3: Consumo de energia primária no mundo em 2009 (IEA).....  | 4  |
| Figura 1.4: Consumo de energia primária nos países pertencentes à OCDE em 2009 (IEA). .....  | 5  |
| Figura 1.5: Consumo de energia primária em Portugal em 2009 (IEA).....   | 5  |
| Figura 1.6: Distribuição da área total por espécies (ICNF, 2013). .....  | 9  |
| Figura 1.7: Distribuição geográfica do <i>Cytisus scoparius</i> (a) e do <i>Cytisus multiflorus</i> (b) no território Português (UTAD, 2013) ..... | 11 |
| Figura 1.8: Peletizadora do tipo “anel” (a) e do tipo plana (b) (Van Loo e Koppejan, 2008).....  | 13 |
| Figura 1.9: Distribuição das unidades de produção de peletes em Portugal (ANPEB, 2013).....  | 15 |
| Figura 1.10: Caldeira a peletes (Oberberger e Thek, 2010). .....   | 18 |
| Figura 1.11: Sistemas de alimentação (Oberberger e Thek, 2010). .....  | 19 |
| <br>   |    |
| Figura 2.1: Processos de conversão termoquímicos (Van Loo e Koppejan, 2008). .....   | 21 |
| Figura 2.2: Evolução da massa duma partícula de biomassa durante o processo de combustão (Dias, 2002).....   | 22 |
| <br>   |    |
| Figura 3.1: Estufa laboratorial. ....  | 27 |
| Figura 3.2: Exsicador.....   | 27 |
| Figura 3.3: Peneiradora vibratória Retsch.....   | 29 |
| Figura 3.4: Distribuição típica da matéria-prima da empresa A. ....  | 30 |
| Figura 3.5: Distribuição típica da matéria-prima da empresa B.....   | 31 |
| <br>   |    |
| Figura 4.1: Espécies – <i>Cytisus scoparius</i> (a), <i>Acacia dealbata</i> (b) e <i>Cytisus multiflorus</i> (c). .....                            | 33 |
| Figura 4.2: Estufa solar. ....   | 34 |
| Figura 4.3: Secagem do <i>Cytisus scoparius</i> em estufa solar (a) e secagem natural (b)...   | 35 |
| Figura 4.4: Secagem de troncos de <i>Acacia dealbata</i> . ....  | 36 |
| Figura 4.5: Temperatura no interior da estufa.....   | 37 |
| Figura 4.6: Humidade relativa no interior da estufa. ....  | 38 |
| Figura 4.7: Irradiação no interior da estufa e no exterior.....  | 38 |
| Figura 4.8: Secagem do <i>Cytisus multiflorus</i> em estufa solar.....   | 39 |
| Figura 4.9: Perda de massa das amostras durante o processo de secagem.....   | 41 |
| Figura 4.10: Temperatura no interior da estufa.....  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.11: Humidade relativa no interior da estufa. ....   | 42 |
| Figura 4.12: Irradiação no interior da estufa e no exterior. ....                                      | 42 |
| Figura 4.13: Moinho de martelos e zona de alimentação. ....  | 43 |
| Figura 4.14: Moinho laboratorial. ....   | 43 |
| Figura 4.15: Teor de humidade das espécies e respetivo desvio padrão. ....                             | 44 |
| Figura 4.16: Distribuição granulométrica típica do <i>Cytisus scoparius</i> A. ....                    | 45 |
| Figura 4.17: Distribuição granulométrica típica da <i>Acacia dealbata</i> A. ....                      | 45 |
| Figura 4.18: Distribuição granulométrica típica do <i>Cytisus multiflorus</i> A. ....                  | 46 |
| Figura 4.19: Distribuição granulométrica típica do <i>Cytisus scoparius</i> B. ....                    | 46 |
| Figura 4.20: Distribuição granulométrica típica da <i>Acacia dealbata</i> B. ....                      | 47 |
| Figura 4.21: Distribuição granulométrica típica do <i>Cytisus multiflorus</i> B1. ....                 | 47 |
| Figura 4.22: Distribuição granulométrica típica do <i>Cytisus multiflorus</i> B2. ....                 | 47 |
|  |    |
| Figura 5.1: Peletizadora industrial. ....  | 49 |
| Figura 5.2: Peletes comerciais – pinho A. ....   | 49 |
| Figura 5.3: Peletes comerciais – pinho B. ....   | 50 |
| Figura 5.4: Peletes de <i>Cytisus scoparius</i> . ....   | 50 |
| Figura 5.5: Peletes de <i>Acacia dealbata</i> . ....   | 50 |
| Figura 5.6: Peletes de <i>Cytisus multiflorus</i> . ....   | 51 |
|  |    |
| Figura 6.1: Teor de humidade dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                               | 53 |
| Figura 6.2: Comprimento médio dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                              | 54 |
| Figura 6.3: Diâmetro médio dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                                 | 54 |
| Figura 6.4: Massa média dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                                    | 55 |
| Figura 6.5: Massa volúmica média dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                           | 56 |
| Figura 6.6: Peneiro de 3,35 mm. ....   | 56 |
| Figura 6.7: Teor de finos dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                                  | 57 |
| Figura 6.8: Durabilidade mecânica dos peletes e respetivo desvio padrão. ....                          | 58 |
|  |    |
| Figura 7.1: Instalação experimental. ....  | 61 |
| Figura 7.2: Caldeira. ....   | 62 |
| Figura 7.3: Zona da câmara de combustão. ....  | 63 |
|  |    |
| Figura 8.1: Temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque. ....                         | 73 |
| Figura 8.2: Concentração de oxigénio nos gases de exaustão durante a fase de arranque. ....            | 74 |
| Figura 8.3: Concentração de monóxido de carbono nos gases de exaustão durante a fase de arranque. .... | 76 |
| Figura 8.4: Concentração de óxidos de azoto nos gases de exaustão durante a fase de arranque. ....     | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 8.5: Concentração de dióxido de carbono nos gases de exaustão durante a fase de arranque. ....   | 78  |
| Figura 8.6: Rendimento térmico em função do tipo de combustível e do caudal mássico de alimentação. ....  | 82  |
| Figura 8.7: Concentração de oxigénio e excesso de ar em função do caudal mássico de combustível. ....   | 85  |
| Figura 8.8: Emissões de monóxido de carbono para os cinco tipos de peletes. ....  | 86  |
| Figura 8.9: Emissões de óxidos de azoto para os cinco tipos de peletes. ....  | 87  |
| Figura 8.10: Emissões de dióxido de carbono para os cinco tipos de peletes. ....  | 89  |
| Figura 8.11: Emissões de CO e NO <sub>x</sub> em função da concentração de oxigénio. ....   | 89  |
| Figura 8.12: Perdas térmicas pela chaminé e temperatura dos gases de exaustão em função do tipo de combustível e do caudal mássico de peletes. .... | 91  |
| Figura 8.13: Rendimento térmico em função do caudal mássico de peletes de pinho A e giesta branca. ....   | 94  |
| Figura 8.14: Emissões de CO e NO <sub>x</sub> nas cargas “reduzida”, “média” e “alta” para o pinho A e para a giesta branca. ....                   | 95  |
| Figura 8.15: Emissões de CO <sub>2</sub> nas cargas “reduzida”, “média” e “alta” para o pinho A e para a giesta branca. ....                        | 96  |
|   |     |
| Figura A.1: Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa A. ....   | 109 |
| Figura A.2: Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa B. ....   | 110 |
| Figura A.3: Distribuição da matéria-prima do <i>Cytisus scoparius</i> A. ....   | 111 |
| Figura A.4: Distribuição da matéria-prima da <i>Acacia dealbata</i> A. ....   | 117 |
| Figura A.5: Distribuição da matéria-prima do <i>Cytisus multiflorus</i> A. ....   | 120 |
| Figura A.6: Distribuição da matéria-prima do <i>Cytisus scoparius</i> B. ....   | 124 |
| Figura A.7: Distribuição da matéria-prima da <i>Acacia dealbata</i> B. ....   | 125 |
| Figura A.8: Distribuição da matéria-prima do <i>Cytisus multiflorus</i> B1. ....  | 125 |
| Figura A.9: Distribuição da matéria-prima do <i>Cytisus multiflorus</i> B2. ....  | 126 |
|   |     |
| Figura B.1: Instalação experimental utilizada na calibração dos Venturis. ....  | 128 |
| Figura B.2: Curva de calibração do Venturi 1. ....  | 128 |
| Figura B.3: Curva de calibração do Venturi 2. ....  | 129 |
| Figura B.4: Esquema da instalação utilizada na calibração da turbina. ....  | 130 |
| Figura B.5: Curva de calibração da turbina. ....  | 130 |
| Figura B.6: Instalação experimental utilizada na calibração do ventilador. ....   | 131 |
| Figura B.7: Curva de calibração do ventilador - Perda de carga vs % CO <sub>2</sub> . ....  | 132 |
| Figura B.8: Curva de calibração do ventilador - Perda de carga vs Caudal mássico de ar. ....  | 133 |
| Figura B.9: Instalação experimental utilizada para a calibração do rotâmetro. ....  | 134 |
| Figura B.10: Curva de calibração do rotâmetro, com CO <sub>2</sub> à pressão relativa de 1 bar. ....  | 136 |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1.1: Valores limite dos parâmetros mais importante dos peletes segundo a norma ENplus. ....           | 17  |
| Tabela 3.1: Teor de humidade da matéria-prima comercial analisada. ....                                      | 28  |
| Tabela 4.1: Variação do teor de humidade do <i>Cytisus scoparius</i> durante a secagem em estufa solar. .... | 35  |
| Tabela 4.2: Variação do teor de humidade do <i>Cytisus scoparius</i> durante a secagem natural. ....         | 36  |
| Tabela 4.3: Teor de humidade da <i>Acacia</i> (%) durante o período de armazenamento..                       | 37  |
| Tabela 4.4: Teor de humidade da <i>Acacia</i> (%) durante a secagem em estufa solar. ....                    | 37  |
| Tabela 4.5: Teor de humidade do <i>Cytisus multiflorus</i> (%). ....   | 39  |
| Tabela 4.6: Teor de humidade do <i>Cytisus multiflorus</i> durante a secagem em estufa solar .....           | 40  |
| Tabela 4.7: Características das amostras de <i>Cytisus multiflorus</i> . ....                                | 40  |
| Tabela 6. 1: Composição imediata e elementar dos peletes. ....   | 59  |
| Tabela 8.1: Ensaio realizados para os peletes de pinho A. ....   | 69  |
| Tabela 8.2: Ensaio realizados para os peletes de pinho B. ....   | 70  |
| Tabela 8.3: Ensaio realizados para os peletes de giesta amarela. ....  | 70  |
| Tabela 8.4: Ensaio realizados para os peletes de mimosa. ....  | 71  |
| Tabela 8.5: Ensaio realizados para os peletes de giesta branca. ....   | 71  |
| Tabela 8.6: Ensaio - pinho A. ....   | 79  |
| Tabela 8.7: Ensaio - pinho B. ....   | 79  |
| Tabela 8.8: Ensaio - giesta amarela. ....  | 80  |
| Tabela 8.9: Ensaio - mimosa. ....  | 80  |
| Tabela 8.10: Ensaio - giesta branca. ....  | 81  |
| Tabela 8.11: Comparação dos resultados obtidos na carga “reduzida”. ....                                     | 83  |
| Tabela 8.12: Comparação dos resultados obtidos na carga “média”. ....  | 83  |
| Tabela 8.13: Comparação dos resultados obtidos na carga “alta”. ....   | 83  |
| Tabela 8.14: Análise das perdas térmicas – carga “reduzida”. ....  | 92  |
| Tabela 8.15: Análise das perdas térmicas – carga “média”. ....   | 92  |
| Tabela 8.16: Análise das perdas térmicas – carga “alta”. ....  | 92  |
| Tabela 8.17: Ensaio – pinho A e giesta branca. ....  | 94  |
| Tabela C.1: Resolução e exatidão do analisador Testo 350. ....   | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela C.2: Incertezas aleatórias associadas à medição da concentração dos gases de exaustão. ....   | 138 |
| Tabela C.3: Incertezas sistemáticas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão. .... | 139 |
| Tabela C.4: Incertezas totais associadas à medição dos gases de exaustão. ....                       | 139 |
| Tabela C.5: Determinação das incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases. ....        | 140 |
| Tabela C.6: Determinação da incerteza associada à medição do caudal mássico de peletes. ....         | 141 |
| Tabela C.7: Incerteza associada à medição do caudal mássico de água. ....                            | 141 |
| Tabela C.8: Incerteza associada à medição da temperatura da água à entrada da caldeira. ....         | 142 |
| Tabela C.9: Incerteza associada à medição da temperatura da água à saída da caldeira. ....           | 142 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| $\bar{c}_{H_2O}$                 | calor específico da água à temperatura média, (kJ/(kg.K))                     |
| $\dot{Q}_{CO}$                   | perdas térmicas por não queimados, (kW)                                       |
| $\dot{Q}_{fornecida}$            | potência térmica libertada na combustão dos peletes, (kW)                     |
| $\dot{Q}_{gases}$                | perdas térmicas relativas aos gases de exaustão, (kW)                         |
| $\dot{Q}_{humidade}$             | perdas térmicas inerentes à humidade do combustível, (kW)                     |
| $\dot{Q}_{transf. \text{ água}}$ | potência térmica transferida para a água do circuito da caldeira, (kW)        |
| $\bar{c}_P$                      | calor específico do produto à temperatura média, (kJ/(kg.K))                  |
| $C_{\text{água}}$                | calor específico a pressão constante da água à temperatura média, (kJ/(kg.K)) |
| $D$                              | diâmetro, (m)   |
| $d_p$                            | diâmetro de uma partícula, (m)  |
| $d_{pi}$                         | média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros sucessivos, (m)   |
| $h$                              | comprimento, (m)  |
| $H_{bs}$                         | teor de humidade na base seca, (%)  |
| $h_{lv}$                         | entalpia latente de vaporização da água, (kJ/(kg.K))                          |
| $M$                              | massa molecular, (kg/kmol)  |
| $\dot{m}_{\text{água}}$          | caudal mássico de água do circuito da caldeira, (kg/s)                        |
| $\dot{m}_{CO}$                   | caudal mássico de monóxido de carbono nos produtos da combustão, (kg/s)       |
| $\dot{m}_{combustível}$          | caudal mássico de peletes, (kg/s)   |
| $m_{finos}$                      | massa de finos, (kg)  |
| $m_h$                            | massa húmida, (kg)  |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $m_{inicial}$          | massa inicial da amostra, (kg)   |
| $m_{pelete}$           | massa de um pelete, (kg)   |
| $\dot{m}_{peletes}$    | caudal mássico de peletes, (kg/s)  |
| $m_{peletes\ final}$   | massa retida no peneiro depois do ensaio de durabilidade, (kg)             |
| $m_{peletes\ inicial}$ | massa inicial da amostra de peletes, (kg)                                  |
| $m_s$                  | massa seca, (kg)   |
| $n$                    | número de <i>kmol</i> do produto considerado por kg de combustível, (kmol) |
| $PCI_{CO}$             | poder calorífico inferior do monóxido de carbono, (kJ/kg)                  |
| $T_{ambiente}$         | temperatura do ar ambiente, (°C)   |
| $T_{entrada}$          | temperatura da água à entrada da caldeira, (°C)                            |
| $T_{gases}$            | temperatura dos gases de exaustão, (°C)                                    |
| $T_{saída}$            | temperatura da água à saída da caldeira, (°C)                              |
| $V_{pelete}$           | volume de um pelete, (m <sup>3</sup> )                                     |
| $x_j$                  | fração mássica das partículas de material retidas no intervalo $i$ (-)     |

### Símbolos Gregos

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\alpha$             | fração de água do combustível, (-)                                    |
| $\Delta m_{peletes}$ | variação da massa de peletes num determinado intervalo de tempo, (kg) |
| $\Delta t$           | intervalo de tempo, (s)   |
| $\eta_{térmico}$     | rendimento térmico, (%)   |
| $\rho_{pelete}$      | massa volúmica de um pelete, (kg/m <sup>3</sup> )                     |

### Abreviaturas

|       |   |
|-------|---|
| ANPEB | Associação Nacional de Peletes Energéticos de Biomassa  |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials              |
| DEMGI | Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial |
| DGEG  | Direcção Geral de Energia e Geologia                    |

|       |   |
|-------|---|
| DNFF  | Direcção Nacional das Fileiras Florestais                 |
| EPC   | European Pellet Council                                   |
| ESTGV | Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu           |
| ICNF  | Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas      |
| IEA   | Internation Energy Agency                                 |
| OCDE  | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico |
| PCI   | Poder calorífico inferior                                 |
| PCS   | Poder calorífico superior                                 |



# 1 INTRODUÇÃO

A energia e os combustíveis são um assunto comum ao longo da história da humanidade, relacionando-se com quase tudo o que o homem faz ou pretende fazer, influenciando deste modo o padrão de vida e o progresso tecnológico (Klass, 1998). O desenvolvimento das sociedades, a industrialização e o crescimento populacional que se tem verificado nos últimos tempos, desencadearam um acentuado aumento do consumo de energia em todo o mundo (Lee *et al.*, 2007). Até meados do século XX (a designada era dos combustíveis fósseis), não era dada grande importância à temática da energia e esta não era vista como um problema até que a humanidade passou a ser confrontada, à escala global, com a escassez de energia e combustíveis e consequentes efeitos sobre o quotidiano dos cidadãos (Klass, 1998).

Durante décadas os combustíveis fósseis foram, claramente, o principal suporte das necessidades energéticas a nível mundial e, atualmente, continuam a ser a principal fonte de energia. Contudo, é esperado que nos próximos 40 a 50 anos esta fonte de energia venha a esgotar-se (Saidur *et al.*, 2011); isto porque, de acordo com Patzek e Pimentel (2006), a taxa de consumo mundial de petróleo é cerca de 300.000 vezes superior à sua taxa de formação. Para além disso, estes combustíveis estão associados a elevadas emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, que causam efeitos irreversíveis no ambiente.

O uso de energias renováveis tornou-se um imperativo de modo a minimizar os consumos energéticos de combustíveis fósseis e a combater as alterações climáticas.

O objetivo principal deste trabalho é estudar a influência do uso como combustível de peletes de espécies infestantes no rendimento térmico de uma caldeira doméstica.

Este trabalho encontra-se estruturado num conjunto de 9 capítulos. No presente capítulo, será abordada a situação energética atual e algumas previsões, no mundo e em particular em Portugal. Será feita uma abordagem à biomassa como combustível, assim como à situação atual da floresta em Portugal, com uma pequena descrição das espécies utilizadas neste trabalho. Ainda neste capítulo é, também, descrito o processo de peletização e abordado o mercado dos peletes, a sua certificação e a tecnologia das caldeiras a peletes. No capítulo 2, é feita uma breve revisão sobre o processo de combustão da biomassa e são descritos os processos de formação dos poluentes mais comuns resultantes da sua combustão. No capítulo 3, é caracterizada a matéria-prima comercial de duas empresas distintas, em termos de teor de humidade e granulometria. No capítulo 4, é abordado o pré-tratamento realizado com as espécies *Acacia dealbata*, *Cytisus scoparius* e *Cytisus multiflorus*. No capítulo 5, é descrito o processo de peletização efetuado com as espécies referidas anteriormente e pós-tratamento realizado. Serão também descritos e apresentados os resultados dos testes de qualidade efetuados aos peletes comerciais e aos peletes

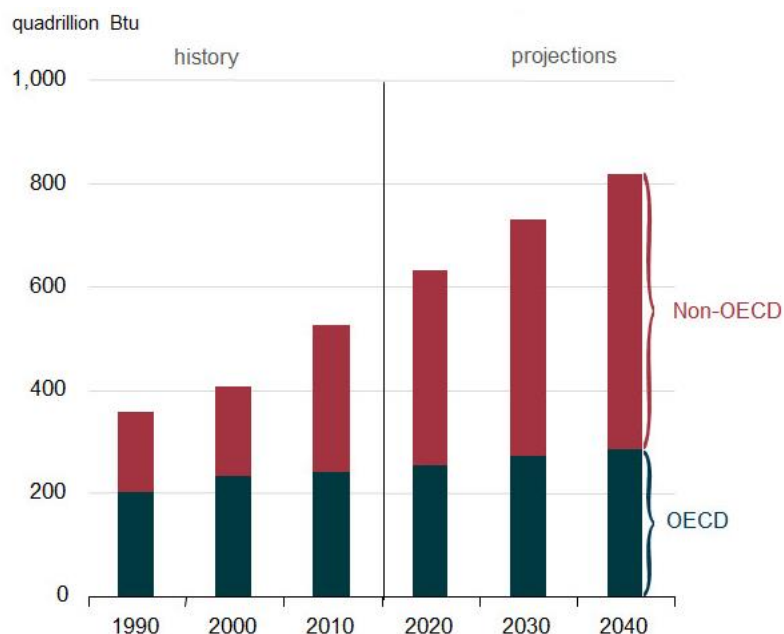
## 1. INTRODUÇÃO

produzidos, no capítulo 6. No capítulo 7 é descrita a instalação experimental bem como as técnicas de medida. Os resultados e a sua discussão são apresentados no capítulo 8. No capítulo 9, são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para futuros trabalhos.

### 1.1 Situação energética

Segundo o relatório anual *International Energy Outlook* (IEA, 2013), estima-se que o consumo de energia mundial cresça 56% entre 2010 e 2040, sendo a China e a Índia responsáveis por metade deste aumento.

A Figura 1 representa o consumo mundial de energia primária nos países pertencentes e não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), entre 1990 e 2010, e ainda as previsões de consumo até 2040.

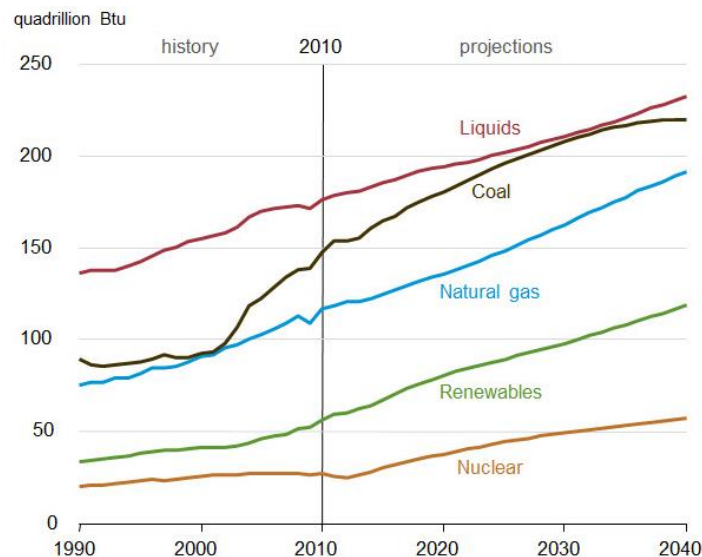


**Figura 1.1:** Consumo mundial de energia primária entre 1990 e 2040 (IEA, 2013).

Observando a figura anterior, verifica-se que os países que não pertencem à OCDE apresentam um consumo de energia superior aos países que pertencem à OCDE, com uma tendência crescente bem visível, devido principalmente ao forte crescimento económico a longo prazo. Estima-se um aumento de 90% no consumo de energia nos países não pertencentes à OCDE, enquanto nos países que pertencem a esta organização o aumento esperado é apenas de 17%. O setor industrial é aquele que representa uma maior fatia no consumo energético, sendo previsível que em 2040 o consumo neste setor represente metade do consumo energético mundial (IEA, 2013).

Prevê-se que as energias renováveis e a energia nuclear venham a ter um aumento de 2,5% por ano, sendo estas as energias com maior aumento. Contudo, os combustíveis fósseis continuarão a ser responsáveis por quase 80% do consumo mundial de energia até 2040 (IEA, 2013).

A Figura 1.2 representa o consumo de energia primária mundial para cada tipo de combustível desde de 1990 até 2010 e as previsões de 2010 até 2040.



**Figura 1.2:** Consumo de energia primária mundial em função do tipo de combustível (IEA, 2013).

Como referido anteriormente, os combustíveis fósseis continuarão a ser a principal fonte de energia durante as próximas décadas. Relativamente ao carvão, as previsões apontam para um aumento substancial.

O consumo mundial de petróleo e dos restantes combustíveis líquidos cresce de 87 milhões de barris por dia em 2010, para 97 milhões de barris por dia em 2020 e para 115 milhões de barris por dia em 2040; este crescimento é sobretudo devido ao setor industrial e de transportes. Apesar do crescente aumento do preço dos combustíveis fósseis, prevê-se um aumento médio de 1,1% no uso destes combustíveis no setor dos transportes (IEA, 2013).

Relativamente às emissões de dióxido de carbono relacionadas com o consumo energético mundial, estima-se um aumento de 46% até 2040 tendo em conta as políticas e regulamentos atuais (IEA, 2013).

Devido à aprovação do Protocolo de Quioto e com o objetivo de combater as alterações climáticas, a Comissão Europeia lançou no ano 2000 o “Programa Europeu para as alterações climáticas” (ECCP I), que visa a redução das emissões de gases com efeito de estufa através da implementação de um conjunto de políticas e medidas.

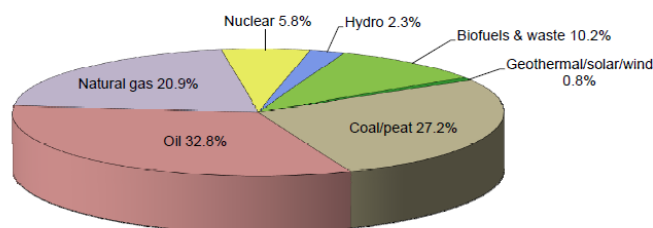
## 1. INTRODUÇÃO

Mais tarde, em 2005, foi lançado o segundo “Programa Europeu para as alterações climáticas” (ECCPII).

Desde 2004 que se tem verificado uma diminuição das emissões de gases com efeito de estufa, com exceção de 2010, em que houve um aumento devido ao crescimento económico de alguns países juntamente com invernos frios sentidos nesse ano. Desde 1990 até à atualidade, a União Europeia conseguiu reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa em 18,4% (EEA, 2013). Ao longo dos últimos anos, têm sido tomadas várias medidas com o intuito de combater as alterações climáticas e melhorar a eficiência energética. Em Março de 2007, a União Europeia aprovou um plano para melhoria das políticas energéticas que inclui os objetivos “20-20-20” (EEA, 2013), que deverão ser cumpridos até 2020. Estes objetivos incluem os seguintes pontos:

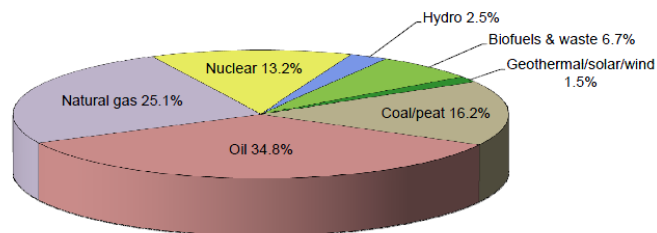
- Decréscimo das emissões de gases com efeito de estufa de, no mínimo 20% face aos níveis de 1990;
- Aumento de 20% na eficiência energética;
- Aumento de 20% no uso de energias renováveis no consumo de energia final.

Seguidamente são apresentadas as últimas estatísticas do consumo de energia primária em função do tipo de combustível, segundo a Internacional Energy Agency (IEA). A Figura 1.3 representa a contribuição das fontes de energia primária no panorama energético mundial, em 2009. Observa-se que os combustíveis fósseis detêm uma elevada parcela, cerca de 81%, seguindo-se as energias renováveis, com 13%, e a energia nuclear com 6%, num consumo total de 12.150 Mtep (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo).



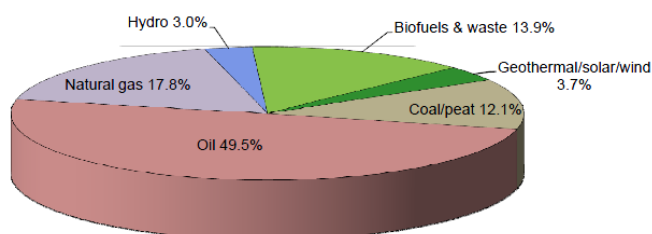
**Figura 1.3:** Consumo de energia primária no mundo em 2009 (IEA).

Na Europa verifica-se o mesmo cenário (Figura 1.4): 77% do consumo total de energia primária provém dos combustíveis fósseis; contudo, a energia nuclear contribui com 13% do consumo total de energia primária. As energias renováveis apenas contribuem com 11%, num total de 1.746 Mtep.



**Figura 1.4:** Consumo de energia primária nos países pertencentes à OCDE em 2009 (IEA).

Relativamente a Portugal, em 2009 os combustíveis fósseis representaram 79% do consumo total de energia primária (24 Mtep). Das energias renováveis foram a biomassa e os resíduos que contribuíram com uma maior parcela, 13,9% (Figura 1.5).



**Figura 1.5:** Consumo de energia primária em Portugal em 2009 (IEA).

Portugal é um país com grande escassez de recursos energéticos endógenos, em particular dos fósseis (petróleo, carvão e gás) e, como referido anteriormente, estes combustíveis asseguram cerca de 79% do consumo total de energia primária, o que leva a uma elevada dependência energética do exterior. Segundo a DGEG, com exceção de 2008, a taxa de dependência energética tem apresentado uma tendência decrescente desde 2005, devido à contribuição cada vez maior das energias renováveis.

Com o objetivo de reduzir a dependência energética do exterior, Portugal estabeleceu um compromisso de que, em 2020, 31% da energia final consumida no país deveria ser obtida a partir de fontes renováveis. As fontes de energia consideradas renováveis são as comumente designadas por solar, eólica, geotérmica e biomassa (Lee *et al.*, 2007).

## 1.2 A biomassa

Tem-se verificado um interesse cada vez maior no uso de biocombustíveis para fins energéticos, sendo que têm sido os aspetos políticos, sociais e ambientais que têm impulsionado esta tendência crescente. Em concreto, a utilização da biomassa permitirá a países como Portugal, que não possuem reservas próprias de combustíveis

## 1. INTRODUÇÃO

fósseis, reduzir a sua dependência do petróleo importando, criar emprego através da exploração deste combustível e reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (Van Loo e Koppejan, 2008).

A biomassa tem sido utilizada desde sempre como fonte de energia; contudo, a sua utilização ainda é muito limitada em algumas regiões do mundo. Estima-se que atualmente a biomassa represente cerca de 14% da energia consumida em todo o planeta, sendo que, nos países em desenvolvimento, contribui com 35% do consumo total de energia. Nos países industrializados o panorama é completamente diferente, estimando-se que apenas 3% da energia utilizada provenha deste combustível. A biomassa é utilizada sobretudo em aplicações tradicionais, que são caracterizadas por baixas eficiências e elevadas emissões de poluentes (Demirbas, 2005).

Segundo a Diretiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009, a biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da agricultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”.

A biomassa tem a particularidade de poder ser convertida em combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos, o que não acontece com as restantes fontes de energias renováveis. Depois dos tratamentos, a biomassa pode ser transformada em três grandes formas de energia: eletricidade, calor e combustível. Esta flexibilidade da biomassa permite-lhe uma concorrência direta com os combustíveis fósseis (Greenpro, 2004).

A biomassa é uma fonte de energia endógena, disponível na maioria dos países. A sua produção através de culturas energéticas permite vários benefícios ambientais, quando a seleção das culturas energéticas é a mais adequada. Os benefícios passam pela redução na utilização de pesticidas e fertilizantes e pela reparação de solos degradados (McKendry, 2002).

A produção de biomassa é realizada através do processo de fotossíntese, em que a energia solar é armazenada nas árvores e plantas sob a forma de energia química por meio de reações entre a luz solar, a água e o dióxido de carbono presente na atmosfera, por intermédio da clorofila (Demirbas, 2009). Este processo converte menos de 1% da energia solar disponível em energia química (McKendry, 2002).

A utilização de biomassa como combustível é considerada neutra em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que não contribui para o aumento da sua quantidade na atmosfera. Durante a sua combustão, a quantidade de CO<sub>2</sub> libertada é aproximadamente igual à quantidade de CO<sub>2</sub> que esta absorveu durante o seu crescimento (McKendry, 2002), pelo que o balanço de emissões de dióxido de carbono é considerado nulo. Contudo, desde do seu tratamento até à obtenção de um combustível final, estão envolvidos consumos energéticos em que a fonte de energia utilizada é por vezes fóssil. Deste modo, estes consumos de energia deverão ser minimizados ou, se possível, substituídos por fontes de energia renováveis.

### 1.2.1 Características da biomassa

Entre outros componentes, a biomassa é constituída essencialmente por celulose, hemiceluloses, lenhina, lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos e cinzas (Jenkins *et al.*, 1998).

As principais propriedades da biomassa que devem ser consideradas importantes na sua conversão como fonte de energia são (McKendry, 2002):

- Teor de humidade;
- Poder calorífico;
- Quantidade de matérias voláteis e carbono fixo;
- Cinzas;
- Teor de metais alcalinos;
- Razão celulose/lenhina;
- Massa volúmica aparente (ou a granel).

#### 1.2.1.1 Teor de humidade

A percentagem de humidade da biomassa é a razão entre a quantidade de água que esta apresenta e a massa total (Quaak *et al.*, 1999). A biomassa possui uma vasta gama de teores de humidade, que são resultado do seu tipo e da forma como é armazenada (Van Loo e Koppejan, 2008), podendo esta ser dividida em dois grupos: a humidade intrínseca e a humidade extrínseca. A humidade intrínseca está relacionada com a própria composição da biomassa e a humidade extrínseca está dependente das condições ambientais e de armazenamento (McKendry, 2002).

A humidade é uma propriedade importante com grande influência no poder calorífico do combustível, assim como no processo de combustão (Khan *et al.*, 2009). Quanto maior for o teor de humidade, menor será o poder calorífico, uma vez que será necessária maior energia para a evaporação da água presente no combustível. A biomassa que apresenta um maior teor de humidade necessita de mais tempo para a sua secagem, o que provoca um atraso na ignição. Por sua vez, há também um atraso na pirólise e na combustão do carvão, reduzindo a temperatura de combustão e levando a uma diminuição da queima dos voláteis (Grammelis, 2011).

#### 1.2.1.2 Poder calorífico

O poder calorífico indica a quantidade de energia, por unidade de massa, que um combustível contém e, que é libertada durante a sua reação com o oxigénio (Quaak *et al.*, 1999). O poder calorífico dum combustível pode classificar-se como “superior” (caso toda a energia resultante da queima seja aproveitada) ou “inferior” (se se considerar que a energia contida na água dos produtos da combustão não vai ser recuperada).

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.2.1.3 Quantidade de matérias voláteis e carbono fixo

O teor de voláteis é a parte orgânica da biomassa que é libertada como gás (incluindo a água) nos primeiros 7 minutos quando esta é aquecida a uma temperatura de 950°C. O carbono fixo é a massa sobrando depois da libertação dos voláteis, excluindo as cinzas (McKendry, 2002). Habitualmente, a biomassa possui um elevado teor de voláteis (Oberberger e Thek, 2004).

### 1.2.1.4 Cinzas

As cinzas são a parte inorgânica da biomassa que não é utilizada e contêm maioritariamente matéria mineral. O teor de cinzas é dependente do tipo de biomassa, chegando a 8% no caso da palha (Hansen *et al.*, 2009). Esta propriedade da biomassa afeta negativamente os custos de manuseamento e processamento das tecnologias de conversão de energia (McKendry, 2002).

### 1.2.1.5 Teor de metais alcalinos

A quantidade de metais alcalinos (tais como Na, K, Mg, P e Ca) presente na biomassa é um importante fator nos processos termoquímicos, uma vez que estes metais reagem com a sílica (presente na cinza) produzindo escória que, muitas vezes, causa problemas operacionais durante a combustão (McKendry, 2002).

### 1.2.1.6 Razão celulose/lenhina

Esta propriedade da biomassa é apenas importante nos processos de conversão bioquímicos. Deve ser tida em conta na seleção da biomassa para os processos bioquímicos, uma vez que a celulose apresenta uma biodegradabilidade superior à lenhina e, por isso, apresenta uma maior conversão de carbono (McKendry, 2002).

### 1.2.1.7 Massa volúmica aparente (ou a granel)

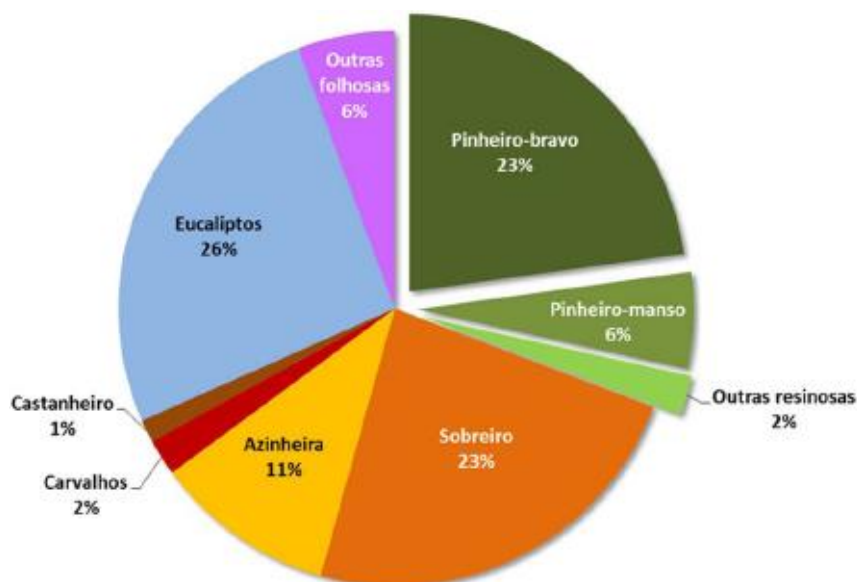
A massa volúmica aparente (ou a granel) é uma característica importante da biomassa, uma vez que se encontra diretamente relacionada com os custos de transporte e armazenamento (McKendry, 2002). A massa volúmica da biomassa tem uma vasta gama de valores, sendo superior no caso da madeira, com cerca de 600 a 900 kg/m<sup>3</sup> (Quaak *et al.*, 1999).

## 1.3 A floresta em Portugal

Em Portugal a floresta é a principal fonte de biomassa. De acordo com o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), em 2010 a floresta representava cerca de 3.154.800 ha do território Português; contudo, esta área tem

vindo a sofrer uma redução ao longo dos anos. Entre 1995 e 2010, a área total de floresta teve uma redução de cerca de 5%. Uma das possíveis formas de a aumentar passaria pela exploração das áreas de matos e pastagens, que representam cerca de 2.853.228 ha.

A Figura 1.6 representa a distribuição das áreas das espécies florestais em Portugal, referente ao ano de 2010.



**Figura 1.6:** Distribuição da área total por espécies (ICNF, 2013).

Analisando a figura anterior, verifica-se que a espécie dominante em Portugal é o eucalipto, com uma ocupação de 26% da área total de floresta, representando cerca de 812.000 ha. O sobreiro é a segunda espécie com maior área de ocupação, cerca de 23%, que representa 737.000 ha, seguido do pinheiro-bravo também com 23% e uma área de ocupação de 714.000 ha. O castanheiro é a espécie com menor área de ocupação na floresta Portuguesa, apenas 1%.

As espécies resinosas (pinheiro-bravo, pinheiro-manso, entre outras), ocupam cerca de 31% da área total da floresta; já as folhosas (eucalipto, sobreiro, azinheira, carvalho e castanheiro, entre outras), representam a maior fatia da área total da floresta Portuguesa, cerca de 69%.

De acordo com o ICNF (2013), entre 1995 e 2010 a área total de pinheiro-bravo teve uma redução de 263.000 ha, em que 63% desta área se transformou em matos e pastagens, 27% foi utilizada no reflorestamento com eucalipto, 5% foi convertida em espaços urbanos e 5% em áreas florestais com outras espécies arbóreas. Em contrapartida, o eucalipto tem ao longo destes últimos anos aumentado a sua área de ocupação.

### 1.3.1 *Acacia dealbata* Link

As *Acacias*, pertencentes à família *Fabaceae* e à subfamília *Mimosoideae*, contêm cerca de 1.200 espécies, nativas principalmente da Austrália e Tasmânia, mas também de outras regiões do mundo, como a África (Marchante, 2001; Sheppard *et al.*, 2006). Em especial a *Acacia dealbata*, é nativa do sudeste da Austrália e foi introduzida na Europa em 1790 como espécie ornamental, sendo posteriormente plantada em diversas áreas do sul deste continente que, por apresentarem climas favoráveis, favoreceu fortemente o seu desenvolvimento (Sheppard, 2006; Lorenzo *et al.*, 2010). Esta espécie encontra-se difundida por florestas secas, encostas e margens de cursos de água, pode crescer até 15 metros e reproduz-se exclusivamente por sementes. Depois de cortada tem uma rápida capacidade de reprodução, assim como de resistir aos efeitos do fogo e do gelo (Sheppard *et al.*, 2006).

As *Acacias* têm uma série de propriedades que as tornam altamente invasoras. Têm a capacidade de fixar azoto, o que lhes permite viver em ambientes pobres em nutrientes, e são caracterizadas por um rápido crescimento. Estas espécies possuem um elevado número de sementes com grande longevidade e a sua germinação é estimulada por altas temperaturas; os fogos que, além de ajudarem na rebentação da espécie, estimulam a germinação das suas sementes (Marchante, 2001).

Atualmente, a *Acacia* é considerada um problema ecológico e é uma das espécies de carácter invasivo mais abundante em Portugal, Espanha, França e Itália (Sheppard, 2006; Lorenzo *et al.*, 2010). Em Portugal, o Decreto-lei n.º 565 / 99 de 21 de Dezembro de 1999 refere a *Acacia dealbata* como uma espécie invasora, sendo totalmente proibido o seu cultivo. O acacial ocupa 0,6% da área florestal portuguesa, cerca de 18.500 ha. Este estrato arbóreo também é constituído por outras espécies, como é o caso do pinheiro-bravo, do pinheiro-manso, do eucalipto, das silvas e dos tojos, entre outros (Godinho *et al.*, 2005).

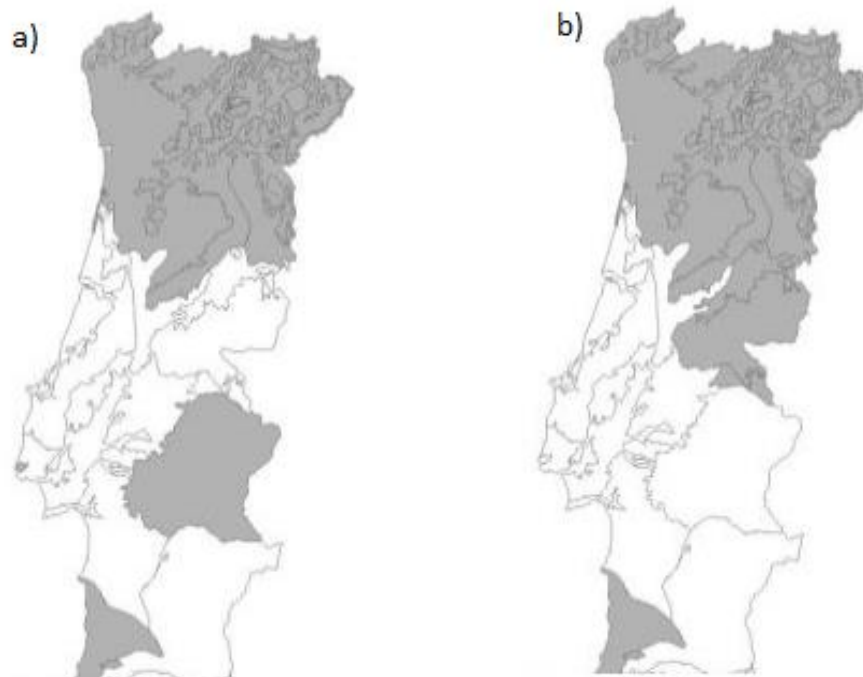
### 1.3.2 *Cytisus multiflorus* e *Cytisus scoparius*

O género *Cytisus* inclui cerca de 60 espécies, geralmente abundantes em torno do Mediterrâneo; contudo, também são encontradas em outras regiões do mundo, como a África e a Europa Ocidental e Central (Pereira *et al.*, 2012b)

A espécie *Cytisus multiflorus*, vulgarmente conhecida como giesta branca, pertence à família *Fabaceae* (UTAD, 2013) e à subfamília *Papilionoideae*. Esta espécie é um arbusto endémico do sudoeste da Europa, concretamente da Península Ibérica (Riaño *et al.*, 2004; Barros *et al.*, 2011), e é conhecida pelas suas alegadas propriedades medicinais; tem sido utilizada devido às suas propriedades diuréticas, anti-inflamatórias, anti-hipertensivas e antidiabéticas (Gião *et al.*, 2007). Frequentemente, esta espécie desenvolve-se em solos degradados, pobres e ácidos. A sua utilização é bastante vasta, sendo utilizada como planta ornamental, como

alimentação animal, como fertilizante dos solos, sendo ainda o pólen das suas flores utilizado na apicultura (Pereira *et al.*, 2012b).

Relativamente ao *Cytisus scoparius*, esta espécie é um arbusto nativo da Europa Ocidental e Central que é usado na medicina tradicional pelas suas propriedades diuréticas, antidiabéticas, hipnóticas e sedativas (González *et al.*, 2013). Tal como o *Cytisus multiflorus*, o *Cytisus scoparius* também detém a capacidade de fixar azoto nos seus ramos e galhos, pelo que é, muitas vezes, utilizado como fertilizante dos solos (Estabrook, 2006). Esta espécie foi intencionalmente introduzida em muitos países, tal como aconteceu com muitas plantas exóticas; contudo, tornou-se numa planta invasora em muitas regiões do mundo (Memmott *et al.*, 2000), principalmente nas que apresentam climas temperados (Caldwell, 2006). Esta espécie encontra-se bem adaptada a climas moderadamente secos, sendo contudo intolerante ao sombreamento de outras árvores ou arbustos (Shaben e Myers, 2010). O seu carácter invasivo está relacionado com a capacidade que esta espécie tem em produzir grandes quantidades de sementes com grande longevidade e, também, na sua aptidão para se estabelecer e ter um crescimento inicial rápido em áreas que sofreram anteriormente perturbações (Prévosto *et al.*, 2004). Em Portugal, o giestal (constituído principalmente por giestas, mas também pelo pinheiro-bravo, carvalho negral e outras espécies em menores quantidades) ocupa cerca de 4,3% da área florestal do país que corresponde aproximadamente a 145.000 ha, que se distribui principalmente pelo interior norte do país (Godinho *et al.*, 2005). A Figura 1.7 representa a distribuição do *Cytisus scoparius* e *multiflorus* no território nacional.



**Figura 1.7:** Distribuição geográfica do *Cytisus scoparius* (a) e do *Cytisus multiflorus* (b) no território Português (UTAD, 2013)

## 1.4 Processo de Peletização

Habitualmente a biomassa tem um elevado teor de humidade, tamanho e forma irregulares e uma baixa massa volúmica aparente, o que a torna difícil de manipular, transportar e armazenar (Kaliyan e Morey, 2009). A densificação da biomassa em peletes permite melhorar estas características, obtendo um combustível com baixa humidade, alta massa volúmica e um tamanho e forma regulares, permitindo, assim, um transporte e armazenamento mais eficientes (Mani *et al.*, 2006). O processo de produção de peletes é dividido em três principais etapas: o pré-tratamento da matéria-prima, a sua peletização e o pós-tratamento.

O pré-tratamento do material é dependente das condições em que este se encontra. Caso seja necessário, é primeiramente efetuada uma limpeza do material, seguida da sua secagem e destorroamento. Deve evitar-se que a matéria-prima contenha materiais contaminantes (areias, metais e vidros), que influenciam de forma negativa o processo de peletização e, posteriormente, o comportamento durante a combustão levando, por exemplo, a um aumento da quantidade de cinzas (Obernberger e Thek, 2010).

O pós-tratamento dos peletes consiste no seu arrefecimento, remoção de finos e posterior embalagem e distribuição.

### 1.4.1 Secagem

Como referido anteriormente, o teor de humidade da biomassa pode apresentar grandes variações que dependem, essencialmente, do tipo de material, do tempo de colheita e do método e duração de armazenamento (Van Loo e Koppejan, 2008). O processo de peletização depende, para além de outros parâmetros, do atrito gerado entre a matriz e a matéria-prima que, por sua vez, é influenciado, entre outros fatores, pelo teor de humidade do material (Obernberger e Thek, 2010). Por um lado, se a matéria-prima se encontra demasiado seca, a superfície das partículas pode carbonizar e os ligantes acabam por se queimar antes do processo de densificação ser concluído; por outro, se a matéria-prima se encontra muito húmida, a humidade do material contido nos orifícios da peletizadora não evapora e aumenta o volume dos peletes, tornando-os mecanicamente fracos (Van Loo e Koppejan, 2008). De acordo com Hansen *et al.* (2009), quando a matéria-prima apresenta um teor de humidade superior a 15%, torna-se bastante difícil de peletizar.

O processo de secagem da biomassa pode ser realizado de forma natural ou forçada. A secagem natural é normalmente utilizada em culturas bioenergéticas e palhas, onde o material é colocado em montes soltos e é regularmente mexido (Obernberger e Thek, 2010). Relativamente à secagem forçada, existem atualmente diferentes tecnologias disponíveis, tais como: secadores tubulares ou de tapetes (Obernberger e Thek, 2010). Existem também métodos de secagem a baixa temperatura que, é o caso, da secagem em estufas solares.

### 1.4.2 Destroçamento

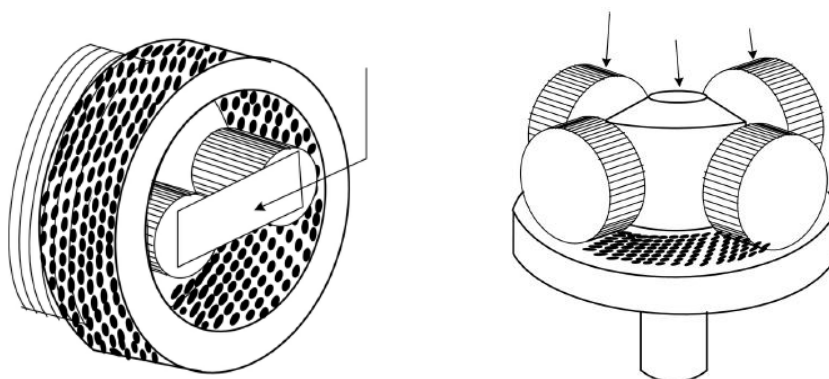
Habitualmente, a matéria-prima utilizada na produção de peletes requer uma redução e homogeneização que, na maioria das vezes, é realizada por um moinho de martelos (Van Loo e Koppejan, 2008). De acordo com Obernberger e Thek (2010), usualmente, o diâmetro de partícula da matéria-prima utilizada na produção de peletes de 6 mm de diâmetro não deve exceder os 4 mm.

### 1.4.3 Acondicionamento

Este processo consiste na adição de vapor de água à matéria-prima anteriormente à sua peletização, tendo por objetivo a formação de uma camada de água superficial para melhorar os mecanismos de ligação das partículas durante o processo. Em detrimento do vapor de água poderão ser utilizados aditivos biológicos (Obernberger e Thek, 2010). A adição de água à matéria-prima também pode ter como objetivo o ajustamento do teor de humidade necessário para o processo de peletização.

### 1.4.4 Peletização

Esta tecnologia é proveniente da indústria da alimentação animal (Obernberger e Thek, 2010), e é efetuada recorrendo a uma máquina peletizadora, que pode ser do tipo “anel” ou do tipo “plana” (Van Loo e Koppejan, 2008). O processo consiste em comprimir a matéria-prima sobre uma matriz perfurada com o auxílio de rolos. Os dois diferentes tipos de peletizadora, “anel” ou “plana”, diferem apenas na posição da matriz e dos rolos. A Figura 1.8 ilustra os dois tipos de peletizadoras disponíveis.



**Figura 1.8:** Peletizadora do tipo “anel” (a) e do tipo plana (b) (Van Loo e Koppejan, 2008).

### 1.4.5 Arrefecimento

Durante o processo de peletização, devido ao atrito gerado entre o material e a matriz, os peletes sofrem um aumento de temperatura (Bergström *et al.*, 2008); em média, a temperatura dos peletes no final do processo de densificação pode variar de 80°C a 130°C (Oberberger e Thek, 2010), pelo que se torna necessário um arrefecimento cuidado para garantir uma alta durabilidade (Van Loo e Koppejan, 2008).

### 1.4.6 Remoção de finos

Depois de arrefecidos, os peletes são peneirados num crivo para remoção dos finos, podendo estes ser introduzidos novamente no processo de peletização. Posteriormente, os peletes são embalados e distribuídos.

## 1.5 Mercado dos peletes

Em 2008, a produção anual de peletes na Europa ultrapassou os 7 milhões de toneladas, dos quais 60% eram de alta qualidade para uso do setor doméstico. O consumo de peletes na Europa para uso doméstico é garantido pela produção europeia, ao ponto que, parte dos peletes para uso industrial são importados de outros países como o Canadá e a Rússia. Os principais produtores europeus de peletes são a Áustria, a Suécia, a Alemanha e a Itália. Apesar da Alemanha e da Suíça possuírem uma grande indústria produtora de peletes e um alto consumo, a Áustria é o país que possui o mercado de aquecimento residencial a peletes mais desenvolvido (Hiegl e Janssen, 2009).

O mercado de peletes em Portugal começou a desenvolver-se em 2005 e tem vindo a registar um aumento contínuo. O principal mercado dos peletes é o setor doméstico, os edifícios públicos, de serviços e pequenas indústrias, não existindo para já nenhuma instalação de “produção” de energia a peletes (Ferreira e Ferreira, 2011). O consumo nacional de peletes é ainda bastante reduzido, sendo que apenas cerca de 10% da produção total é para consumo interno; os restantes 90% são exportados principalmente para o norte da Europa. Porém, em 2011, verificou-se um aumento de 41% no consumo interno face ao ano anterior (Ferreira e Ferreira, 2011; Monteiro *et al.*, 2012).

De acordo com a Associação Nacional de Peletes Energéticos de Biomassa (ANPEB), no final de 2012 existiam em Portugal 23 unidades de produção de peletes, com uma capacidade de produção instalada de cerca de 904.000 t. No final de 2012, nem todas as unidades de produção se encontravam totalmente operacionais: 5 encontravam-se em fase de implementação, sendo a produção total desse ano aproximadamente de 690.000 t. A Figura 1.9 ilustra a distribuição das unidades de

produção de peletes em Portugal, é claramente visível a sua concentração no norte e centro do país e tendencialmente no litoral.

As cores dos marcadores distinguem a capacidade de produção das unidades, em que, o azul-escuro corresponde a uma capacidade de produção de até 5.000 t/ano, rosa de 5.000 a 10.000 t/ano, verde de 10.000 a 50.000 t/ano, turquesa de 50.000 a 100.000 t/ano e amarelo igual ou superior a 100.000 t/ano.



**Figura 1.9:** Distribuição das unidades de produção de peletes em Portugal (ANPEB, 2013).

Relativamente às previsões da ANPEB para o presente ano de 2013, espera-se o início de atividade de 3 a 5 novas unidades de produção de peletes com uma capacidade de 400.000 t. Prevê-se também um aumento de 100% no consumo nacional de peletes, passando para as 150.000 t/ano.

Cerca de 80% da matéria-prima utilizada na produção de peletes provém do pinho, sendo o pinho-bravo a espécie predileta na produção de peletes em Portugal. Ainda que em menores quantidades, também são utilizadas outras espécies, como o choupo, o eucalipto, a acácia e o carvalho (ANPEB, 2013). Como já foi referido, nos últimos anos a área total ocupada pelo pinheiro-bravo tem sofrido uma redução significativa (INCF, 2013), o que leva a preocupações de disponibilidade de matéria-prima para produção de peletes, sobretudo se se mantiver durante mais tempo a inépcia até agora registada pelo setor na procura duma verticalização da atividade.

Segundo a DNFF (2010), é esperado que a curto e médio prazo as necessidades de biomassa como matéria-prima para abastecimento das atuais e futuras centrais

## 1. INTRODUÇÃO

termoelétricas e unidades industriais (como a indústria de produção de peletes), venham causar uma elevada pressão sobre este recurso energético, uma vez que se prevê que a disponibilidade de biomassa para fins energéticos venha a ser inferior a 3 milhões t/ano, enquanto as necessidades serão superiores a 4,4 milhões t/ano. Uma das possíveis soluções para ultrapassar este problema, poderá passar pela valorização da biomassa existente que ainda não é utilizada para fins energéticos, assim como pela produção de biomassa de forma dedicada e sustentada através de culturas energéticas.

Há uma lacuna em termos de legislação para a implementação de culturas energéticas de crescimento rápido, como o choupo, o salgueiro ou mesmo a acácia. O cultivo destas e outras espécies permitiria aliviar a pressão exercida sobre as espécies de renovação mais demorada, como é o caso do pinheiro (ANPEB, 2013).

### 1.6 Certificação de peletes

Hoje em dia, verifica-se uma grande necessidade e facilidade do comércio de produtos entre diferentes países. Deste modo, o Comité Europeu de Normalização desenvolveu um conjunto de normas internacionais para combustíveis sólidos, o CEN/TC 335, com o objetivo de facilitar o mercado de compra e venda de combustíveis sólidos entre os diferentes países europeus. Apesar disso, diversos países (Áustria, Suécia, Alemanha, Itália e França), desenvolveram normas próprias de qualidade para peletes, com algumas diferenças entre elas (Maraver, *et al.*, 2011). Relativamente a Portugal, não existe nenhuma norma referente a combustíveis sólidos, sendo a norma Alemã, DIN, a mais utilizada (Vivarelli, 2009).

Em 2011 com a introdução de novas normas Europeias para biocombustíveis sólidos, que incluem a norma para peletes de madeira EN 14961-2, que foi implementada por toda a Europa através da certificação ENplus, encontrando-se atualmente em rápido crescimento. Na Alemanha e Áustria, 90% dos peletes produzidos são certificados por esta norma (Pellicert, 2012).

Em Portugal, apenas 3 unidades de produção de peletes detêm esta certificação. São elas a Pinewells SA, a Pelletsfirst e a José Afonso & Filhos, Lda. Estas três indústrias são responsáveis por 22% da produção total nacional (ANPEB, 2013).

A certificação ENplus inclui três classes de qualidade de peletes: a ENplus-A1, a ENplus-A2 e a EN-B, que correspondem às classes da norma EN 14961-2. As classes são diferenciadas pelo tipo de matéria-prima utilizada e pelas características dos peletes. Os peletes da classe A1 são os que cumprem os mais elevados requisitos de qualidade, produzem menor quantidade de cinzas e são utilizados para caldeiras e salamandras domésticas. Relativamente aos peletes pertencentes à classe A2, estes produzem maior quantidade de cinza e são utilizados em aplicações maiores. A classe EN B refere-se a peletes para uso industrial (EPC, 2013).

A Tabela 1.1 representa os principais parâmetros definidos para as três classes pela certificação ENplus.

**Tabela 1.1:** Valores limite dos parâmetros mais importante dos peletes segundo a norma ENplus.

| <b>Propriedade</b>                | <b>Unidade</b>    | <b>ENplus-A1</b>       | <b>ENplus-A2</b>       | <b>EN-B</b>            | <b>Norma</b> |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| Diâmetro                          | mm                |                        | 6 ou 8                 |                        | EN 16127     |
| Comprimento                       | mm                |                        | $3,15 \leq L \leq 40$  |                        | EN 16127     |
| Teor de humidade                  | %                 |                        | $\leq 10$              |                        | EN 14774-1   |
| Teor de cinzas                    | %                 | $\leq 0,7$             | $\leq 1,5$             | $\leq 3,0$             | EN 14775     |
| Durabilidade mecânica             | %                 | $\geq 97,5$            |                        | $\geq 96,5$            | EN 15210-1   |
| Finos (< 3,15 mm)                 | %                 |                        | $< 1$                  |                        | EN 15210-1   |
| Poder calorífico                  | MJ/kg             | $16,5 \leq PC \leq 19$ | $16,3 \leq PC \leq 19$ | $16,0 \leq PC \leq 19$ | EN 14918     |
| Densidade aparente                | Kg/m <sup>3</sup> |                        | $\geq 600$             |                        | EN 15103     |
| Azoto                             | %                 | $\leq 0,3$             | $\leq 0,5$             | $\leq 1,0$             | EN 15104     |
| Enxofre                           | %                 |                        | $\leq 0,03$            | $\leq 0,04$            | EN 15289     |
| Cloro                             | %                 |                        | $\leq 0,02$            | $\leq 0,03$            | EN 15289     |
| Comportamento de fusão das cinzas | °C                | $\geq 1200$            |                        | $\geq 1100$            | EN 15370     |

## 1.7 Tecnologia das caldeiras a peletes

Há milhares de anos que a combustão da madeira tem sido utilizada como fonte de calor, tendo evoluído da queima a céu aberto para sistemas de combustão sofisticados (Van Loo e Koppejan, 2008).

A combustão de peletes no setor doméstico pode ser realizada por fogões/salamandras ou caldeiras. Os fogões são utilizados habitualmente para aquecimento do espaço onde se encontram instalados, através da transferência de calor por radiação para a envolvente e convecção para o ar ambiente. Existem atualmente no mercado fogões que também possibilitam o aquecimento central. As caldeiras permitem fazer o aquecimento central de uma habitação recorrendo a um sistema de distribuição de energia térmica (Fiedler, 2004).

Na utilização eficaz de lenha em sistemas de aquecimento existe a necessidade de uma alimentação constante, o que torna este processo de aquecimento pouco prático, dada a fraca adaptação da lenha a este tipo de procedimento. Contudo, hoje em dia as caldeiras a peletes permitem um conforto idêntico às caldeiras a gásóleo ou gás, uma vez que possibilitam uma alimentação automática sem grande necessidade de intervenção do utilizador. A Figura 1.10 representa um esquema de uma caldeira doméstica a peletes com os principais componentes.



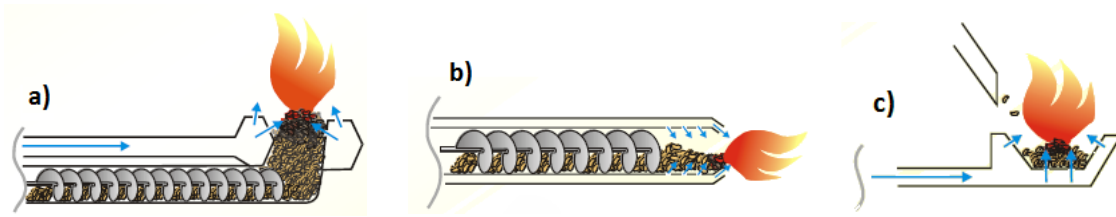
Figura 1.10: Caldeira a peletes (Oberberger e Thek, 2010).

**Legenda:**

1. Depósito de peletes
2. Parafuso sem-fim
3. Câmara de combustão primária com fornecimento de ar
4. Fornecimento de ar secundário
5. Câmara de combustão secundária
6. Permutador de calor com dispositivo de limpeza
7. Recipiente de cinzas
8. Recipiente de cinzas suspensas

Encontram-se disponíveis dois tipos de queimadores nas caldeiras a peletes: queimadores externos e queimadores internos, sendo estes últimos os mais utilizados. As caldeiras a peletes com queimador externo são tipicamente utilizadas quando se pretende converter caldeiras a gás para caldeiras a peletes. Neste caso, a combustão ocorre no queimador externo, que se encontra fora da caldeira e, apenas os gases de combustão entram na caldeira (Oberberger e Thek, 2010).

Ambos os sistemas de aquecimento, fogões e caldeiras, podem ter três configurações possíveis de alimentação dos peletes: inferior (a), horizontal (b) e pelo topo (c) (Figura 1.11).



**Figura 1.11:** Sistemas de alimentação (Obernberger e Thek, 2010).

Na alimentação inferior o combustível é transportado para a zona de combustão e empurrado para cima, sendo o fornecimento de ar realizado pelas paredes/zonas laterais. No caso da alimentação horizontal, os peletes são transportados e queimados na horizontal, sendo o fornecimento de ar realizado pela parte inferior e superior do leito. Relativamente à alimentação pelo topo, os peletes são transportados do depósito para a câmara de combustão, caindo por gravidade através de uma “calha” para a zona da combustão; o ar é introduzido por debaixo da grelha e flui em contracorrente com o combustível através do leito (Obernberger e Thek, 2010).

Na alimentação horizontal e inferior existe o risco de retorno da chama, ou seja, os peletes que estão a ser transportados entram em contacto com a zona de combustão. Pode então acontecer que a combustão se propague ao depósito, colocando assim em risco a segurança da instalação. Relativamente à alimentação pelo topo, dificilmente essa situação se poderá verificar, uma vez que o armazenamento dos peletes é separado da zona de combustão. Contudo, quando os peletes são alimentados pelo topo, a sua queda resulta num impacto negativo no leito, levando a um aumento da libertação de pó e emissões de partículas não queimadas. Esta alimentação também causa um comportamento instável na combustão (Fiedler, 2004; Obernberger e Thek, 2010).

As caldeiras a peletes são equipadas com um termostato e um sistema eletrónico de ignição. Os peletes são armazenados num depósito que poderá estar acoplado à caldeira ou localizado num compartimento separado. Quando o depósito faz parte integrante da caldeira, a sua capacidade é limitada e depende do fabricante. No caso do armazenamento ser num compartimento separado, é possível que apenas um abastecimento anual seja suficiente para toda a estação de aquecimento.

Neste tipo de caldeiras, a intervenção do utilizador passa pelo abastecimento do depósito dos peletes, pela remoção das cinzas e limpeza da caldeira e chaminé.

### 1.7.1 Normalização

A norma Europeia EN 14785 especifica os requerimentos relativos ao projeto, construção, segurança e desempenho de sistemas de aquecimento domésticos alimentados a peletes, até 50 kW de potência nominal. Relativamente ao desempenho

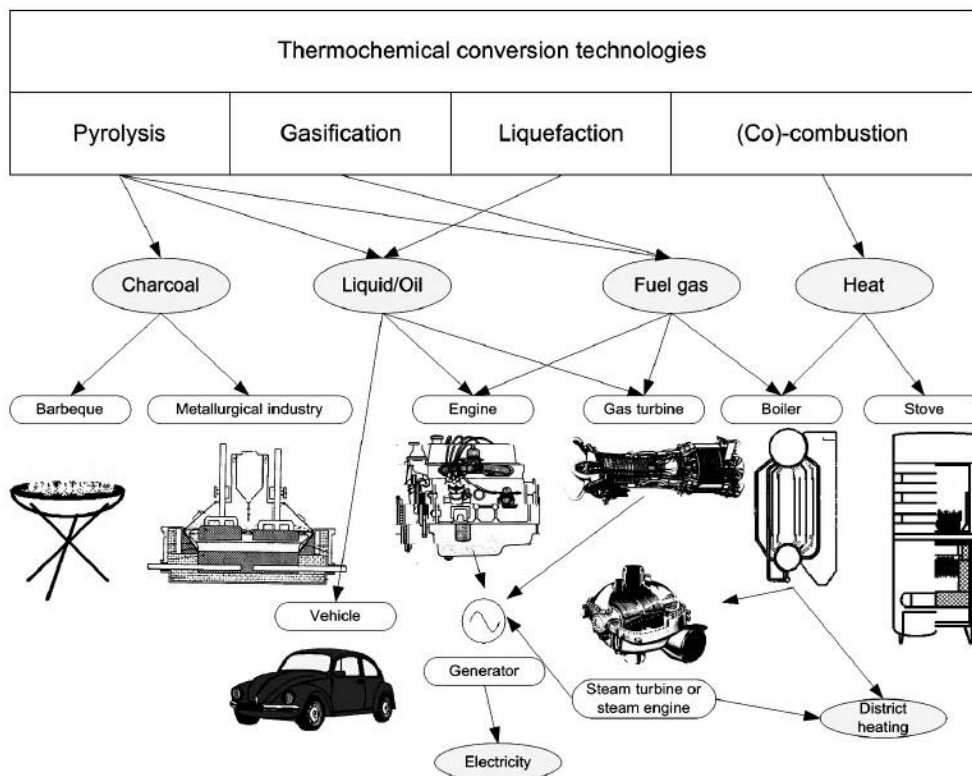
## 1. INTRODUÇÃO

de caldeiras ou fogões a peletes, a norma impõe limites mínimos de eficiência térmica e limites máximos de emissões de monóxido de carbono, nas potências reduzida e nominal. Os limites de rendimento térmico são 70 e 75% nas cargas reduzida e nominal, respetivamente. Relativamente às emissões de monóxido de carbono, a referida norma impõe um limite máximo de 600 ppm (a 13% O<sub>2</sub>) na carga reduzida, e 400 ppm (a 13% O<sub>2</sub>) na carga nominal.

## 2 COMBUSTÃO DA BIOMASSA

### 2.1 Tecnologias de conversão

A biomassa pode ser convertida em energia útil através de tecnologias de conversão bioquímicas ou termoquímicas. Na conversão bioquímica estão incluídos os processos de fermentação na produção de álcool e o processo de digestão anaeróbia para produção do gás metano (Van Loo e Koppejan, 2008). Relativamente às tecnologias de conversão termoquímicas, a Figura 2.1 representa os possíveis processos de conversão da biomassa.



**Figura 2.1:** Processos de conversão termoquímicos (Van Loo e Koppejan, 2008).

Atualmente, existem quatro tipos de tecnologias de conversão termoquímicas. São elas: a pirólise, a gaseificação, a liquefação e a combustão. A partir destes processos, obtém-se energia sobre a forma de carvão, petróleo, gás e calor.

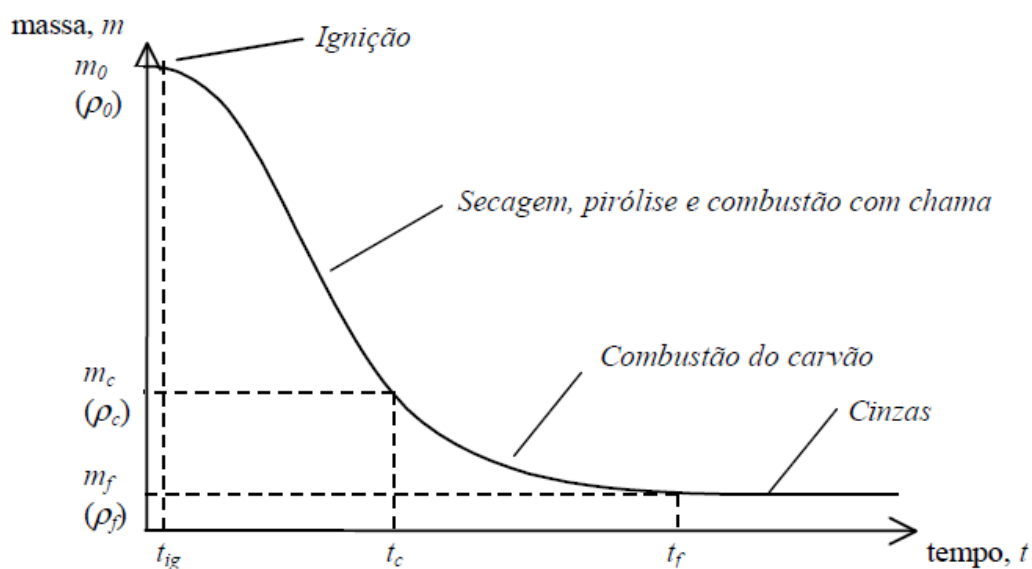
### 2.1.1 O processo de combustão

A combustão é o processo mais direto e mais utilizado na conversão de biomassa em energia. Contudo, esta conversão envolve uma elevada complexidade devido aos aspetos físicos e químicos envolvidos. O processo de combustão depende tanto das propriedades do combustível quanto da aplicação de combustão (Quaak *et al.*, 1999; Van Loo e Koppejan, 2008).

Atualmente, cerca de 90% da energia utilizada nos transportes, na produção de energia elétrica e de energia térmica provém da queima dos diversos combustíveis disponíveis. Apesar das previsões apontarem para uma diminuição desta percentagem, estima-se que durante as próximas décadas a combustão continue a ser o processo de conversão de energia mais utilizado (Coelho e Costa, 2007).

A biomassa apresenta algumas propriedades que afetam o seu desempenho como combustível. É o caso do teor de humidade, do tamanho de partícula, da composição elementar, da composição imediata e do poder calorífico (McGowan, 2009).

A Figura 2.2 ilustra a variação de massa de uma partícula de biomassa ao longo do processo de combustão.



**Figura 2.2:** Evolução da massa dum partícula de biomassa durante o processo de combustão (Dias, 2002).

A combustão da biomassa advém de uma sequência de diversas fases distintas, sendo iniciada quando ocorre a sua ignição. Seguidamente, o calor produzido pela combustão permite a secagem do material, sendo esta etapa dependente do teor de humidade inicial. À medida que a biomassa perde humidade a sua temperatura aumenta, seguindo-se a fase de volatilização (pirólise), em que são libertadas as espécies voláteis contidas no combustível. A libertação de água e dos voláteis na

biomassa leva a uma drástica perda de massa do material. Terminada a pirólise inicia-se a combustão do carvão, restando no final a parte inorgânica da biomassa, as cinzas.

#### **2.1.1.1 Ignição**

A ignição de uma mistura combustível/comburente pode ocorrer de duas formas distintas: espontânea ou forçada, sendo a ignição espontânea um processo pouco habitual. A combustão é iniciada normalmente por meio da aplicação de uma fonte de calor exterior. Assim, uma pequena parte da mistura, a que satisfaz as condições de temperatura, pressão e composição, entra em combustão, e as reações de combustão podem então propagar-se por todo o volume da mistura (Pinho, 2005a).

Se a biomassa apresentar um alto teor de humidade poderá proporcionar uma má ignição, reduzindo a temperatura de combustão, o que dificulta a combustão dos produtos da reação e que, por sua vez, afeta a qualidade da combustão (Werther *et al.*, 2000).

#### **2.1.1.2 Secagem**

Quando uma dada quantidade de biomassa é colocada numa câmara de combustão, onde a combustão já está a decorrer, é iniciada a fase de aquecimento, levando a um aumento da sua temperatura e permitindo a evaporação da humidade contida no material. A secagem e o aquecimento da biomassa são processos endotérmicos, pelo que utilizam a energia libertada na combustão, o que leva a uma redução da temperatura da câmara de combustão. A quantidade de energia necessária ao aquecimento e secagem depende da humidade inicial da biomassa, das suas dimensões e propriedades. Quando a biomassa se encontra demasiado húmida, a energia necessária para vaporizar e aquecer a água é elevada e a temperatura da combustão torna-se inferior à necessária para assegurar a combustão (Coelho e Costa, 2007; Van Loo e Koppejan, 2008). Na prática, apenas é fiável a combustão de biomassa com teores de humidade inferiores a 50% (McKendry, 2002).

#### **2.1.1.3 Pirólise**

O processo de pirólise, também designado por volatilização, refere-se à libertação da matéria volátil presente na biomassa. Para a maioria da biomassa, este processo ocorre entre os 200 e os 260°C (Coelho e Costa, 2007).

A pirólise tem uma grande influência no processo de combustão, uma vez que a biomassa possui um elevado teor de voláteis, podendo variar em média entre 80 e 85% (Nussbaumer, 2003).

A quantidade e o tipo de produtos libertados durante a pirólise dependem, entre outros fatores, do tipo de combustível, da temperatura, da pressão, da taxa de aquecimento e do tempo de reação (Van Loo e Koppejan, 2008). Os produtos

libertados são principalmente  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , hidrocarbonetos leves (sobretudo,  $CH_4$ ),  $H_2$  e alcatrões (Coelho e Costa, 2007).

### 2.1.1.4 Combustão do resíduo carbonoso

O resíduo carbonoso é a matéria resultante depois da libertação de todos os voláteis da biomassa. Este resíduo é essencialmente constituído por carbono e cinzas, com pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre. No caso de partículas pequenas, o resíduo carbonoso apresenta normalmente uma forma esférica, podendo apresentar fissuras devido ao processo de pirólise. Também devido a este processo, poderá ocorrer dilatação das partículas do resíduo carbonoso com grande porosidade no interior das mesmas (Coelho e Costa, 2007).

### 2.1.1.5 Poluentes resultantes da combustão

A queima de combustíveis tem como consequência a emissão de poluentes para a atmosfera, o que contribui para a degradação ambiental. Os poluentes mais comuns são os hidrocarbonetos não queimados (HC), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre ( $SO_2$  e  $SO_3$ ), os óxidos de azoto (NO,  $NO_2$  e  $N_2O$ ), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e as partículas (fuligem e cenosferas) (Coelho e Costa, 2007).

As emissões resultantes da combustão da biomassa podem ser integradas em dois grupos: os poluentes não queimados, que são maioritariamente influenciados pelo processo e equipamento de combustão, e os poluentes relativos a cada tipo de combustível, que são dependentes das suas propriedades. Os poluentes não queimados incluem essencialmente o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos e as partículas de carvão. Relativamente aos poluentes formados devido ao tipo de combustível, incluem-se os óxidos de azoto, os óxidos de enxofre e as cinzas (Werther *et al.*, 2000; Khan *et al.*, 2009).

Dos poluentes não queimados, o monóxido de carbono é o mais comum. Este gás tem a capacidade de reagir com a hemoglobina do sangue, formando a carboxiemoglobina, que não se combina com o oxigénio e afeta o seu transporte no sangue, podendo conduzir à morte (Coelho e Costa, 2007).

A formação de monóxido de carbono e de outros não queimados encontra-se relacionada com diversos fatores que habitualmente levam a uma má combustão, tais como: baixa temperatura de combustão, mistura deficiente entre o combustível e o comburente, tempo de residência insuficiente dos gases de exaustão na câmara de combustão e excesso de ar insuficiente (Werther *et al.*, 2000; Johansson *et al.*, 2004; Verma *et al.*, 2012a; Roy *et al.*, 2013). De acordo com Nussbaumer (2003), para minimizar as emissões de não queimados a temperatura deve ser superior a  $850^\circ C$  e o tempo de residência superior a 0,5 s.

A produção de monóxido de carbono ocorre em duas situações distintas, nas regiões de mistura pobre e nas regiões de mistura rica. Por um lado, elevados excessos

de ar resultam numa diminuição da temperatura da combustão e ocasionam a formação de monóxido de carbono, por outro, quando o excesso de ar é demasiado baixo, a mistura entre o combustível e o comburente é dificultada e não existe oxigénio suficiente para a oxidação completa do combustível, levando à produção de não queimados (Van Loo e Koppejan, 2008; Roy *et al.*, 2013). No caso da quantidade de oxigénio disponível ser a necessária, a temperatura é o fator mais importante. Ajustando a mistura de combustível e comburente, a temperatura e o tempo de permanência, é possível otimizar o processo de combustão, minimizando as emissões provenientes da combustão incompleta (Van Loo e Koppejan, 2008).

Os óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) incluem o óxido de azoto (NO), o dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), sendo o primeiro a principal fonte de  $\text{NO}_x$ . Estes compostos apresentam um papel importante nas reações atmosféricas que produzem partículas prejudiciais, o ozono troposférico e as chuvas ácidas (Khan *et al.*, 2009).

Segundo Coelho e Costa (2007), durante um processo de combustão a formação de NO resulta de duas fontes diferentes: a oxidação do azoto molecular presente no ar de combustão e a oxidação do azoto presente no combustível. Quando o combustível não apresenta azoto na sua composição, apenas irá existir formação de NO pelos mecanismos provenientes da oxidação do azoto molecular existente no ar de combustão.

Geralmente a formação de NO é devida principalmente a três mecanismos: o NO-térmico, o NO-combustível e o NO- imediato (Khan *et al.*, 2009; Verma *et al.*, 2011b; Liu *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013). Coelho e Costa (2007) referem ainda um quarto mecanismo, o mecanismo com óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), como intermédio, que é particularmente importante em chamas pobres de pré-mistura com temperaturas baixas.

Forma-se NO através do mecanismo térmico devido às elevadas temperaturas que são atingidas e permitem a dissociação do azoto atmosférico e do oxigénio (Khan *et al.*, 2009; Verma *et al.*, 2011c; Liu *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013). É formado NO-térmico segundo as seguintes equações (Coelho e Costa, 2007):



As Equações (2.1) e (2.2) são designadas por mecanismo de Zeldovich e as três equações em conjunto constituem o mecanismo de Zeldovich estendido. A reação 1 tem uma elevada energia de ativação e, deste modo, a formação de NO por este mecanismo depende fortemente da temperatura (Coelho e Costa, 2007).

Durante o processo de combustão, para que ocorra formação de NO por via do mecanismo térmico, são necessárias temperaturas de combustão na ordem dos  $1300^\circ\text{C}$  (Verma *et al.*, 2012a; Rabaçal *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2013); no caso de não se

## 2. COMBUSTÃO DA BIOMASSA

atingirem estes valores de temperatura, a formação de NO é devida ao mecanismo do combustível.

A formação de NO-combustível é consequência do conteúdo de azoto presente no combustível (Khan *et al.*, 2009; Verma *et al.*, 2011a; Liu *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013). De acordo com Coelho e Costa (2007), a formação de NO por via do mecanismo do combustível tem uma grande dependência da fração mássica de azoto que o combustível apresenta e da concentração local de oxigénio.

O NO formado através do mecanismo imediato é devido às rápidas reações na frente de chama, o que é frequente em chamas com defeito de ar (Khan *et al.*, 2009; Verma *et al.*, 2011a; Liu *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013). Este mecanismo envolve reações de radicais de hidrocarbonetos com o azoto molecular, originando compostos de ciano que, por sua vez, são convertidos em compostos intermédios que promovem a formação de NO (Coelho e Costa, 2007).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA COMERCIAL

O processo de transformação da biomassa em peletes depende essencialmente de dois parâmetros, do próprio processo (pressão exercida e temperatura atingida) e das propriedades físicas da matéria-prima (Mani *et al.*, 2006).

Com o objetivo de estudar as condições da matéria-prima na produção de peletes, no que diz respeito ao teor de humidade e à distribuição granulométrica utilizada na indústria de produção de peletes, utilizaram-se amostras de produto comercial (retirado no instante imediatamente anterior à sua prensagem) de duas empresas Portuguesas distintas, empresa A (Pinewells) e B (PelletsPower).

#### 3.1 Teor de humidade

O teor de humidade das amostras de matéria-prima comercial foi determinado segundo a norma FprEN 14774-2:2009; deste modo, a humidade de uma amostra de biomassa é determinada através da perda de massa da mesma. As amostras foram colocadas numa estufa laboratorial, modelo *UM 200* da *Memmert*, e secas à temperatura de  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  até que a sua massa se mantivesse constante, de modo a garantir que toda a água contida na amostra era eliminada.

Inicialmente, as amostras eram pesadas e colocadas na estufa. Periodicamente, eram pesadas e colocadas novamente na estufa, até se encontrarem completamente secas. Nesse momento eram colocadas num exsicador com sais de sílica, com o objetivo de estabilizarem a sua temperatura até à temperatura ambiente, sem absorverem humidade da envolvente. As pesagens foram efetuadas recorrendo a uma balança digital da marca *Precisa*, modelo *205ASCS*.



Figura 3.1: Estufa laboratorial.



Figura 3.2: Exsicador.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA COMERCIAL

A percentagem de humidade das amostras na base húmida e na base seca foi calculada através das seguintes equações, respetivamente:

$$H_{bh}(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 \quad (3.1)$$

$$H_{bs}(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.2)$$

onde  $m_h$  representa a massa húmida (massa inicial) e  $m_s$  a massa seca (massa final).

O teor de humidade médio e o desvio padrão das amostras analisadas das duas empresas encontram-se representados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Teor de humidade da matéria-prima comercial analisada.

|  | Empresa A  | Empresa B  |
|--|------------|------------|
| <b>Teor de humidade na base húmida (%)</b> | 6,4 ± 0,62 | 7,2 ± 0,51 |
| <b>Teor de humidade na base seca (%)</b>   | 7,1 ± 0,71 | 7,8 ± 0,60 |

A partir deste momento, em todo o texto, sempre que não seja explicitamente mencionado de outro modo, a percentagem de humidade será sempre considerada na base húmida (bh).

### 3.2 Análise granulométrica

O tamanho e forma das partículas constituintes da matéria-prima são consequência do processo de destroçamento e das características do próprio material (Jensen *et al*, 2011).

A análise granulométrica permite obter a distribuição estatística das dimensões das partículas que constituem uma amostra pulveréa ou granular (Pinho, 2005b).

Existem diversas formas de medição do tamanho de partículas. Para partículas de grandes dimensões a medição direta é a mais utilizada, recorrendo a paquímetros ou micrómetros, por exemplo. Para partículas muito pequenas os métodos utilizados são os indiretos, tais como a sedimentação. Já para partículas de dimensões intermédias a peneiração é o método mais comum (Kunii e Levenspiel, 1969).

A peneiração pode ser realizada manualmente ou mecanicamente, tendo como objetivo a separação das partículas de uma amostra por tamanhos através da agitação de sucessivos peneiros empilhados, que se encontram por ordem crescente de espaçamento da sua malha. Na peneiração mecânica é utilizado um agitador para realizar os movimentos que permitem a separação das partículas.

A separação de partículas das amostras da matéria-prima comercial foi realizada recorrendo a uma Peneiradora vibratória *Retsch*, modelo *AS 200 control*, em

que se utilizaram peneiros com malhas calibradas de acordo com a norma ASTM (Figura 3.3).

Depois de realizada a separação das partículas, as massas retidas em cada peneiro foram pesadas e a respetiva distribuição mássica foi determinada. A sua pesagem foi efetuada numa balança da marca *Precisa 6200 D*, com uma resolução de um miligrama.

Cada teste de peneiração teve uma duração de 10 minutos e a amplitude de vibração utilizada foi de 1,50 mm. A duração de 10 minutos considerou-se suficiente para que ocorresse separação total das partículas.



**Figura 3.3:** Peneiradora vibratória Retsch.

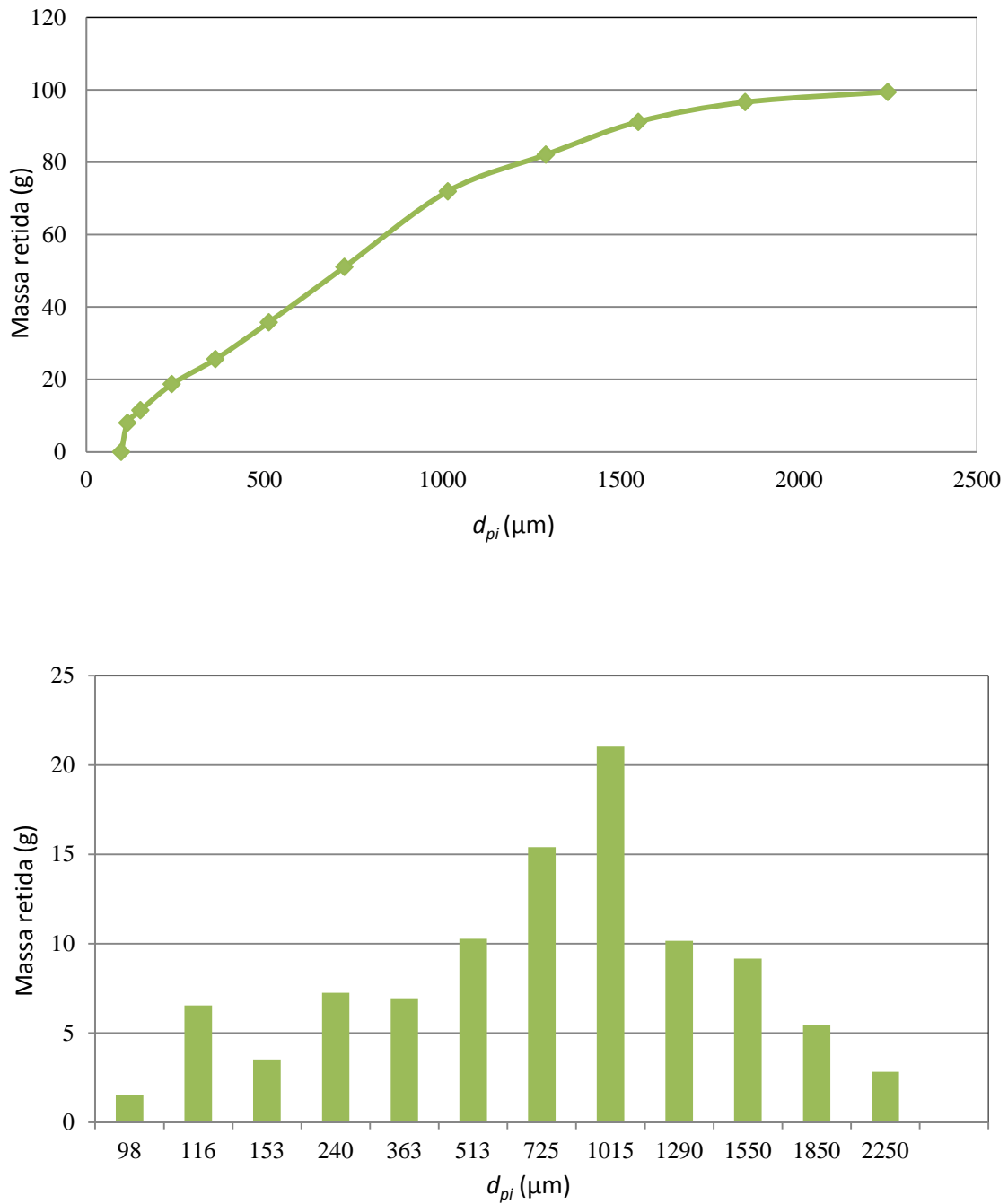
Após a peneiração sucedeu-se a etapa do tratamento estatístico das amostras e do cálculo do diâmetro médio. O cálculo do diâmetro médio das partículas constituintes de uma amostra poderá ser efetuado de diversas formas. Para o caso da combustão das partículas o mais adequado é o diâmetro médio volume/superfície (Klinzing, 1981). Assim o diâmetro médio foi calculado recorrendo à Equação (3.3) (Kunii e Levenspiel, 1969).

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (3.3)$$

onde  $x_i$  representa a fração mássica das partículas de material retidas no intervalo  $i$  e  $d_{pi}$  a média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros sucessivos.

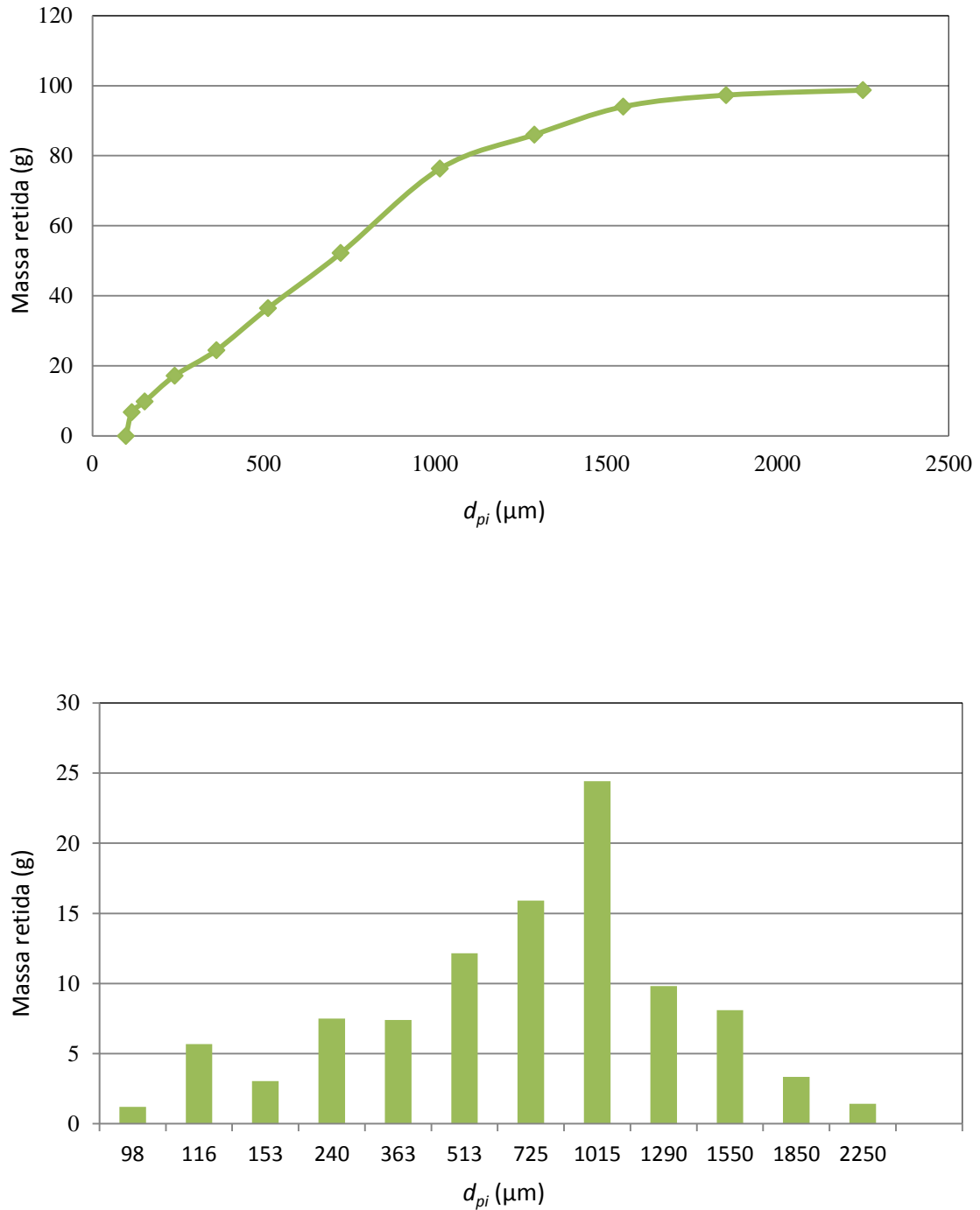
Na Figura 3.4 encontra-se representada uma distribuição tipo das partículas da matéria-prima da empresa A; o diâmetro médio obtido foi de  $344 \pm 17 \mu\text{m}$ , para um total de 8 amostras tratadas.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA COMERCIAL



**Figura 3.4:** Distribuição típica da matéria-prima da empresa A.

Na Figura 3.5 encontra-se representada uma distribuição típica das partículas da matéria-prima da empresa B, que resulta num diâmetro médio de  $348 \pm 16 \mu\text{m}$ . A totalidade das distribuições, referentes a 6 amostras peneiradas, encontra-se no Anexo A.



**Figura 3.5:** Distribuição típica da matéria-prima da empresa B.

Analisando os valores dos diâmetros médios para as empresas A e B, verifica-se que ambas as empresas utilizam diâmetros de partículas muito semelhantes. Em relação à distribuição de tamanhos verifica-se uma maior percentagem de partículas com diâmetro médio entre os 513 e 1015  $\mu\text{m}$ .

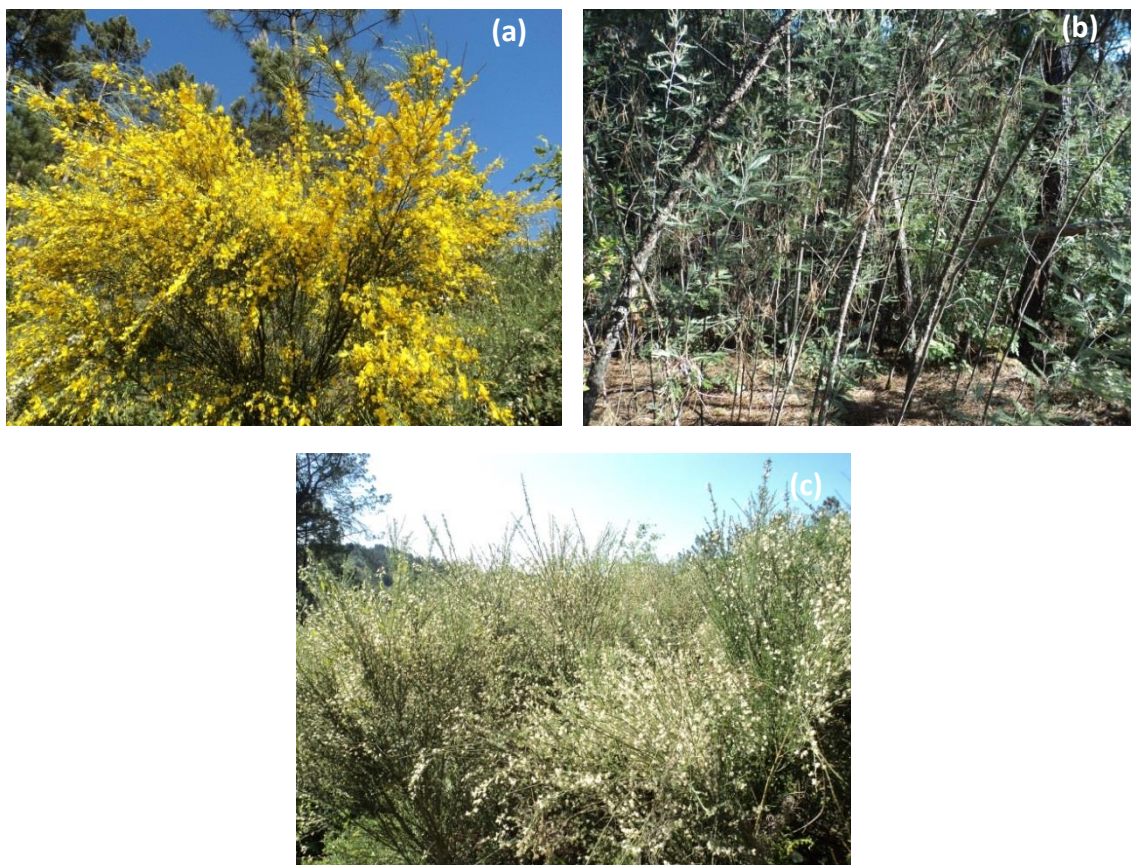
### 3. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA COMERCIAL

## 4 PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*

O pré-tratamento da matéria-prima utilizada na produção de peletes incluiu a sua recolha, secagem e destroçamento.

### 4.1 Recolha do material

Inicialmente efetuou-se a recolha das espécies *Cytisus scoparius* (giesta amarela), *Acacia dealbata* (mimosa) e *Cytisus multiflorus* (giesta branca). Esta recolha foi realizada na zona de Viseu, numa área privada com alguma abundância daquelas espécies. Estas foram capturadas e transportadas para a ESTGV. Durante as várias recolhas efetuadas foram guardadas amostras das diferentes espécies em caixas hermeticamente fechadas, para posterior análise do teor de humidade (inicial) das mesmas.



**Figura 4.1:** Espécies – *Cytisus scoparius* (a), *Acacia dealbata* (b) e *Cytisus multiflorus* (c).

## 4.2 Secagem

O teor de humidade da biomassa pode variar entre 10 e 70%, dependendo do tipo de biomassa em questão (Khan *et al*, 2009). De acordo com Carroll e Finnan (2012), para a obtenção de peletes estáveis o teor de humidade da matéria-prima deve encontrar-se entre 8 a 12% (bh); desta forma há necessidade de uma secagem prévia da matéria-prima para a produção de peletes. Esta operação requer um consumo energético elevado, mas que pode ser minimizado utilizando a energia solar como fonte de energia (Lamnatou *et al*, 2012).

Sempre que foi possível, a secagem das espécies foi realizada numa estufa solar a fim de minimizar os custos energéticos durante o processo de produção de peletes.

A estufa encontrava-se localizada no telhado da ESTGV (Figura 4.2), sendo esta projetada e construída por um grupo de alunos do DEMGI (Paiva, 2009).



**Figura 4.2:** Estufa solar.

A eficiência do processo de secagem em estufa solar é dependente de diversos fatores, que vão desde da sua construção (geometria, materiais e localização) até às condições ambientais durante o período de secagem (temperatura e humidade relativa do ar, radiação solar incidente e caudal de renovação de ar) (Khater *et al*., 2004). Com o objetivo de monitorizar alguns destes parâmetros durante o período de secagem das espécies, a estufa solar encontrava-se equipada com três termopares tipo T no seu interior, localizados respetivamente na parte superior, intermédia e inferior, dois sensores de humidade da marca da *Honeywell*, modelo *HIH 4000*, colocados na parte superior e inferior, e dois piranómetros *SP 215*, um no interior e o outro no exterior. Os sinais provenientes dos termopares eram transmitidos para um computador utilizando o programa *PicoLog* da *Pico Technology Ltd.* conectado ao datalogger *Pico TC08* USB, sendo estes registados a cada minuto. Os piranómetros encontravam-se ligados à placa *NI USB-6008 DAQ* da *National Instruments*, sendo o seu registo feito, utilizando o programa *Labview 8.6* da *National Instruments*, a cada 10 segundos. Os sensores de humidade encontravam-se ligados ao datalogger *ADC-20* da

*Pico Technology Ltd.*, sendo os sinais respetivos registados a cada minuto utilizando o programa *PicoLog*, também da *Pico Technology Ltd.*

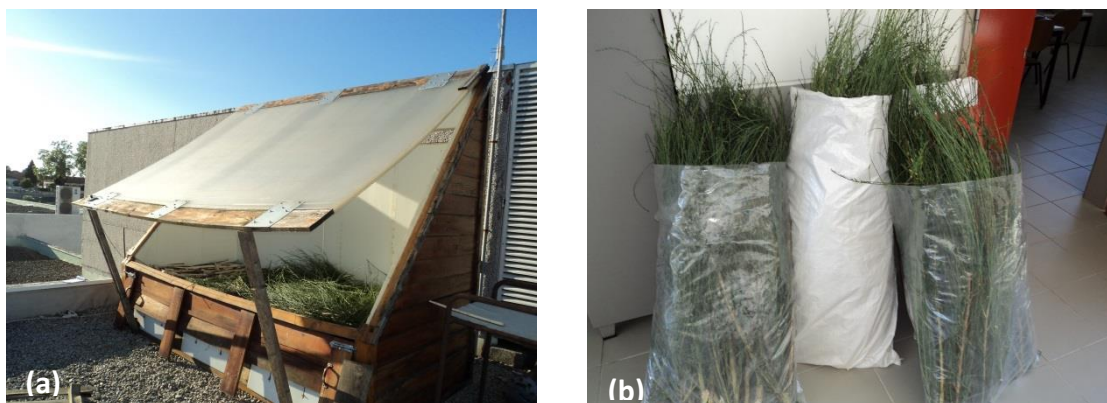
Para cada espécie foram realizados dois ciclos de secagem diferentes que se realizaram, por coincidência, no verão e no inverno.

Durante o período de secagem das espécies foi monitorizado o teor de humidade da matéria-prima em estufa laboratorial, segundo a norma FprEN 14774-2:2009; o procedimento foi descrito anteriormente no parágrafo 3.1.

#### 4.2.1 Secagem do *Cytisus scoparius*

##### 4.2.1.1 Primeiro ciclo de secagem

O primeiro ciclo de secagem do *Cytisus scoparius* foi, como referido, realizado no verão e, devido à limitação de espaço disponível na estufa solar, dividido em dois processos diferentes: a quantidade de material colhido foi distribuída pela estufa e o remanescente foi deixado em sacos ao ar ambiente, para secagem natural, como ilustrado na Figura 4.3 (b).



**Figura 4.3:** Secagem do *Cytisus scoparius* em estufa solar (a) e secagem natural (b).

Após a captura, a matéria-prima apresentava um teor de humidade de 53% na base húmida; no entanto, quando se iniciou o processo de secagem esta já tinha reduzido o valor para 48%. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 encontram-se representados os teores de humidade na base mássica durante o período de secagem em estufa solar e durante a secagem natural, respetivamente.

**Tabela 4.1:** Variação do teor de humidade do *Cytisus scoparius* durante a secagem em estufa solar.

|                                  | Tempo de secagem (horas) |    |    |    |    |
|----------------------------------|--------------------------|----|----|----|----|
|                                  | Captura                  | 0  | 24 | 72 | 96 |
| Teor de humidade base húmida (%) | 53                       | 48 | 33 | 13 | 9  |

#### 4. PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*

**Tabela 4.2:** Variação do teor de humidade do *Cytisus scoparius* durante a secagem natural.

|                                  | Tempo de armazenagem (horas) |     |
|----------------------------------|------------------------------|-----|
|                                  | 0 (captura)                  | 120 |
| Teor de humidade base húmida (%) | 53                           | 16  |

##### 4.2.1.2 Segundo ciclo de secagem

Devido às condições ambientais e à limitação de tempo a secagem de inverno do *Cytisus scoparius* foi realizada numa estufa industrial sem monitorização do teor de humidade.

##### 4.2.2 Secagem da *Acacia dealbata*

###### 4.2.2.1 Primeiro ciclo de secagem

O primeiro ciclo de secagem da *Acacia dealbata* também foi realizado no verão. Foi feita uma pré-seleção do material colhido e apenas os troncos maiores foram colocados na estufa solar. Os ramos e folhas foram armazenados e deixados em sacos ao ar ambiente, para uma secagem natural. A colocação dos troncos na estufa solar ocorreu 7 dias depois da sua captura, pelo que durante esse período de tempo o material já tinha perdido algum teor de humidade.



**Figura 4.4:** Secagem de troncos de *Acacia dealbata*.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 encontram-se representados os teores de humidade da *Acacia dealbata* durante os dias em que permaneceu armazenada e ao longo dos dias de secagem na estufa solar, respetivamente.

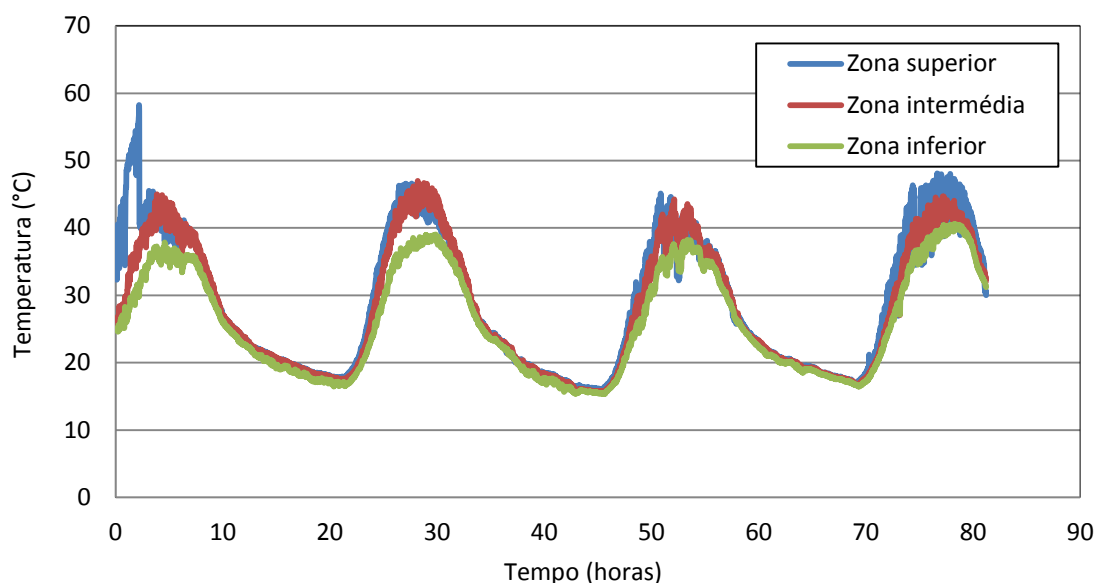
**Tabela 4.3:** Teor de humidade da *Acacia* (%) durante o período de armazenamento.

|                              | Tempo de armazenamento (horas) |    |    |    |
|------------------------------|--------------------------------|----|----|----|
|                              | 0                              | 36 | 60 | 84 |
| <b>Folhas</b>                | 48                             | 26 | 19 | 9  |
| <b>Ramos pequenos/médios</b> | 40                             | 30 | 25 | 24 |
| <b>Troncos grandes</b>       | 32                             | –  | –  | 28 |

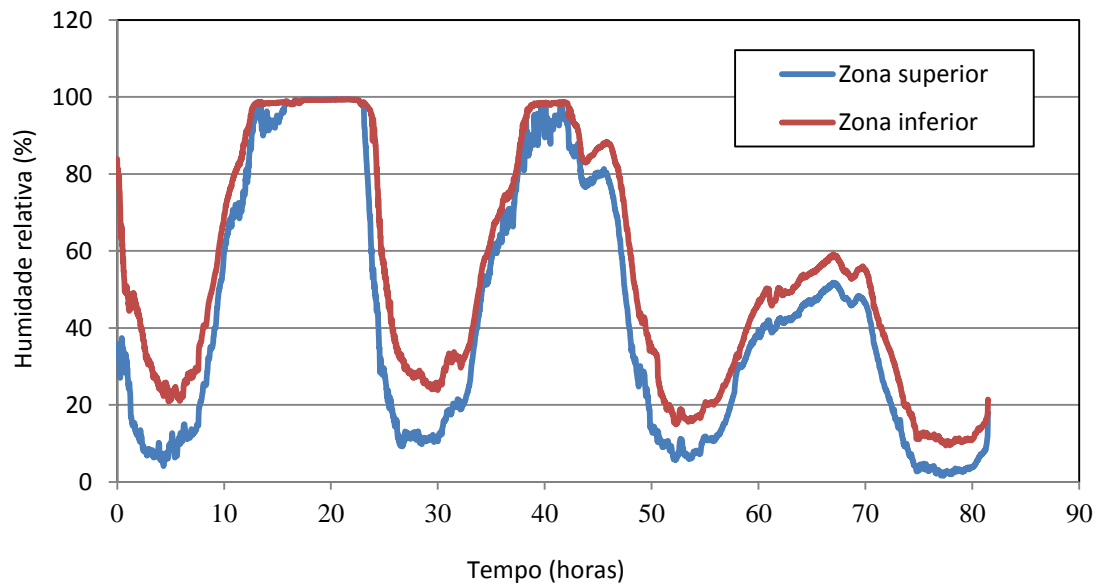
**Tabela 4.4:** Teor de humidade da *Acacia* (%) durante a secagem em estufa solar.

|                        | Diâmetro médio (mm) | Tempo de secagem (horas) |      |      |      |      |      |
|------------------------|---------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
|                        |                     | 0                        | 24   | 48   | 57   | 72   | 81   |
| <b>Ramos pequenos</b>  | <7                  | 20,8                     | 17,3 | 11,4 | –    | –    | –    |
|                        | 8; 9                | –                        | –    | –    | 13,9 | –    | –    |
| <b>Ramos médios</b>    | 10; 11; 12          | 20,9                     | –    | –    | 18,8 | –    | –    |
|                        | 14; 15              | 24,3                     | –    | 19,3 | 18,6 | –    | –    |
|                        | 16; 17              | –                        | 35,8 | –    | –    | 19,5 | –    |
| <b>Troncos grandes</b> | 22; 23              | –                        | –    | –    | –    | –    | 19,4 |
|                        | 24; 25              | 28,0                     | –    | 24,6 | –    | –    | 22,5 |
|                        | 27; 28              | –                        | –    | –    | –    | 19,1 | –    |

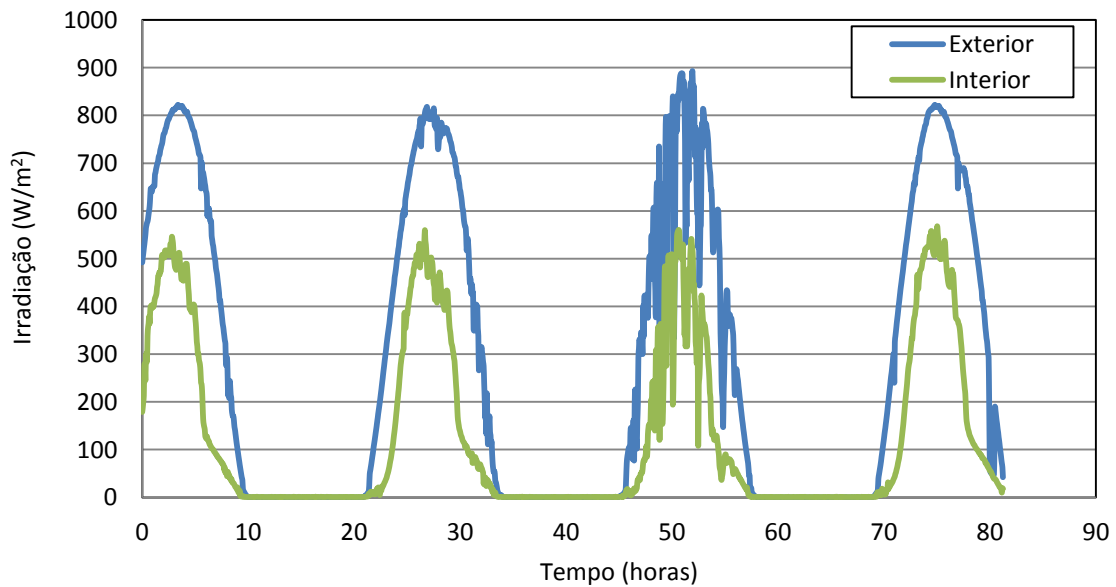
Durante o período de secagem em estufa solar da *Acacia* foram registados os valores de temperatura, humidade e radiação solar no interior da mesma. Nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 encontram-se representados os dados de temperatura, humidade relativa e irradiação durante o período de secagem, respetivamente.

**Figura 4.5:** Temperatura no interior da estufa.

#### 4. PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*



**Figura 4.6:** Umidade relativa no interior da estufa.



**Figura 4.7:** Irradiação no interior da estufa e no exterior.

#### 4.2.2.2 Segundo ciclo de secagem

O segundo ciclo de secagem da *Acacia dealbata* foi realizado no inverno numa estufa industrial sem monitorização do teor de humidade.

### 4.2.3 Secagem do *Cytisus multiflorus*

#### 4.2.3.1 Primeiro ciclo de secagem

Como o sucedido com as duas espécies anteriores, o primeiro ciclo de secagem do *Cytisus multiflorus* também foi realizado no verão. No entanto, apenas foi feita uma secagem natural. Depois de colhido, o material foi armazenado em sacos ao ar ambiente e durante cerca de 5 dias foi monitorizada a perda de água da matéria-prima.

**Tabela 4.5:** Teor de humidade do *Cytisus multiflorus* (%).

|                | Tempo de armazenamento (horas) |      |      |      |
|----------------|--------------------------------|------|------|------|
|                | 0                              | 24   | 48   | 288  |
| <b>Folhas</b>  | 51,1                           | 44,1 | 34,9 | 8,9  |
| <b>Ramos</b>   | 43,6                           | 37,5 | 35,0 | 10,9 |
| <b>Troncos</b> | 38,9                           | –    | –    | 19,9 |

#### 4.2.3.2 Segundo ciclo de secagem

O segundo ciclo de secagem do *Cytisus multiflours* foi realizado no inverno em estufa solar (Figura 4.8).



**Figura 4.8:** Secagem do *Cytisus multiflorus* em estufa solar.

Na Tabela 4.6 encontram-se representados os teores de humidade na base húmida do *Cytisus multiflours* desde da sua recolha até ao destroçamento, para o caso das folhas, ramos e troncos.

**Tabela 4.6:** Teor de humidade do *Cytisus multiflorus* durante a secagem em estufa solar.

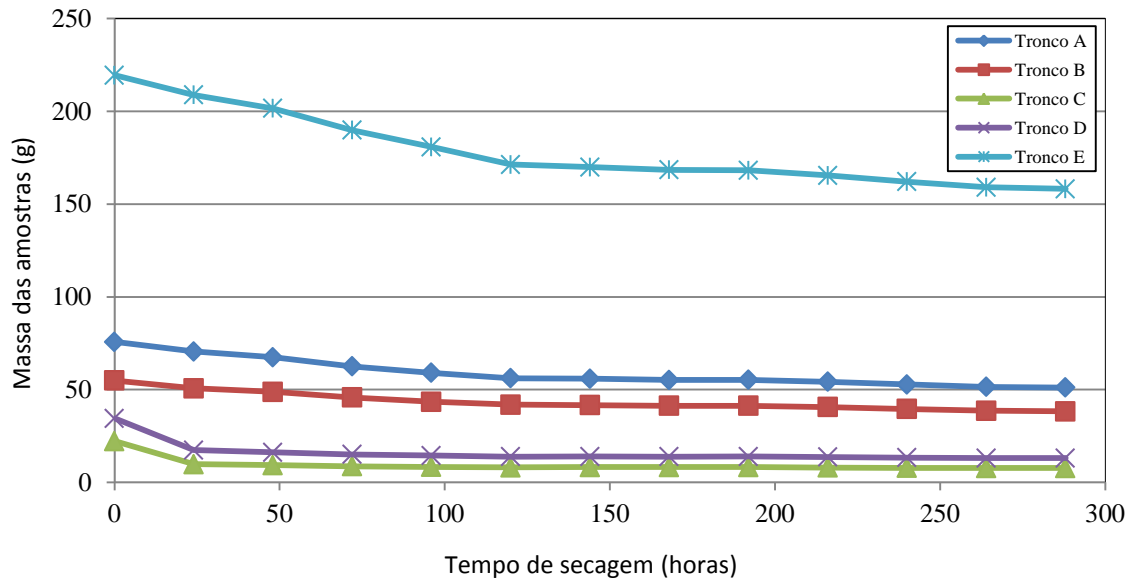
| Tempo de secagem (horas) | Diâmetro médio (mm) |      |                 |         |         |         |
|--------------------------|---------------------|------|-----------------|---------|---------|---------|
|                          | Folhas              |      | Ramos e Troncos |         |         |         |
|                          | –                   | <7   | 9<D<12          | 13<D<16 | 17<D<20 | 21<D<26 |
| 0                        | 52,6                | 42,7 | 46,6            | 45,1    | 46,7    | 46,6    |
| 24                       | 42,0                | –    | 40,5            | 42,3    | –       | 42,9    |
| 48                       | 32,8                | 33,9 | 39,6            | 36,1    | 37,8    | –       |
| 72                       | 24,2                | 32,3 | 31,6            | 31,7    | 35,1    | –       |
| 96                       | 17,3                | 24,8 | 30,1            | –       | 32,1    | 38,4    |
| 120                      | 15,5                | 25,0 | 32,1            | 33,1    | –       | 33,3    |
| 144                      | 18,7                | 20,8 | 29,3            | 29,1    | 30,8    | 32,4    |
| 168                      | 17,5                | 25,8 | 29,9            | –       | 27,4    | 32,1    |
| 192                      | 17,2                | 28,3 | –               | 33,3    | –       | 32,3    |
| 216                      | 12,8                | 24,6 | 26,4            | 31,2    | 31,2    | –       |
| 240                      | 8,5                 | 23,5 | 37,3            | 26,6    | 26,9    | –       |
| 264                      | 6,5                 | 20,3 | 25,0            | 27,8    | 28,6    | 27,6    |
| 288                      | 9,9                 | 22,4 | 25,5            | –       | 23,6    | –       |

No início da secagem foram colocadas 5 amostras de troncos na estufa solar, previamente pesadas e medidas, sendo o objetivo a monitorização da perda de massa das mesmas durante o período de secagem. Na Tabela 4.7 encontram-se representadas as características das amostras. Para o cálculo da humidade inicial, as amostras selecionadas foram cortadas em duas partes com tamanhos iguais; assim, uma das partes foi utilizada para a determinação do teor de humidade inicial e a outra foi a colocada na estufa. A determinação da humidade final foi realizada no final do período de secagem.

**Tabela 4.7:** Características das amostras de *Cytisus multiflorus*.

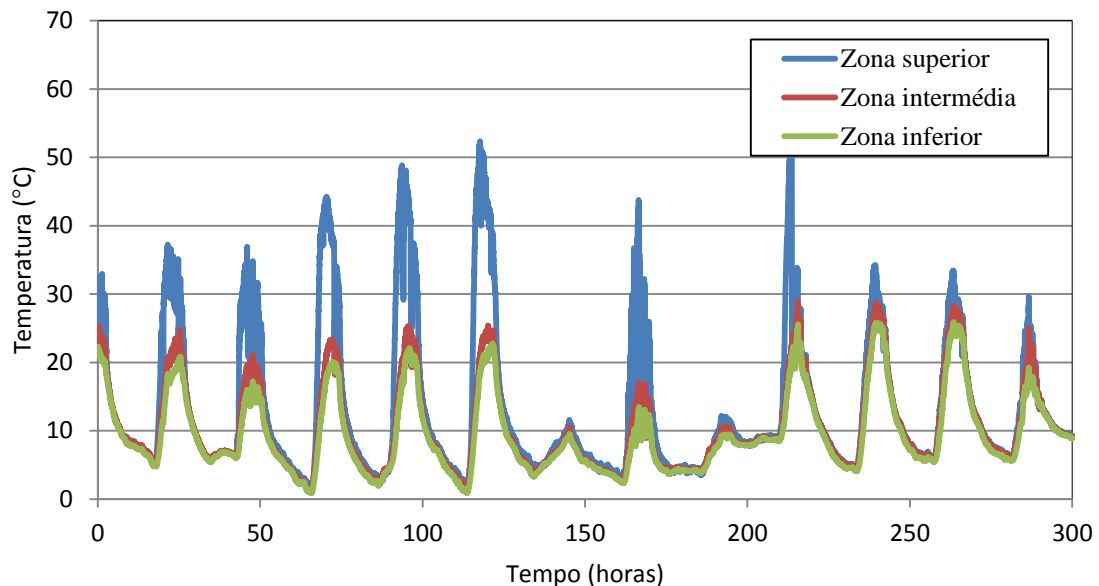
|          | Diâmetro médio (mm) | Comprimento médio (cm) | Humidade inicial (%) | Humidade final (%) |
|----------|---------------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| Tronco A | 19                  | 19                     | 46,7                 | 22,8               |
| Tronco B | 14                  | 24                     | 45,1                 | 22,2               |
| Tronco C | 7                   | 20                     | 42,7                 | 12,3               |
| Tronco D | 9                   | 27                     | 46,6                 | 12,6               |
| Tronco E | 26                  | 31                     | 46,6                 | 28,1               |

A Figura 4.9 ilustra perda de massa das amostras durante o período em que estas permaneceram na estufa solar (aproximadamente 12 dias).



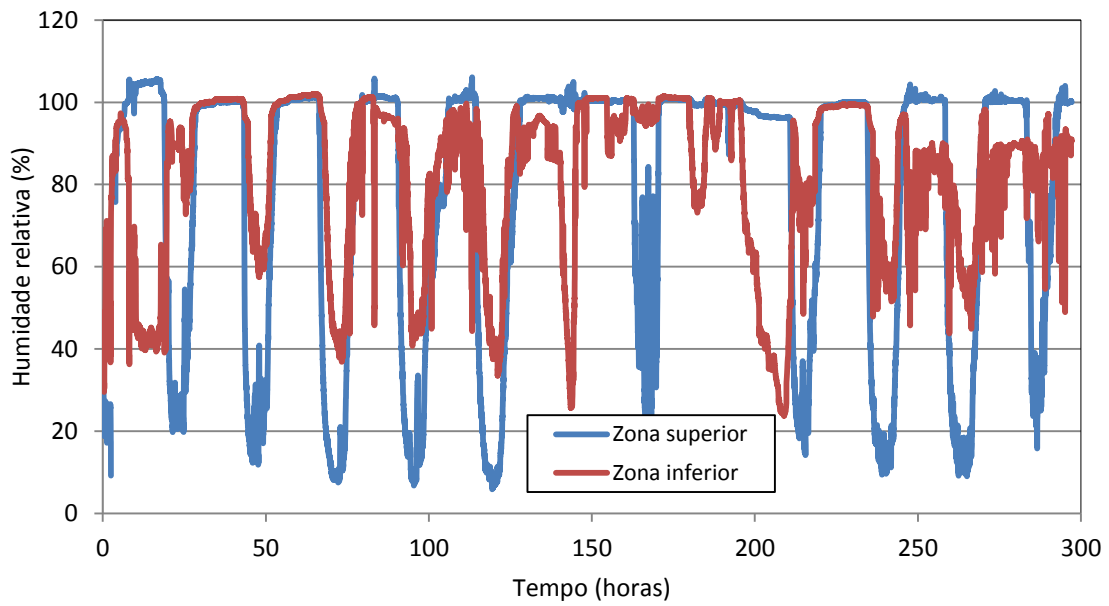
**Figura 4.9:** Perda de massa das amostras durante o processo de secagem.

Assim como o que sucedeu na secagem solar da *Acacia dealbata*, também durante o período de secagem do *Cytisus multiflorus* foram registados os valores de temperatura, humidade e irradiação no interior da estufa. Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 encontram-se representados os valores de temperatura, humidade relativa e irradiação ao longo dos dias de secagem, respetivamente.

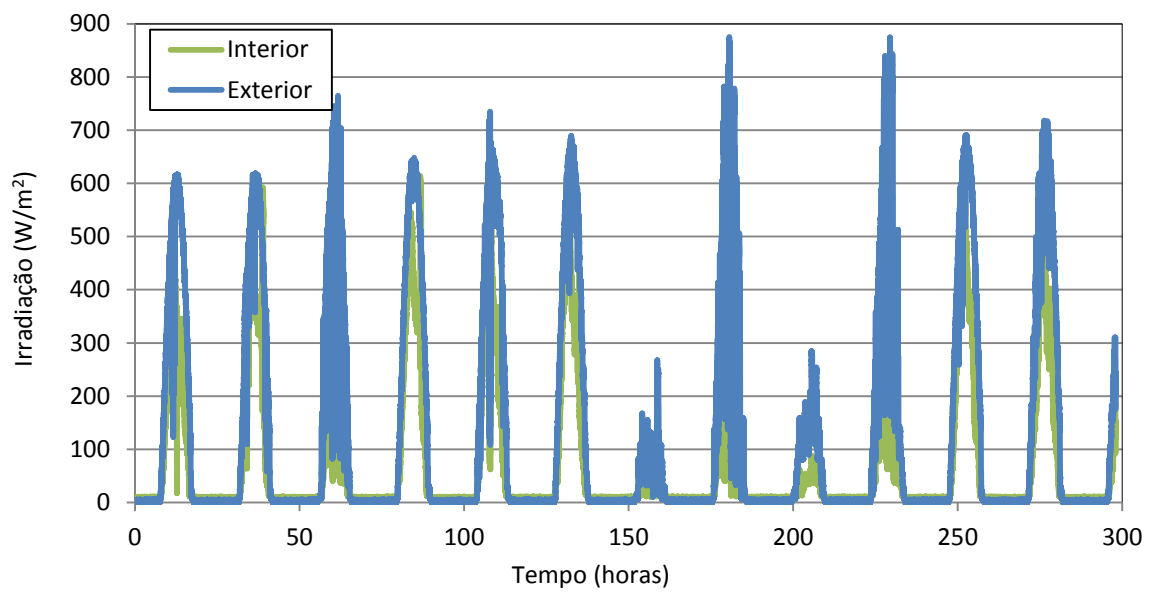


**Figura 4.10:** Temperatura no interior da estufa.

#### 4. PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*



**Figura 4.11:** Umidade relativa no interior da estufa.



**Figura 4.12:** Irradiação no interior da estufa e no exterior.

### 4.3 Destroçamento

A etapa seguinte no pré-tratamento da matéria-prima foi o seu destroçamento. Para a realização desta etapa foi necessário transportar a maioria da matéria-prima da ESTGV até à empresa Transagri, Lda., onde se encontrava o moinho de martelos utilizado no destroçamento (*GKLC-19PK2010*). Com exceção de algum material de *Cytisus multiflorus* do segundo ciclo de secagem (que foi destroçado num moinho laboratorial), todo o restante foi destroçado no moinho de martelos industrial referido anteriormente.

No destroçamento de todo o material do primeiro ciclo de secagem e do material do segundo ciclo de secagem da *Acacia dealbata*, foi utilizado um crivo com um diâmetro médio de 4 mm. Para o restante material destroçado no moinho de martelos utilizou-se um crivo com diâmetro médio de 3,5 mm, em virtude de o anterior se ter danificado.



**Figura 4.13:** Moinho de martelos e zona de alimentação.

Parte do material do segundo ciclo de secagem do *Cytisus multiflorus* foi destroçado num moinho de navalhas laboratorial, *Retsch SM 100*, utilizando um crivo com diâmetro médio de 7 mm.



**Figura 4.14:** Moinho laboratorial.

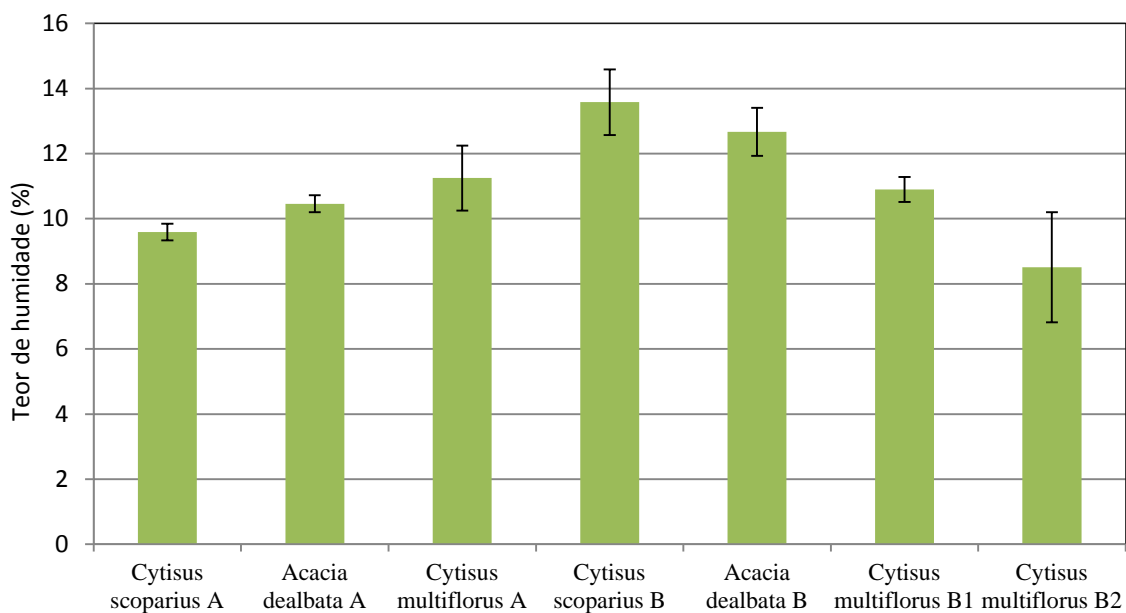
#### 4.4 Caracterização das espécies

Depois de realizadas as etapas do pré-tratamento, procedeu-se à caracterização do material obtido, que incluiu a verificação do teor de humidade e a análise granulométrica. Esta caracterização foi descrita nos parágrafos 3.1 e 3.2, pelo que se evitará a sua repetição e será apresentada em conjunto para o material do primeiro e segundo ciclo de secagem.

Para uma melhor identificação do material utilizado estabeleceu-se uma nomenclatura tendo em conta o ciclo de secagem realizado, em que a letra “A” corresponde ao primeiro ciclo de secagem (realizado no verão) e a letra “B” ao segundo (realizado no inverno). Os números 1 e 2 correspondem ao tipo de destroçamento, moinho de martelos ou de facas, respetivamente, para o caso do *Cytisus multiflorus*.

##### 4.4.1 Teor de humidade

Na Figura 4.15 encontra-se representado o teor de humidade das diferentes espécies após o seu destroçamento, determinado segundo a norma FprEN 14774-2:2009.



**Figura 4.15:** Teor de humidade das espécies e respetivo desvio padrão.

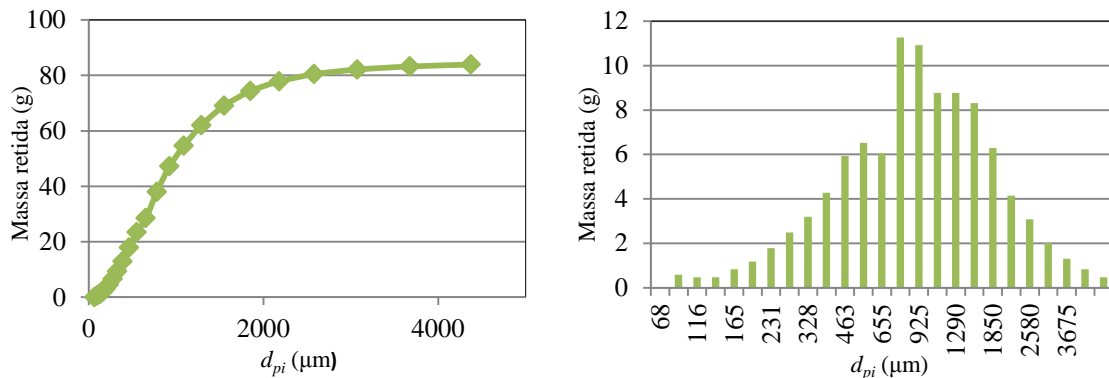
##### 4.4.2 Análise granulométrica

Nas figuras seguintes encontram-se representadas as distribuições típicas dos tamanhos de partículas do *Cytisus scoparius*, *Acacia dealbata* e *Cytisus multiflorus*, sendo também apresentado o diâmetro médio obtido para as amostras tratadas.

Foram analisadas diferentes amostras de cada espécie. No material do primeiro ciclo de secagem a análise granulométrica foi efetuada a 32% da massa total do *Cytisus scoparius* (36 amostras), 11% da massa total da *Acácia dealbata* (20 amostras) e 20% da massa total do *Cytisus multiflorus* (21 amostras). Relativamente ao material do segundo ciclo de secagem, foram analisadas 4 amostras, com exceção do *Cytisus multiflorus* B em que, apenas foram analisadas 3 amostras do material. A totalidade das distribuições encontra-se no Anexo A.

#### 4.4.2.1 *Cytisus scoparius* A

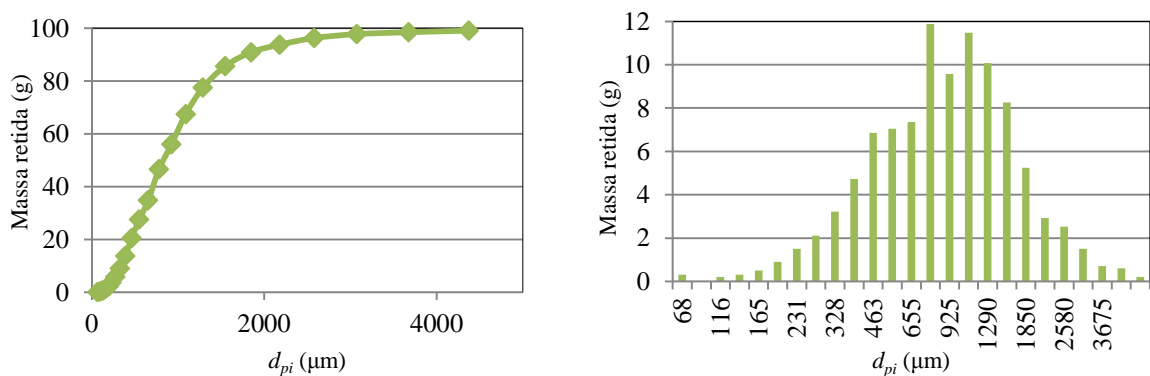
Na Figura 4.16 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica do *Cytisus scoparius* A, que resulta num diâmetro médio de  $459 \pm 58 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.16:** Distribuição granulométrica típica do *Cytisus scoparius* A.

#### 4.4.2.2 *Acacia dealbata* A

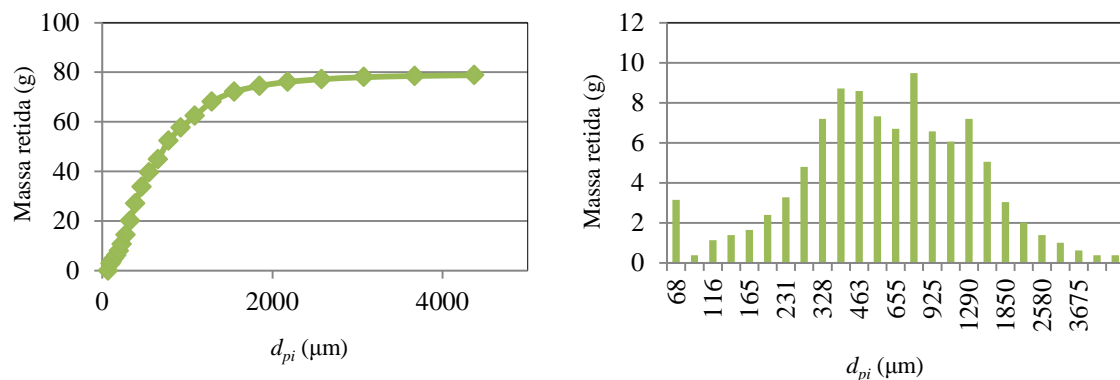
Na Figura 4.17 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica da *Acacia dealbata* A, que resulta num diâmetro médio de  $543 \pm 38 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.17:** Distribuição granulométrica típica da *Acacia dealbata* A.

#### 4.4.2.3 *Cytisus multiflorus* A

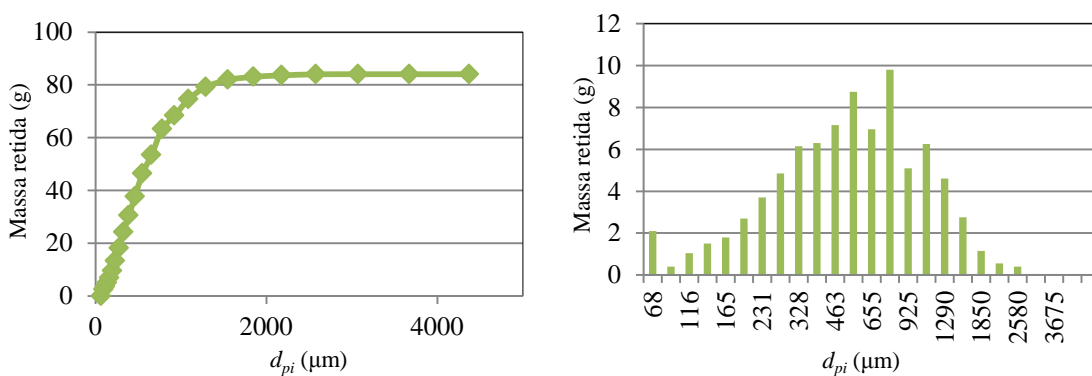
Na Figura 4.18 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* A, que resulta num diâmetro médio de  $402 \pm 26 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.18:** Distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* A.

#### 4.4.2.4 *Cytisus scoparius* B

Na Figura 4.19 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica do *Cytisus scoparius* B, que resulta num diâmetro médio de  $349 \pm 15 \mu\text{m}$ .



**Figura 4.19:** Distribuição granulométrica típica do *Cytisus scoparius* B.

#### 4.4.2.5 *Acacia dealbata* B

Na Figura 4.20 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica da *Acacia dealbata* B, que resulta num diâmetro médio de  $467 \pm 45 \mu\text{m}$ .

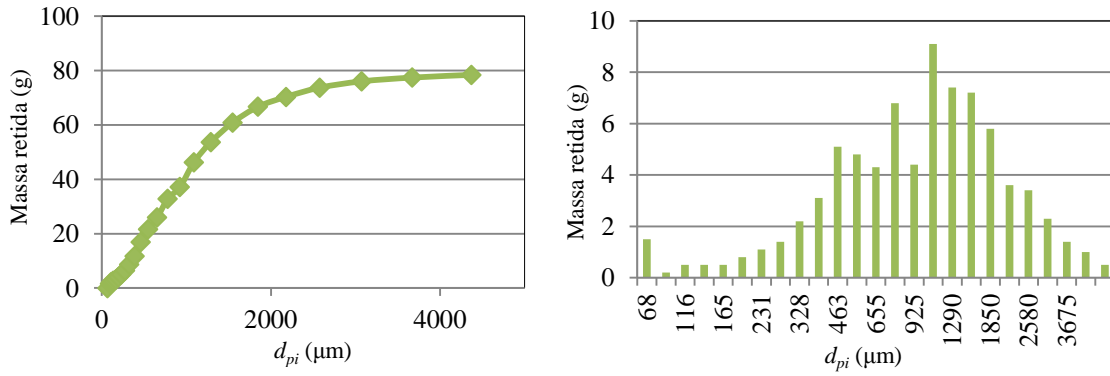


Figura 4.20: Distribuição granulométrica típica da *Acacia dealbata* B.

#### 4.4.2.6 *Cytisus multiflorus* B1

Na Figura 4.21 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* B1, que resulta num diâmetro médio de  $368 \pm 3 \mu\text{m}$ .

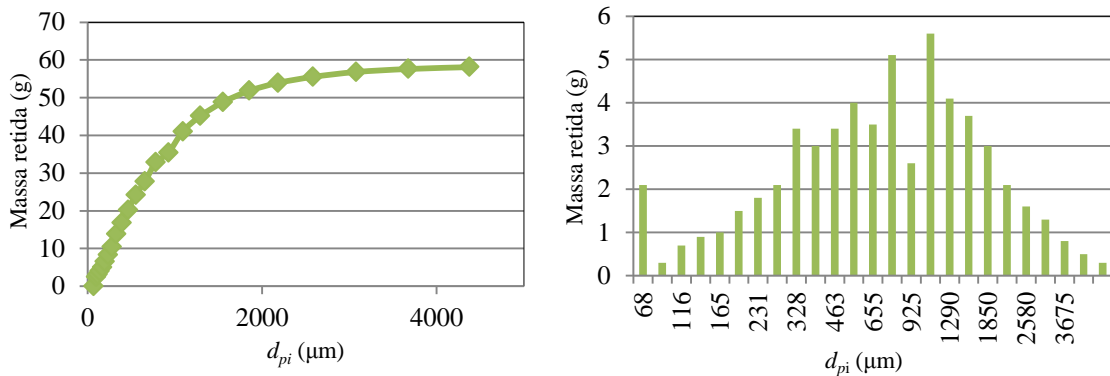


Figura 4.21: Distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* B1.

#### 4.4.2.7 *Cytisus multiflorus* B2

Na Figura 4.22 encontra-se representada uma distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* B2, que resulta num diâmetro médio de  $788 \pm 87 \mu\text{m}$ .

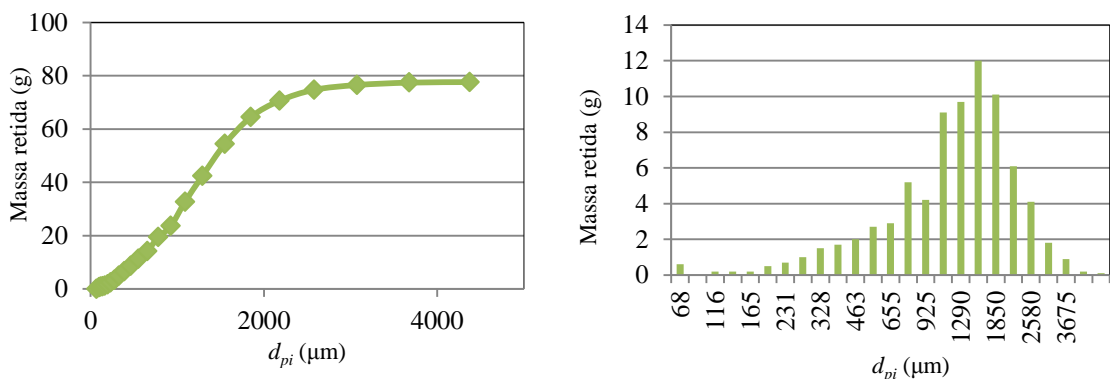


Figura 4.22: Distribuição granulométrica típica do *Cytisus multiflorus* B2.

#### 4. PRÉ-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*

Como seria natural, verificou-se um diâmetro de partícula superior na matéria-prima destrozada com o crivo de diâmetro superior. Quando destrozados com o mesmo crivo não se verificaram diferenças significativas no diâmetro de partículas do *Cytisus scoparius* e *multiflorus*. No caso da *Acacia dealbata*, o valor foi sempre superior. Em relação à distribuição de tamanhos, verifica-se um andamento semelhante ao registado para o caso do material destrozado no moinho de martelos.

## 5 PELETIZAÇÃO E PÓS-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES

Foram produzidos peletes de 6 mm de diâmetro utilizando uma peletizadora da marca *AGP International*, modelo *GK5500*. A matriz foi previamente aquecida até cerca de 90°C. A taxa de alimentação foi de, aproximadamente, 100 kg/h para o *Cytisus scoparius* A, 71 kg/h para a *Acacia dealbata* A e 77 kg/h para o *Cytisus multiflorus* A. Na peletização do restante material a taxa de alimentação não foi determinada, devido a uma falha nas pesagens do material.



**Figura 5.1:** Peletizadora industrial.

Após a compactação seguiu-se o arrefecimento natural dos peletes: estes foram colocados sobre uma superfície ao ar livre onde permaneceram durante cerca de 24 horas. Posteriormente, foram peneirados com um crivo de 3,35 mm para correta separação entre os peletes e os finos originados na sua produção, sendo seguidamente embalados.

Apresentam-se em seguida os peletes produzidos das três espécies do primeiro ciclo de secagem, assim como os peletes comerciais, que serão utilizados como comparação com os peletes produzidos no presente trabalho.



**Figura 5.2:** Peletes comerciais – pinho A.

## 5. PELETIZAÇÃO E PÓS-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*



**Figura 5.3:** Peletes comerciais – pinho B.



**Figura 5.4:** Peletes de *Cytisus scoparius*.



**Figura 5.5:** Peletes de *Acacia dealbata*.



**Figura 5.6:** Peletes de *Cytisus multiflorus*.

Como referido anteriormente, os peletes de *Cytisus* e *Acacia* foram produzidos especificamente para este trabalho. Relativamente ao peletes de pinho, estes foram adquiridos a duas empresas distintas de produção de peletes, sendo ambos, atualmente comercializados em Portugal. Porém, apenas os peletes de pinho A se encontram certificados pela norma Europeia ENplus. Os peletes de pinho A e B foram adquiridos, respetivamente, às duas empresas de produção de peletes em que foi analisado o serrim comercial: a empresa A e a empresa B.

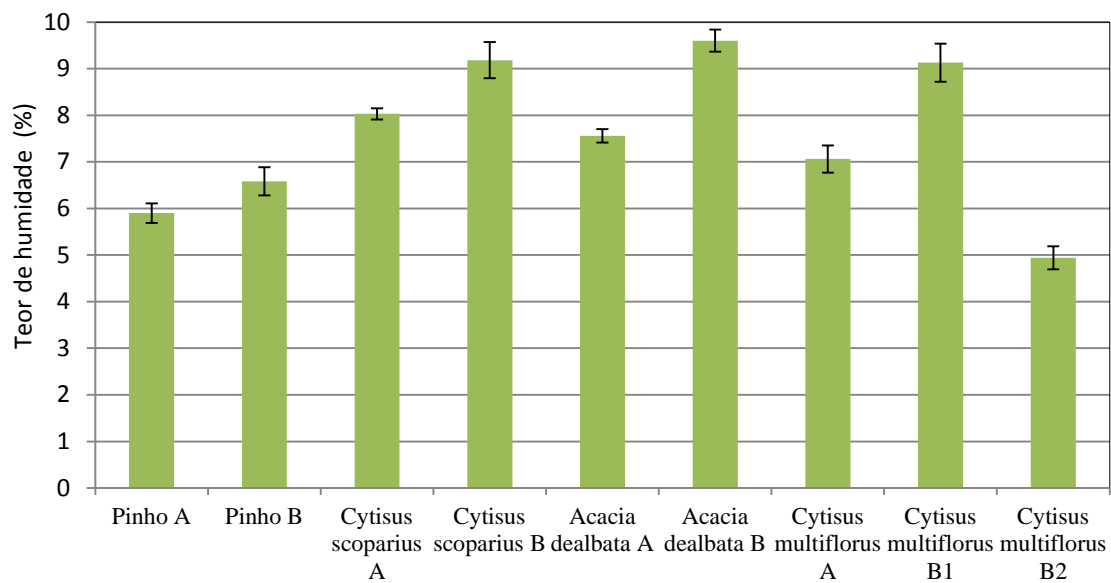
## 5. PELETIZAÇÃO E PÓS-TRATAMENTO DAS ESPÉCIES *CYTISUS* E *ACACIA*

## 6 TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES

Com o objetivo de avaliar as características dos peletes produzidos foram realizados alguns testes de qualidade normalizados, que se encontram descritos seguidamente. Os resultados serão comparados com os valores de referência da norma europeia EN 14961-2, que estabelece especificações para peletes de madeira para uso não industrial. Os mesmos testes foram também realizados aos peletes comerciais de pinho, como forma de comparação com os produzidos durante e para este trabalho.

### 6.1 Teor de humidade

O teor de humidade dos peletes, ver Figura 6.1, foi determinado de acordo com a norma FprEN 14774-2:2009.



**Figura 6.1:** Teor de humidade dos peletes e respetivo desvio padrão.

Analisando os resultados anteriores, verifica-se que todos os peletes apresentam um teor de humidade na base húmida inferior a 10%, valor limite definido pela norma EN 14961-2. Os peletes de *Cytisus multiflorus* B2 foram os que apresentam menor teor de humidade, seguidos dos comerciais de pinho. Os peletes com maior teor de humidade foram os de *Acacia dealbata* B, com 9,6%.

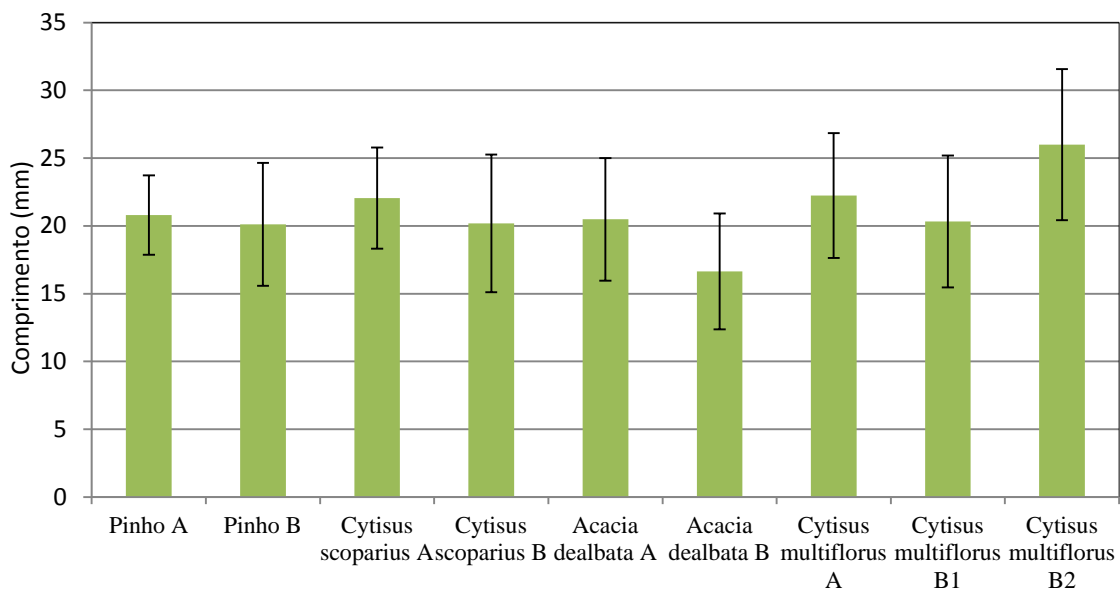
### 6.2 Dimensões

As dimensões dos peletes foram determinadas segundo a norma Austríaca ÖNORM M 7135: selecionaram-se 20 peletes aleatoriamente numa amostra e,

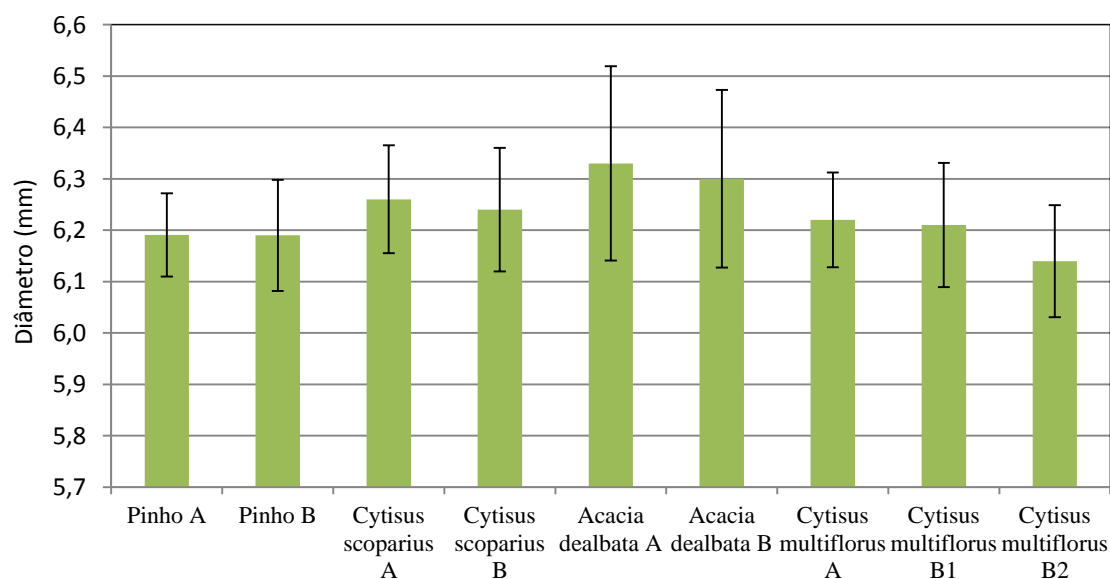
## 6. TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES

recorrendo a um paquímetro digital com uma resolução de 0,1 mm, mediram-se os seus comprimentos e diâmetros. Foram realizados um mínimo de dois testes para cada tipo de peletes, sendo apresentadas as médias aritméticas correspondentes. Nas Figuras 6.2 e 6.3 encontram-se representados os comprimentos e diâmetros médios dos peletes produzidos e dos peletes comerciais, respetivamente.

Segundo a norma Europeia o valor do comprimento dos peletes deve encontrar-se entre 3,15 e 40 mm, e o diâmetro médio não deve exceder o valor de  $6 \pm 1$  mm.



**Figura 6.2:** Comprimento médio dos peletes e respetivo desvio padrão.



**Figura 6.3:** Diâmetro médio dos peletes e respetivo desvio padrão.

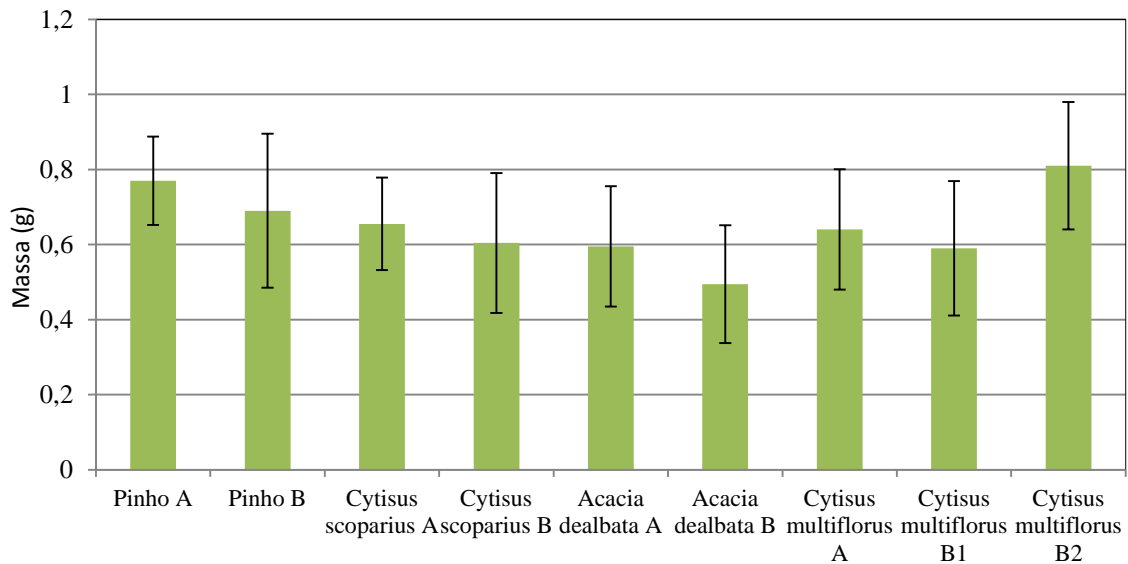
Pode observar-se que o comprimento médio dos peletes testados se encontra dentro da gama especificada, com uma tendência visível para um comprimento médio de 20 mm.

Em relação ao diâmetro médio, verifica-se, uma vez mais, que todos os peletes se encontram dentro dos limites estabelecidos.

### 6.3 Massa

Os 20 peletes selecionados aleatoriamente para a determinação das dimensões (comprimento e diâmetro) foram pesados numa balança digital, marca *Precisa*, modelo 6200, segundo a norma ÖNORM M 7135.

A Figura 6.4 apresenta a massa média dos diferentes peletes.



**Figura 6.4:** Massa média dos peletes e respetivo desvio padrão.

Em relação à massa dos peletes, a norma referida não estabelece nenhum limite.

### 6.4 Massa volúmica

Diferentes métodos podem ser utilizados para estimar a massa volúmica dos peletes, neste trabalho foi utilizado o método das dimensões (Rabier *et al.*, 2006), devido à facilidade da sua aplicação. Este método é baseado na relação entre a massa de um pelete e o volume correspondente, sendo este cálculo efetuado considerando-o como um cilindro (Equações (6.1) e (6.2), respetivamente).

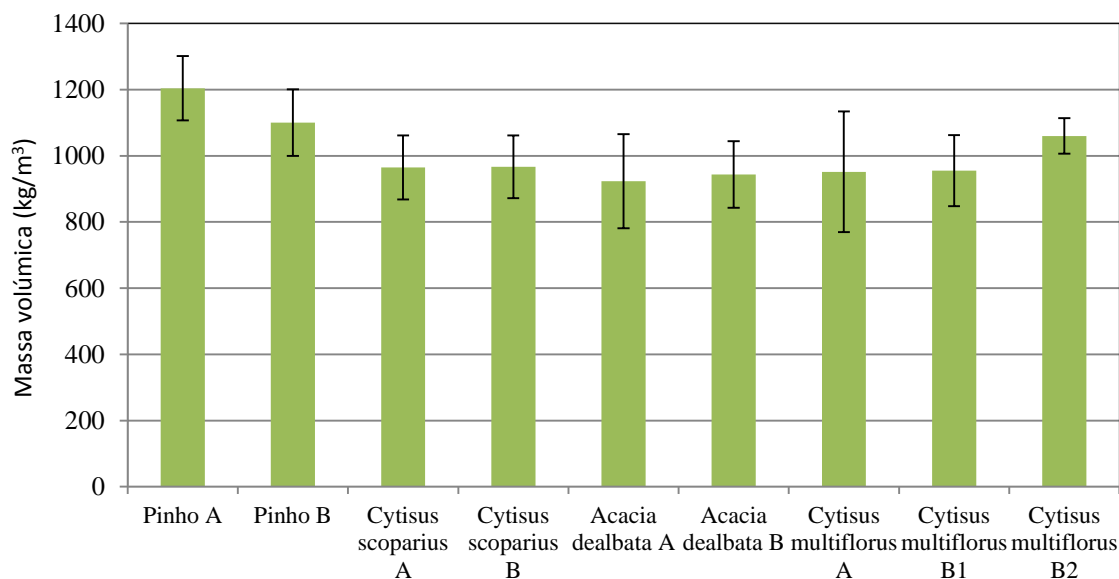
## 6. TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES

$$\rho_{pelete} = \frac{massa_{pelete}}{volume_{pelete}} \quad (6.1)$$

$$V_{pelete} = \pi \frac{D^2}{4} h \quad (6.2)$$

em que  $D$  representa o diâmetro dos peletes e  $h$  o comprimento.

Na Figura 6.5 encontra-se representada a massa volúmica média dos peletes assim obtida.



**Figura 6.5:** Massa volúmica média dos peletes e respetivo desvio padrão.

### 6.5 Quantidade de finos

Segundo a norma EN 14961-2, o limite máximo da percentagem de finos admitidos é de 1%.

A quantidade de finos foi determinada segundo a norma EN 15210-1, para três amostras de cada tipo de peletes que foram pesadas e peneiradas manualmente num peneiro de 3,35 mm.

Embora a norma ISSO 3310-1 refira a utilização de um peneiro de 3,15 mm, por este não se encontrar disponível foi utilizado um de 3,35 mm. O facto de se utilizar um peneiro com tamanho de malha superior penaliza os resultados, pois poderiam existir partículas nas amostras com diâmetro médio entre 3,15 e 3,35 mm que ficariam retidas no peneiro de 3,15 mm, reduzindo assim o teor de finos a considerar.



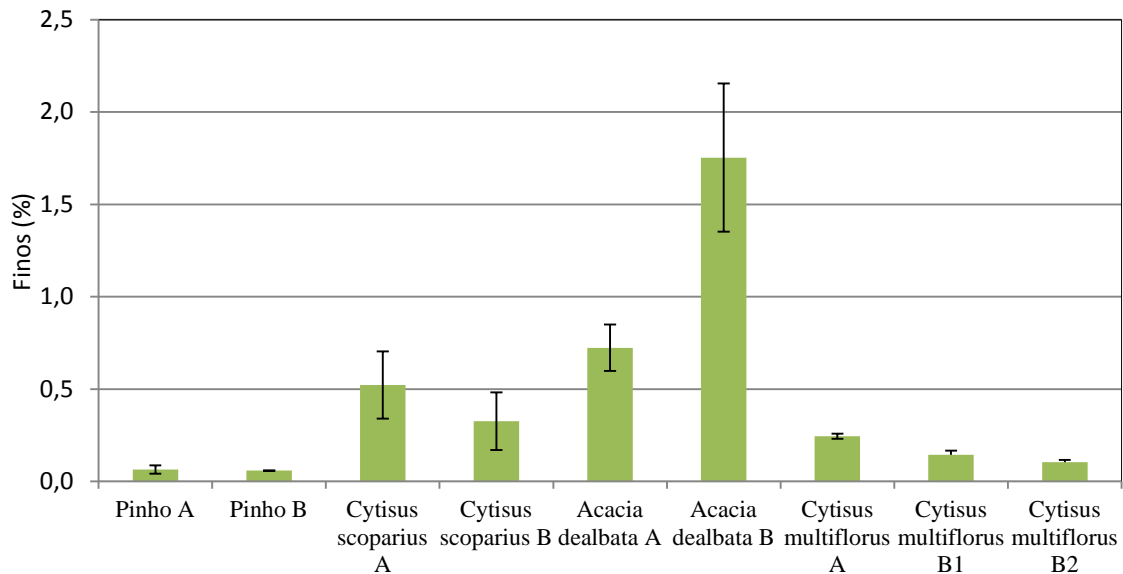
**Figura 6.6:** Peneiro de 3,35 mm.

A quantidade de finos foi calculada recorrendo à Equação (6.3).

$$\% \text{ Finos} = \frac{m_{\text{finos}}}{m_{\text{inicial}}} 100 \quad (6.3)$$

em que  $m_{\text{finos}}$  representa a massa de finos que passaram o peneiro e  $m_{\text{inicial}}$  a massa inicial da amostra, antes da peneiração.

Na Figura 6.7 encontra-se representada a percentagem de finos para os diferentes peletes.



**Figura 6.7:** Teor de finos dos peletes e respetivo desvio padrão.

Observando o gráfico do teor de finos verifica-se uma percentagem inferior no caso dos peletes comerciais. A *Acacia dealbata* B apresentou um teor muito elevado, cerca de 1,8%, ou seja, 80% superior ao valor limite definido pela norma. No caso dos restantes peletes, o limite foi cumprido.

## 6.6 Durabilidade

A durabilidade é o principal parâmetro que define a qualidade física dos peletes (Carroll e Finnan, 2012), sendo esta determinada segundo a norma ASAE S 269.4.

A norma descreve a utilização dum recipiente retangular em alumínio ou aço inoxidável, com dimensões interiores de 300 × 300 × 1259 mm, e um defletor com dimensões de 230 × 50 mm. O recipiente deve rodar, com uma velocidade de rotação de 50 rpm (Termmerman *et al.*, 2006). Desta forma, cada amostra de 500 ± 10 g era introduzida no recipiente que rodava a 500 rotações durante um período de 10 minutos, *i.e.*, a 50 rpm, tendo sido anteriormente peneirada manualmente com um peneiro de 3,35 mm. Depois de terminado o ensaio de durabilidade, a amostra era

## 6. TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES

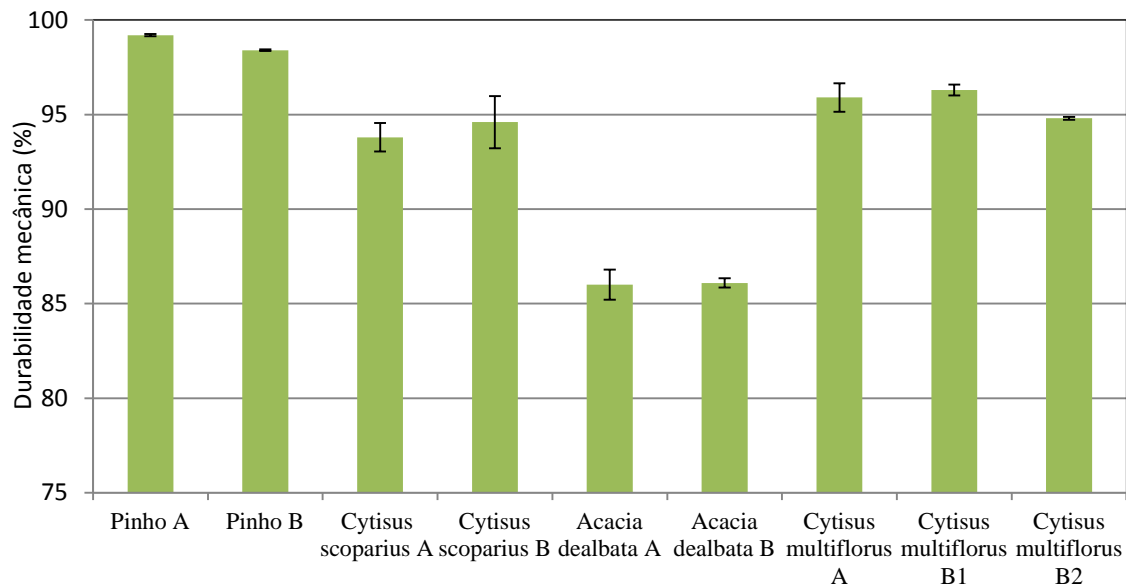
novamente peneirada num peneiro de 3,35 mm, sendo pesada a massa retida. Foram realizados ensaios de durabilidade para três amostras de cada tipo de peletes.

A durabilidade mecânica dos peletes foi determinada de acordo com a seguinte equação.

$$\% \text{ Durabilidade} = \frac{m_{\text{peletes final}}}{m_{\text{peletes inicial}}} 100 \quad (6.4)$$

em que  $m_{\text{peletes final}}$  e  $m_{\text{peletes inicial}}$  são a massa retida no peneiro depois do ensaio de durabilidade e a massa inicial da amostra, respetivamente.

Na Figura 6.8 encontra-se representada a durabilidade mecânica média dos peletes, assim como o respetivo desvio padrão.



**Figura 6.8:** Durabilidade mecânica dos peletes e respetivo desvio padrão.

Segundo a norma EN 14961-2, o valor mínimo de durabilidade mecânica admitido nos peletes para uso comercial é de 97,5%. Verifica-se que apenas os peletes comerciais de pinho cumprem este requisito. Os peletes de *Acacia dealbata* foram os que apresentaram menor durabilidade mecânica, 86%.

## 6.7 Composição química

Na tabela seguinte é apresentada a composição imediata e elementar dos peletes utilizados neste trabalho. No caso dos peletes de pinho B, a composição foi totalmente fornecida pela empresa correspondente. Relativamente aos peletes de pinho A, as análises imediata e elementar também foram fornecidas pela empresa correspondente, e quanto ao PCI, assumiu-se um valor igual ao dos peletes de pinho B. A análise do *Cytisus multiflorus* foi realizada pelo LNEG – Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia, sendo considerada a mesma composição para o *Cytisus scoparius*. Relativamente à *Acacia dealbata*, a sua composição foi retirada da literatura (Olmo *et al.*, 2005; Agulló *et al.*, 2012).

**Tabela 6. 1:** Composição imediata e elementar dos peletes.

|                            | <b>Pinho A</b> | <b>Pinho B</b> | <b><i>Cytisus scoparius</i></b> | <b><i>Cytisus multiflorus</i></b> | <b><i>Acacia dealbata</i></b> |
|----------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Cinzas % (m/m)             | 0,68           | 0,6            | 1,2                             | 1,2                               | 0,55 <sup>(2)</sup>           |
| Matérias voláteis % (m/m)  | nd             | 85,3           | 74,9                            | 74,9                              | nd                            |
| Carbono fixo % (m/m)       | nd             | 14,1           | 15,6                            | 15,6                              | nd                            |
| Carbono total % (m/m)      | 50,6           | 50,7           | 46,0                            | 46,0                              | 44,6 <sup>(2)</sup>           |
| Hidrogénio total % (m/m)   | 6,38           | 6,9            | 6,4                             | 6,4                               | 6,19 <sup>(2)</sup>           |
| Azoto % (m/m)              | 0,12           | 0,2            | 1,1                             | 1,1                               | 0,39 <sup>(2)</sup>           |
| Enxofre % (m/m)            | 0,01           | 0,01           | < 0,06                          | < 0,06                            | 0 <sup>(2)</sup>              |
| Oxigénio % (m/m)           | 42,89          | 42,19          | 46,44                           | 46,44                             | 48,84 <sup>(1)</sup>          |
| PCI (kJ/kg) <sup>(1)</sup> | 18790          | 18790          | 18491                           | 18491                             | 18665 <sup>(3)</sup>          |

<sup>(1)</sup>Na base seca

<sup>(2)</sup>Agulló *et al.*, 2012

<sup>(3)</sup>Olmo *et al.*, 2005

Comparando as características dos 5 tipos de peletes, constata-se que o poder calorífico é bastante semelhante, sendo os peletes de pinho os que apresentam um valor superior. Relativamente ao teor de cinzas, os peletes de giesta são os que apresentam maior percentagem. Em relação ao teor de azoto, os peletes de pinho A são os que apresentam menor teor e os de giesta um maior valor.

## 6. TESTES DE QUALIDADE EFETUADOS AOS PELETES

## 7 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

### 7.1 Descrição da instalação

A Figura 7.1 representa esquematicamente a instalação experimental, assim como todos os componentes utilizados nas medições necessárias para a realização do presente trabalho.

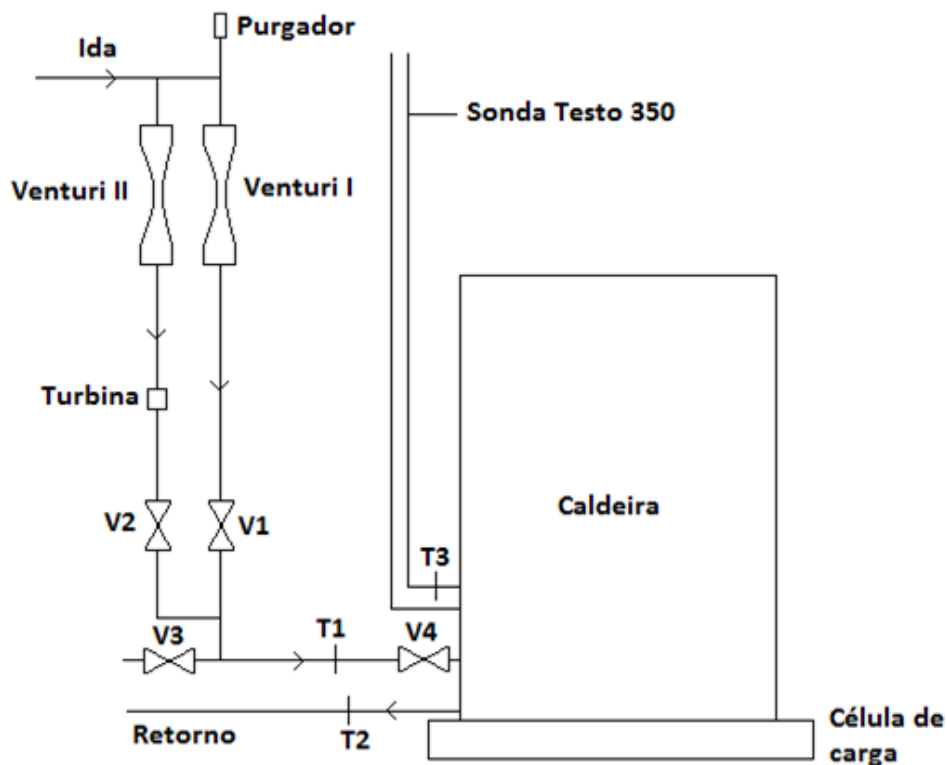


Figura 7.1: Instalação experimental.

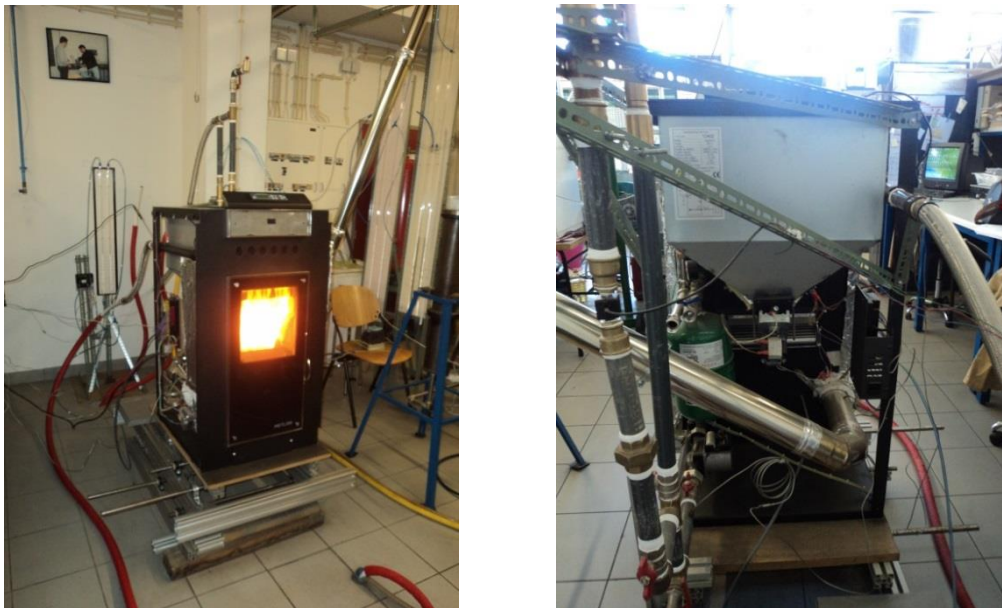
Foi necessária a colocação de vários dispositivos, indispensáveis para a execução de medições durante os ensaios experimentais. Com o objetivo de permitir a medição direta da taxa de queima do combustível, a caldeira foi colocada sobre um mecanismo com contra-peso, semelhante ao utilizado nas balanças decimais, por forma a não sofrer a influência do deslocamento do centro de massa; o prato superior deste mecanismo foi então ligado a uma célula de carga para permitir a aquisição de valores. Dois Venturis e uma turbina foram utilizados para a medição do caudal mássico de água; no ponto mais alto do circuito foi colocado um purgador automático. A monitorização das temperaturas da água e dos gases de exaustão foi efetuada recorrendo a termopares tipo K.

## 7.2 Descrição da caldeira

A caldeira utilizada para os ensaios de combustão dos peletes era uma caldeira doméstica típica de uma habitação unifamiliar. Da marca Metlor, modelo Aqualux, tinha uma indicação de potência térmica de 20 kW (Figura 7.2). As suas dimensões exteriores são: 1060 mm de altura, 625 de largura e 625 de profundidade. A sua estrutura é constituída por aço ao carbono e, na parte frontal, possui uma porta em vidro com as dimensões de 690 por 355 mm.

O depósito da caldeira tem uma capacidade para 50 litros, o equivalente a cerca de 35 kg de peletes. Os peletes são introduzidos manualmente no depósito, sendo a sua alimentação ao queimador controlada por um parafuso de Arquimedes (ou parafuso sem-fim) que se encontra acoplado a um motor elétrico na parte inferior do depósito. A alimentação dos peletes para o queimador é realizada pelo topo e a sua ignição conseguida através de uma resistência elétrica.

A caldeira possui ainda um ventilador auxiliar, que pode ser utilizado para aquecimento do ambiente onde esta se encontra. Durante os ensaios realizados este ventilador esteve sempre desligado.



**Figura 7.2:** Caldeira.

O funcionamento da caldeira é suposto ser totalmente automático. Possui 5 níveis de funcionamento, isto é, 5 velocidades diferentes para o parafuso de Arquimedes, permitindo uma aproximação à potência térmica desejada. O parafuso funciona num regime intermitente, ou seja, a sua velocidade de rotação é constante em todas as potências, variando o intervalo de tempo em que este se encontra parado, sendo portanto maior nas potências mais baixas e menor nas mais altas.

A zona da câmara de combustão é constituída por um “cesto” amovível, com orifícios que permitem a chegada de ar pela zona inferior, por uma resistência elétrica para a ignição (Figura 7.3) e ainda uma gaveta de remoção de cinzas.



**Figura 7.3:** Zona da câmara de combustão.

Na câmara de combustão passam tubos onde circula a água. Os produtos da combustão são escoados através de uma tubagem em alumínio com 8 cm de diâmetro. Esta tubagem encontra-se ligada ao sistema de exaustão do laboratório.

Devido à injeção de ar, as cinzas produzidas pela combustão dos peletes são arrastadas pelas partes laterais da câmara de combustão para a gaveta.

A caldeira possui um sensor de temperatura do tipo PTC100, que permite a monitorização da temperatura da água na tubagem interior, e ainda um termopar tipo K, para monitorização da temperatura dos gases de exaustão; estas temperaturas podem ser visualizadas a qualquer instante no painel de comando da caldeira.

A fase de arranque até à estabilização tem uma duração de cerca de 12 minutos e é denominada por “chama acesa”. Quando a caldeira é ligada, a resistência elétrica entra em fase de aquecimento durante cerca de 5 minutos e, simultaneamente é iniciada a pré-carga dos peletes, que tem uma duração de 110 segundos. Assim que se verifique uma temperatura de 60°C nos gases de exaustão, é ativado o modo estabilização. Neste modo, a bomba de circulação é acionada e a alimentação dos peletes é constante e função da potência térmica (nominal) selecionada. A cada 20 minutos é ativado o modo limpeza das cinzas, durante um intervalo de tempo de 20 segundos. Durante este intervalo de tempo o ventilador principal da caldeira funciona na potência máxima levando a um aumento do caudal de ar, para uma remoção mais eficaz das cinzas depositadas no “cesto” amovível.

Quando a temperatura da água à saída da caldeira excede o valor definido no painel de comandos, o sistema de controlo da caldeira reduz o nível de potência para o

mínimo e, sempre que necessário, retoma ao nível de potência inicial para garantir as necessidades de aquecimento.

De modo a evitar danos ou acidentes, a caldeira possui um conjunto de alarmes: temperatura excessiva de queima, temperatura excessiva no depósito de combustível, combustível esgotado e combustão insuficiente, entre outros.

Todos os componentes da caldeira, tais como o sem-fim, a bomba de circulação, o ventilador auxiliar e o exaustor, possuem parâmetros operacionais que poderão ser alterados dentro de certas gamas de valores permitidas.

### 7.3 Metodologia experimental

#### 7.3.1 Medição do consumo de peletes

A caldeira encontrava-se instalada em cima de um mecanismo de suporte com contrapeso ligado a uma célula de carga, com a finalidade de monitorização em contínuo do consumo de peletes. O sinal de saída da célula de carga era registado recorrendo ao programa *Catman* através do datalogger *Spider* modelo 8.

Por forma a obter a massa de peletes existente num dado momento, no depósito da caldeira, foi necessário traçar a curva de calibração do sinal da célula de carga, que estabelecia a relação entre o sinal de saída desta célula, a massa total da caldeira incluindo a água nela contida e ainda a massa de peletes contida no depósito. Conhecida a massa da caldeira com água, mas sem peletes, obtinha-se assim uma leitura da massa de peletes contida, num dado instante, na caldeira. Foi ainda utilizado um segundo processo, como forma de controlar os resultados globais obtidos para cada ensaio, que consistiu na medição da massa inicial dos peletes antes de colocados no depósito e da massa restante no final do ensaio, depois de retirados, sendo o caudal mássico médio dos peletes queimados a razão entre a diferença entre aqueles dois valores e o intervalo de tempo que demorou o ensaio:

$$\dot{m}_{peletes} = \frac{\Delta m_{peletes}}{\Delta t} \quad (7.1)$$

onde  $\dot{m}_{peletes}$  (kg/s) representa o caudal mássico médio,  $\Delta m_{peletes}$  (kg) a variação de massa dos peletes durante um determinado ensaio e  $\Delta t$  o intervalo de tempo (s) em que decorreu o ensaio.

#### 7.3.2 Medição das temperaturas

Como referido anteriormente, as temperaturas de entrada e saída da água da caldeira foram medidas através de dois termopares tipo K com 3 mm de diâmetro, cuja gama de leitura vai desde os -200 aos 1250°C. Para a medição da temperatura dos gases de exaustão colocou-se também um termopar tipo K com 3 mm de diâmetro na

tubagem da chaminé. Na zona do termopar a chaminé encontrava-se revestida por manta cerâmica da marca *Kaowool* de modo a minimizar os erros de leitura. Os sinais analógicos provenientes dos termopares eram transmitidos através de uma porta RS232 para um computador, utilizando o programa *PicoLog da Pico Technology Ltd.* conectado ao datalogger *Pico TC08*, com compensação por junção fria. As leituras de temperatura eram registadas a cada segundo.

### 7.3.3 Medição do caudal mássico de água

Para a medição do caudal mássico de água que circulava no circuito da caldeira foi necessário a instalação de um troço de tubagem em PVC a montante da entrada de água na caldeira. Para isso foram colocados dois Venturis em paralelo e um medidor de caudal de turbina, modelo *DFC.9000.100* da *Parker*, previamente calibrados pelo método das pesagens, conforme o descrito no Anexo B. O medidor de caudal (turbina) encontrava-se alimentado com 5 Volts e ligado a uma placa *NI USB-6008*.

Cada um dos Venturis estava ligado a um transdutor diferencial de pressão e a um manómetro diferencial de coluna de água construídos para o efeito.

O sinal analógico proveniente do medidor de caudal era transmitido para um computador utilizando uma placa *NI USB-6008*, sendo que o transdutor diferencial de pressão utilizado foi o *FCO34* da *Furness Controls Limited*, alimentado com 15 Volts por uma fonte de alimentação *Furness Control MO177*.

Inicialmente, pretendia-se apenas a medição do caudal mássico de água recorrendo aos Venturis; no entanto, devido à compressibilidade do ar surgiram alguns problemas durante as medições - o ar contido na tubagem de ligação dos Venturis aos manómetros era comprimido pela água e, desta forma, havia uma pequena quantidade de água que entrava na tubagem de ligação aos manómetros e interferia nas medições. Assim, optou-se por colocar uma turbina em série com um dos Venturis para uma medição mais fiável, continuando os Venturis a serem utilizados como meio de verificação e controlo das medições da turbina.

O primeiro Venturi tinha uma queda de pressão localizada baixa (face aos valores em jogo) e, como o caudal de água utilizado inicialmente se traduzia numa pequena diferença de pressão lida no manómetro de coluna de água, a incerteza de medição aumentava; foi então necessário fabricar um outro Venturi, que provocasse uma queda de pressão superior e que pudesse ser utilizado nessas gamas. Quanto à turbina, este dispositivo revelou-se fiável em todas as gamas de medição utilizadas.

### 7.3.4 Medição do caudal mássico de gases de combustão

Para a determinação do caudal mássico de gases de combustão, foi necessário calibrar previamente o ventilador principal da caldeira pelo método do gás traçador, conforme descrito no Anexo B.

## 7. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Foram feitas duas tomas de pressão, uma antes e outra depois do ventilador; nelas ligaram-se em paralelo, um manómetro diferencial de coluna de água e um transdutor diferencial de pressão (*FCO34 da Furness Controls Limited*) alimentado com 15 Volts através de uma fonte de alimentação (*Furness Control, modelo MO177*). O transdutor encontrava-se ligado a uma placa *NI USB-6008*. Esta placa, por sua vez, encontrava-se ligada ao programa *Labview 8.6* da *National Instruments*, com uma taxa de aquisição de 1 segundo para as medições do caudal mássico de água e de gases de combustão.

### 7.3.5 Composição dos gases de combustão

A composição dos gases de exaustão durante os ensaios de combustão dos peletes foi monitorizada recorrendo-se a um analisador de gases da marca *Testo*, modelo *350*. Para a leitura da composição desta corrente gasosa foi colocada a sonda de análise na saída da chaminé. Registaram-se as concentrações molares de oxigénio ( $O_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto ( $NO_x$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), recorrendo ao programa "*EasyEmission*" que acompanhava o analisador. As concentrações eram registadas a cada 10 segundos.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados experimentais dos vários ensaios realizados com peletes comerciais de *Pinus pinaster*, *Cytisus scoparius*, *Acacia dealbata* e *Cytisus multiflorus*.

Será avaliada a influência dos diferentes tipos de peletes e do caudal mássico de alimentação na eficiência térmica da caldeira e nas emissões resultantes da sua combustão.

### 8.1. Metodologia de cálculo

O rendimento térmico da caldeira foi determinado apenas quando eram atingidas condições de regime permanente, considerado como o correspondente ao intervalo de tempo em que a temperatura da água à saída da caldeira se mantinha aproximadamente constante, recorrendo ao método direto, Equação (8.1).

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{\dot{Q}_{\text{transf. água}}}{\dot{Q}_{\text{fornecida}}} \quad (8.1)$$

onde  $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$  representa a potência térmica libertada na combustão dos peletes e  $\dot{Q}_{\text{transf. água}}$  representa a potência térmica transferida para a água do circuito da caldeira.

A potência térmica fornecida à caldeira (carga térmica) foi calculada de acordo com a Equação (8.2).

$$\dot{Q}_{\text{fornecida}} = \dot{m}_{\text{peletes}} PCI_{\text{peletes}} \quad (8.2)$$

onde  $\dot{m}_{\text{peletes}}$  representa o caudal mássico de peletes (kg/s) e  $PCI_{\text{peletes}}$  é o poder calorífico inferior dos peletes (kJ/kg). Para os cinco tipos de peletes foi usado o poder calorífico inferior na base seca.

A potência térmica transferida para a água foi calculada segundo a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{\text{transf. água}} = \dot{m}_{\text{água}} c_{\text{água}} (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad (8.3)$$

onde  $\dot{m}_{\text{água}}$  representa o caudal médio de água do circuito da caldeira (kg/s),  $c_{\text{água}}$  o calor específico da água à temperatura média (kJ/(kg.K)),  $T_{\text{saída}}$  a temperatura da água à saída da caldeira (°C) e  $T_{\text{entrada}}$  a temperatura de entrada da água (°C).

Relativamente às perdas térmicas da caldeira, apenas foram avaliadas as perdas pelos gases de exaustão.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de combustão existem três tipos de perdas térmicas pela chaminé: as perdas relativas à corrente dos gases de exaustão, as perdas por não queimados (que no caso presente diz apenas respeito ao monóxido de carbono) e as perdas inerentes à humidade existente no combustível.

As perdas térmicas relativas à corrente dos gases de exaustão foram calculadas de acordo com a Equação (8.4).

$$\dot{Q}_{gases} = [(nM\bar{c}_P)_{CO_2} + (nM\bar{c}_P)_{CO} + (nM\bar{c}_P)_{O_2} + (nM\bar{c}_P)_{N_2} + (nM\bar{c}_P)_{NO} + (nM\bar{c}_P)_{H_2O}] (T_{gases} - T_{amb}) \dot{m}_{combustível} \quad (8.4)$$

em que  $n$  é o número de  $kmol$  do produto considerado por  $kg$  de combustível,  $M$  é a massa molecular ( $kg/kmol$ ),  $\bar{c}_P$  o calor específico mássico do produto à temperatura média ( $kJ/(kg.K)$ ),  $T_{gases}$  a temperatura dos gases de exaustão ( $^{\circ}C$ ),  $T_{ambiente}$  a temperatura do ar ambiente ( $^{\circ}C$ ) e  $\dot{m}_{combustível}$  o caudal mássico de peletes ( $kg/s$ ). A água considerada na Equação (8.4) diz apenas respeito à quantidade de água formada durante a combustão.

Relativamente às perdas térmicas por não queimados, em concreto pela formação de monóxido de carbono, o seu cálculo foi efetuado recorrendo à seguinte equação:

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{m}_{CO} PCI_{CO} \quad (8.5)$$

em que  $\dot{m}_{CO}$  representa o caudal mássico de monóxido de carbono nos produtos de combustão ( $kg/s$ ) e  $PCI_{CO}$  o poder calorífico inferior do monóxido de carbono ( $kJ/kg$ ).

Já as perdas térmicas inerentes à humidade existente nos peletes foram calculadas de acordo com a Equação (8.6).

$$\dot{Q}_{humidade} = \dot{m}_{combustível} \alpha [ \bar{c}_{H_2O} (100 - T_{ambiente}) + h_{lv} + \bar{c}_{P_{H_2O}} (T_{gases} - 100) ] \quad (8.6)$$

em que  $\alpha$  representa a fração de água do combustível,  $\bar{c}_{H_2O}$  o calor específico da água à temperatura média ( $kJ/(kg.K)$ ) e  $h_{lv}$  a entalpia latente de vaporização da água ( $kJ/(kg.K)$ ).

As perdas térmicas por convecção e radiação para a envolvente não foram contabilizadas pelo que, se admitiu serem simplesmente o fecho do balanço térmico. Assim sendo, o somatório da potência transferida para a água, das perdas pela chaminé e das outras perdas terá de ser igual à potência fornecida, ou seja à potência térmica libertada na combustão dos peletes, Equação (8.7).

$$\dot{Q}_{fornecida} = \dot{Q}_{transf.água} + \dot{Q}_{chaminé} + \dot{Q}_{outras perdas} \quad (8.7)$$

em que  $\dot{Q}_{fornecida}$  representa a potência fornecida útil ( $kW$ ),  $\dot{Q}_{transf.água}$  é a potência transferida para o circuito da água ( $kW$ ),  $\dot{Q}_{chaminé}$  são as perdas térmicas pela chaminé ( $kW$ ) e  $\dot{Q}_{outras perdas}$  representa as restantes perdas ( $kW$ ).

## 8.2. Ensaios experimentais

Das cinco cargas operacionais pré-definidas pelo fabricante foram realizados ensaios nas potências térmicas “reduzida”, “média” e “alta”, para os cinco tipos de peletes utilizados. Serão apresentados os resultados durante a fase de arranque e durante a fase de regime permanente.

Devido às diferenças entre as propriedades físicas dos peletes de pinho e dos peletes de giesta e mimosa produzidos, aquando da realização dos primeiros ensaios utilizando giesta e mimosa, obtiveram-se caudais mássicos de alimentação cerca de 26 e 59% inferiores aos conseguidos nos ensaios de pinho nas potências “reduzida” e “alta”, respetivamente. Como um dos objetivos era a comparação dos ensaios com os diferentes tipos de peletes, seria imprescindível a utilização de condições semelhantes. Deste modo, foi necessário calibrar o parafuso sem-fim para estimar os tempos de carga e paragem necessários para a obtenção dum caudal mássico de alimentação semelhante ao utilizado nos ensaios de peletes de pinho.

As Tabelas 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5 contêm as condições de operação da caldeira para os testes de pinho A, pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca, respetivamente. As tabelas apresentam o caudal médio de consumo de peletes durante cada ensaio, assim como a respetiva carga térmica, o caudal volúmico médio da água no circuito da caldeira e por fim, a potência térmica transferida para a água.

**Tabela 8.1:** Ensaios realizados para os peletes de pinho A.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Carga térmica (kW) | Caudal de água (l/min) | Potência transferida para a água (kW) |
|----------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Teste 1  | 1,17                         | 6,11               | 5,18                   | 2,83                                  |
| Teste 2  | 1,25                         | 6,52               | 5,39                   | 2,97                                  |
| Teste 3  | 1,19                         | 6,21               | 10,01                  | 2,90                                  |
| Teste 4  | 1,20                         | 6,26               | 9,97                   | 2,82                                  |
| Teste 5  | 1,22                         | 6,36               | 9,83                   | 3,08                                  |
| Teste 6  | 1,89                         | 9,86               | 9,81                   | 5,56                                  |
| Teste 7  | 1,85                         | 9,66               | 9,88                   | 5,47                                  |
| Teste 8  | 1,93                         | 10,06              | 9,76                   | 5,93                                  |
| Teste 9  | 1,92                         | 10,04              | 9,89                   | 5,74                                  |
| Teste 10 | 1,85                         | 9,66               | 9,85                   | 5,74                                  |
| Teste 11 | 3,49                         | 18,22              | 9,86                   | 11,78                                 |
| Teste 12 | 3,55                         | 18,53              | 9,87                   | 11,83                                 |
| Teste 13 | 3,87                         | 20,20              | 9,89                   | 12,96                                 |
| Teste 14 | 4,10                         | 21,40              | 9,88                   | 14,03                                 |

Como o esperado o caudal de alimentação foi inferior na potência “reduzida” e superior na potência “alta”. Os ensaios realizados na potência “alta” são os que apresentam maiores diferenças no caudal de alimentação. Relativamente ao caudal de

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

água no circuito da caldeira, observou-se que com exceção dos testes 1 e 2 do pinho A, o caudal de água manteve-se aproximadamente constante nos 10 l/min.

Para o pinho A são apresentados 5 ensaios para a potência “reduzida” e “média”, e 4 para a potência “alta”.

**Tabela 8.2:** Ensaios realizados para os peletes de pinho B.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Carga térmica (kW) | Caudal de água (l/min) | Potência transferida para a água (kW) |
|----------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Teste 1  | 1,13                         | 5,90               | 9,84                   | 2,70                                  |
| Teste 2  | 1,17                         | 6,11               | 9,94                   | 2,77                                  |
| Teste 3  | 1,195                        | 6,26               | 9,77                   | 2,67                                  |
| Teste 4  | 1,179                        | 6,16               | 9,92                   | 2,70                                  |
| Teste 5  | 1,82                         | 9,50               | 9,71                   | 5,30                                  |
| Teste 6  | 1,87                         | 9,76               | 10,04                  | 5,30                                  |
| Teste 7  | 1,85                         | 9,66               | 9,95                   | 5,28                                  |
| Teste 8  | 1,87                         | 9,76               | 9,80                   | 5,46                                  |
| Teste 9  | 1,91                         | 9,97               | 9,93                   | 5,53                                  |
| Teste 10 | 3,71                         | 19,36              | 9,83                   | 12,53                                 |
| Teste 11 | 3,56                         | 18,58              | 9,99                   | 11,65                                 |
| Teste 12 | 3,48                         | 18,16              | 9,82                   | 11,54                                 |
| Teste 13 | 3,43                         | 17,90              | 9,98                   | 10,79                                 |

Comparando o caudal de alimentação dos ensaios de pinho A com os de pinho B, verifica-se uma semelhança entre os resultados obtidos. Para o pinho B foram realizados 4 ensaios na potência “reduzida” e “alta”, e 5 na potência “média”.

**Tabela 8.3:** Ensaios realizados para os peletes de giesta amarela.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Carga térmica (kW) | Caudal de água (l/min) | Potência transferida para a água (kW) |
|----------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Teste 1  | 1,31                         | 6,73               | 9,70                   | 3,08                                  |
| Teste 2  | 1,25                         | 6,42               | 9,58                   | 2,85                                  |
| Teste 3  | 1,40                         | 7,19               | 9,67                   | 3,16                                  |
| Teste 4  | 1,81                         | 9,30               | 9,90                   | 5,11                                  |
| Teste 5  | 1,94                         | 9,96               | 9,78                   | 5,70                                  |
| Teste 6  | 1,88                         | 9,66               | 9,89                   | 5,73                                  |
| Teste 7  | 3,43                         | 17,62              | 9,88                   | 10,24                                 |
| Teste 8  | 3,35                         | 17,21              | 9,99                   | 11,16                                 |
| Teste 9  | 3,38                         | 17,36              | 9,78                   | 11,18                                 |
| Teste 10 | 3,15                         | 16,18              | 10,04                  | 10,11                                 |
| Teste 11 | 3,51                         | 18,03              | 9,82                   | 11,17                                 |

**Tabela 8.4:** Ensaios realizados para os peletes de mimosa.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Carga térmica (kW) | Caudal de água (l/min) | Potência transferida para a água (kW) |
|----------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Teste 1  | 1,35                         | 7,00               | 9,79                   | 3,68                                  |
| Teste 2  | 1,79                         | 9,28               | 9,84                   | 5,17                                  |
| Teste 3  | 1,36                         | 7,05               | 9,77                   | 3,35                                  |
| Teste 4  | 1,30                         | 6,74               | 9,81                   | 3,22                                  |
| Teste 5  | 1,61                         | 8,35               | 9,74                   | 3,92                                  |
| Teste 6  | 2,13                         | 11,04              | 9,84                   | 5,86                                  |
| Teste 7  | 1,78                         | 9,23               | 9,76                   | 5,09                                  |
| Teste 8  | 1,74                         | 9,02               | 9,80                   | 4,80                                  |
| Teste 9  | 3,39                         | 17,58              | 9,72                   | 10,58                                 |
| Teste 10 | 3,74                         | 19,39              | 9,79                   | 12,09                                 |
| Teste 11 | 3,47                         | 17,99              | 9,99                   | 11,42                                 |

**Tabela 8.5:** Ensaios realizados para os peletes de giesta branca.

| Ensaio  | Caudal de alimentação (kg/h) | Carga térmica (kW) | Caudal de água (l/min) | Potência transferida para a água (kW) |
|---------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Teste 1 | 1,35                         | 6,93               | 9,79                   | 3,19                                  |
| Teste 2 | 1,18                         | 6,06               | 9,92                   | 2,64                                  |
| Teste 3 | 1,39                         | 7,14               | 9,83                   | 3,69                                  |
| Teste 4 | 1,76                         | 9,04               | 9,77                   | 4,82                                  |
| Teste 5 | 1,93                         | 9,91               | 9,76                   | 5,38                                  |
| Teste 6 | 2,98                         | 15,31              | 10,03                  | 9,59                                  |
| Teste 7 | 3,68                         | 18,90              | 10,01                  | 11,65                                 |

Verificou-se uma maior dispersão do caudal de alimentação nos ensaios realizados com os peletes de giesta e mimosa, provavelmente devido às suas diferentes propriedades físicas. Em relação ao caudal de água do circuito da caldeira, este foi semelhante ao utilizado nos ensaios de pinho.

### 8.2.1 Fase de arranque

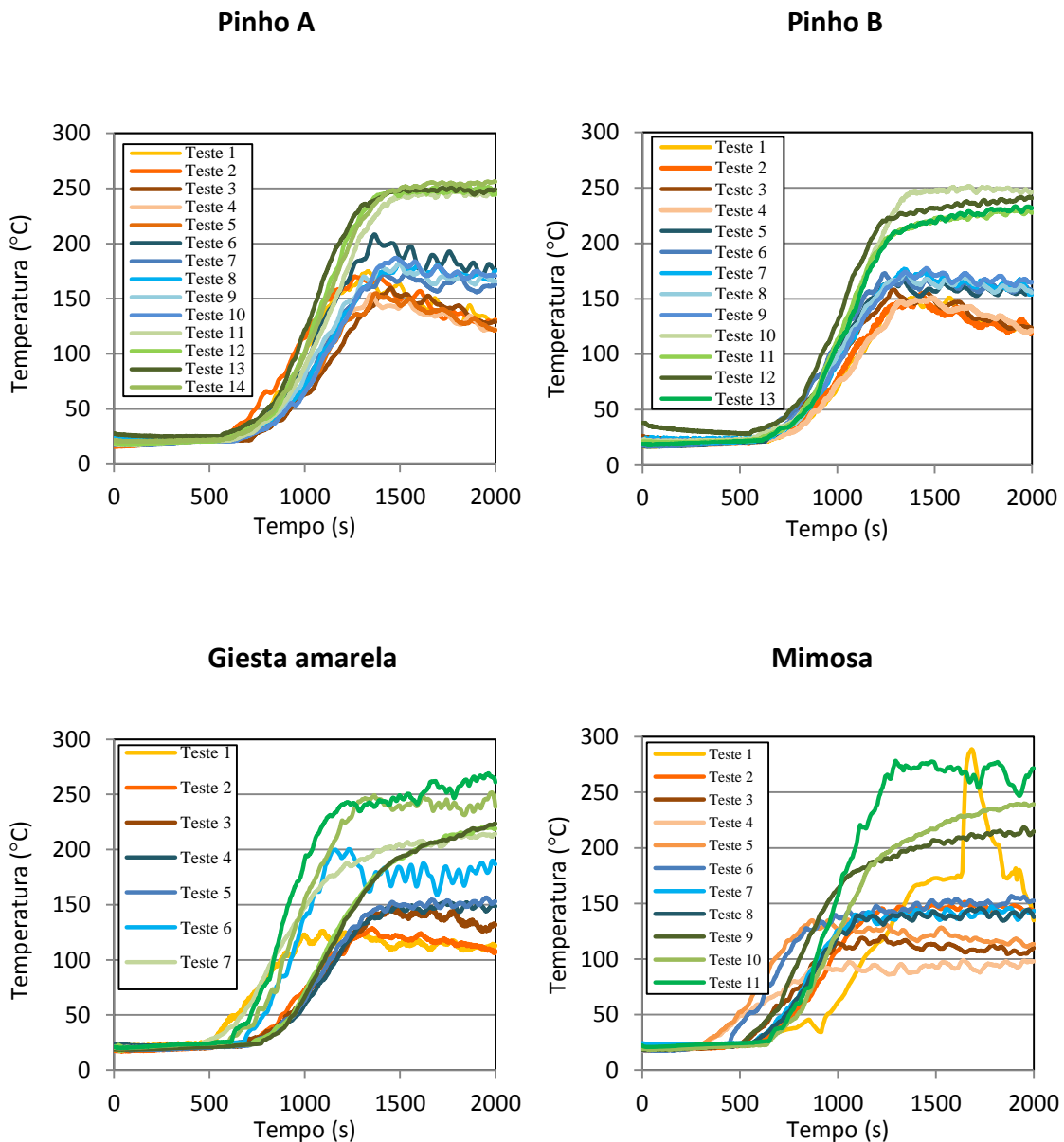
A fase de arranque da caldeira tinha em média uma duração de cerca de 30 minutos. Durante esta fase eram atingidas temperaturas mais elevadas e grandes emissões de CO, particularmente na potência “alta”. A temperatura e a composição dos gases de exaustão, nos diversos testes, foram continuamente registadas. No caso dos ensaios de potência “alta” para o pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca,

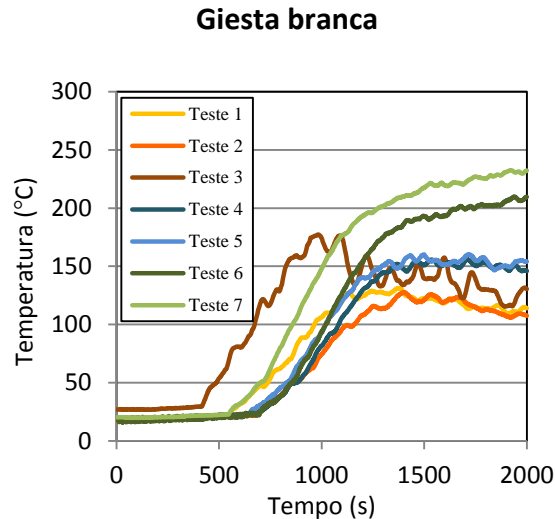
## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

na fase de arranque o analisador era desligado devido às elevadas emissões de CO que poderiam vir a danificar a célula; deste modo, apenas são apresentadas as medições da composição dos gases de exaustão nos testes em que tal foi possível, ou seja, nos testes realizados com o pinho A, em que foram verificadas emissões substancialmente inferiores.

A medição da temperatura dos gases de exaustão foi realizada para todos os ensaios desde o instante em que a caldeira entrava em funcionamento. A concentração dos gases de exaustão para as potências “reduzida” e “média” também era medida a partir desse mesmo instante.

A Figura 8.1 representa a temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque nas três potências operacionais e para os cinco combustíveis: pinho A, pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca, respetivamente.

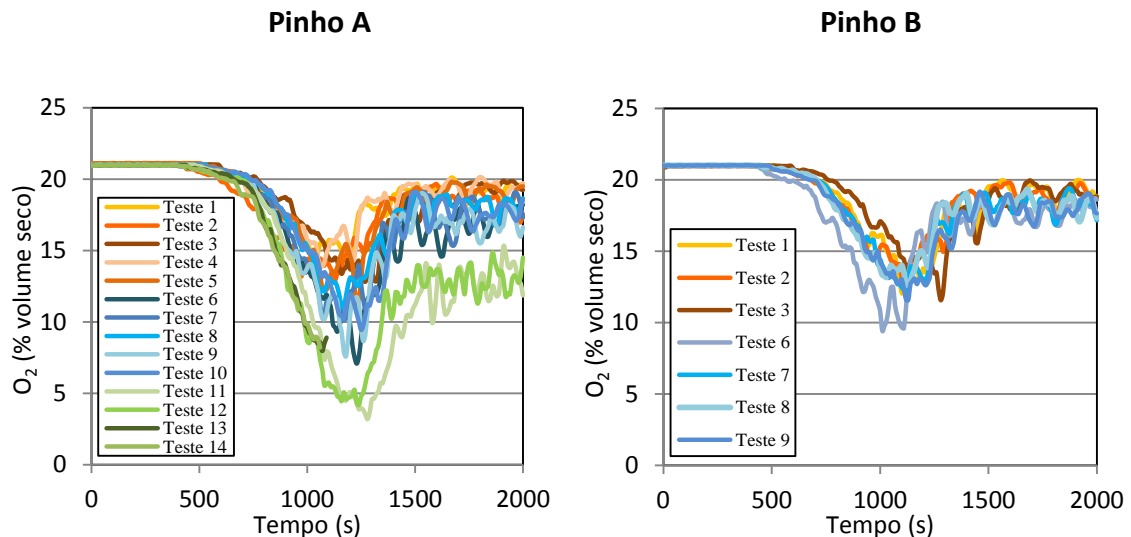


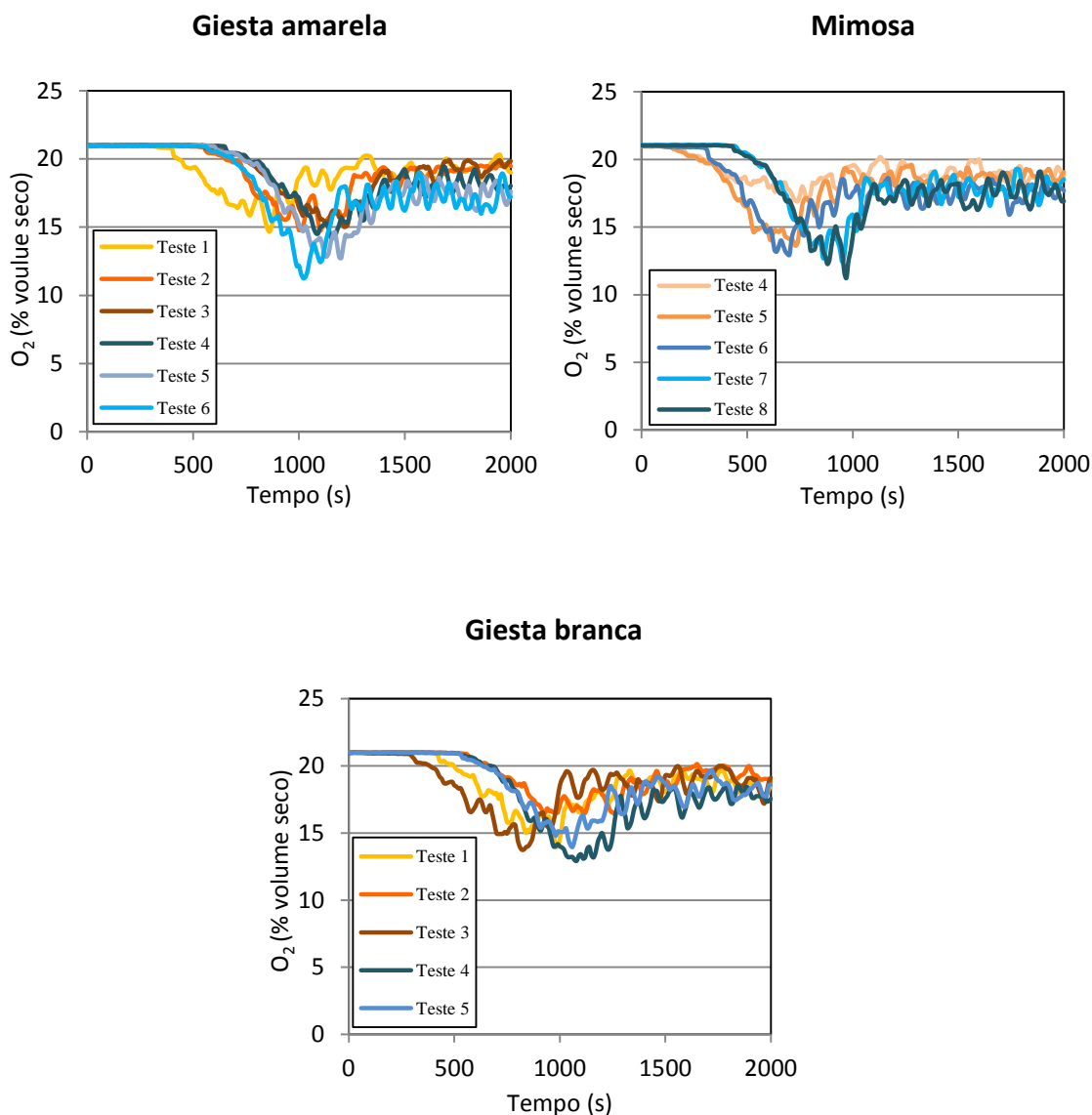


**Figura 8.1:** Temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque.

Como esperado durante a fase de pré-carga e de aquecimento da resistência elétrica, a temperatura dos gases de exaustão mantinha-se constante e idêntica à temperatura ambiente, até ao momento em que os peletes entravam em combustão. Posteriormente, verificava-se um rápido aumento da temperatura na fase inicial devido à ignição dos peletes e à propagação da frente de chama. Foi observada uma relação direta entre a temperatura dos gases de exaustão e a carga térmica. As temperaturas mais elevadas eram atingidas para os testes de carga “alta” e as temperaturas mais baixas para os testes de carga “reduzida”. Comparando os gráficos de temperatura dos gases de exaustão com as Tabelas 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5, que contêm o caudal mássico de alimentação para os testes de pinho A, pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca, respetivamente, verifica-se um aumento da temperatura dos gases de exaustão em função do aumento do caudal mássico de alimentação.

Na Figura 8.2 pode-se observar a influência da carga térmica e do tipo de combustível na concentração de oxigénio nos gases de exaustão.





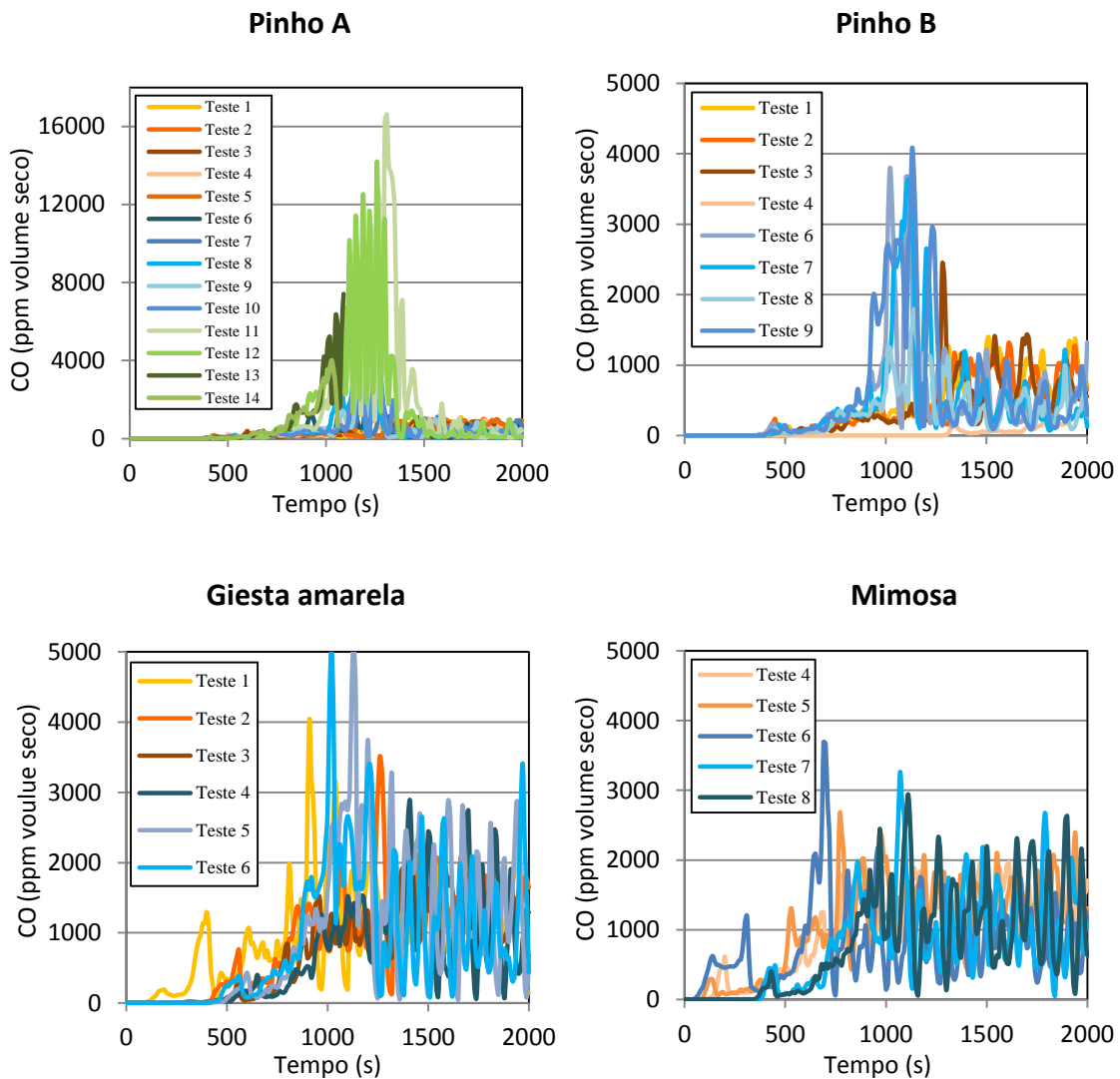
**Figura 8.2:** Concentração de oxigênio nos gases de exaustão durante a fase de arranque.

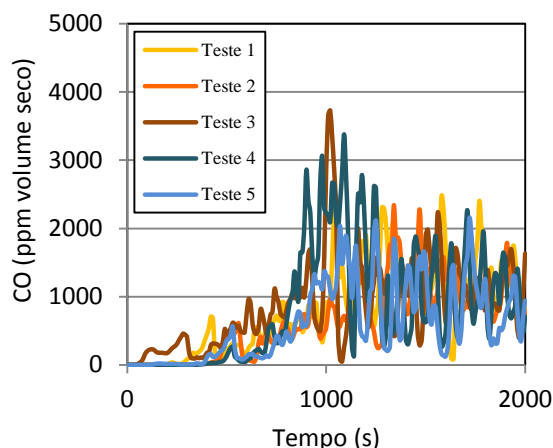
Como esperado, inicialmente a concentração de oxigênio nos gases de exaustão encontrava-se nos 21%, pois nesse momento os peletes ainda não se encontravam em combustão e a concentração de oxigênio era a existente no ar atmosférico. Depois do início da combustão verificava-se uma rápida diminuição da concentração de oxigênio, até ser atingido um valor mínimo, devido à elevada quantidade de combustível existente nesse momento na câmara de combustão. Essa quantidade é consequência da pré-carga e da alimentação contínua durante o período de aquecimento da resistência elétrica. Quando toda essa massa de peletes contida no “cesto” se encontrava em combustão, a quantidade de oxigênio disponível diminuía drasticamente devido à utilização do oxigênio para a oxidação do combustível, traduzindo-se numa diminuição da sua concentração nos gases de exaustão. Esta diminuição era dependente da quantidade de combustível existente na câmara de combustão, pelo que as menores concentrações de oxigênio eram verificadas na

potência “alta” pois, nessa potência, o caudal mássico de peletes era superior. Depois de toda a massa inicial de peletes ser consumida, a concentração de oxigénio nos gases de exaustão voltava a aumentar para um determinado valor (dependente da carga) e mantinha-se constante durante o restante processo de combustão.

A Figura 8.3 representa as emissões de monóxido de carbono durante a fase de arranque para os 5 tipos de peletes.

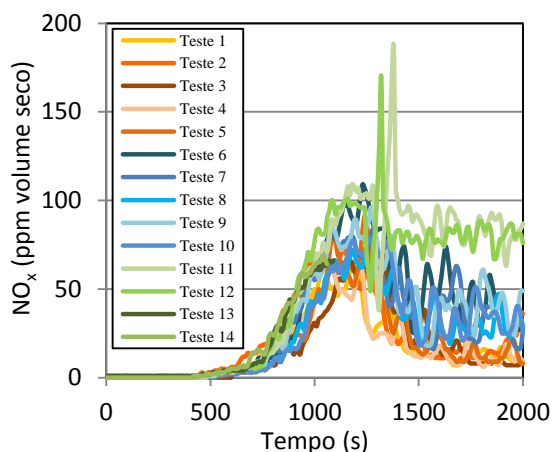
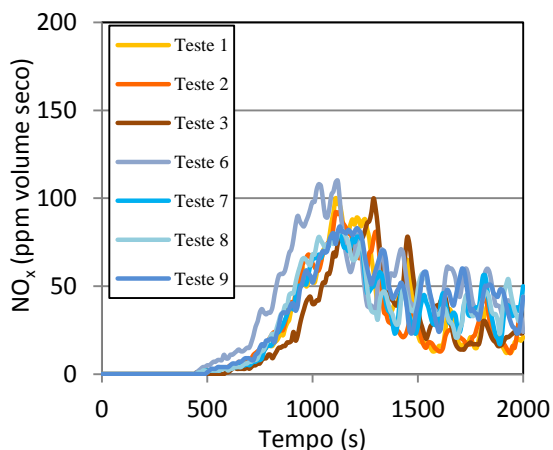
Como foi dito anteriormente, apenas nos ensaios de pinho A foi possível efetuar as medições de CO na carga “alta”. Verificou-se que, em geral para os testes de potência “reduzida” e “média”, as emissões de CO são semelhantes no caso da giesta branca e mimosa e um pouco superiores no caso da giesta amarela. Em relação aos testes de pinho A e B, as emissões são inferiores às referidas anteriormente em ambos os casos.

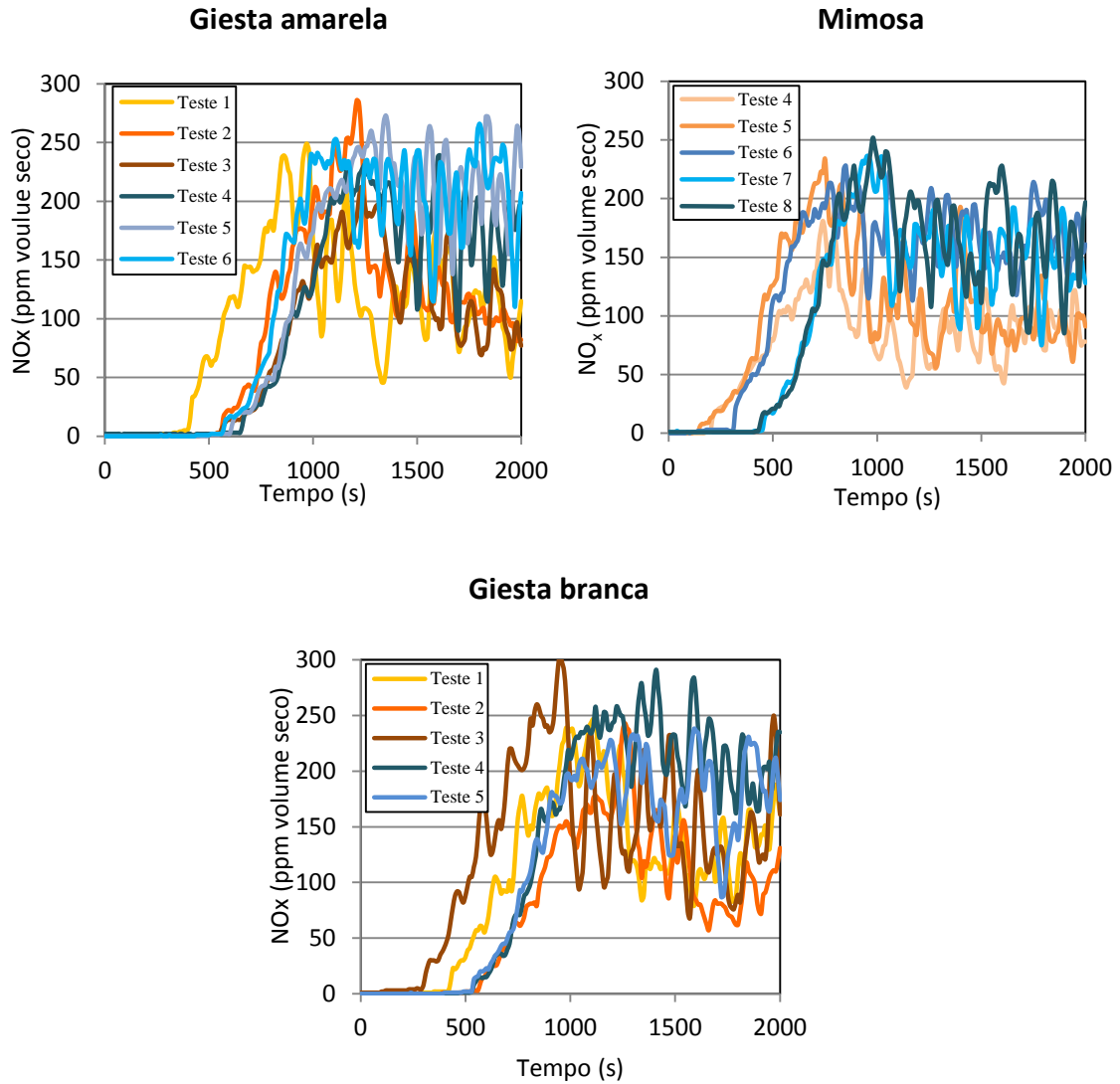


**Giesta branca**

**Figura 8.3:** Concentração de monóxido de carbono nos gases de exaustão durante a fase de arranque.

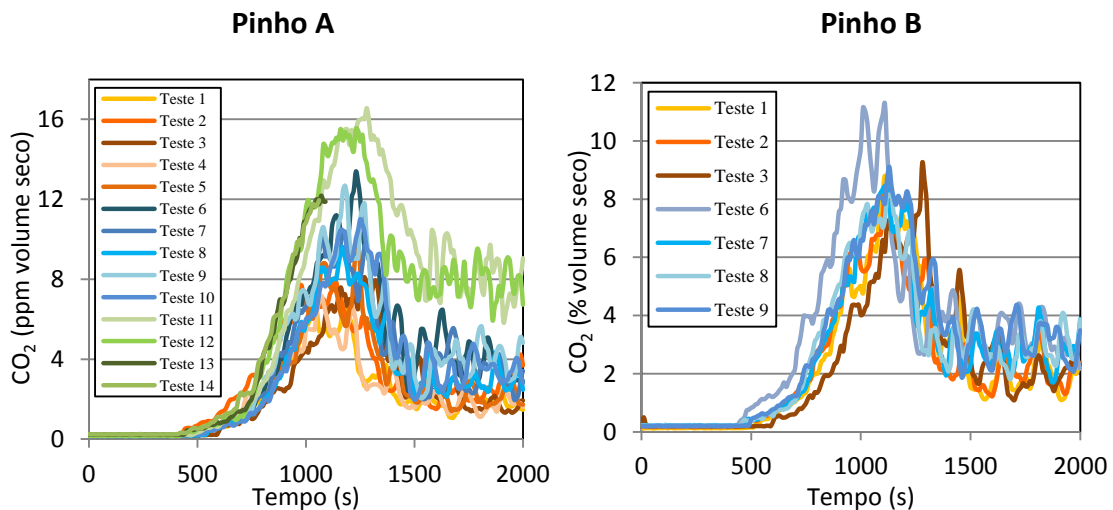
A Figura 8.4 representa as emissões de óxidos de azoto para os ensaios realizados. Em média, para os testes de pinho A durante a fase de arranque, as concentrações de óxidos de azoto são inferiores na carga “reduzida” e bastante superiores na carga “alta”. Em relação ao caso dos peletes de giesta amarela, mimosa e giesta branca as emissões de  $\text{NO}_x$  são semelhantes e inferiores a 300 ppm para as três espécies. Os peletes de pinho apresentam menores emissões de óxidos de azoto, quando comparados com os anteriores.

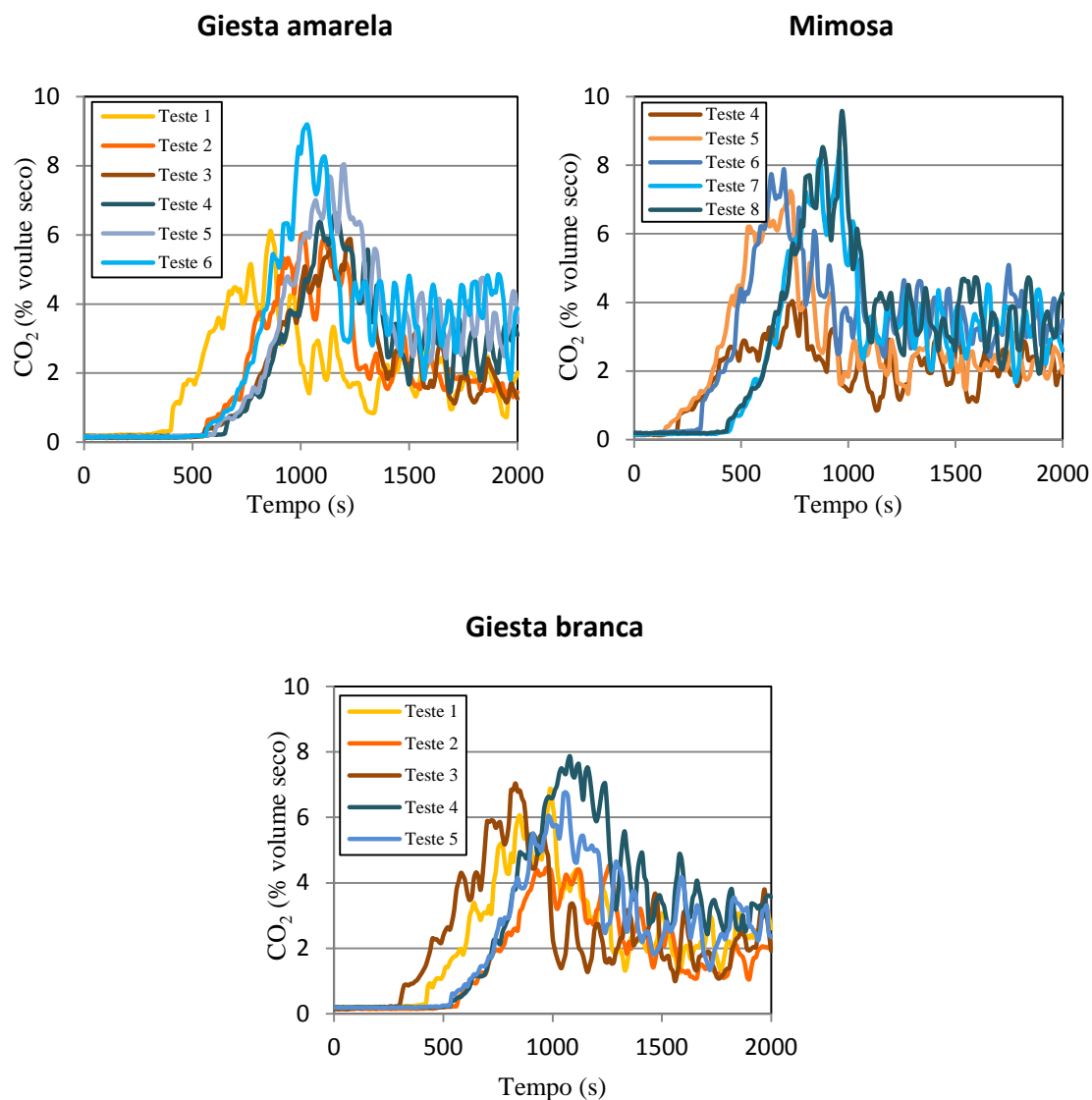
**Pinho A****Pinho B**



**Figura 8.4:** Concentração de óxidos de azoto nos gases de exaustão durante a fase de arranque.

Por fim, a Figura 8.5 representa as emissões de dióxido de carbono durante a fase de arranque. Constatou-se no caso do pinho A um aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  em função do aumento da carga térmica.





**Figura 8.5:** Concentração de dióxido de carbono nos gases de exaustão durante a fase de arranque.

### 8.2.2 Regime permanente

As Tabelas 8.6, 8.7, 8.8, 8.9 e 8.10 contêm, novamente, os vários ensaios realizados, com as condições de operação da caldeira. As tabelas apresentam a média das temperaturas dos gases de exaustão e as emissões médias resultantes da combustão dos peletes de pinho A, pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca. As emissões apresentadas foram medidas durante a fase de regime estacionário e foram corrigidas para 13% (v/v) de oxigênio nos gases de exaustão.

**Tabela 8.6:** Ensaios - pinho A.

| <b>Ensaios</b> | <b>Caudal de<br/>alimentação<br/>(kg/h)</b> | <b>Temperatura<br/>dos gases de<br/>exaustão (°C)</b> | <b>O<sub>2</sub> (%<br/>volume<br/>seco)</b> | <b>CO (ppm<br/>volume<br/>seco)</b> | <b>NO<sub>x</sub> (ppm<br/>volume<br/>seco)</b> |
|----------------|---|---|--|-------------------------------------|---|
| Teste 1        | 1,17  | 113,76  | 18,95  | 2435                                | 47  |
| Teste 2        | 1,25  | 115,03  | 18,88  | 2917                                | 49  |
| Teste 3        | 1,19  | 105,03  | 19,18  | 3015                                | 48  |
| Teste 4        | 1,20  | 104,33  | 19,54  | 3107                                | 49  |
| Teste 5        | 1,22  | 108,29  | 19,00  | 2728                                | 52  |
| Teste 6        | 1,89  | 163,34  | 17,07  | 837                                 | 77  |
| Teste 7        | 1,85  | 153,19  | 17,35  | 767                                 | 79  |
| Teste 8        | 1,93  | 159,72  | 18,32  | 707                                 | 81  |
| Teste 9        | 1,92  | 158,69  | 17,20  | 718                                 | 76  |
| Teste 10       | 1,85  | 158,04  | 17,77  | 721                                 | 74  |
| Teste 11       | 3,49  | 241,57  | 12,73  | 229                                 | 82  |
| Teste 12       | 3,54  | 241,47  | 13,57  | 173                                 | 83  |
| Teste 13       | 3,87  | 250,86  | 14,49  | 484                                 | 74  |
| Teste 14       | 4,10  | 257,23  | 15,41  | 693                                 | 70  |

**Tabela 8.7:** Ensaios - pinho B.

| <b>Ensaios</b> | <b>Caudal de<br/>alimentação<br/>(kg/h)</b> | <b>Temperatura<br/>dos gases de<br/>exaustão (°C)</b> | <b>O<sub>2</sub> (%<br/>volume<br/>seco)</b> | <b>CO (ppm<br/>volume<br/>seco)</b> | <b>NO<sub>x</sub> (ppm<br/>volume<br/>seco)</b> |
|----------------|---|---|--|-------------------------------------|---|
| Teste 1        | 1,13  | 99,18   | 19,16  | 3778                                | 87  |
| Teste 2        | 1,17  | 101,12  | 19,10  | 3288                                | 80  |
| Teste 3        | 1,195                                       | 100,25  | 19,23  | 3340                                | 77  |
| Teste 4        | 1,179                                       | 99,39   | 19,24  | 3800                                | 77  |
| Teste 5        | 1,82  | 149,54  | –  | –                                   | –   |
| Teste 6        | 1,87  | 151,54  | 17,66  | 1138                                | 110   |
| Teste 7        | 1,85  | 153,12  | 18,29  | 1139                                | 106   |
| Teste 8        | 1,87  | 152,68  | 18,28  | 1165                                | 106   |
| Teste 9        | 1,91  | 156,35  | 17,99  | 1143                                | 106   |
| Teste 10       | 3,71  | 252,30  | 13,75  | 588                                 | 94  |
| Teste 11       | 3,43  | 242,35  | 15,67  | 310                                 | 100   |
| Teste 12       | 3,56  | 233,42  | 15,15  | 363                                 | 98  |
| Teste 13       | 3,48  | 243,40  | 13,14  | 360                                 | 98  |

**Tabela 8.8:** Ensaios - giesta amarela.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Temperatura dos gases de exaustão (°C) | O <sub>2</sub> (% volume seco) | CO (ppm volume seco) | NO <sub>x</sub> (ppm volume seco) |
|----------|------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Teste 1  | 1,31                         | 106,95                                 | 19,28                          | 6256                 | 526                               |
| Teste 2  | 1,25                         | 102,36                                 | 18,98                          | 5988                 | 487                               |
| Teste 3  | 1,40                         | 120,95                                 | 19,39                          | 6176                 | 502                               |
| Teste 4  | 1,81                         | 145,06                                 | 18,33                          | 3593                 | 521                               |
| Teste 5  | 1,94                         | 153,02                                 | 17,60                          | 2784                 | 494                               |
| Teste 6  | 1,88                         | 177,08                                 | 17,61                          | 2608                 | 455                               |
| Teste 7  | 3,43                         | 226,95                                 | 16,10                          | 851                  | 364                               |
| Teste 8  | 3,35                         | 234,51                                 | 15,33                          | 831                  | 317                               |
| Teste 9  | 3,38                         | 236,67                                 | –                              | –                    | –                                 |
| Teste 10 | 3,15                         | 256,83                                 | 15,68                          | 889                  | 331                               |
| Teste 11 | 3,51                         | 274,03                                 | 14,56                          | 766                  | 287                               |

**Tabela 8.9:** Ensaios - mimosa.

| Ensaio   | Caudal de alimentação (kg/h) | Temperatura dos gases de exaustão (°C) | O <sub>2</sub> (% volume seco) | CO (ppm volume seco) | NO <sub>x</sub> (ppm volume seco) |
|----------|------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Teste 1  | 1,35                         | 117,60                                 | 19,28                          | 4916                 | 415                               |
| Teste 2  | –                            | –                                      | –                              | –                    | –                                 |
| Teste 3  | 1,36                         | 111,25                                 | 19,39                          | 4555                 | 382                               |
| Teste 4  | 1,30                         | 105,42                                 | 18,33                          | 4786                 | 362                               |
| Teste 5  | 1,61                         | 122,24                                 | 17,60                          | 3673                 | 381                               |
| Teste 6  | 2,13                         | 156,72                                 | 17,61                          | 2034                 | 390                               |
| Teste 7  | 1,78                         | 143,65                                 | 16,10                          | 2797                 | 390                               |
| Teste 8  | 1,74                         | 139,38                                 | 15,33                          | 2833                 | 393                               |
| Teste 9  | 3,39                         | 226,22                                 | –                              | 748                  | 256                               |
| Teste 10 | 3,74                         | 245,36                                 | 15,68                          | 1082                 | 217                               |
| Teste 11 | 3,47                         | 280,67                                 | 14,56                          | 607                  | 286                               |

**Tabela 8.10:** Ensaios - giesta branca.

| Ensaios | Caudal de alimentação (kg/h) | Temperatura dos gases de exaustão (°C) | O <sub>2</sub> (% volume seco) | CO (ppm volume seco) | NO <sub>x</sub> (ppm volume seco) |
|---------|------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Teste 1 | 1,35                         | 108,43                                 | 18,76                          | 4625                 | 482                               |
| Teste 2 | 1,18                         | 96,81                                  | 19,46                          | 6171                 | 499                               |
| Teste 3 | 1,39                         | 129,71                                 | 18,76                          | 4250                 | 550                               |
| Teste 4 | 1,76                         | 142,44                                 | 17,68                          | 2583                 | 506                               |
| Teste 5 | 1,93                         | 152,60                                 | 18,08                          | 2340                 | 534                               |
| Teste 6 | 2,98                         | 218,80                                 | 14,46                          | 483                  | 407                               |
| Teste 7 | 3,68                         | 244,84                                 | 12,93                          | 607                  | 311                               |

Analisando as tabelas anteriores verifica-se uma relação entre o caudal mássico de peletes e a temperatura dos gases de exaustão. Como o sucedido durante a fase de arranque, observou-se um aumento da temperatura dos gases de exaustão em função do aumento do caudal mássico de peletes, para os cinco combustíveis.

Um aumento do caudal mássico de peletes levou a uma diminuição da concentração de oxigénio nos gases de exaustão, uma vez que o aumento do caudal combustível não é acompanhado pelo aumento do caudal de ar.

Foi verificada uma diminuição das emissões de monóxido de carbono com o aumento do caudal mássico de peletes, sendo estas emissões, em média, muito superiores na potência “reduzida”.

Em relação às emissões de NO<sub>x</sub>, constatou-se existir uma grande influência do tipo de peletes utilizado.

### 8.2.2.1 Influência do tipo de peletes e do caudal mássico

A Figura 8.6 representa a influência do tipo de combustível e do seu caudal de alimentação no rendimento térmico da caldeira. Os valores apresentados representam a média dos ensaios realizados com cada um dos cinco combustíveis utilizados, nas três cargas operacionais. A totalidade dos ensaios foi apresentada nas tabelas anteriores.

Como se pode verificar, para as cinco espécies de peletes um aumento do caudal mássico de peletes traduz-se num aumento do rendimento térmico da caldeira. O maior rendimento foi obtido na potência “alta” (65% para um caudal mássico de peletes de pinho A de 4,1 kg/h) e o menor na potência “reduzida” (44% para um caudal mássico de peletes de pinho B de 1,20 kg/h).

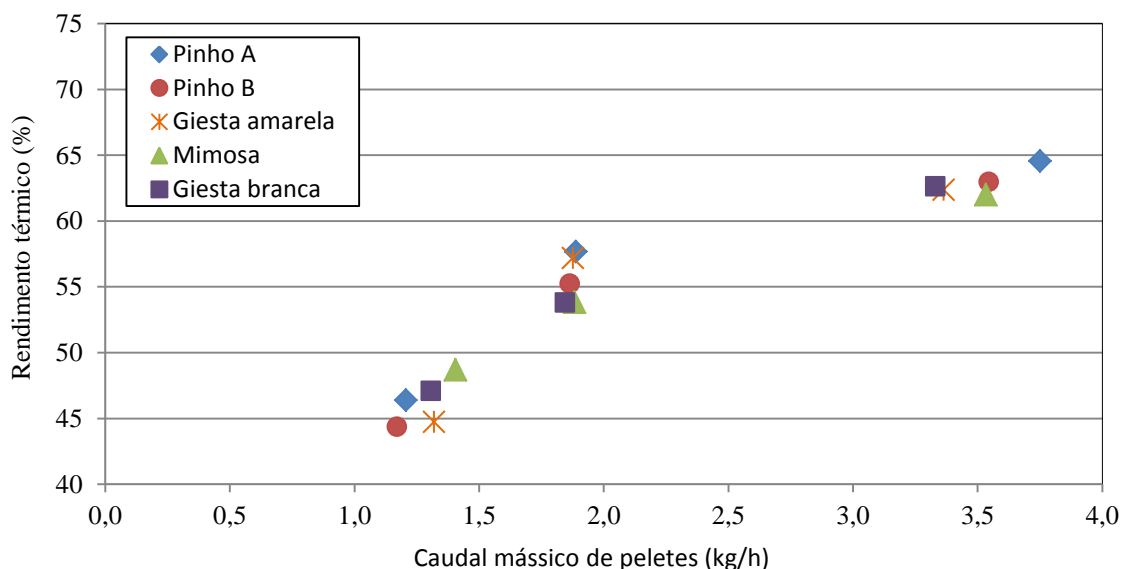
Para aproximadamente o mesmo caudal mássico de combustível, o rendimento térmico da caldeira é ligeiramente superior com os peletes de pinho A.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando o rendimento térmico da caldeira com os dois tipos de peletes de pinho, verifica-se que em média este é 4% superior com os peletes de pinho A.

Em relação aos peletes de giesta e mimosa verifica-se um comportamento semelhante em ambas as espécies, embora também com baixo rendimento.

Globalmente o andamento da curva do rendimento térmico da caldeira é muito semelhante para os cinco tipos de peletes.



**Figura 8.6:** Rendimento térmico em função do tipo de combustível e do caudal mássico de alimentação.

A norma Europeia prEN 14785 impõe limites inferiores de rendimento térmico para caldeiras domésticas alimentadas a peletes. Esses limites são estabelecidos para as potências “reduzida” e “alta” e são, respetivamente, 70 e 75%. Observando a figura anterior verifica-se que, independentemente do tipo de peletes ou da carga térmica utilizada, a caldeira a funcionar naquelas condições e para as medições efetuadas, não cumpre a norma referida.

Como exposto anteriormente o cálculo do rendimento térmico da caldeira foi efetuado usando o PCI dos peletes na base seca, e como tal foi necessário contabilizar as perdas térmicas associadas à humidade dos peletes. No caso de se utilizar o PCI “como recebido” obtém-se um rendimento superior, que é consequência da não correção da humidade inicial dos peletes. Com o objetivo de comparar o rendimento térmico da caldeira usando o PCI na base seca ou o PCI “como recebido”, foi novamente calculada a potência térmica fornecida à caldeira e o rendimento térmico usando o PCI “como recebido” e o PCI corrigido.

O facto de ser conhecida a humidade à qual o PCI “como recebido” foi calculado, permitiu efetuar uma correção deste valor através da seguinte equação:

$$PCI_{\text{corrigido}} = \frac{PCI_{\text{como recebido}} + \alpha h_{lv}}{(1-\alpha)} \quad (8.8)$$

em que  $\alpha$  representa a fração de água do combustível e  $h_{lv}$  representa a entalpia latente de vaporização da água (kJ/(kg.K)).

Os resultados encontram-se representados nas Tabelas 8.11, 8.12 e 8.13, juntamente com os resultados obtidos com os peletes de pinho, giesta e mimosa usando o PCI na base seca.

**Tabela 8.11:** Comparação dos resultados obtidos na carga “reduzida”.

|                                   | Pinho A <sup>(1)</sup> | Pinho B <sup>(1)</sup> | Pinho A <sup>(2)</sup> | Pinho B <sup>(2)</sup> | Pinho A <sup>(3)</sup> | Pinho B <sup>(3)</sup> | Giesta amarela <sup>(1)</sup> | Giesta branca <sup>(1)</sup> | Mimosa <sup>(1)</sup> |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$ (kW) | 6,3                    | 6,1                    | 5,9                    | 5,7                    | 6,3                    | 6,1                    | 6,8                           | 6,7                          | 7,3                   |
| $\eta_{\text{térmico}}$ (%)       | 46,4                   | 44,4                   | 49,8                   | 47,7                   | 46,4                   | 44,4                   | 44,8                          | 47,1                         | 50,1                  |

<sup>(1)</sup> Considerando o PCI na base seca

<sup>(2)</sup> Considerando o PCI “como recebido”

<sup>(3)</sup> Considerando o PCI corrigido

**Tabela 8.12:** Comparação dos resultados obtidos na carga “média”.

|                                   | Pinho A <sup>(1)</sup> | Pinho B <sup>(1)</sup> | Pinho A <sup>(2)</sup> | Pinho B <sup>(2)</sup> | Pinho A <sup>(3)</sup> | Pinho B <sup>(3)</sup> | Giesta amarela <sup>(1)</sup> | Giesta branca <sup>(1)</sup> | Mimosa <sup>(1)</sup> |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$ (kW) | 9,9                    | 9,7                    | 9,2                    | 9,1                    | 9,9                    | 9,7                    | 9,6                           | 9,5                          | 9,8                   |
| $\eta_{\text{térmico}}$ (%)       | 57,7                   | 55,2                   | 61,9                   | 59,3                   | 57,7                   | 55,2                   | 57,2                          | 53,8                         | 53,8                  |

**Tabela 8.13:** Comparação dos resultados obtidos na carga “alta”.

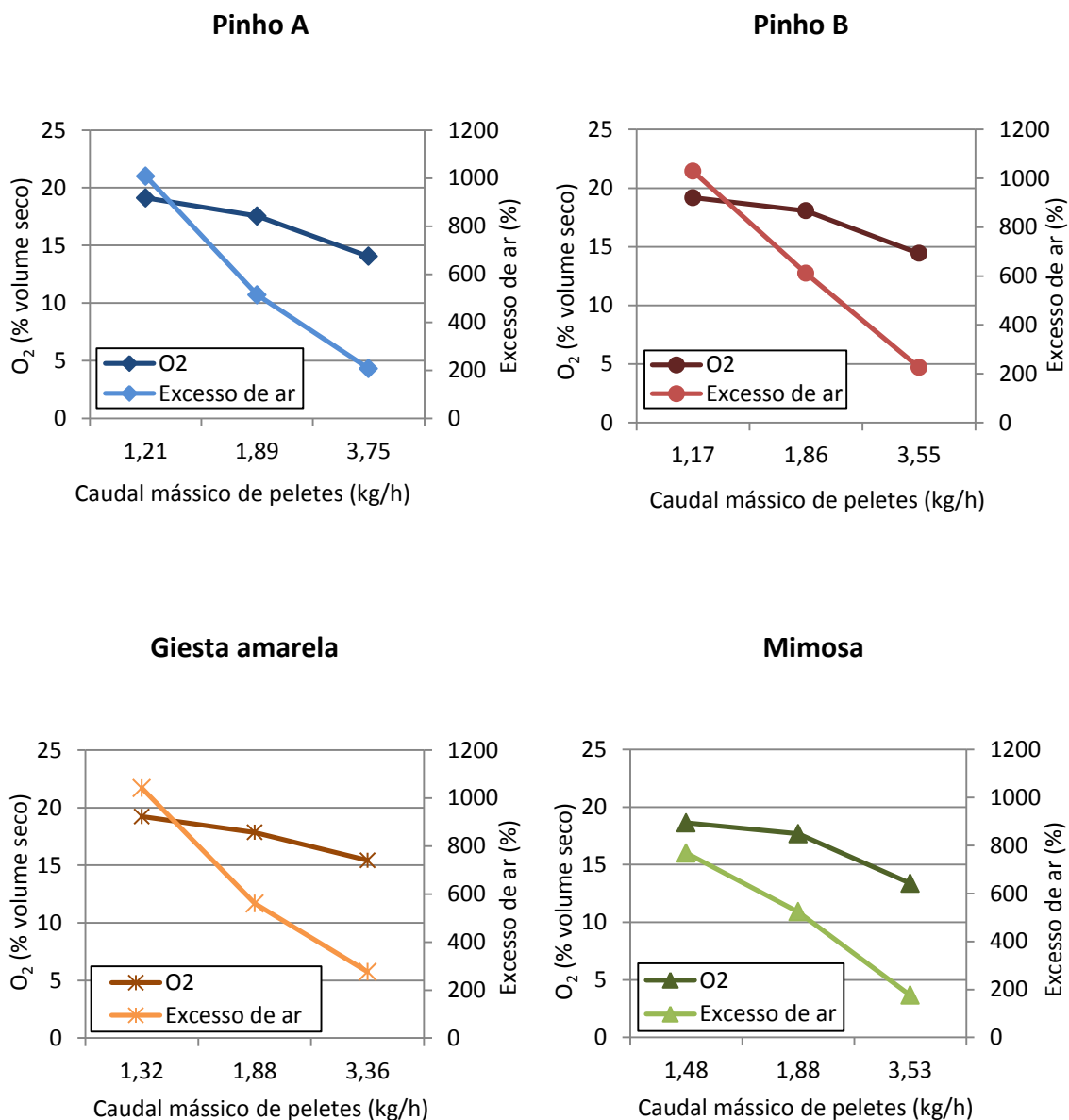
|                                   | Pinho A <sup>(1)</sup> | Pinho B <sup>(1)</sup> | Pinho A <sup>(2)</sup> | Pinho B <sup>(2)</sup> | Pinho A <sup>(3)</sup> | Pinho B <sup>(3)</sup> | Giesta amarela <sup>(1)</sup> | Giesta branca <sup>(1)</sup> | Mimosa <sup>(1)</sup> |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$ (kW) | 19,6                   | 18,5                   | 18,2                   | 17,2                   | 19,6                   | 18,5                   | 17,3                          | 17,1                         | 18,3                  |
| $\eta_{\text{térmico}}$ (%)       | 64,6                   | 62,8                   | 69,3                   | 67,4                   | 64,6                   | 62,8                   | 62,4                          | 62,1                         | 62,0                  |

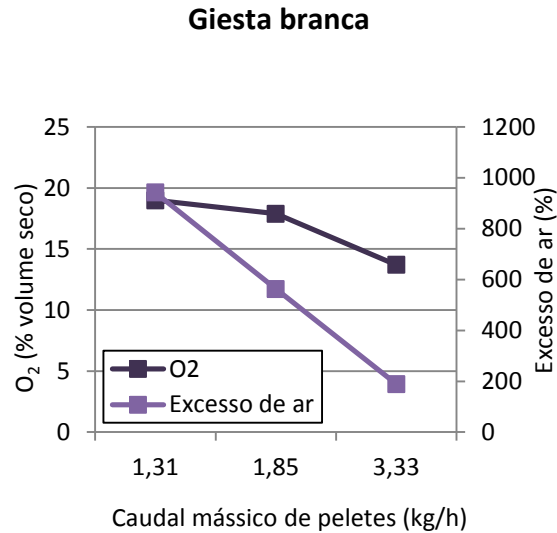
## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos resultados obtidos com os peletes de pinho, verifica-se que o rendimento térmico da caldeira é igual quando utilizado o PCI na base seca e o PCI corrigido e, um pouco superior quando utilizado o PCI “como recebido”. Isto porque, o teor de humidade dos peletes penaliza o rendimento térmico obtido; uma vez que, essa quantidade de água que o combustível contém irá sair na corrente de gases de exaustão como vapor de água e como tal foi necessário gastar energia térmica para a vaporizar.

### 8.2.2.2 Concentração de oxigénio e excesso de ar

A Figura 8.7 representa a concentração de oxigénio e o excesso de ar nos gases de exaustão em função do tipo de combustível e do caudal mássico.



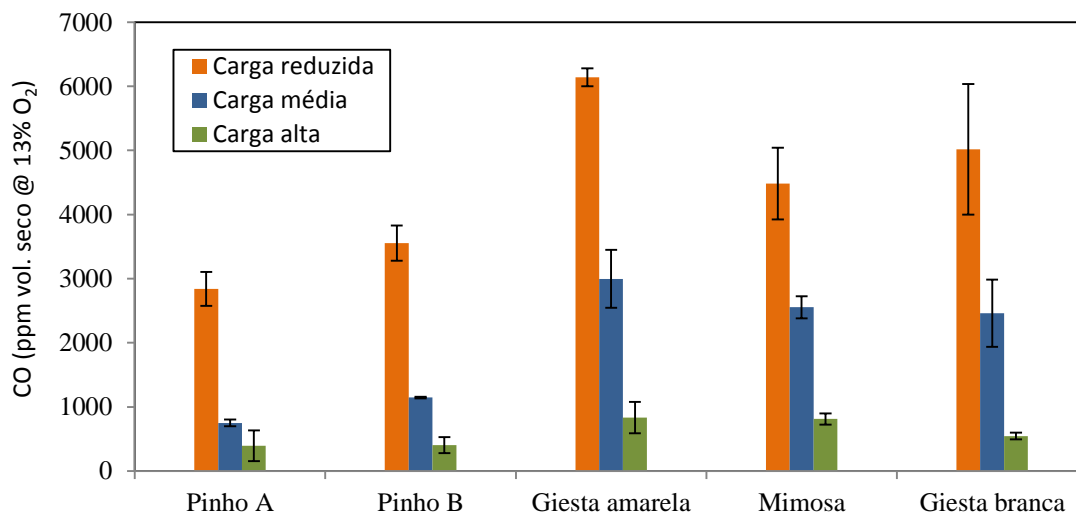


**Figura 8.7:** Concentração de oxigênio e excesso de ar em função do caudal mássico de combustível.

Observa-se uma diminuição da concentração de oxigênio em função do aumento do caudal mássico de peletes, o que se reflete também numa diminuição do excesso de ar. Apesar do ventilador principal da caldeira se encontrar “supostamente” regulado para as três potências operacionais usadas, a caldeira não faz um ajustamento automático do caudal de ar em função do caudal de combustível que está a ser queimado. Deste modo, um aumento do caudal mássico de peletes leva a uma diminuição da percentagem volumétrica de oxigênio nos gases de exaustão, pois a quantidade de ar que é introduzida na câmara de combustão é inferior na potência “alta” quando comparada com a potência “reduzida”, conservando todas as proporções. Assim, um aumento do caudal de alimentação necessita de uma maior quantidade de ar disponível para a combustão e, por essa razão, a quantidade de oxigênio diminuiu; conseqüentemente verifica-se também uma diminuição da sua concentração nos gases de exaustão. O excesso de ar, sendo dependente da concentração de oxigênio nos gases de exaustão, segue a mesma tendência, verificando-se o mesmo comportamento para os cinco tipos de peletes.

### 8.2.2.3 Influência do tipo de peletes e da carga térmica nas emissões

A Figura 8.8 representa a média das emissões de monóxido de carbono para os cinco tipos de peletes nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”.



**Figura 8.8:** Emissões de monóxido de carbono para os cinco tipos de peletes.

Analisando o gráfico anterior, referente às emissões de monóxido de carbono, verifica-se uma diminuição destas emissões com o aumento da carga térmica, ou seja, com o aumento do caudal mássico de peletes. Constatou-se que o tipo de peletes influencia as emissões de monóxido de carbono, sendo a giesta amarela a espécie que apresenta maiores emissões.

Comparando os peletes de pinho A com os peletes de pinho B verifica-se uma maior emissão de monóxido de carbono nos peletes de pinho B nas cargas “reduzida” e “média”, já na carga “alta” as emissões são semelhantes com ambos os peletes. Em média, as emissões de CO com os peletes de pinho B são 25, 53 e 3% superiores às emissões com os peletes de pinho A nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente. As emissões de CO são muito superiores no caso dos peletes de giesta e mímosa, quando comparadas com os peletes de pinho. Os peletes de giesta amarela emitem, em média 116, 299 e 111% mais CO do que os peletes de pinho A, respetivamente nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”. Em relação à mímosa, para as mesmas cargas, o aumento das emissões em relação ao pinho A é de 58, 241 e 106%, respetivamente. Por fim, no caso da giesta branca as emissões de CO são 77, 228 e 38% superiores, respetivamente para as cargas “reduzida”, “média” e “alta”, quando comparadas com as de pinho A.

Segundo vários autores (Johansson *et al.*, 2004; ; Verma *et al.*, 2012a; Roy *et al.*, 2013), a formação do CO é devida a diversos fatores, tais como: excesso de ar insuficiente, tempo de residência na câmara de combustão limitado, fraca mistura entre o combustível e o comburente ou baixa temperatura de combustão. As elevadas emissões de monóxido de carbono podem estar relacionadas com algum destes fatores em concreto ou com uma combinação entre eles. Por um lado, elevados excessos de ar resultam numa diminuição da temperatura da combustão e ocasionam a formação de monóxido de carbono, por outro, quando o excesso de ar é demasiado

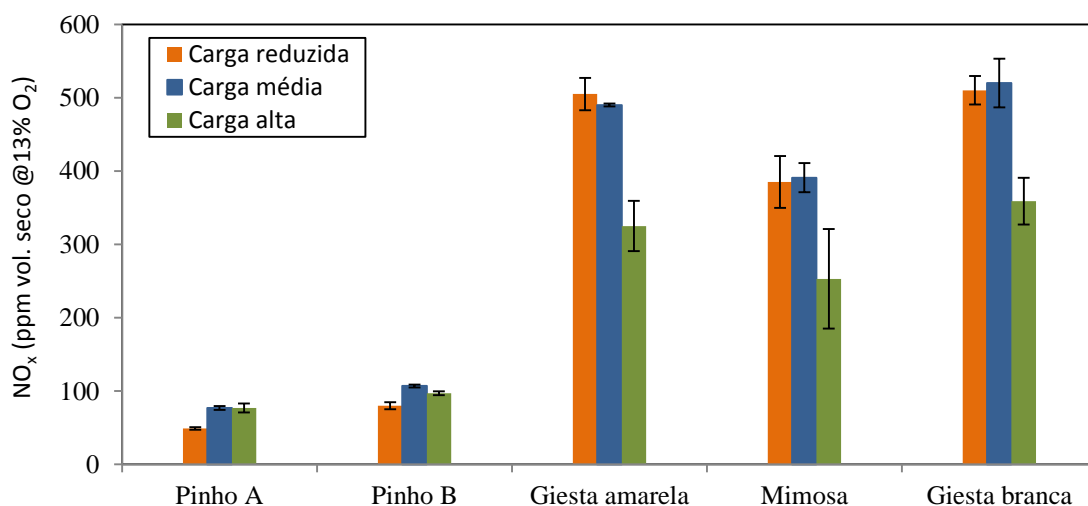
baixo, a mistura entre o combustível e o comburente é dificultada (Van Loo e Koppejan, 2008).

Para a carga “reduzida” os cinco peletes apresentam elevadas emissões de CO, bastante superiores aos obtidos para a carga “alta”, o que indica uma combustão muito pobre, como se verificou anteriormente no rendimento térmico da caldeira para esta carga. O elevado excesso de ar (Figura 8.7) proporcionou baixas temperaturas de combustão, levando a uma elevada formação de monóxido de carbono, como reportado em vários estudos (Dias *et al.*, 2004; González *et al.*, 2004; Verma *et al.*, 2011a; Verma *et al.*, 2012b).

No caso das cargas “média” e “alta”, apesar das emissões serem inferiores às da carga “reduzida”, o excesso de ar continuou a ser excessivo para a quantidade de combustível que estava a ser consumida.

A norma EN 14785 também estabelece limites no caso das emissões de monóxido de carbono para as cargas “reduzida” e “alta”. Estes limites são, respetivamente, 600 ppm (a 13% O<sub>2</sub>) e 400 ppm (a 13% O<sub>2</sub>) nas cargas “reduzida” e “alta”. Na carga “reduzida”, os cinco tipos de peletes não cumprem o limite máximo imposto, sendo as emissões de CO no caso da giesta amarela 10 vezes superiores ao limite máximo admitido. No caso da espécie com menores emissões, o pinho A, estas são 5 vezes superiores ao limite. Na carga “alta” ambos os peletes de pinho se encontram no limite de cumprimento das emissões máximas estabelecidas pela norma. No caso da giesta amarela e da mimosa as emissões são, em média, 2 vezes superiores ao limite máximo estabelecido pela norma, relativamente à giesta branca as emissões são 1,4 vezes superiores.

A Figura 8.9 ilustra a influência do tipo de peletes e da carga térmica nas emissões de óxidos de azoto.



**Figura 8.9:** Emissões de óxidos de azoto para os cinco tipos de peletes.

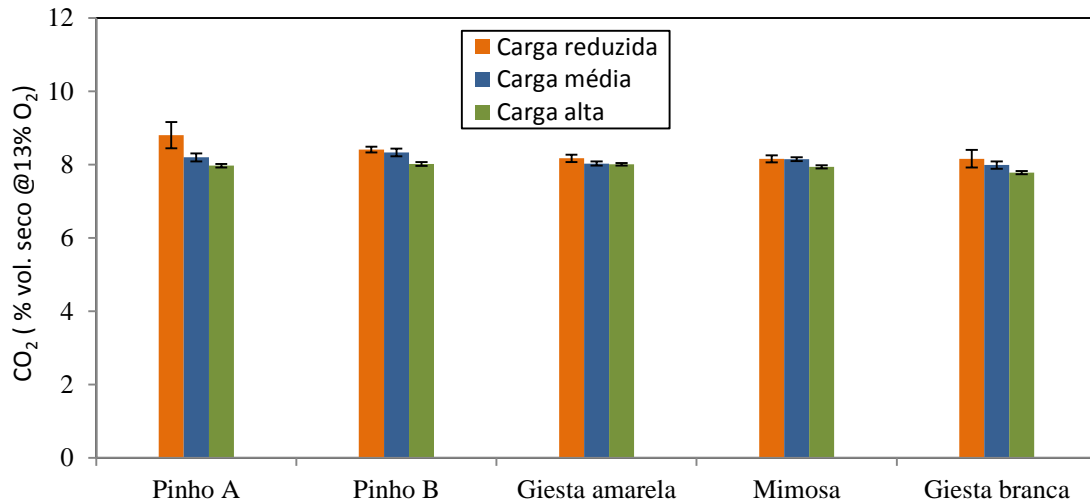
A formação de NO durante o processo de combustão é devida principalmente a três mecanismos: o NO-térmico – em que elevadas temperaturas permitem a dissociação do azoto atmosférico e do oxigénio, o NO-combustível – formado devido ao conteúdo de azoto presente no combustível, e um terceiro, denominado por NO-imediato, que se forma devido às rápidas reações na frente de chama e, que é frequente em chamas com defeito de ar (Khan *et al.*, 2009 ; Verma *et al.*, 2011b; Liu *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013).

Durante o processo de combustão, para que ocorra formação de NO por via do mecanismo térmico, são necessárias temperaturas de combustão na ordem dos 1300°C (Verma *et al.*, 2012a; Rabaçal *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2013); no caso de não se atingirem estes valores, a formação de NO é devida ao mecanismo do combustível. Tipicamente na combustão em caldeiras domésticas não são atingidas temperaturas tão elevadas, pelo que os diferentes níveis de emissões de NO<sub>x</sub> verificados nos cinco tipos de peletes são provavelmente consequência do conteúdo de azoto presente nas próprias espécies (Verma *et al.*, 2012a; Meiller *et al.*, 2013; Rabaçal *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2013).

Verificou-se, uma vez mais, um desempenho superior no caso dos peletes de pinho em comparação com os peletes de giesta e mimosa. Em ambos os peletes de pinho as emissões de NO<sub>x</sub> são inferiores na carga “reduzida” e ligeiramente superiores na carga “média”. Os peletes de pinho A e de pinho B apresentam respetivamente menos 36% e menos de 25% de emissões na carga “reduzida”, comparativamente ao funcionamento com a carga “média”.

Comparando as emissões de NO<sub>x</sub> nos peletes de pinho, verifica-se que, em média, as emissões são 63, 39 e 26% superiores no caso dos peletes de pinho B, nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente. Das restantes três espécies, a mimosa é a que apresenta menores emissões; estas emissões são, no entanto, 8, 5 e 3 vezes superiores, em média, às de pinho A, respetivamente nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”. Em relação à giesta amarela, as emissões de óxidos de azoto para as cargas “reduzida”, “média” e “alta” são, em média, 10, 6 e 4 vezes, respetivamente, mais elevadas do que com o pinho A. O mesmo comportamento foi verificado no caso da giesta branca e, novamente para as mesmas três cargas operacionais, as emissões de NO<sub>x</sub> foram em média 10, 7 e 5 vezes superiores às emissões de pinho A. Os peletes de pinho A foram os que apresentaram menores emissões de óxidos de azoto.

A Figura 8.10 ilustra a influência do tipo de peletes nas emissões de dióxido de carbono nas cargas térmicas “reduzida”, “média” e “alta”.

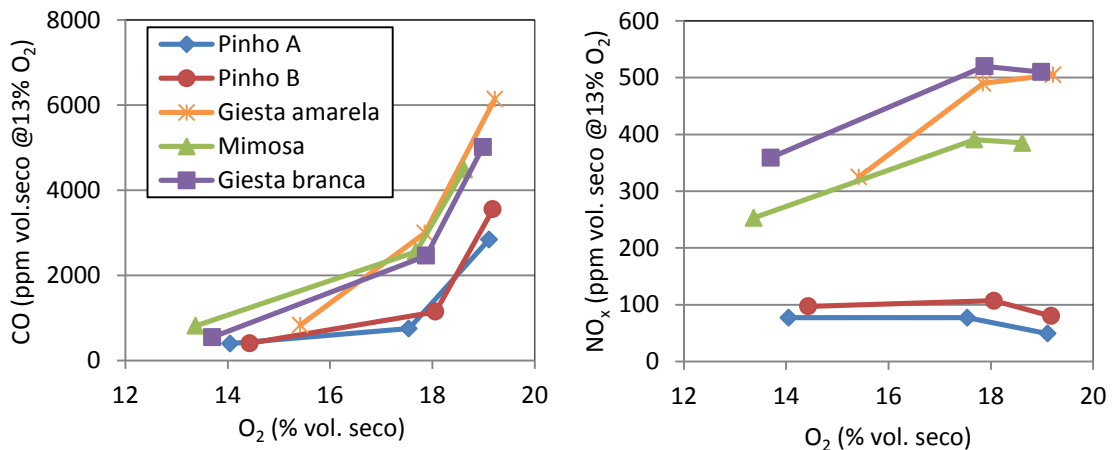


**Figura 8.10:** Emissões de dióxido de carbono para os cinco tipos de peletes.

No que diz respeito às emissões de dióxido de carbono verificou-se uma grande semelhança destas emissões nos cinco tipos de peletes nas diferentes cargas. Em média, as emissões de  $\text{CO}_2$  são ligeiramente superiores na carga “reduzida” e inferiores na carga “alta”.

#### 8.2.2.4 Influência da concentração de oxigénio nas emissões

A Figura 8.11 representa a influência da concentração de oxigénio nos gases de exaustão nas emissões de monóxido de carbono e de óxidos de azoto, para os cinco tipos de peletes.



**Figura 8.11:** Emissões de CO e  $\text{NO}_x$  em função da concentração de oxigénio.

Analisando o gráfico anterior, verifica-se um aumento das emissões de monóxido de carbono em função do aumento da concentração de oxigénio nos gases de exaustão. Este aumento da concentração de oxigénio é acompanhado por uma

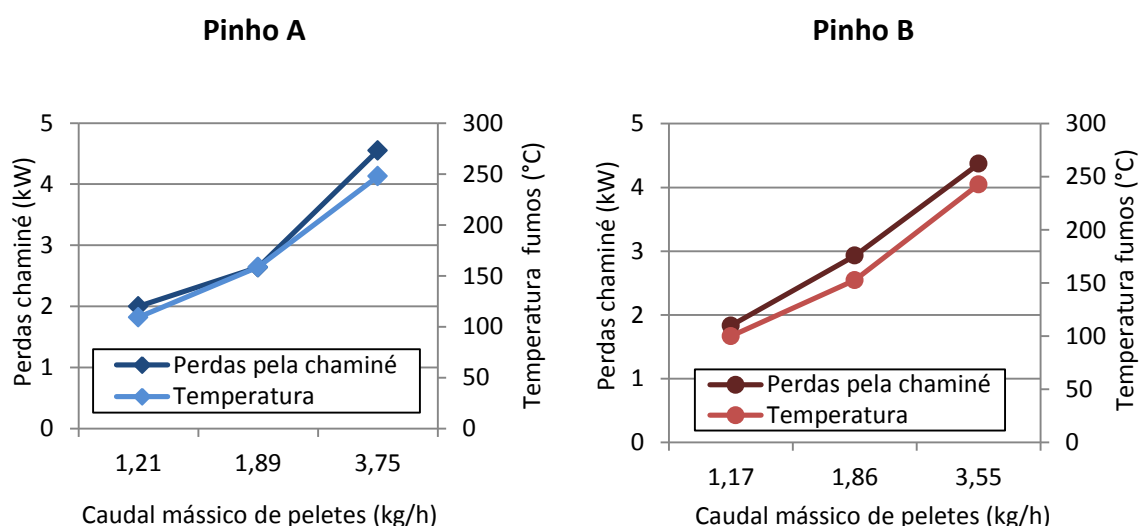
diminuição do caudal mássico de combustível. Como foi referido anteriormente, um excesso de ar elevado diminui a temperatura de combustão, levando a uma maior formação de CO.

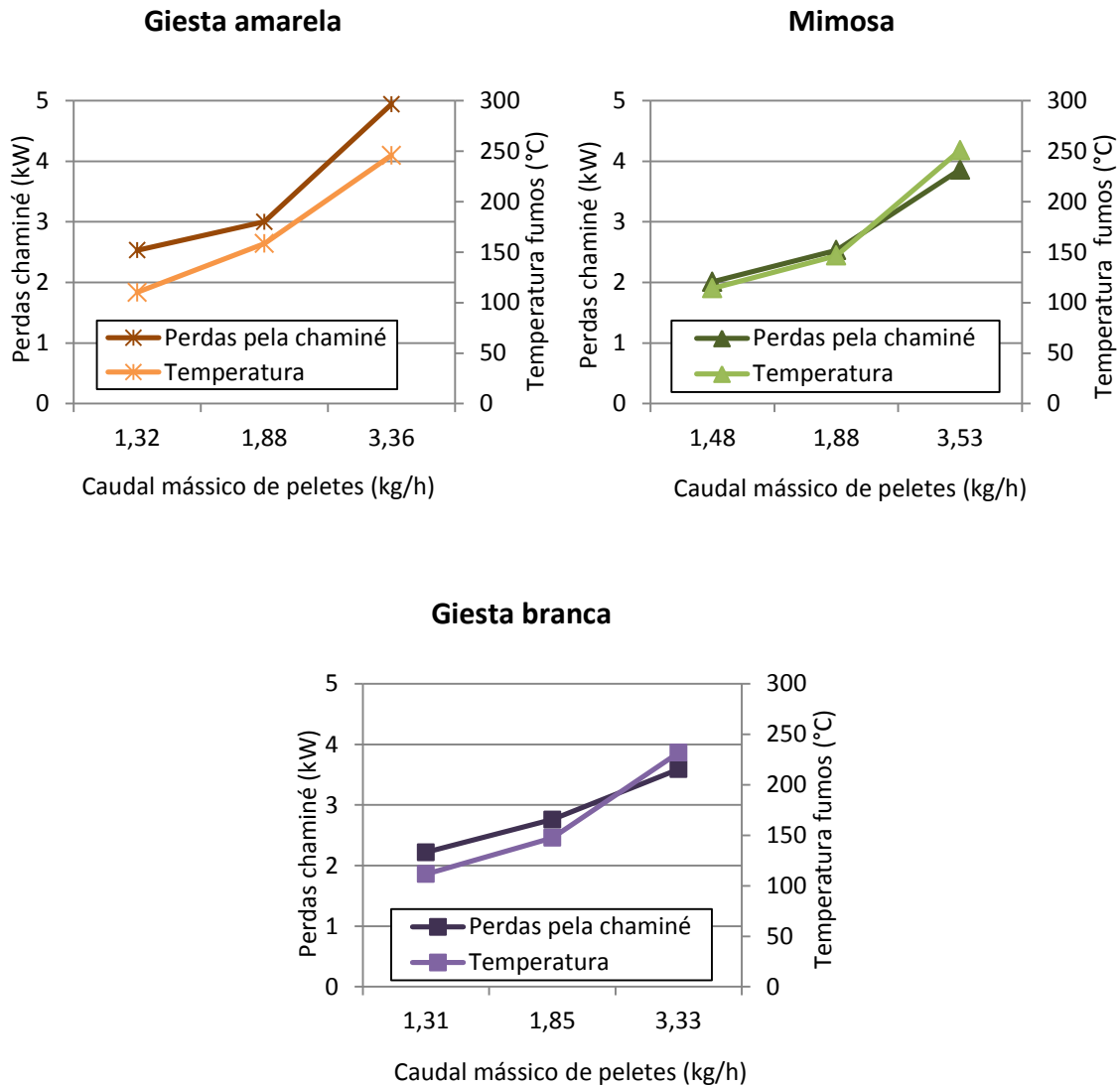
Em relação às emissões de  $\text{NO}_x$  verifica-se que, para o caso dos peletes de pinho, estas emissões não são muito dependentes da concentração de oxigénio, visto serem semelhantes nas cargas “alta” e “média” e ligeiramente inferiores na carga “reduzida”.

No caso dos peletes de giesta e mimosa, observou-se uma grande diminuição das emissões de óxidos de azoto em função da diminuição da concentração de oxigénio nos gases de exaustão. Como provavelmente o NO que se formou foi devido ao mecanismo do NO-combustível e, de acordo com Karlström *et al.* (2013) a concentração de NO é diretamente proporcional à concentração de  $\text{O}_2$ , ou seja como na carga “alta” a concentração de  $\text{O}_2$  era inferior, o NO formado também foi inferior. Os mesmos autores constataram que aumentando a temperatura a que as partículas queimam, o que acontece quando se aumenta a carga térmica da caldeira e se reduz o excesso de ar, há um aumento da redução do NO à superfície das partículas, justificando-se assim a diminuição das emissões de  $\text{NO}_x$  com o aumento da carga térmica.

#### 8.2.2.5 Influência do caudal mássico de peletes nas perdas térmicas pela chaminé e na temperatura dos gases de exaustão

A Figura 8.12 representa as perdas de energia pela chaminé e a temperatura dos gases de exaustão em função do caudal mássico de combustível.





**Figura 8.12:** Perdas térmicas pela chaminé e temperatura dos gases de exaustão em função do tipo de combustível e do caudal mássico de peletes.

Analisando os gráficos anteriores, verifica-se que o aumento do caudal mássico de peletes é acompanhado por um aumento das perdas térmicas pela chaminé devido ao aumento da temperatura dos gases de exaustão. O aumento do caudal mássico de peletes leva a uma diminuição do excesso de ar e, por isso, conduz a um aumento da temperatura dos gases de exaustão. Em média, as perdas térmicas pela chaminé são inferiores no caso do pinho e superiores no caso da giesta amarela.

#### 8.2.2.6 Análise das perdas térmicas na caldeira

Como referido anteriormente, apenas foram determinadas as perdas térmicas pela chaminé. Relativamente às perdas térmicas por convecção e radiação, o seu valor foi estimado e admitiu-se ser igual ao valor necessário para o fecho do balanço térmico. As Tabelas 8.14, 8.15 e 8.16 apresentam os valores médios para as perdas térmicas pela chaminé e por convecção e radiação, para as três cargas testadas.

**Tabela 8.14:** Análise das perdas térmicas – carga “reduzida”.

|                            | Pinho A | Pinho B | Giesta amarela | Giesta branca | Mimosa |
|----------------------------|---------|---------|----------------|---------------|--------|
| $\dot{Q}_{fornecida}$ (kW) | 6,29    | 6,11    | 6,78           | 6,71          | 7,29   |
| $\eta_{térmico}$ (%)       | 46,4    | 44,4    | 44,7           | 47,1          | 48,7   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (kW)   | 2,00    | 1,83    | 2,53           | 2,22          | 2,01   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (%)    | 31,8    | 29,95   | 37,3           | 33,1          | 27,57  |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (kW)  | 1,37    | 1,57    | 1,22           | 1,32          | 1,73   |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (%)   | 21,8    | 25,7    | 17,9           | 19,7          | 23,7   |

**Tabela 8.15:** Análise das perdas térmicas – carga “média”.

|                            | Pinho A | Pinho B | Giesta amarela | Giesta branca | Mimosa |
|----------------------------|---------|---------|----------------|---------------|--------|
| $\dot{Q}_{fornecida}$ (kW) | 9,86    | 9,73    | 9,64           | 9,48          | 9,76   |
| $\eta_{térmico}$ (%)       | 57,7    | 55,2    | 57,2           | 53,8          | 53,8   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (kW)   | 2,64    | 2,93    | 3,00           | 2,76          | 2,53   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (%)    | 26,8    | 30,1    | 31,1           | 29,1          | 25,9   |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (kW)  | 1,54    | 1,46    | 1,13           | 1,61          | 1,99   |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (%)   | 15,6    | 15,0    | 11,70          | 16,9          | 20,4   |

**Tabela 8.16:** Análise das perdas térmicas – carga “alta”.

|                            | Pinho A | Pinho B | Giesta amarela | Giesta branca | Mimosa |
|----------------------------|---------|---------|----------------|---------------|--------|
| $\dot{Q}_{fornecida}$ (kW) | 19,59   | 18,50   | 17,26          | 17,11         | 18,32  |
| $\eta_{térmico}$ (%)       | 64,6    | 62,8    | 61,9           | 62,1          | 62,0   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (kW)   | 4,55    | 4,37    | 4,97           | 3,59          | 3,86   |
| $\dot{Q}_{chaminé}$ (%)    | 23,2    | 23,6    | 28,8           | 20,9          | 21,1   |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (kW)  | 2,39    | 2,51    | 1,62           | 2,89          | 3,10   |
| $\dot{Q}_{conv/rad}$ (%)   | 12,2    | 13,6    | 9,4            | 16,9          | 16,9   |

As perdas térmicas pela chaminé representam uma elevada fração da potência térmica fornecida, sendo este valor superior no caso da carga “reduzida” e inferior no caso da carga “alta”. Verifica-se pela análise das tabelas anteriores que, em média, as perdas térmicas pela chaminé são inferiores no caso do pinho e superiores no caso da giesta amarela. Por exemplo, para o caso do pinho A, as perdas térmicas pela chaminé representam aproximadamente 32, 27 e 23% da potência térmica útil nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente. Para o caso da giesta amarela, para as mesmas cargas, estas perdas representam aproximadamente 37, 31 e 29% da potência térmica útil, respetivamente.

Relativamente às perdas térmicas por convecção e radiação para a envolvente, constatou-se que estas perdas são mais elevadas na condição de potência “reduzida” e um pouco mais baixas na condição de potência “alta”. Contudo, estas perdas são mais elevadas do que seria de esperar, pois raramente são superiores a 10%. Para o caso do pinho A, as perdas por convecção e radiação representam aproximadamente 22, 16 e 12% da potência térmica útil nas cargas “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente.

O baixo rendimento térmico da caldeira para as três cargas térmicas testadas é justificado pelas elevadas perdas térmicas que esta apresenta. O facto da caldeira não se encontrar montada com as tampas laterais e traseira, possibilitou um aumento das perdas térmicas por convecção e radiação para o ambiente. Certamente também é perdida, para a envolvente, alguma da energia térmica do circuito da água que foi aquecida. Deste modo existindo um isolamento na caldeira o rendimento térmico da mesma será superior, uma vez que este é calculado com base no calor transferido para água, que logicamente irá aumentar.

#### **8.2.2.7 Ensaios de pinho e giesta branca com menor excesso de ar**

Para as três potências (“reduzida”, “média” e “alta”) o caudal mássico de ar utilizado, pré-definido pelo fabricante, provou ser excessivo, levando a um baixo rendimento da caldeira. Deste modo, foram realizados novos ensaios apenas para o pinho A e para a giesta branca, com o objetivo de diminuir a quantidade de ar para um determinado caudal de combustível. Em alguns ensaios esse ajustamento não foi totalmente conseguido, pelo que os resultados na carga “alta” não foram os melhores. A diminuição do excesso de ar foi obtida recorrendo à alteração dos parâmetros operacionais do ventilador principal da caldeira.

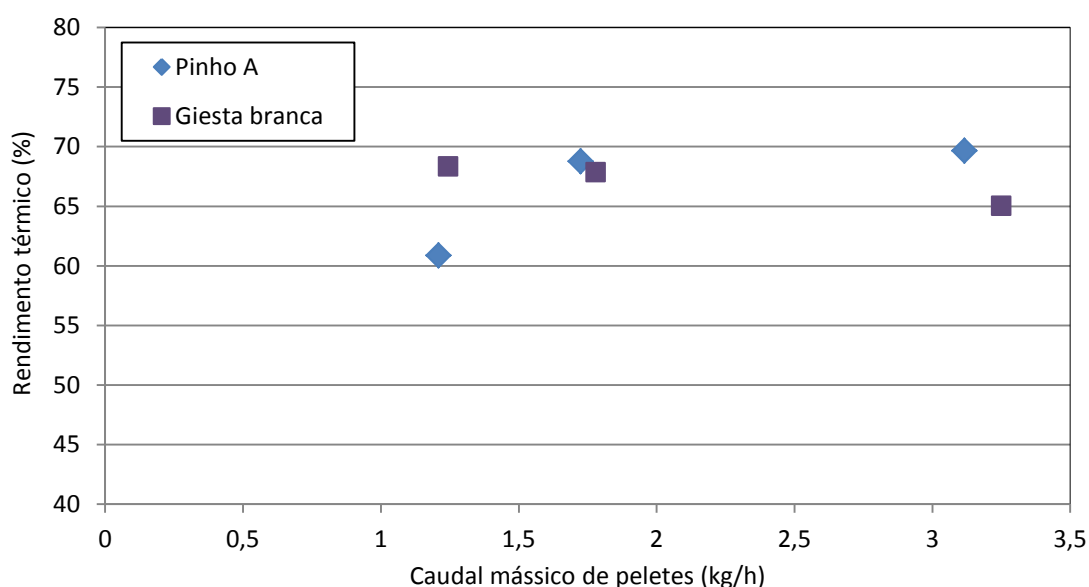
A Tabela 8.14 representa todos os ensaios realizados para o pinho A e para a giesta branca nesta segunda série, que teve como objetivo analisar a influência da diminuição do excesso de ar no desempenho da caldeira. Apenas foram realizados quatro ensaios de giesta branca devido à pequena quantidade de peletes que restavam desta espécie.

**Tabela 8.17:** Ensaios – pinho A e giesta branca.

|                          | Caudal de<br>alimentação<br>(kg/h) | Temperatura<br>dos gases de<br>exaustão (°C) | O <sub>2</sub><br>(%) | Excesso<br>de ar<br>(%) | Perdas<br>chaminé<br>(kW) | Rendimento<br>térmico (%) |
|--------------------------|------------------------------------|--|-----------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Pinho<br/>A</b>       | 1,19                               | 103,75                                       | 16,80                 | 396                     | 0,88                      | 56,99                     |
|                          | 1,23                               | 86,48  | 17,12                 | 438                     | 0,75                      | 64,74                     |
|                          | 1,60                               | 137,09                                       | 14,54                 | 224                     | 1,07                      | 68,27                     |
|                          | 1,85                               | 104,87                                       | 14,82                 | 238                     | 0,95                      | 69,26                     |
|                          | 2,91                               | 231,85                                       | 14,29                 | 211                     | 3,35                      | 73,18                     |
|                          | 2,93                               | 237,0  | 12,10                 | 135                     | 2,70                      | 72,83                     |
|                          | 3,09                               | 247,76                                       | 14,70                 | 232                     | 3,99                      | 64,14                     |
|                          | 3,22                               | 257,95                                       | 13,26                 | 170                     | 3,53                      | 68,63                     |
|                          | 3,23                               | 242,99                                       | –                     | –                       | –                         | 70,24                     |
|                          | 3,32                               | 268,42                                       | 13,92                 | 195                     | 4,14                      | 68,91                     |
| <b>Giesta<br/>branca</b> | 1,15                               | 118,19                                       | 17,40                 | 475                     | 1,13                      | 71,56                     |
|                          | 1,34                               | 110,98                                       | 14,81                 | 236                     | 0,76                      | 65,11                     |
|                          | 1,78                               | 137,65                                       | 13,97                 | 196                     | 1,13                      | 67,84                     |
|                          | 3,25                               | 262,98                                       | 15,02                 | 248                     | 4,75                      | 67,94                     |

Analisando a tabela anterior, pode-se concluir que o primeiro objetivo desta segunda série de ensaios foi cumprido, ou seja, verificou-se uma redução da concentração de oxigénio nos gases de exaustão em relação à primeira série de ensaios, com a consequente diminuição do excesso de ar. Em alguns ensaios as perdas térmicas pela chaminé também sofreram uma redução significativa.

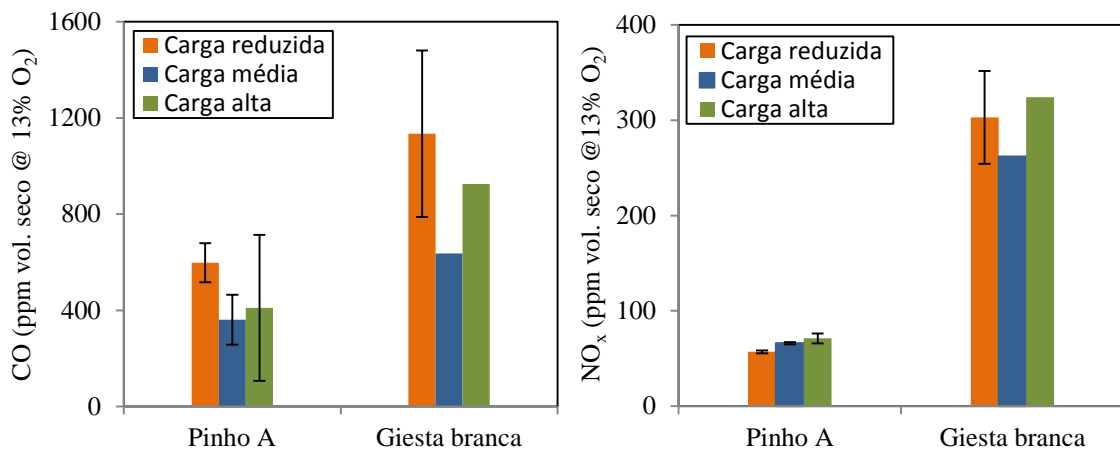
A Figura 8.13 representa o rendimento térmico da caldeira com os peletes de pinho A e giesta branca em função do seu caudal mássico de alimentação. Os resultados representam a média de todos os ensaios realizados.

**Figura 8.13:** Rendimento térmico em função do caudal mássico de peletes de pinho A e giesta branca.

Para ambos os combustíveis verifica-se um aumento substancial do rendimento térmico da caldeira, em especial nas potências “reduzida” e “média”. Na potência “alta” o aumento de rendimento não foi tão elevado pois a redução do excesso de ar não foi adequada. No início dos ensaios de potência “alta”, foi definida uma redução do excesso de ar tendo em conta os caudais de peletes dos ensaios anteriores, contudo, os caudais de alimentação obtidos foram inferiores e, desta forma deveriam ter sido utilizados excessos de ar também inferiores.

Em média, para o pinho A o rendimento térmico da caldeira teve um aumento de aproximadamente 31, 19 e 8% nas potências “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente. Em relação à giesta branca, o aumento de rendimento conseguido foi de 45, 26 e 4% para as potências “reduzida”, “média” e “alta”, respetivamente; ficando a ideia, não testada, de que seria possível aumentar ainda mais o rendimento da caldeira se fossem realizados melhores ajustamentos do excesso de ar ao caudal de combustível queimado.

Em relação às emissões resultantes desta nova série de ensaios, a Figura 8.14 apresenta as emissões médias de monóxido de carbono e de óxidos de azoto para os testes realizados com os peletes de pinho A e giesta branca.



**Figura 8.14:** Emissões de CO e NO<sub>x</sub> nas cargas “reduzida”, “média” e “alta” para o pinho A e para a giesta branca.

Analisando aos gráficos anteriores, verifica-se uma redução evidente nas emissões de monóxido de carbono, em concreto nas cargas “reduzida” e “média”. Em contrapartida, as emissões na carga “alta” foram superiores, devido ao ajustamento inapropriado do caudal mássico de ar.

Em média, para o pinho as emissões de monóxido de carbono sofreram uma redução de 79 e 52% em relação à primeira série de ensaios para as cargas “reduzida” e “média”, respetivamente. No caso da giesta branca essa diminuição foi de 77 e 74% respetivamente, para as mesmas cargas.

Relativamente aos óxidos de azoto, também se verificou uma diminuição das suas emissões para ambos os tipos de peletes. Esta diminuição poderá ter sido

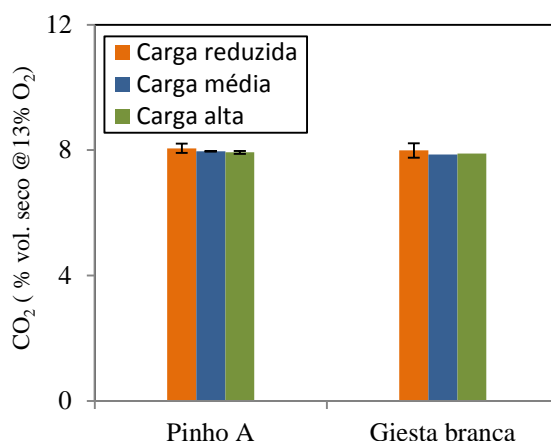
## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

consequência da elevada redução do excesso de ar. Uma vez mais, as emissões de  $\text{NO}_x$  são superiores na giesta branca, devido ao facto de os peletes de giesta apresentarem maior conteúdo de azoto e o NO estar a ser formado principalmente pela via do NO-combustível (Verma *et al.*, 2012; Rabaçal *et al.*, 2013; Meiller *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2013).

Nestes ensaios as emissões de  $\text{NO}_x$  foram superiores na carga “alta”, ao contrário do sucedido com a primeira série de ensaios. Esta diferença pode ser devida à formação de NO através do mecanismo térmico, ou seja, como o excesso de ar foi reduzido, a temperatura de chama foi superior, o que levou a uma maior formação de NO na carga “alta”.

Relativamente às emissões de dióxido de carbono, estas são apresentadas na Figura 8.15.

Em média, as emissões de  $\text{CO}_2$  são semelhantes com os dois tipos de peletes nas três cargas operacionais. Comparando com a primeira série de ensaios, constata-se uma grande similaridade entre estas emissões.



**Figura 8.15:** Emissões de  $\text{CO}_2$  nas cargas “reduzida”, “média” e “alta” para o pinho A e para a giesta branca.

## 9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi estudada a influência do uso de espécies infestantes, nomeadamente do *Cytisus scoparius*, da *Acacia dealbata* e do *Cytisus multiflorus*, como combustível numa caldeira doméstica a peletes. Os resultados obtidos com estas espécies foram comparados com os resultados anteriormente conseguidos com peletes comerciais de *Pinus pinaster*. Procurou-se avaliar o rendimento térmico da caldeira e as emissões resultantes da queima dos cinco tipos de peletes, para isso, foram realizados ensaios em três cargas térmicas distintas, pré-definidas pelo fabricante da caldeira.

Da análise da matéria-prima comercial concluiu-se que ambas as empresas utilizam matéria-prima com baixo teor de humidade e um diâmetro médio de partícula muito idêntico, na ordem dos 350 µm.

O processo que levou à obtenção dos peletes das espécies *Cytisus* e *Acacia* revelou ser moroso, devido sobretudo às etapas envolvidas e à quantidade de peletes necessários para os ensaios de combustão. A recolha e secagem realizaram-se separadamente para cada espécie e, como o previsto, as secagens de verão em estufa solar apresentaram uma maior taxa de secagem. Relativamente ao destroçamento, verificou-se que a utilização do moinho industrial de martelos permite uma minimização do tempo utilizado para o processo quando comparado com o moinho laboratorial.

Durante o processo de peletização constatou-se que a mimosa foi a espécie que revelou maior dificuldade na sua compactação. No que diz respeito aos ensaios de qualidade efetuados aos peletes comerciais e aos peletes produzidos, verificou-se que relativamente ao teor de humidade e dimensões, todos eles cumpriram a norma EN 14961-2. Em relação à massa volúmica, à quantidade de finos e à durabilidade mecânica constatou-se que os peletes de pinho foram os que apresentaram maior massa volúmica, menor quantidade de finos e maior durabilidade, já os peletes de mimosa foram os que apresentaram os piores resultados. Nos peletes produzidos de giesta e mimosa, a durabilidade mecânica determinada foi inferior ao limite estabelecido pela norma EN 14961-2. Comparando as duas espécies de giesta, não foram observadas diferenças significativas na durabilidade mecânica entre ambas.

A influência dos diferentes tipos de peletes no desempenho da caldeira foi avaliada na fase de arranque e em condições de regime permanente. Observou-se que durante a fase de arranque eram atingidas elevadas emissões de poluentes, sobretudo na carga “alta”. Nos ensaios realizados para esta carga com os peletes de pinho B, giesta amarela, mimosa e giesta branca não foi possível a medição das concentrações de monóxido de carbono devido a estas serem extremamente elevadas para o analisador disponível.

Observou-se durante a fase de regime permanente que um aumento do caudal mássico de peletes levava a um aumento do rendimento térmico da caldeira. O melhor

rendimento foi obtido na carga “alta” com os peletes de pinho A e, o menor na carga “reduzida”, com os peletes de pinho B. Em média, para o mesmo caudal mássico de combustível, o rendimento térmico da caldeira foi ligeiramente superior com os peletes de pinho A. Contudo, não foi verificada uma influência significativa do tipo de peletes no rendimento térmico da caldeira. Relativamente aos ensaios realizados com os peletes de giesta e mimosa, verificou-se um comportamento semelhante entre ambos. Da análise aos ensaios realizados concluiu-se que independentemente do tipo de peletes ou da carga térmica utilizada, o rendimento térmico da caldeira não cumpriu a norma EN 14785.

Foi observado um efeito significativo do caudal mássico de peletes na concentração de oxigénio nos gases de exaustão. Um aumento do caudal mássico de peletes traduziu-se numa diminuição da concentração de oxigénio nos gases de exaustão, isto porque, a caldeira não faz um ajustamento automático do caudal de ar em função do caudal de combustível que está a ser queimado. Quando advém um aumento do caudal de peletes é necessário uma maior quantidade de oxigénio disponível para a oxidação do combustível, no caso de essa quantidade ser aproximadamente constante irá ser consumido mais oxigénio e sua concentração nos gases de exaustão será inferior.

No que respeita as emissões de poluentes, constatou-se que o tipo de peletes e a carga térmica têm um efeito significativo nas emissões de monóxido de carbono. Verificou-se uma diminuição das emissões de CO em função do aumento do caudal mássico de alimentação. Nas três cargas térmicas testadas, as concentrações de CO medidas foram sempre inferiores no caso dos peletes de pinho A. Em contrapartida, os peletes de giesta amarela foram os que apresentaram maiores emissões de monóxido de carbono nas três cargas térmicas. Para os cinco tipos de peletes as emissões de CO medidas na carga “reduzida” foram extremamente elevadas, indicando uma combustão muito pobre. O elevado excesso de ar utilizado ocasionou baixas temperaturas de combustão, o que proporcionou uma elevada formação de CO. Comparando as emissões de CO com os dois tipos de peletes de pinho, verificou-se que as emissões deste poluente foram ligeiramente superiores no caso dos peletes de pinho B nas cargas “reduzida” e “média”. Relativamente aos peletes de giesta e mimosa, as emissões de CO resultantes da sua combustão foram substancialmente superiores às emissões de CO resultantes da combustão dos peletes de pinho A. No que respeita o cumprimento da norma EN 14785, uma vez mais, na carga “reduzida” nenhum dos cinco tipos de peletes cumpriu os limites, no caso da carga “alta” ambos os peletes de pinho encontravam-se no limite do cumprimento da referida norma.

Da análise das emissões de NO<sub>x</sub> concluiu-se que o tipo de peletes detinha uma grande influência, sendo os peletes de pinho os que apresentaram menores emissões deste poluente. Relativamente à giesta amarela e branca as emissões de NO<sub>x</sub> foram análogas, já as emissões de NO<sub>x</sub> resultantes da queima de peletes de mimosa foram ligeiramente inferiores. Concluiu-se da análise dos resultados, que o NO é formado

sobretudo pela via do NO-combustível, isto porque, por um lado os peletes de pinho apresentam menores emissões de  $\text{NO}_x$  quando comparados com os peletes de giesta e mimosa, por outro lado verifica-se uma diminuição de  $\text{NO}_x$  com a diminuição do excesso de ar. No caso de se ter formado NO por via do mecanismo térmico isso não teria acontecido, pois um menor excesso de ar levaria a maiores temperaturas e logo a maiores emissões de  $\text{NO}_x$ .

A determinação das perdas térmicas pela chaminé, permitiu concluir que estas representam uma elevada parcela da potência térmica libertada durante a combustão dos peletes. O pior caso é o da giesta amarela, em que as perdas térmicas representaram, em média, 37% da potência térmica útil na carga “reduzida”.

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais concluiu-se que o excesso de ar utilizado na combustão era demasiado elevado, traduzindo-se numa combustão pobre. De modo a apoiar este desígnio, foram realizados novos ensaios para o pinho A e para a giesta branca com menor excesso de ar. Nesta segunda série de ensaios foi possível concluir que, de facto, a diminuição do excesso de ar permitiu uma melhoria das condições de combustão, traduzindo-se num aumento do desempenho da caldeira. Em comparação com os ensaios realizados nas condições de excesso de ar definidas pelo fabricante, esta segunda série permitiu um aumento substancial do rendimento térmico da caldeira, particularmente nas cargas “reduzida” e “média”. O aumento de rendimento mais acentuado foi verificado para o caso da giesta branca na carga “reduzida”, que relativamente à primeira série de ensaios, teve um incremento percentual de 45%. Foi possível também, através da diminuição do excesso de ar diminuir as perdas térmicas pela chaminé. No caso das emissões de poluentes, observou-se uma redução significativa das emissões de monóxido de carbono em ambas as espécies nas cargas “reduzida” e “média”. Na carga “alta”, pelo contrário houve um aumento das emissões de monóxido de carbono, devido à falha do ajustamento do caudal de ar em função do caudal de combustível que estava a ser queimado. As emissões de  $\text{NO}_x$  também sofreram uma redução, sobretudo nos ensaios de giesta branca, esta redução poderá ter sido devida ao menor excesso de ar utilizado e por consequente menor concentração local de oxigénio, que afeta as emissões dos  $\text{NO}_x$  quando o mecanismo dominante é o NO-combustível. Uma vez mais, as emissões de  $\text{NO}_x$  foram superiores no caso da giesta, devido ao conteúdo de azoto ser superior nesta espécie e, a formação de NO ser principalmente por via do NO-combustível.

Com base nos resultados obtidos durante este trabalho serão seguidamente apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

De modo a ser realizado um aproveitamento da energia térmica contida nos gases de exaustão, sugere-se para trabalho futuro o dimensionamento e teste de um permutador para pré-aquecimento da água de entrada da caldeira por recuperação de condensados nos fumos.

As emissões de partículas resultantes dos processos de combustão da biomassa constituem uma preocupação ambiental e de saúde humana, pelo que será importante

o estudo dos processos de formação e emissão de partículas resultantes da queima dos peletes.

Para permitir um fornecimento de ar correto e uma boa mistura entre os gases de combustão e o ar, sugere-se a modificação da caldeira utilizada no presente trabalho de forma a possibilitar a injeção de ar secundário na zona superior da câmara de combustão. Sugere-se ainda, um estudo da proporção ótima de ar primário em função do tipo de combustível e do seu caudal mássico. Eventualmente, poderá ser utilizada uma sonda lambda de modo a controlar a quantidade de ar introduzida na câmara de combustão em função da quantidade de oxigénio detetada nos gases de exaustão.

Com o objetivo de ajustar o volume e a forma da câmara de combustão às condições da combustão, como é o caso da carga térmica utilizada, sugere-se o estudo de uma câmara de combustão de geometria variável.

O facto da alimentação dos peletes ser realizada de forma intermitente causa alguma instabilidade na combustão. Como tal, recomenda-se o projeto dum sistema de alimentação que permita atenuar este problema.

A execução de uma análise dos fatores determinantes nas flutuações de CO e NO<sub>x</sub> durante a queima realizada na caldeira será igualmente um estudo cujos resultados não deixarão de ser pertinentes para os problemas em causa.

Sugere-se a colocação de um isolamento adequado na caldeira, sobretudo nas laterais e na parte traseira, de modo a minimizar as perdas térmicas por convecção e radiação para a envolvente.

Finalmente, na sequência das diferenças encontradas na combustão dos dois tipos de peletes comerciais de pinho utilizados neste trabalho, sugere-se uma comparação da qualidade dos peletes atualmente comercializados em Portugal. Para além dos peletes comerciais de pinho, poderão também ser testadas mais espécies florestais em diferentes cargas térmicas.

## 10 REFERÊNCIAS

- ANPEB, 2013, “Relatório Indústria e Mercado dos pellets em Portugal”.
- Agulló, A.F., Castro, C.G., Soto, L., Freire, M.S. e Álvarez, J.G., 2012, “Study of the antioxidant potential of forestry biomass waste”, 6<sup>th</sup> International Conference on Waste Management and the Environment, New Forest Reino Unido.
- Barros, L., Cabrita, L., Boas, M., Carvalho, A. e Ferreira, I., 2011, “Chemical, biochemical and electrochemical assays to evaluate phytochemicals and antioxidant activity of wild plants”, *Food Chemistry*, 127, pp. 1600-1608.
- Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S.A., Gref, R., Boman, C. e Wästerlund, I., 2008, “Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets”, *Fuel Processing Technology*, 89, pp. 1324-1329.
- ASAE S 269.4 Dec 96 – Cubes, pellets and crumbles - definitions and methods for determining density, durability and moisture content.
- Caldwell, B., 2006, “Effects of invasive scotch broom on soil properties in a Pacific coastal prairie soil”, *Applied Soil Ecology*, 32, pp. 149-152.
- Carroll, JP. e Finnan, J., 2012, “Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws”, *Biosystems Engineering*, 112, pp. 151-159.
- Coelho, P. e Costa, M., 2007 “Combustão”, Edições Orion.
- Coleman, H. W. e Steele, W.G., 1999, “Experimentation and uncertainty analysis for engineers”, John Wiley and Sons, New York.
- Demirbas, A., 2005, “Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, pp. 171-2192.
- Demirbas, A., 2009, “Biohydrogen: For Future Engine Fuel Demands (Green Energy and Technology”, Springer.
- Dias, J., 2002, “Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Dias, J., Costa, M. e Azevedo, J.L.T., 2004, “Test of a small domestic boiler using different pellets”, *Biomass Bioenergy*, 27, pp. 531-539.

## 10. REFERÊNCIAS

- DNFF, 2010, “Culturas Energéticas Florestais – Primeira Abordagem do Levantamento da Situação Actual”.
- EEA, 2013, “Greenhouse gas emissions trends (CSI 010)”.
- EEA, 2013, “Towards a green economy in Europe – EU environmental policy targets and objectives 2010-2050”.
- EN 14785: 2006 - Residential space heating appliances fired by wood pellets requirements and test methods.
- EN 14961-2 – Solid biofuels – Fuel specifications and classes Part 2: Wood pellets for non-industrial use.
- EN 14961-2: 2011 - Solid biofuels - Fuel specification and classes - Part 2: Wood pellets for non-industrial use.
- EN 15210-1: 2009 –Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes Part 1: Pellets.
- EPC, 2013, “Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes”, Renewable Energy House.
- Estabrook, G., 2006, “Neither wild nor planted: Essential role of Giesta (*Cytisus Fabaceae*) in traditional agriculture of Beira Alta, Portugal”, *Economic Botany*, 60, pp. 307-320.
- Ferreira, J. e Ferreira, M.E., 2011, “ Portugal Pellet Report”, ANPEB Portugal.
- Fiedler, F., 2004, “The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 8, pp. 201-221.
- FprEN 14774-2: 2009 - Solid biofuels- Determination of moisture content- Oven dry method- Part 2: Total moisture- Simplified method.
- Gião, M., Gonzalez-Sanjose, M., Rivero-Perez, M., Pereira, C., Pintado, M., e Malcata, F., 2007, “Infusions of Portuguese medicinal plants: Dependence of final antioxidant capacity and phenol content on extraction features”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, pp. 2638-2647.
- Godinho, P., Azevedo, A. e Rego, F., 2005, “Carta da Tipologia Florestal de Portugal Continental”, *Silva Lusitana*, 1, pp. 1-34.
- González, J.F., González-García, C.M., Ramiro, A., González, J., Sabio, E., Gañán, J., e Rodríguez, M.A., 2004, “Combustion optimization of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler”, *Biomass Bioenergy*, 27, pp. 145-154.

- González, N., Ribeiro, D., Fernandes, E., Nogueira, D., Conde, E., Moure, A., Vinardell, M., Mitjans, M. e Domínguez, H., 2013, "Potential use of *Cytisus scoparius* extracts in topical applications for skin protection against oxidative damage", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 125, pp. 83-89.
- Grammelis, P., 2011, "Solid Biofuels for Energy- A Lower Greenhouse Gas Alternative", Springer.
- Greenpro, 2004, "Bioenergia – manual sobre tecnologias, projecto e instalação", IST, DGS, Ecofys, Altener.
- Hansen, M., Jein, A., Hayes, H. e Bateman, P, 2009, "English Handbook for Wood Pellet Combustion", European Biomass Industry Association.
- Hiegl, W. e Janssen, R., 2009, "Final Report Summary of pellets@las results", WIP Renewable Energies.
- IEA, 2013, "International energy outlook", Paris.
- ICNF, 2013, "*IFN6* – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental em 1995, 2005 e 2010".
- ISO 3310-1:2000 – Test sieves - Technical requirements and testing-Part 1: Test sieves of metal wire cloth.
- Jenkins, B., Baxter, L. e Miles, T, 1998, "Combustion properties of biomass", *Fuel Processing Technology*, 54, pp. 17-46.
- Jensen, P.D., Temmerman, M. e Westborg, S., 2011, "Internal particle size distribution of biofuel pellets", *Fuel*, 90, pp. 980-986.
- Johansson, L., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. e Potter, A., 2004, "Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets", *Atmospheric Environment*, 38, pp. 4183-4195.
- Kaliyan, N. e Morey, R.V., 2009, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products", *Biomass and Bioenergy*, 33, pp. 337-359.
- Karlström, O., Brink, A. e Hupa, M., 2013, "Time dependent production of NO from combustion of large biomass char particles", *Fuel*, 103, pp. 524-532.
- Khan, A., Jong, W., Jansen, P. e Spliethoff, H., 2009, "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies", *Fuel Processing Technology*, 90, pp. 21-50.

## 10. REFERÊNCIAS

- Khater, H.A., Helwa, N.H., Enayet, M.M. e Hashish, I., 2004, "Optimization of Solar Kiln for Drying Wood", *Drying Technology: An International Journal*, 22, pp. 677-701.
- Klasom, T. e Bai, X., 2007, "Computational study of the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace", *Fuel*, 86, pp. 1465-1474.
- Klass, D. L., 1998, "Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemical", Academic Press, California.
- Klinzing, G.E., 1981, "Gas-Solid Transport", McGraw-Hill Book Company.
- Kunii, D. e Levenspiel, O., 1969, "Fluidization Engineering", Robert E. Krieger Publishing Company.
- Lamnatou, Chr., Papanicolaou, E., Belessiotis, V. e Kyriakis, N., 2012, "Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector", *Applied Energy*, 94, pp. 232-243.
- Lee, S., Speight, J. e Loyalka, S., 2007, "Handbook of alternative fuel technologies", Taylor & Francis Group.
- Liu, H., Chaney, J., Li, J. e Sun, C., 2013, "Control of NO<sub>x</sub> emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging", *Fuel*, 103, pp. 792-798.
- Lorenzo, P., Echeverría S.R., González, L. e Freitas, H., 2010, "Effect of invasive *Acacia dealbata* Link on soil microorganisms as determined by PCR-DGGE", *Applied Soil Ecology*, 44, pp. 245-251.
- Mani, S., Tabil, L. e Sokhansanj, S., 2006, "Specific energy requirement for compacting corn stover", *Bioresource Technology*, 97, pp. 1420-1426.
- Maraver, A.G., Popov, V. e Zamorano, M., 2011, "A review of European standards for pellet quality", *Renewable Energy*, 36, pp. 3537-3540.
- Marchante, H., 2001, "Invasão dos ecossistemas dunares portugueses por *Acacia*: uma ameaça para a biodiversidade nativa", Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- McGowan, T., Bulpitt, W., Brown, M. e Wash, J., 2009, "Biomass and Alternate Fuel Systems - An Engineering and Economic Guide, Wiley, New Jersey.
- McKendry, P., 2002, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass", *Bioresource Technology*, 83, pp. 37-46.

- Meiller, M., Jakuttis, M., Binder, S. e Hornung, A., 2013, "Fuel staging in biomass heating systems – a primary measure to reduce NO<sub>x</sub> emissions", 21<sup>st</sup> European Biomass Conference and Exhibition, Copenhagen.
- Memmott, J., Fowler, S., Paynter, Q., Sheppard, A. e Syrett, P., 2000, "The invertebrate fauna on broom, *Cytisus scoparius* in two native and two exotic habitats", *Acta Oecologica*, 21, pp. 213-222.
- Monteiro, E., Mantha, V. e Rouboa, A., 2012, "Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constrains", *Energy Policy*, 42, pp. 129-135.
- Nussbaumer, T., 2003, "Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction", *Energy & Fuels*, 17, pp. 1510-1521.
- Obernberger, I. e Thek, G., 2004, "Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior", *Biomass and Bioenergy*, 27, pp. 653-669.
- Obernberger, I. e Thek, G., 2010, "The Pellet Handbook - The production and thermal utilization of biomass pellets", Earthscan, Washington DC.
- Olmo, E.V.G., Martín, J.P., Torres, L.O., Dopazo, G.V.B e Carreira, N.G., 2005, "Bioenergy properties of *Acacia dealbata* Link. Stands propiedades bioenergéticas de las masas de *Acacia dealbata* Link", 5º Congresso Florestal Nacional, Viseu.
- ÖNORM M 7135: 2000, Compressed wood or compressed bark in natural state - pellets and briquettes, requirements and test specifications. Vienna, Austria: Österreichisches Normungsinstitut.
- Paiva, 2009, <<http://bioestufasolar.blogspot.pt/>> consultado a 06 de Julho de 2013.
- Paiva, 2012, "Influência da granulometria das Partículas Sobre o Comportamento Hidrodinâmico de Leitões Fluidizados", Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Patzek, T. e Pimentel, D., 2006, "Thermodynamics of Energy Production from Biomass" <<http://www.oilcrisis.com/patzek/ThermodynamicsEnergyFromBiomass.pdf>> consultado a 20 de Maio de 2013.
- Pellcert, 2012, "Enplus - A nova referência para pellets de madeira". Folheto. <[http://www.cebio.net/web/images/stories/PellCert\\_flyer.pdf](http://www.cebio.net/web/images/stories/PellCert_flyer.pdf)> consultado a 20 de Julho de 2013.

## 10. REFERÊNCIAS

- Pereira, C., 2012a, “Queima de Biomassa de Origem Nacional em Leito Fluidizado Borbulhante”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira, O., Silva, A., Domingues, M. e Cardoso, S., 2012b, “Identification of phenolic constituents of *Cytisus multiflorus*”, *Food Chemistry*, 131, pp. 652-659.
- Pereira, O., Macias, R., Perez, M., Marin, J. e Cardoso, S., 2013, “Protective effects of phenolic constituents from *Cytisus multiflorus*, *Lamium álbum* L. and *Thymus citriodorus* on liver cells”, *Journal of functional foods*, 5, pp. 1170-1179.
- Pinho, C., 2005a, “Sebenta de combustão”, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinho, C., 2005b, “Transporte Pneumático- Análise Granulométrica”, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinho, C., 2012, “The positive displacement method for calibration of gas flow meters. The influence of gas compressibility”, *Applied Thermal Engineering*, 41, pp. 111-115.
- Prévosto, B., Robert, A. e Coquillard, P., 2004, “Development of *Cytisus scoparius* L. at stand and individual level in a mid-elevation mountain of the French Massif Central”, *Acta Oecologica*, 25, pp. 73-81.
- Quaak, P., Knoef, H. e Stassen, H., 1999, “Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies”, The World Bank, Washington D.C.
- Rabaçal, M., Fernandes, U. e Costa, M., 2013, “Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones”, *Renewable Energy*, 51, pp. 220-226.
- Rabier, F., Temmerman, M., Bohm, T., Hartmann, H., Jensen, P., Rathbauer, J., Carrasco, J. e Fernandez, M., 2006, “Particle density determination of pellets and briquettes”, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 954-963.
- Riaño, T., Olivencia, A. e Devesa, J., 2004, “Reproductive biology in *Cytisus multiflorus* (Fabaceae)”, *Ann. Bot. Fennici*, 41, pp. 179-188.
- Roy, M.M., Dutta, A. e Corscadden, K., 2013, “An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace”, *Appl Energy*, 108, pp. 298-307.
- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. e Mekhilef, S., 2011, “A review on biomass as a fuel for boilers”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 2262-2289.

- Shaben, J. e Myers, J., 2010, "Relationships between Scotch broom (*Cytisus scoparius*), soil nutrients, and plant diversity in the Garry oak savannah ecosystem", *Plant Ecol*, 207, pp. 81-91.
- Sheppard, A., Shaw, R. e Sforza, R., 2006, "Top 20 environmental weeds for classical biological control in Europe: a review of opportunities, regulations and other barriers to adoption", *Weed Research*, 46, pp. 93-117.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P., Hartmann, H. e Bohm, T., 2006, "Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes", *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 964-972.
- UTAD, 2013, <<http://jb.utad.pt/>> consultado a 20 de Julho de 2013.
- Van Loo, S. e Koppejan, J., 2008, "The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing" 2<sup>nd</sup> Edition, Earthscan, United Kingdom.
- Verma, V.K., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I. e Hubin, A., 2012a, "Agro-pellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance", *Appl Energy*, 90, pp. 17-23.
- Verma, V.K., Bram, S., Delattin, F., Schmidl, C., Haslinger, W., Worgetter, M., e De Ruyck, J., 2012b, "Real life performance of domestic pellet boiler technologies as a function of operational loads: A case study of Belgium", *Appl Energy*, 101, pp. 357-362.
- Verma, V.K., Bram, S., Gauthier, G. e De Ruyck, J., 2011a, "Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads; Part-2", *Biomass Bioenergy*, 35, pp. 272-279.
- Verma, V.K., Bram, S., Gauthier, G. e De Ruyck, J., 2011b, "Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels: Part-1", *Biomass Bioenergy*, 35 pp. 80-89.
- Verma, V.K., Bram, S., Vandendael, I., Laha, P., Hubin, A. e De Ruyck, J., 2011c, "Residential pellet boilers in Belgium: Standard laboratory and real life performance with respect to European standard and quality labels", *Appl Energy*, 88, pp. 2628-2634.
- Vivarelli, F., 2009, "Pellet market country report: Portugal", *ETA Renewable Energies*.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E., Ogata, T. e Siagi, Z., 2000, " Combustion of agricultural residues", *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, pp. 1-27.

## 10. REFERÊNCIAS

## ANEXOS

### Anexo A - Distribuição de partículas

Será apresentada nesta secção a totalidade da análise granulométrica efetuada ao serrim comercial e ao serrim das espécies *Cytisus* e *Acacia*. O resultado encontra-se ilustrado nas figuras seguintes.

#### Distribuição de partículas da empresa A

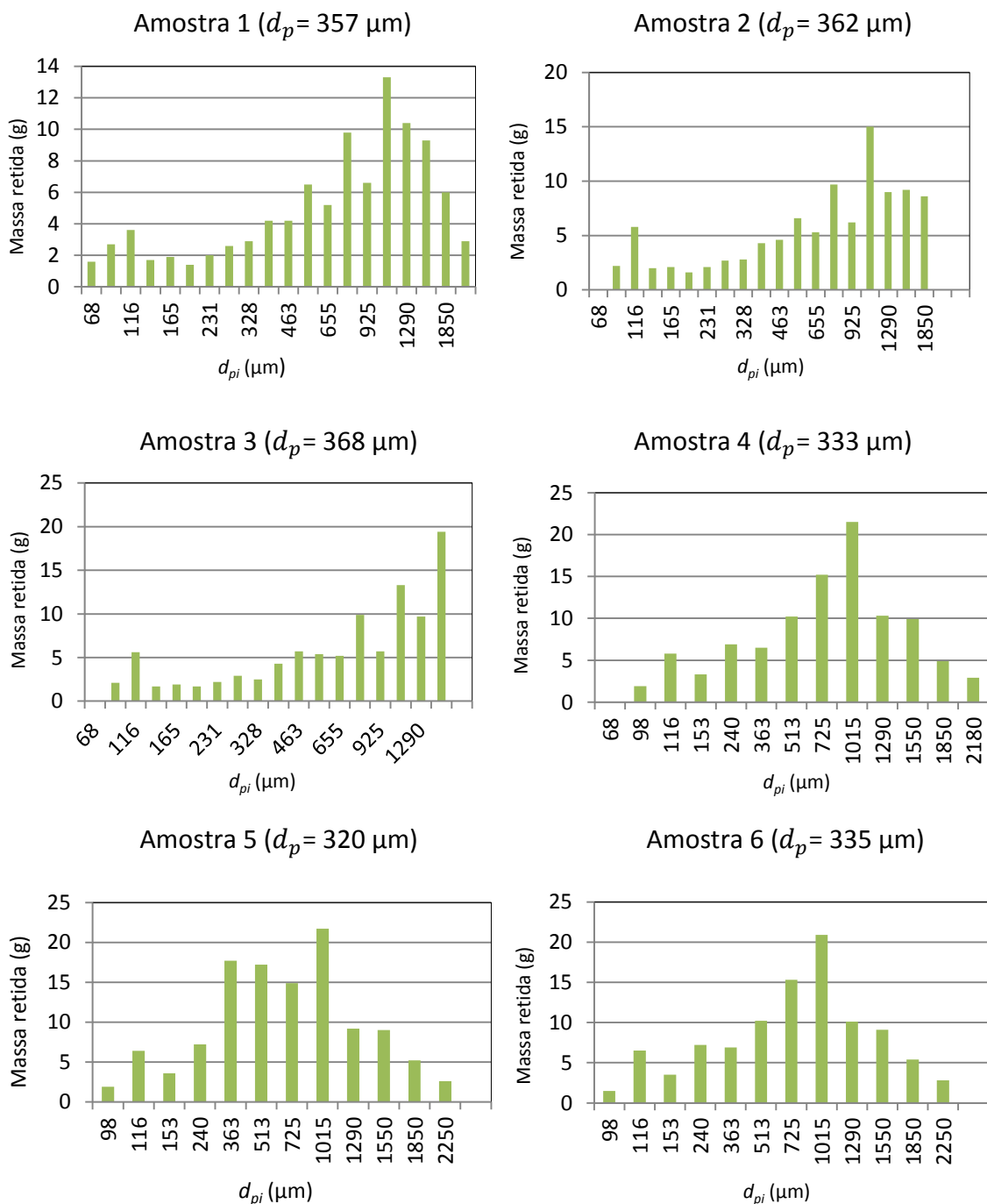
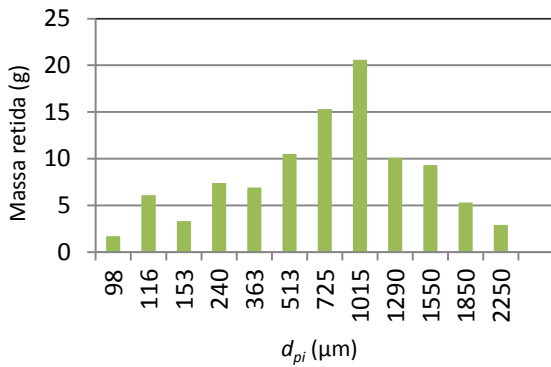


Figura A.1: Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa A.

Amostra 7 ( $d_p = 337 \mu\text{m}$ )



Amostra 8 ( $d_p = 340 \mu\text{m}$ )

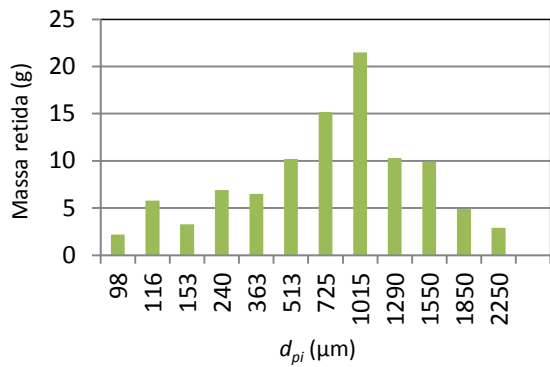
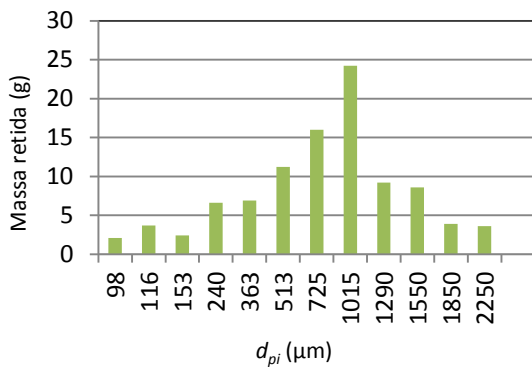


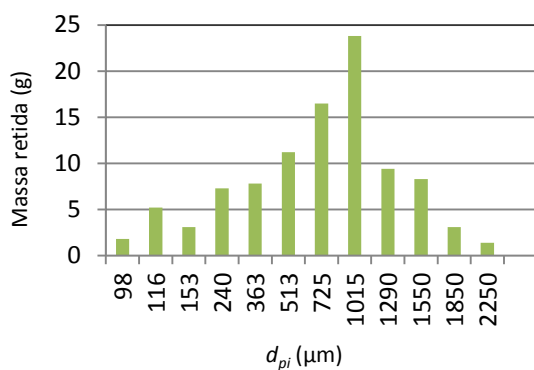
Figura A.1 (cont.): Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa A.

Distribuição de partículas da empresa B

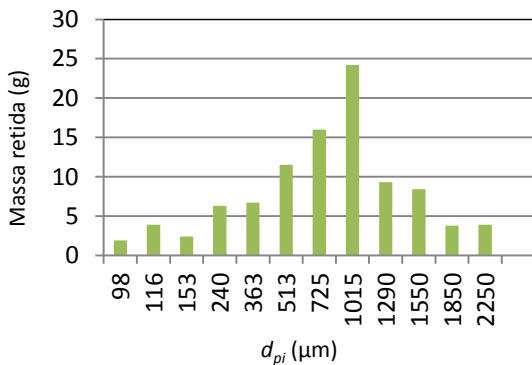
Amostra 1 ( $d_p = 368 \mu\text{m}$ )



Amostra 2 ( $d_p = 338 \mu\text{m}$ )



Amostra 3 ( $d_p = 370 \mu\text{m}$ )



Amostra 4 ( $d_p = 340 \mu\text{m}$ )

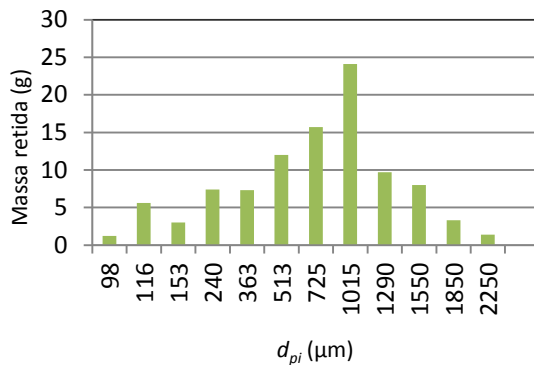
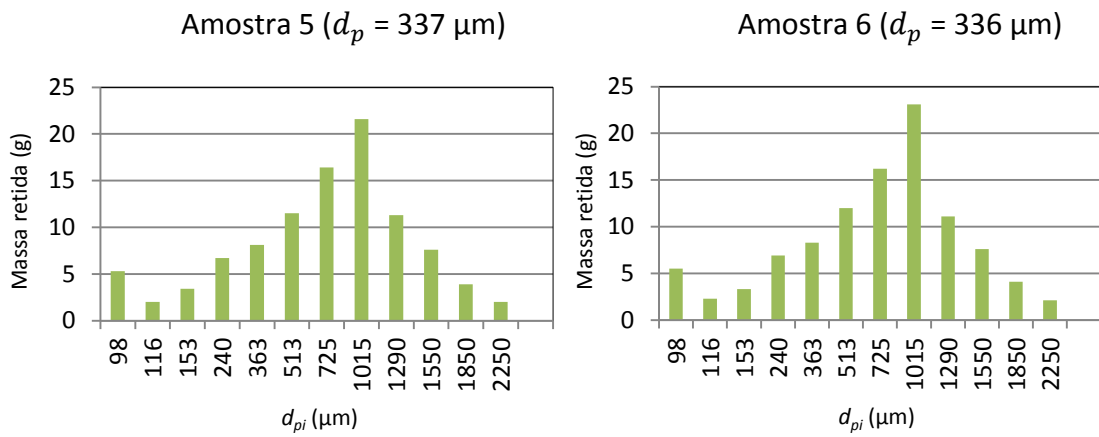
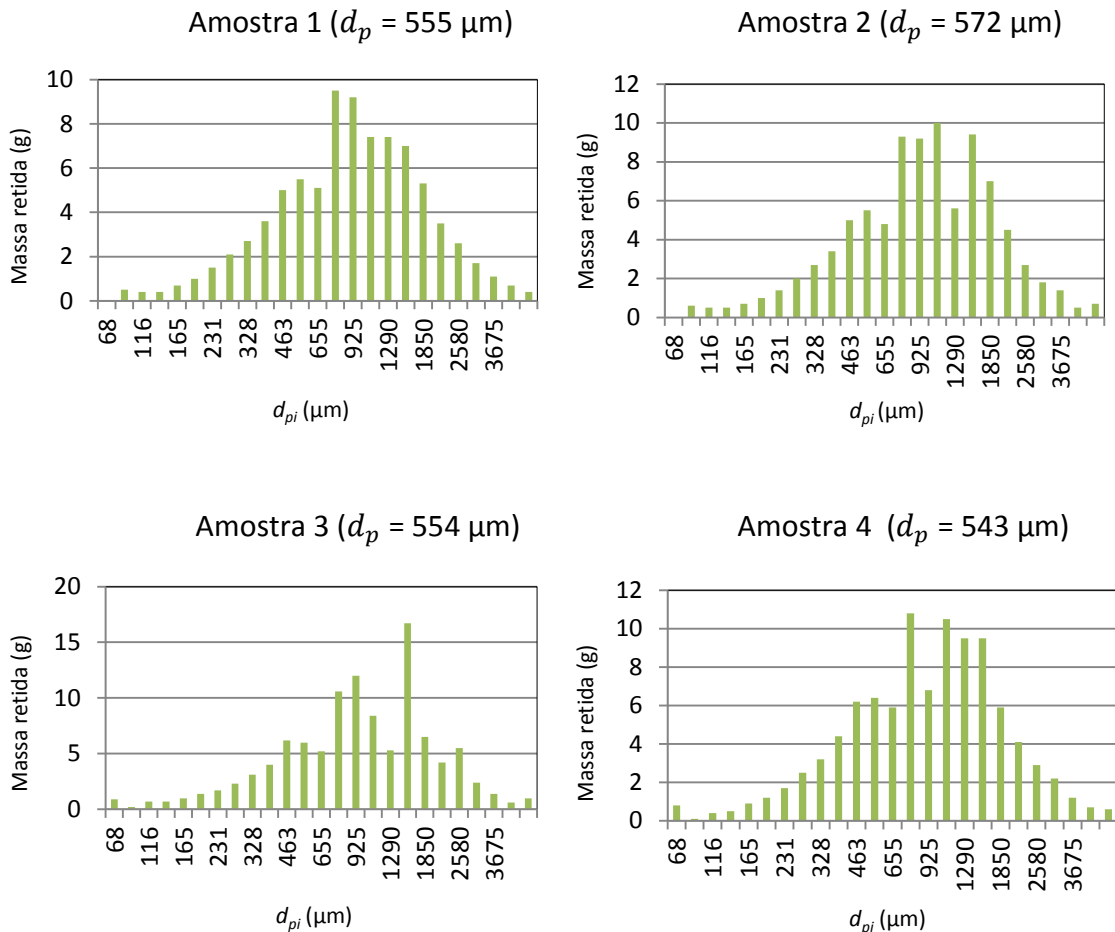


Figura A.2: Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa B.



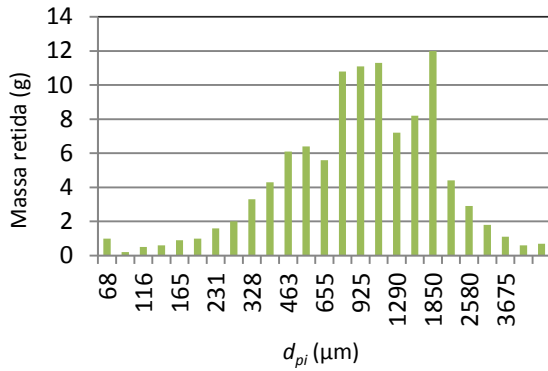
**Figura A.2 (cont.):** Distribuição da matéria-prima de pinho da empresa B.

**Distribuição de partículas do *Cytisus scoparius* A**

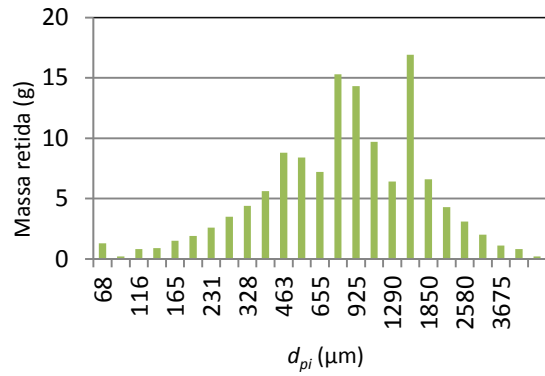


**Figura A.3:** Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

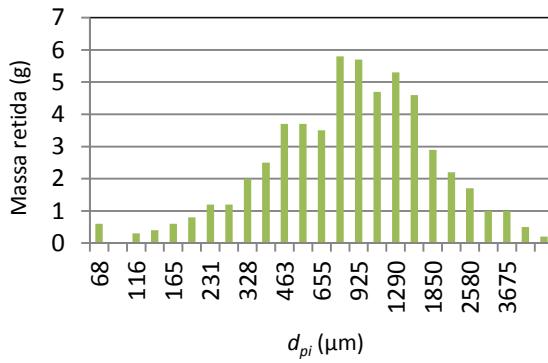
Amostra 5 ( $d_p = 553 \mu\text{m}$ )



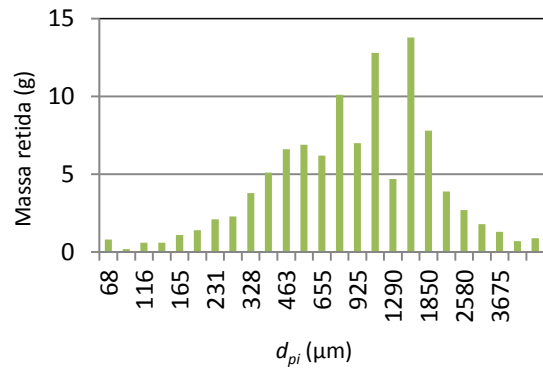
Amostra 6 ( $d_p = 498 \mu\text{m}$ )



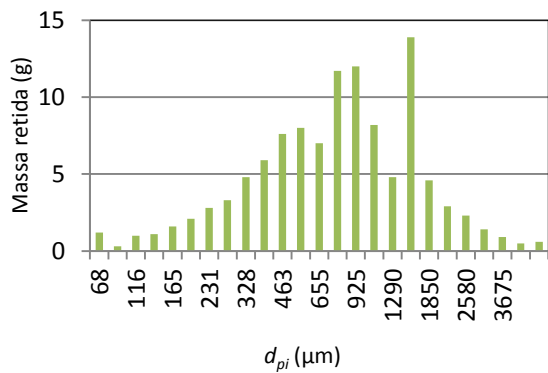
Amostra 7 ( $d_p = 514 \mu\text{m}$ )



Amostra 8 ( $d_p = 529 \mu\text{m}$ )



Amostra 9 ( $d_p = 453 \mu\text{m}$ )



Amostra 10 ( $d_p = 456 \mu\text{m}$ )

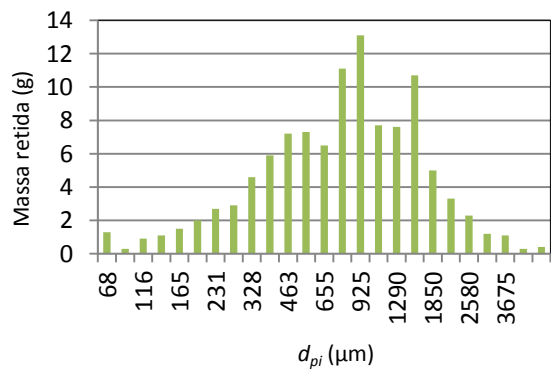
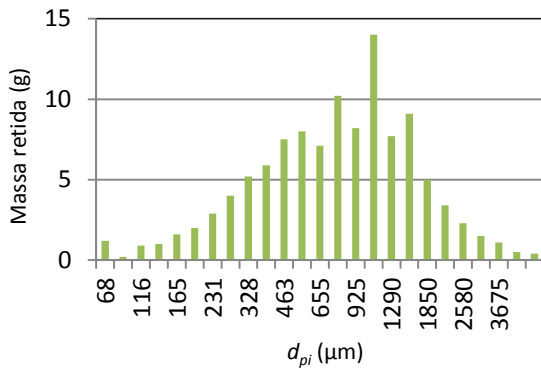
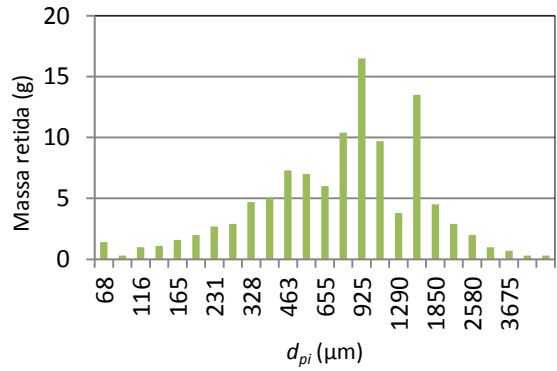


Figura A.3 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

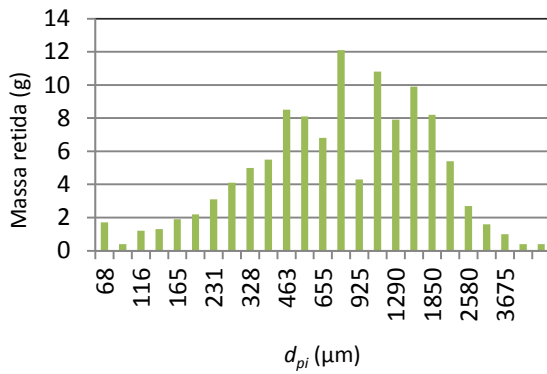
Amostra 11 ( $d_p = 456 \mu\text{m}$ )



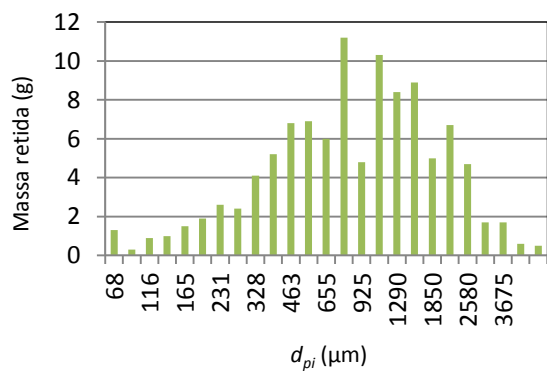
Amostra 12 ( $d_p = 453 \mu\text{m}$ )



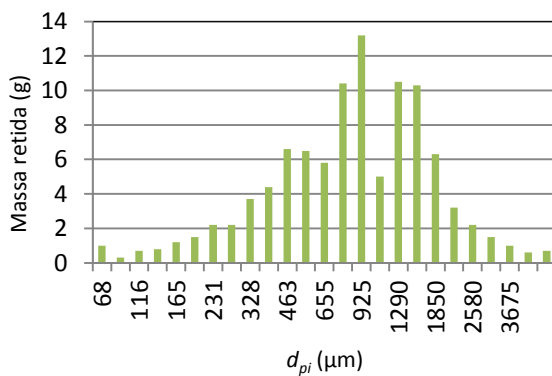
Amostra 13 ( $d_p = 435 \mu\text{m}$ )



Amostra 14 ( $d_p = 477 \mu\text{m}$ )



Amostra 15 ( $d_p = 499 \mu\text{m}$ )



Amostra 16 ( $d_p = 498 \mu\text{m}$ )

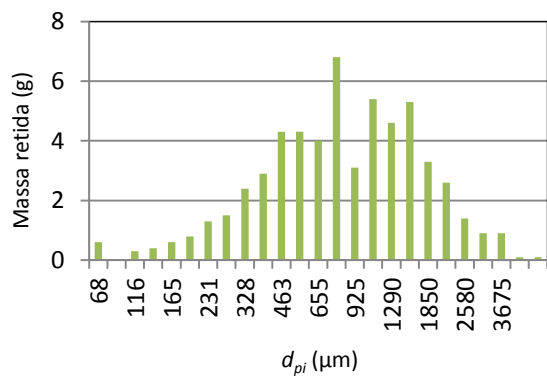
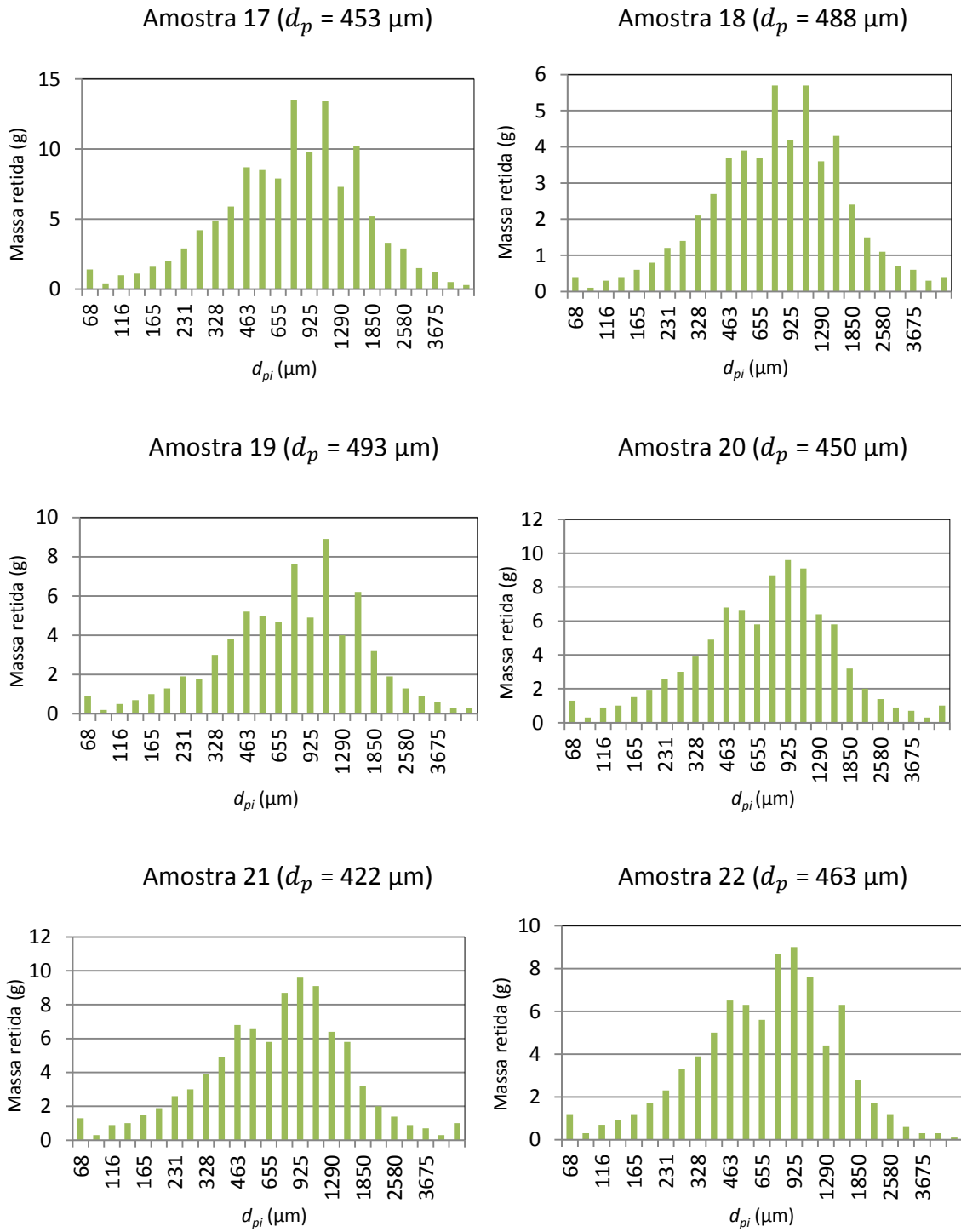
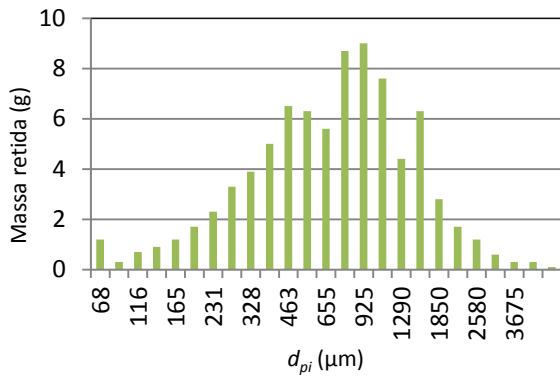


Figura A.3 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

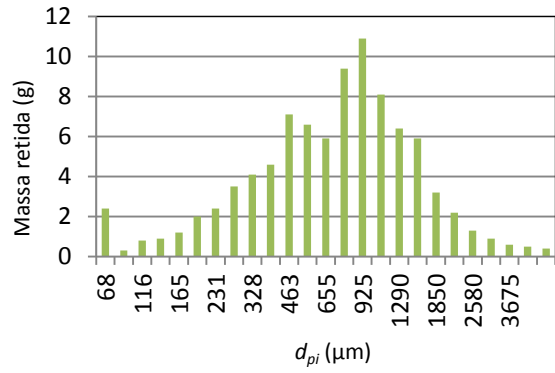


**Figura A.3 (cont.):** Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

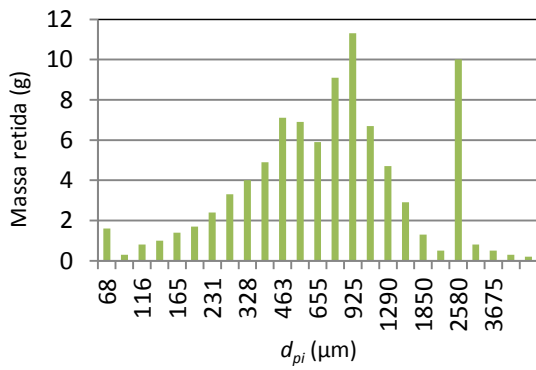
Amostra 23 ( $d_p = 414 \mu\text{m}$ )



Amostra 24 ( $d_p = 401 \mu\text{m}$ )



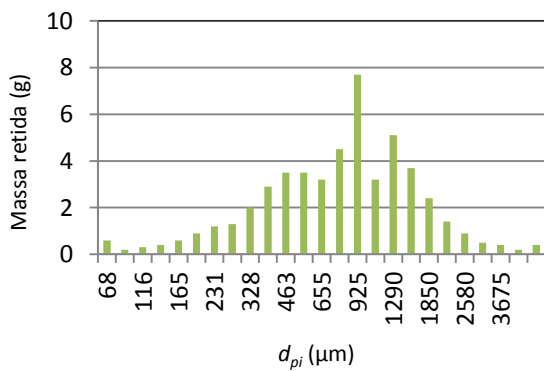
Amostra 25 ( $d_p = 419 \mu\text{m}$ )



Amostra 26 ( $d_p = 420 \mu\text{m}$ )



Amostra 27 ( $d_p = 466 \mu\text{m}$ )



Amostra 28 ( $d_p = 453 \mu\text{m}$ )

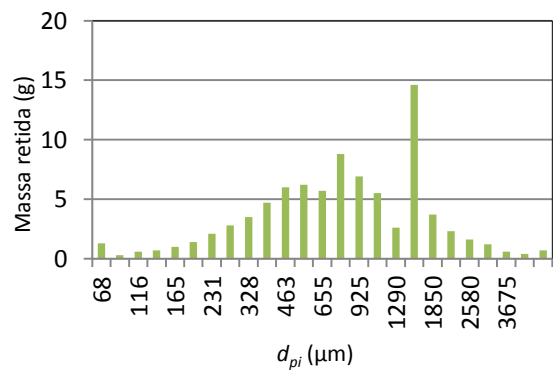
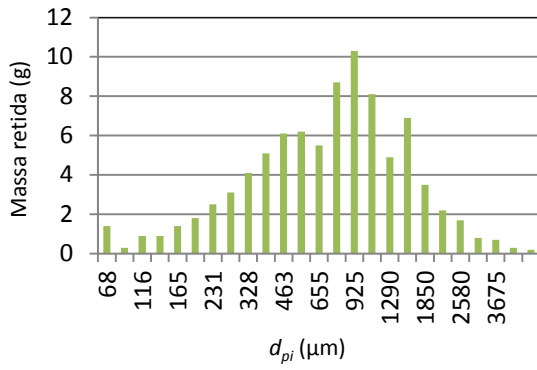
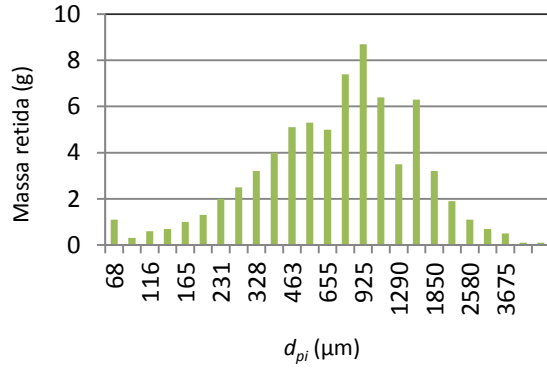


Figura A.3 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

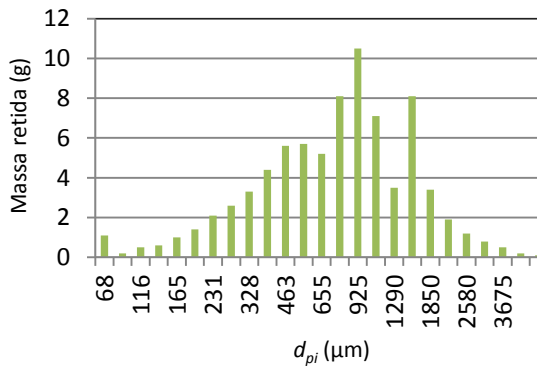
Amostra 29 ( $d_p = 419 \mu\text{m}$ )



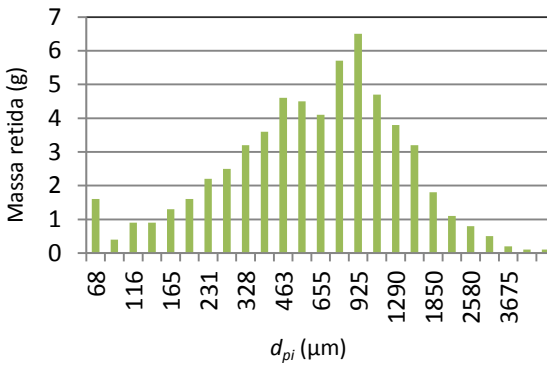
Amostra 30 ( $d_p = 428 \mu\text{m}$ )



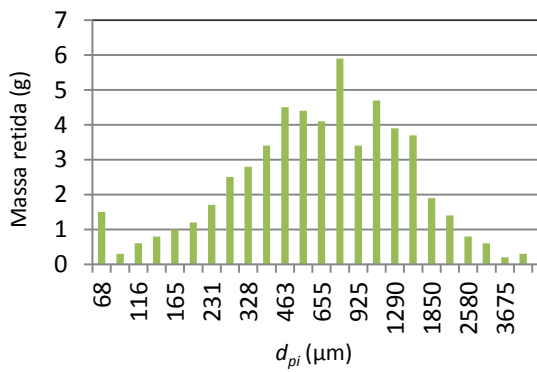
Amostra 31 ( $d_p = 449 \mu\text{m}$ )



Amostra 32 ( $d_p = 353 \mu\text{m}$ )



Amostra 33 ( $d_p = 371 \mu\text{m}$ )



Amostra 34 ( $d_p = 370 \mu\text{m}$ )

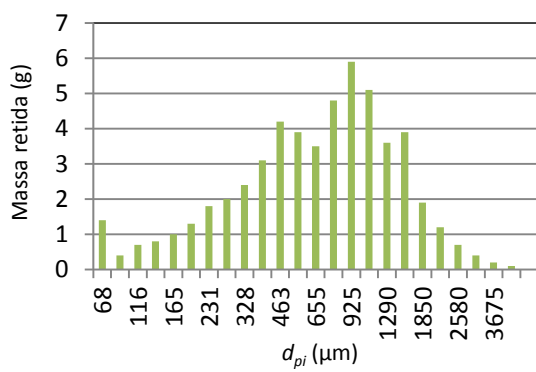
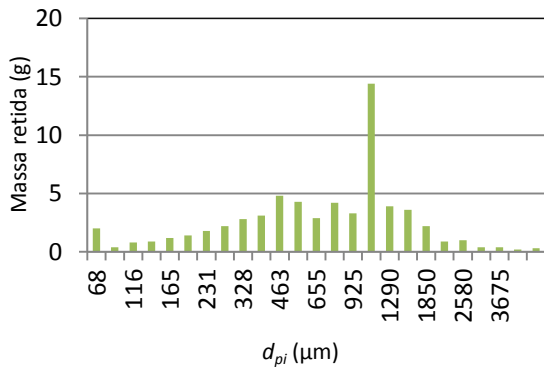


Figura A.3 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

Amostra 35 ( $d_p = 371 \mu\text{m}$ )



Amostra 36 ( $d_p = 368 \mu\text{m}$ )

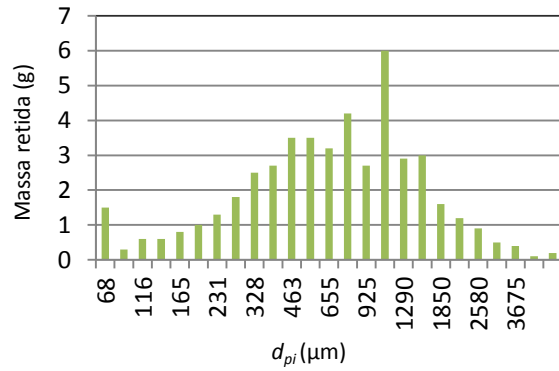
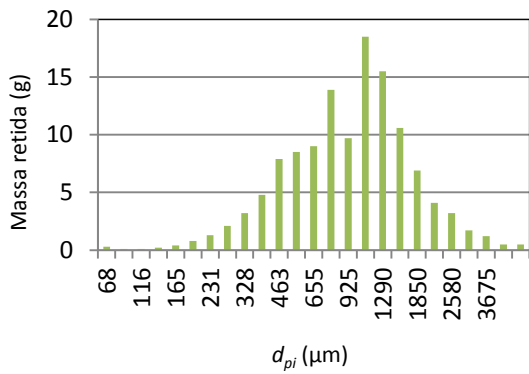


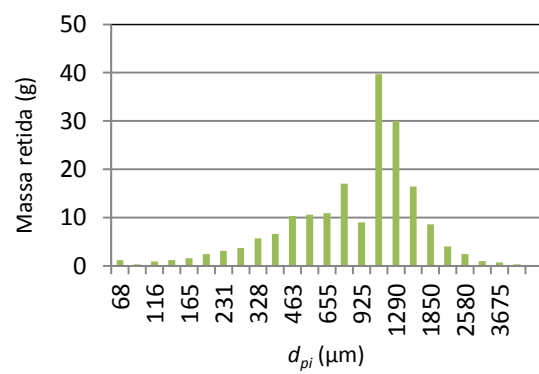
Figura A.3 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* A.

**Distribuição de partículas da *Acacia dealbata* A**

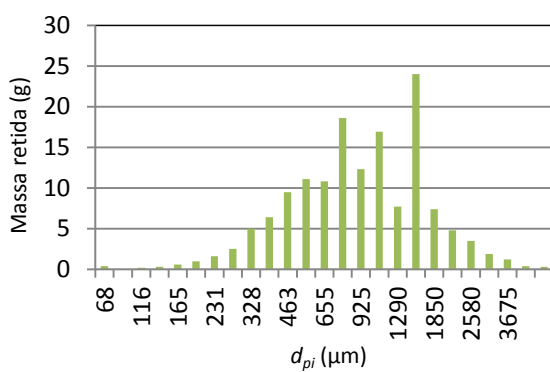
Amostra 1 ( $d_p = 628 \mu\text{m}$ )



Amostra 2 ( $d_p = 552 \mu\text{m}$ )



Amostra 3 ( $d_p = 608 \mu\text{m}$ )



Amostra 4 ( $d_p = 536 \mu\text{m}$ )

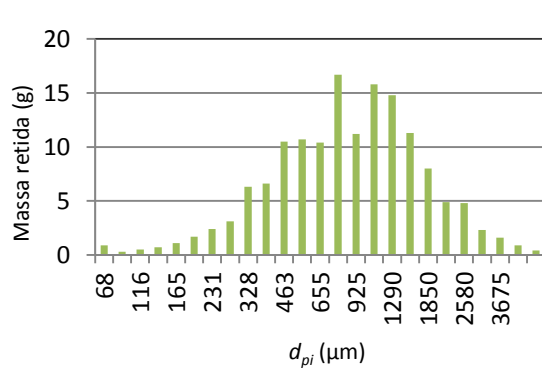
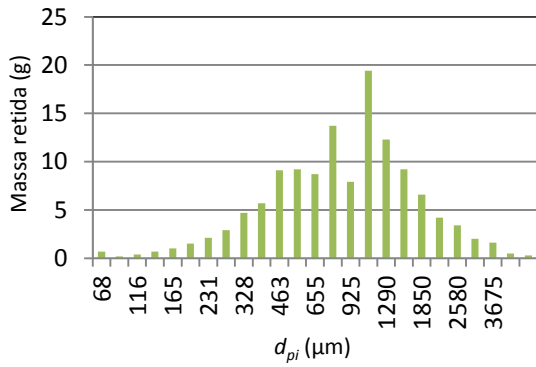
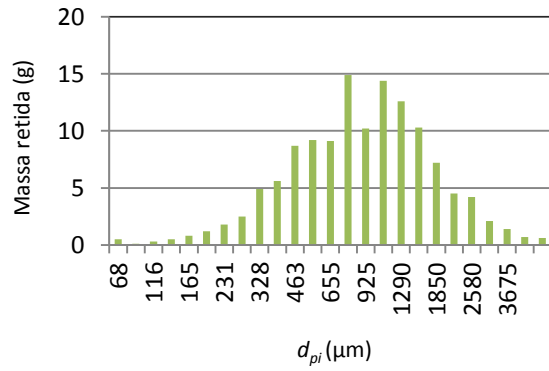


Figura A.4: Distribuição da matéria-prima da *Acacia dealbata* A.

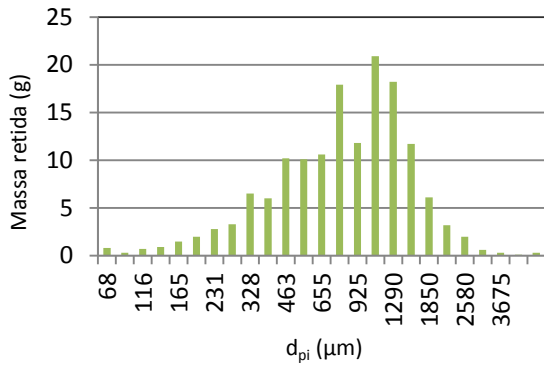
Amostra 5 ( $d_p = 541 \mu\text{m}$ )



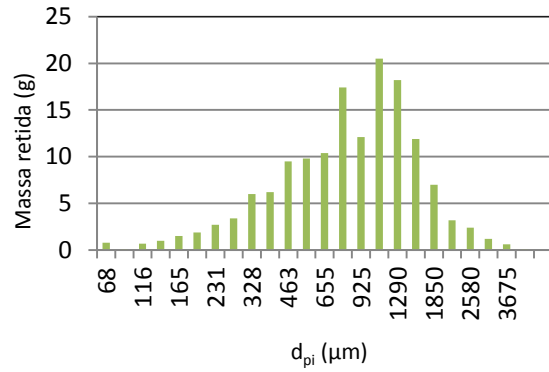
Amostra 6 ( $d_p = 571 \mu\text{m}$ )



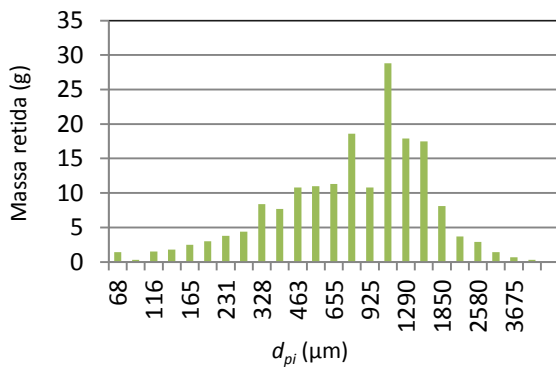
Amostra 7 ( $d_p = 513 \mu\text{m}$ )



Amostra 8 ( $d_p = 524 \mu\text{m}$ )



Amostra 9 ( $d_p = 483 \mu\text{m}$ )



Amostra 10 ( $d_p = 552 \mu\text{m}$ )

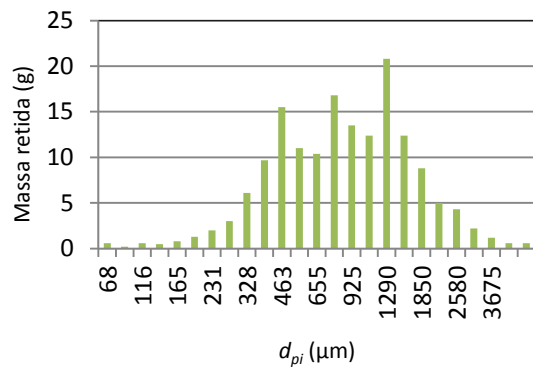


Figura A.4 (cont.): Distribuição da matéria-prima da *Acacia dealbata* A.

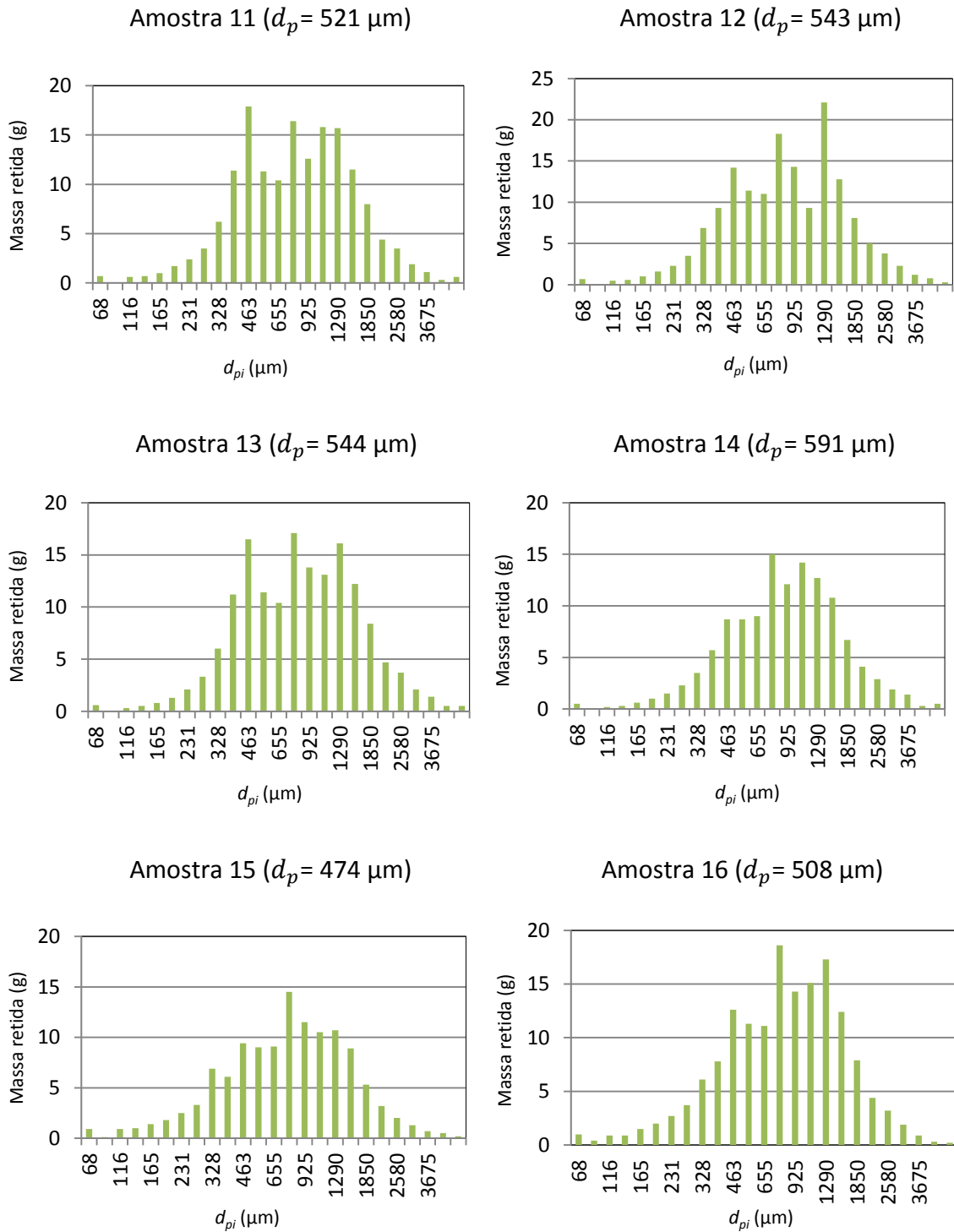
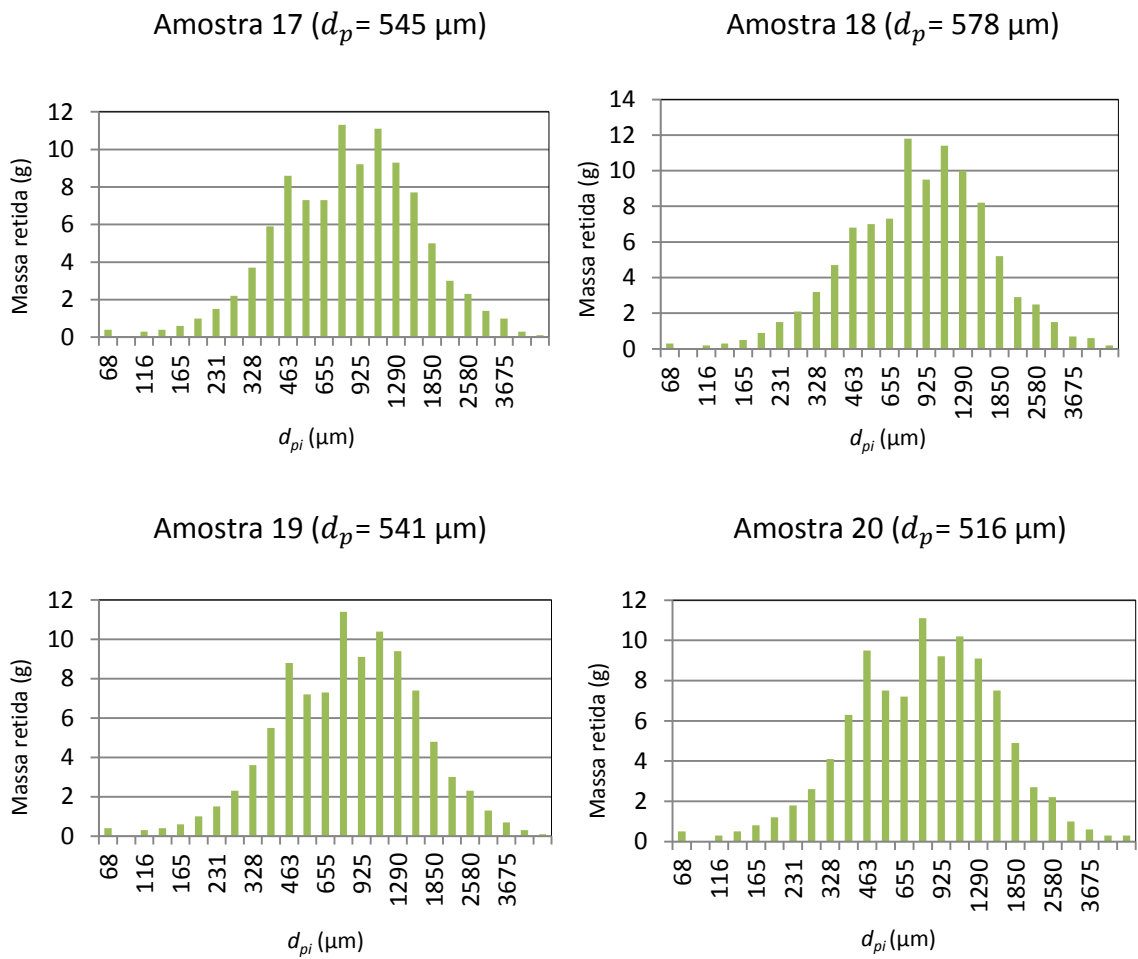
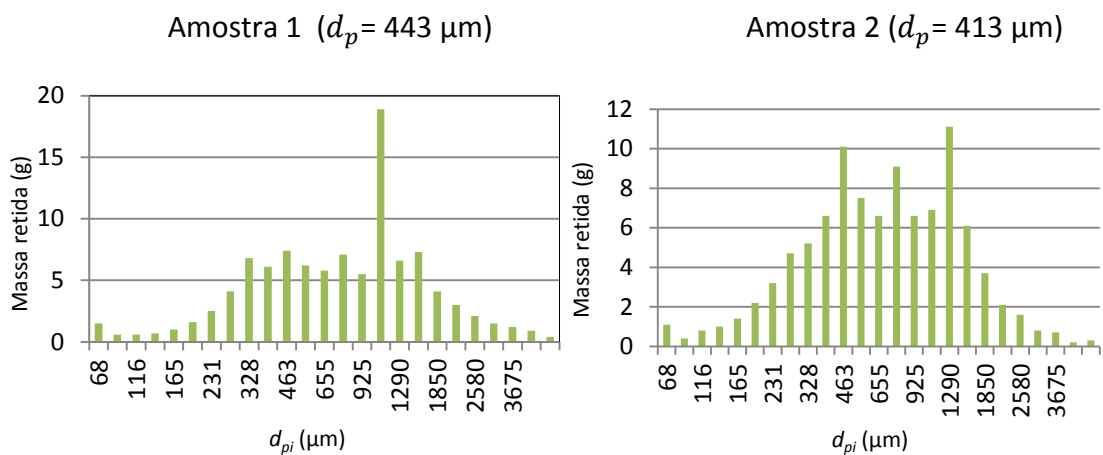


Figura A.4 (cont.): Distribuição da matéria-prima da *Acacia dealbata* A.



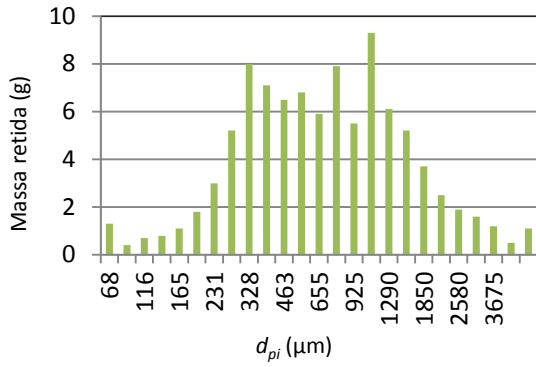
**Figura A.4 (cont.):** Distribuição da matéria-prima da *Acacia dealbata* A.

**Distribuição de partículas do *Cytisus multiflorus* A**

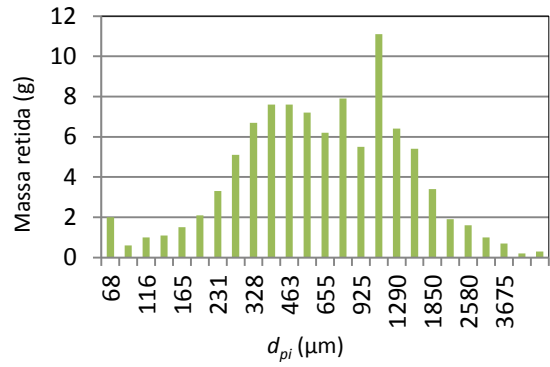


**Figura A.5:** Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* A.

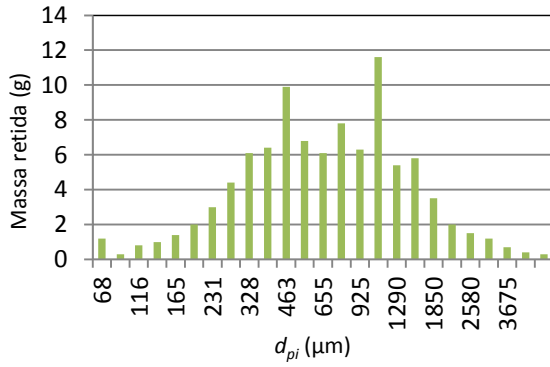
Amostra 3 ( $d_p = 407 \mu\text{m}$ )



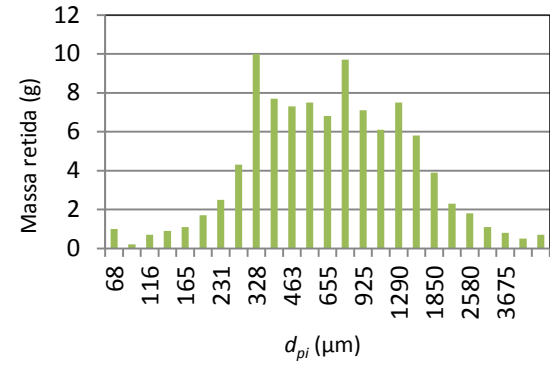
Amostra 4 ( $d_p = 374 \mu\text{m}$ )



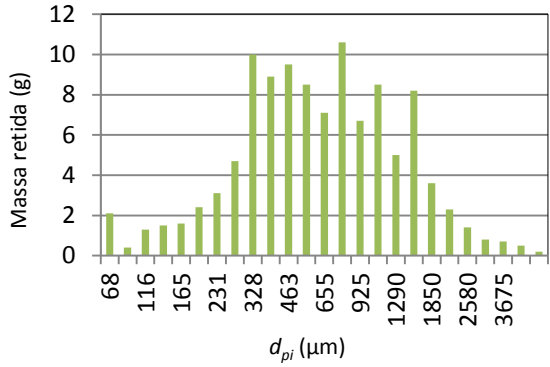
Amostra 5 ( $d_p = 407 \mu\text{m}$ )



Amostra 6 ( $d_p = 418 \mu\text{m}$ )



Amostra 7 ( $d_p = 372 \mu\text{m}$ )



Amostra 8 ( $d_p = 435 \mu\text{m}$ )

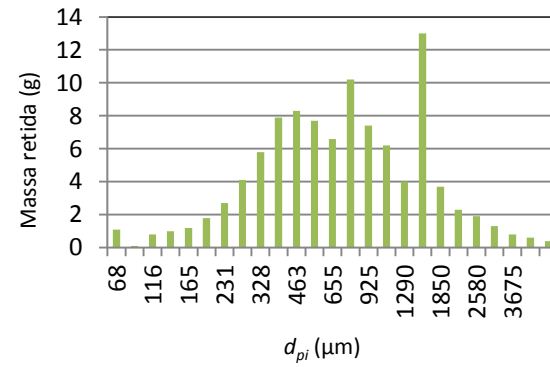
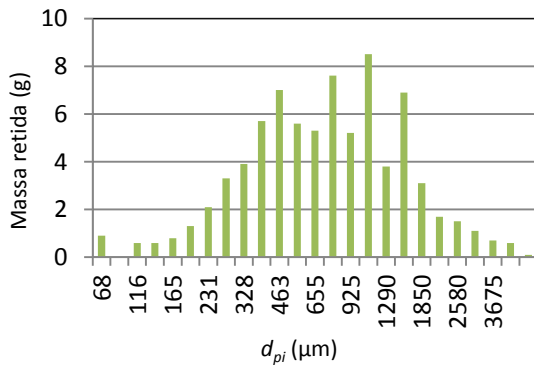
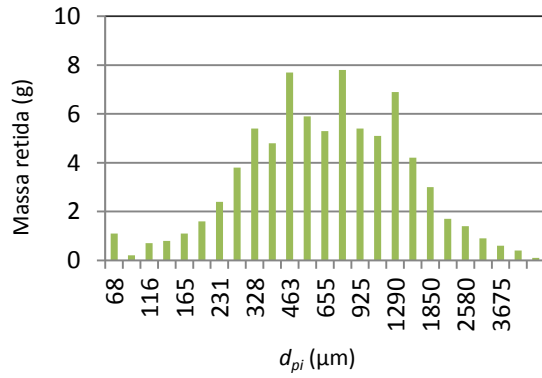


Figura A.5 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* A.

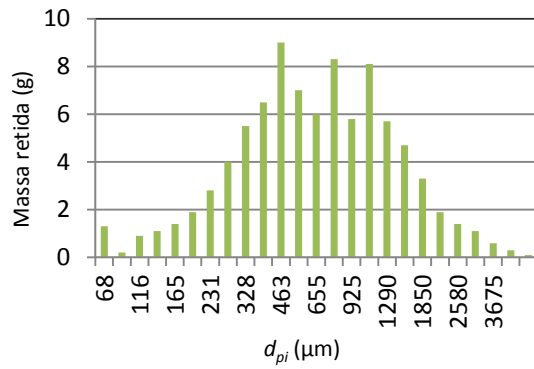
Amostra 9 ( $d_p = 444 \mu\text{m}$ )



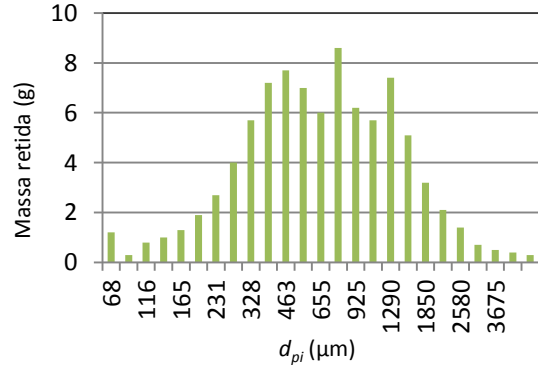
Amostra 10 ( $d_p = 403 \mu\text{m}$ )



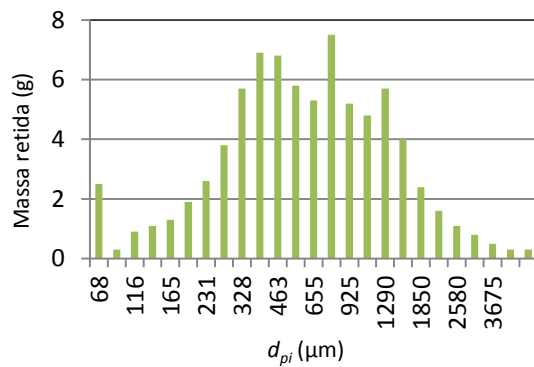
Amostra 11 ( $d_p = 394 \mu\text{m}$ )



Amostra 12 ( $d_p = 398 \mu\text{m}$ )



Amostra 13 ( $d_p = 348 \mu\text{m}$ )



Amostra 14 ( $d_p = 371 \mu\text{m}$ )

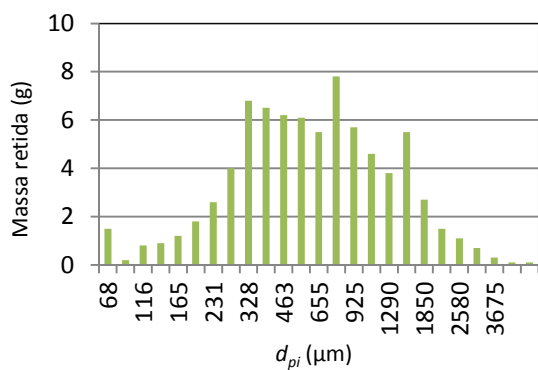
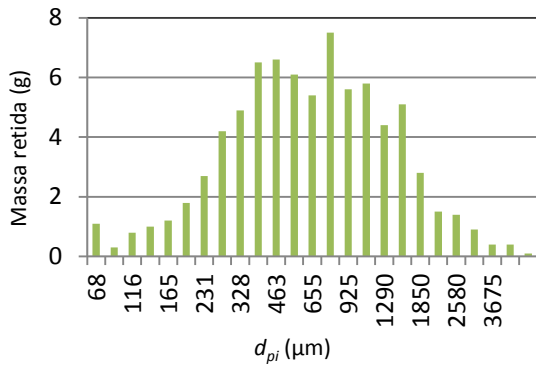
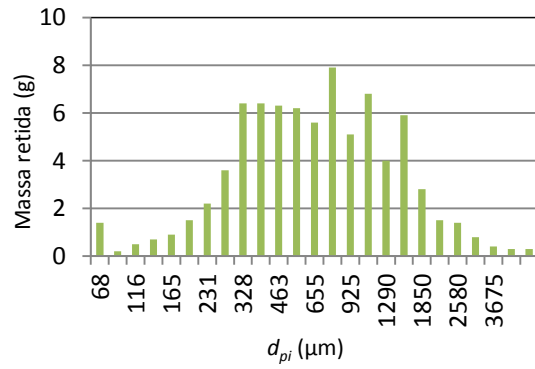


Figura A.5 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* A.

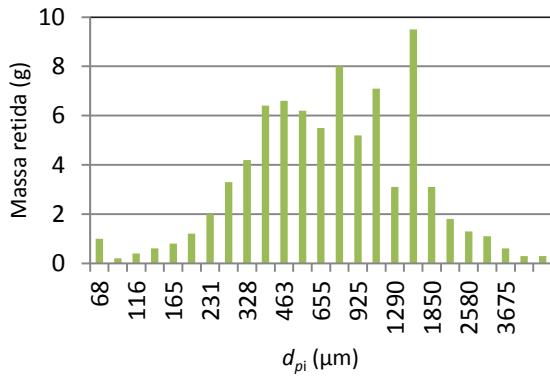
Amostra 15 ( $d_p = 386 \mu\text{m}$ )



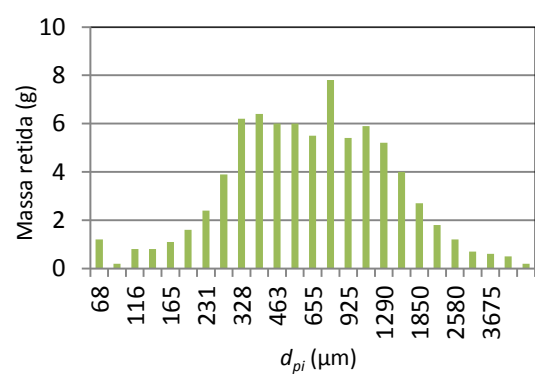
Amostra 16 ( $d_p = 400 \mu\text{m}$ )



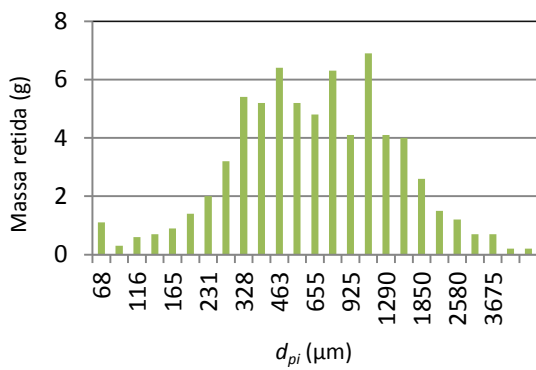
Amostra 17 ( $d_p = 441 \mu\text{m}$ )



Amostra 18 ( $d_p = 390 \mu\text{m}$ )



Amostra 19 ( $d_p = 394 \mu\text{m}$ )



Amostra 20 ( $d_p = 427 \mu\text{m}$ )

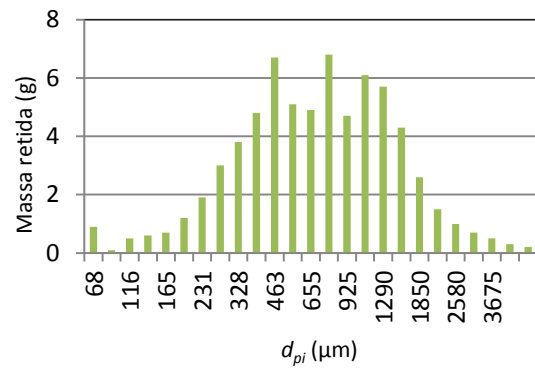


Figura A.5 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* A.

Amostra 21 ( $d_p = 387 \mu\text{m}$ )

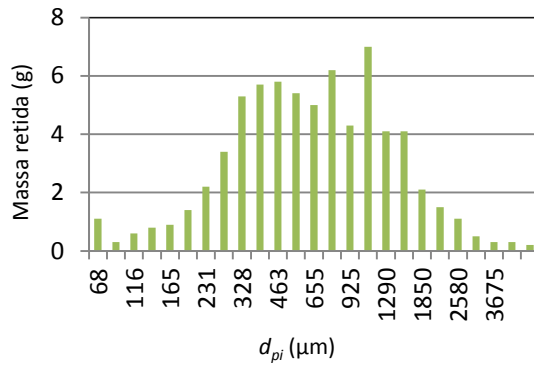
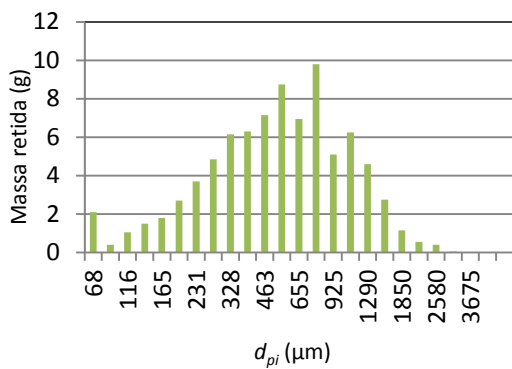


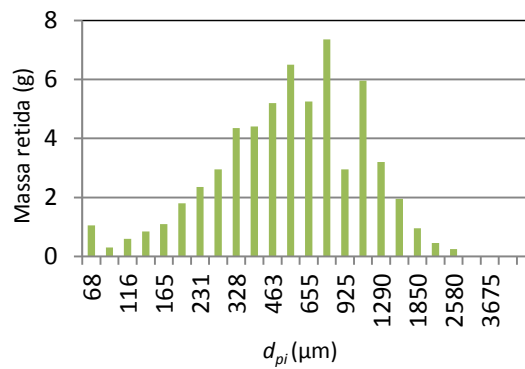
Figura A.5 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* A.

**Distribuição de partículas do *Cytisus scoparius* B**

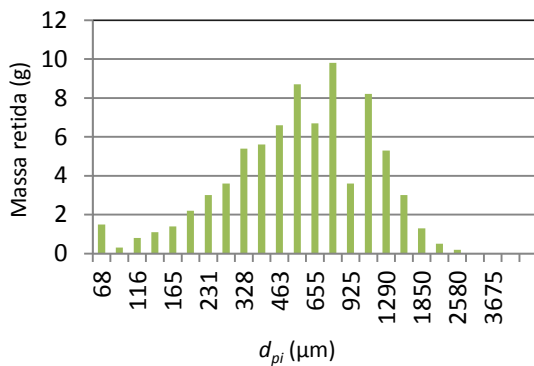
Amostra 1 ( $d_p = 327 \mu\text{m}$ )



Amostra 2 ( $d_p = 351 \mu\text{m}$ )



Amostra 3 ( $d_p = 358 \mu\text{m}$ )



Amostra 4 ( $d_p = 361 \mu\text{m}$ )

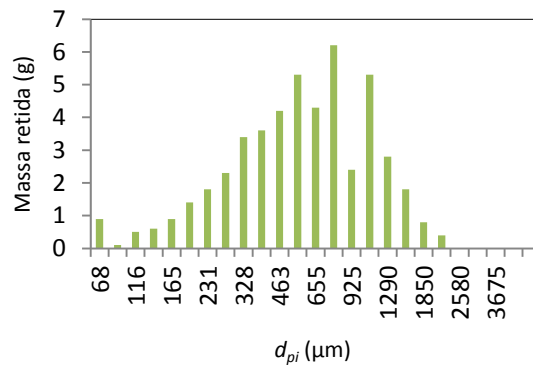


Figura A.6: Distribuição da matéria-prima do *Cytisus scoparius* B.

### Distribuição de partículas da *Acacia dealbata* B

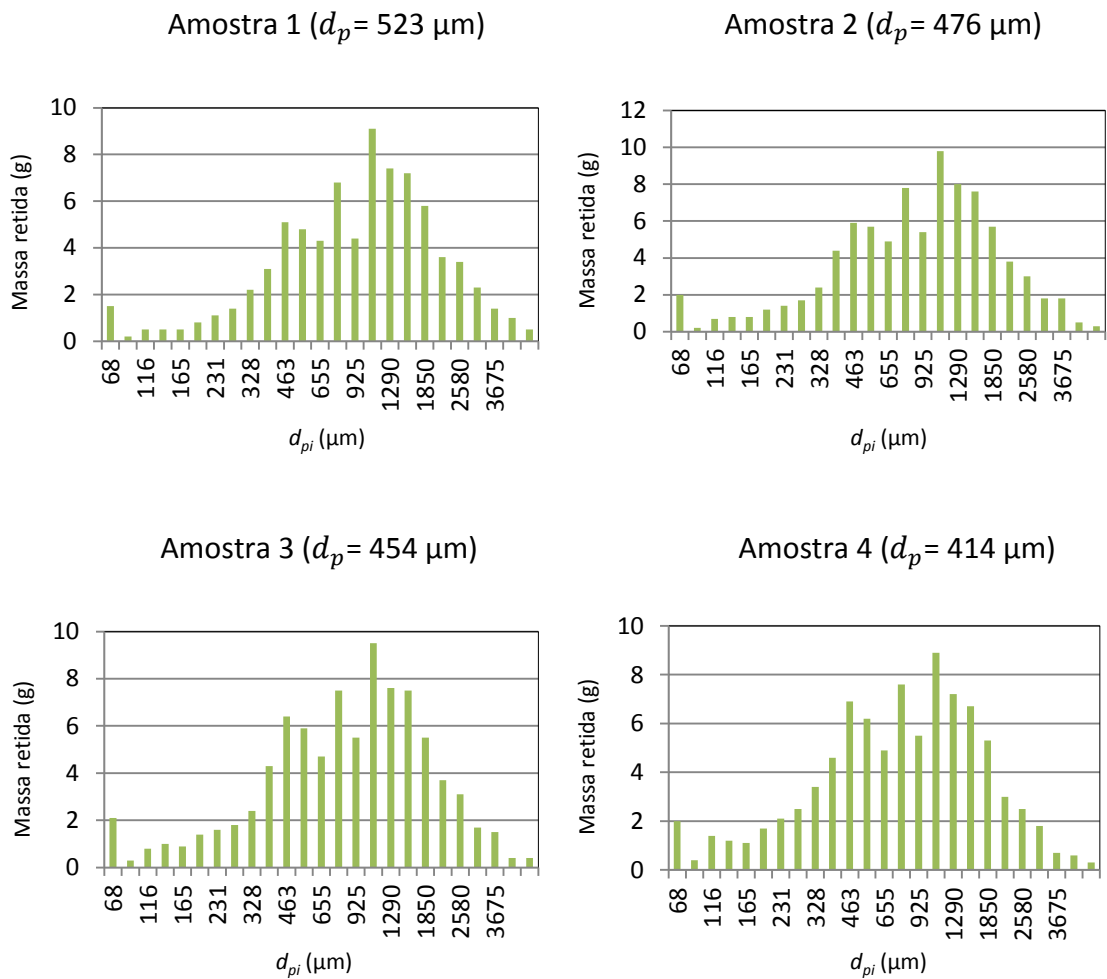


Figura A.7: Distribuição da matéria-prima da *Acacia dealbata* B.

### Distribuição de partículas do *Cytisus multiflorus* B1

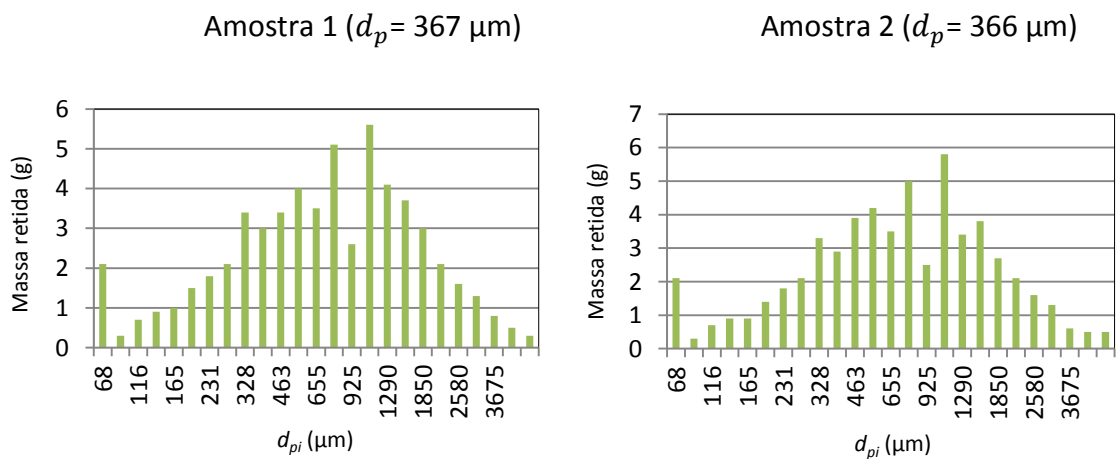


Figura A.8: Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* B1.

Amostra 3 ( $d_p = 372 \mu\text{m}$ )

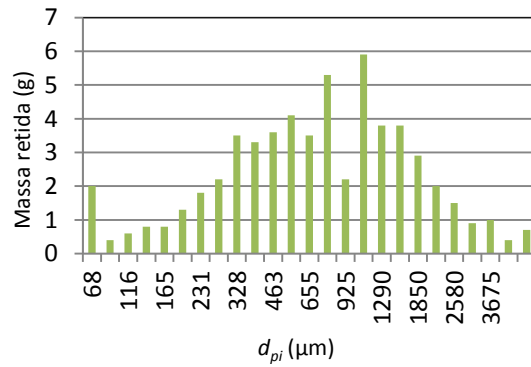
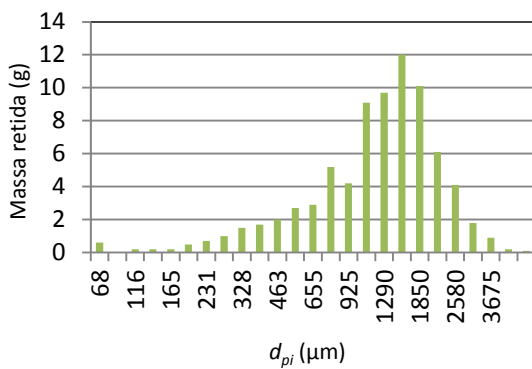


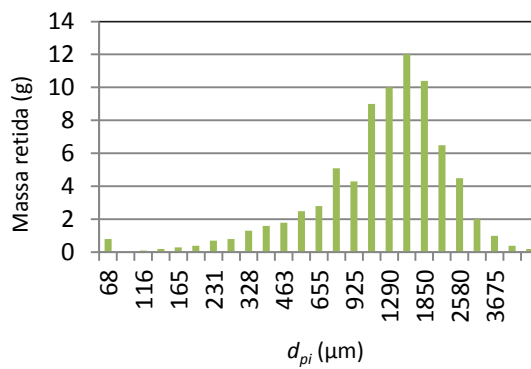
Figura A.8 (cont.): Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* B1.

**Distribuição de partículas do *Cytisus multiflorus* B2**

Amostra 1 ( $d_p = 733 \mu\text{m}$ )



Amostra 2 ( $d_p = 742 \mu\text{m}$ )



Amostra 3 ( $d_p = 888 \mu\text{m}$ )

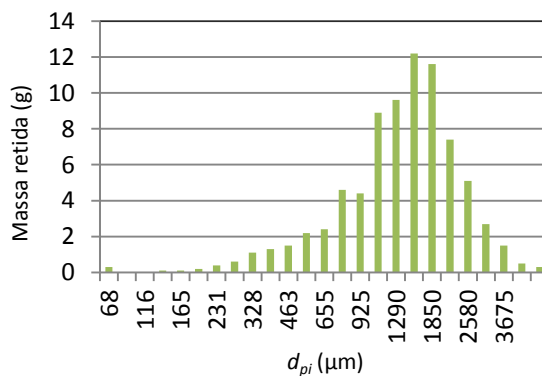


Figura A.9: Distribuição da matéria-prima do *Cytisus multiflorus* B2.

## Anexo B - Calibrações

Durante o decorrer do presente trabalho foi necessário proceder à calibração dos medidores de caudal de água, os Venturis e a turbina, ambos calibrados pelo método das pesagens. O ventilador principal da caldeira foi calibrado pelo método do gás traçador, com o CO<sub>2</sub> como gás traçador e, para tal foi necessário a calibração de um rotâmetro, utilizando o método do deslocamento positivo.

### B.1 Calibração Venturis

A calibração dos Venturis consistiu no estabelecimento de uma relação entre a perda de carga provocada pela sua redução e o caudal mássico do escoamento. Para isso recorreu-se ao método das pesagens, que consistiu na recolha e pesagem da quantidade de massa de água que escoava num determinado intervalo de tempo através dos referidos Venturis.

Ambos os Venturis possuíam tomas de pressão antes e depois da redução. Estas tomas encontravam-se ligadas a um manómetro diferencial de coluna de água e a um transdutor diferencial de pressão FCO34 da *Furness Controls Limited*.

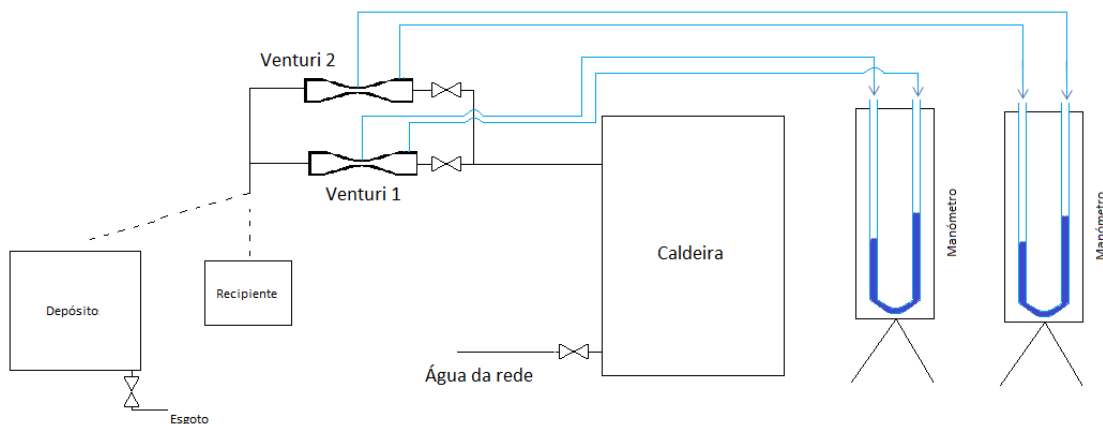
O transporte de água para o circuito interno da caldeira era garantido por uma mangueira que se encontrava ligada à água da rede. A porção de tubo na saída da caldeira estava ligada a um conjunto de dois depósitos, com saída para o esgoto. O ensaio era iniciado com a abertura da válvula da água da rede e o enchimento do circuito da caldeira. Assim que este se encontrava cheio a água passaria pelo Venturi (o que estivesse a ser calibrado) e era encaminhada para a saída que se encontrava direccionada para os depósitos. Quando se verificava um diferencial de pressão constante no manómetro de coluna de água, indicando a obtenção de condições de escoamento em regime permanente, desviava-se a tubagem da água situada após o Venturi em calibração, para um recipiente previamente pesado, com 5 litros de capacidade, e simultaneamente era iniciada a contagem de tempo. No decurso deste procedimento era verificada a pressão diferencial no manómetro de coluna de água e no transdutor diferencial de pressão, sendo ambas registadas. O ensaio terminava quando a tubagem era novamente direccionada para os depósitos e simultaneamente se parava a contagem de tempo. Por fim, a massa de água era pesada numa balança marca *Precisa 6200*, e o recipiente era então despejado e pesado novamente para o próximo ensaio.

O caudal mássico de água que escoava através dos Venturis foi calculado através da seguinte equação:

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

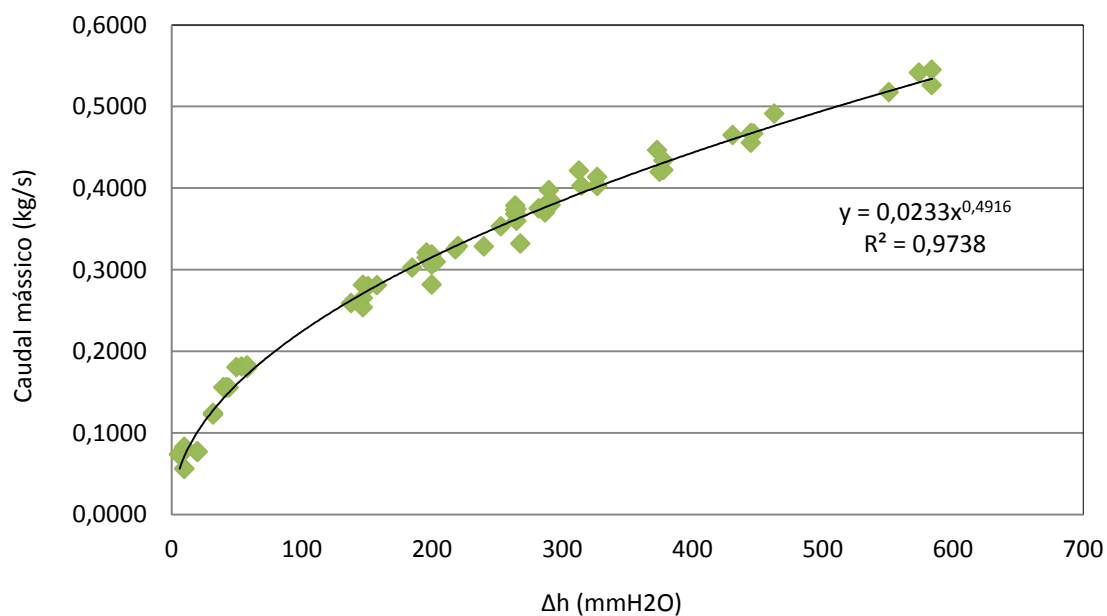
onde  $m_{\text{água}}$  é a massa de água e  $\Delta t$  o intervalo de tempo em que decorreu o ensaio.

A Figura B.1 representa a instalação experimental utilizada na calibração dos Venturis.

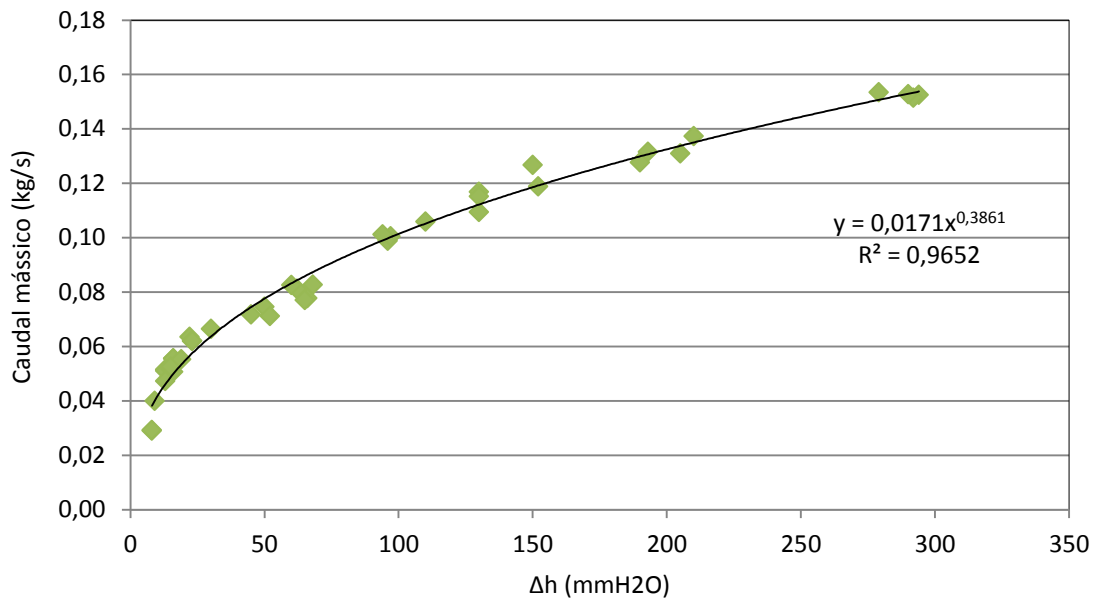


**Figura B.1:** Instalação experimental utilizada na calibração dos Venturis.

As Figuras B.2 e B.3 representam as curvas de calibração dos Venturis 1 e 2, respetivamente.



**Figura B.2:** Curva de calibração do Venturi 1.



**Figura B.3:** Curva de calibração do Venturi 2.

## B.2. Calibração turbina

A calibração da turbina foi efetuada recorrendo também ao método das pesagens. Esta calibração consistiu no estabelecimento de uma relação entre o caudal mássico de água que escoava através da turbina e o sinal de frequência da mesma. Deste modo a turbina encontrava-se ligada à água da rede a 2 bar de pressão. O sinal de saída da turbina era transmitido para um computador através de uma placa de aquisição *NI USB-6008*, utilizando o programa *Labview 8.6* da *National Instruments*.

Medindo a massa de água que escoava através da turbina num determinado intervalo de tempo era possível determinar o caudal mássico de água, que correspondia a uma frequência média da turbina durante o intervalo de tempo considerado.

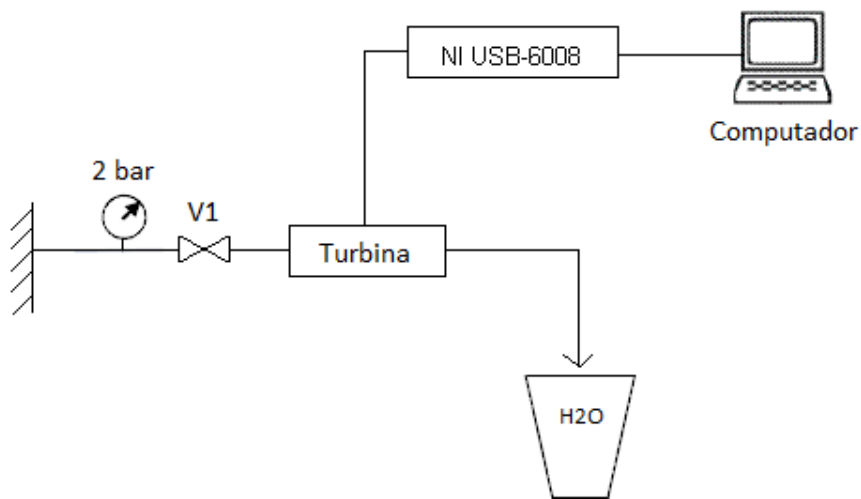
O ensaio era iniciado abrindo a válvula V1 (Figura B.4); assim, quando o caudal de água de saída da turbina fosse constante, a água era encaminhada para um recipiente previamente pesado e iniciava-se a contagem de tempo. O ensaio terminava quando se transferia a água para um recipiente secundário e se parava a contagem de tempo. A massa de água era pesada numa balança marca *Precisa* modelo *6200* e o tempo respetivo era registado. O recipiente era então despejado e pesado novamente para um novo ensaio. A abertura da válvula V1 foi progressiva ao longo dos ensaios, ou seja, nos primeiros ensaios a válvula encontrava-se pouco aberta mas, à medida que se efetuavam novos ensaios, foi sendo cada vez mais aberta.

O caudal mássico de água que escoava através da turbina foi calculado recorrendo à seguinte equação:

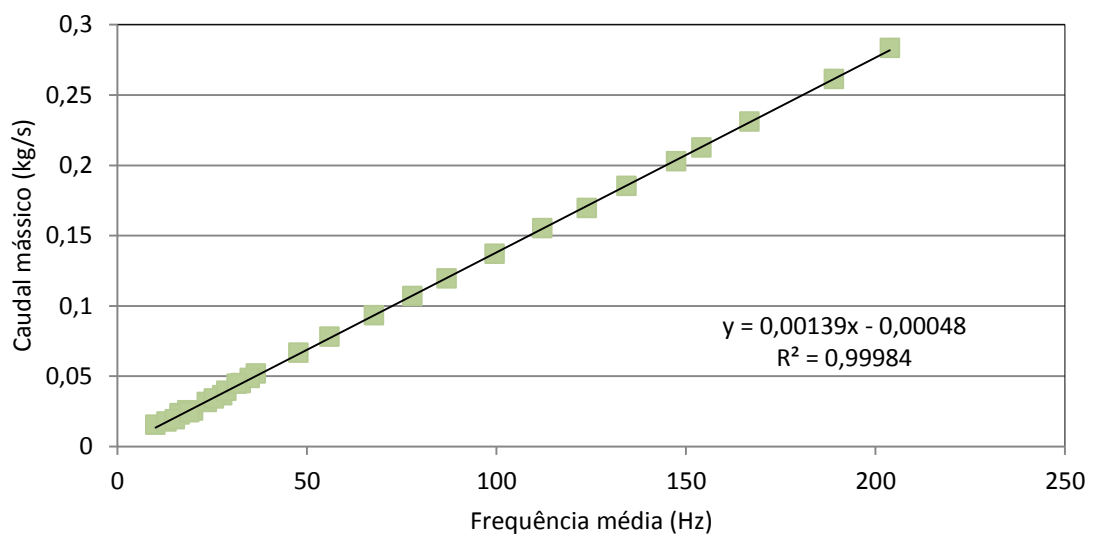
$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{m_{\text{água}}}{\Delta t} \quad (\text{B.2})$$

onde  $m_{\text{água}}$  é a massa de água e  $\Delta t$  o intervalo de tempo em que decorreu o ensaio.

Na Figura B.4 encontra-se representado o esquema da instalação utilizado na calibração da turbina e a Figura B.5 apresenta a curva de calibração obtida.



**Figura B.4:** Esquema da instalação utilizada na calibração da turbina.



**Figura B.5:** Curva de calibração da turbina.

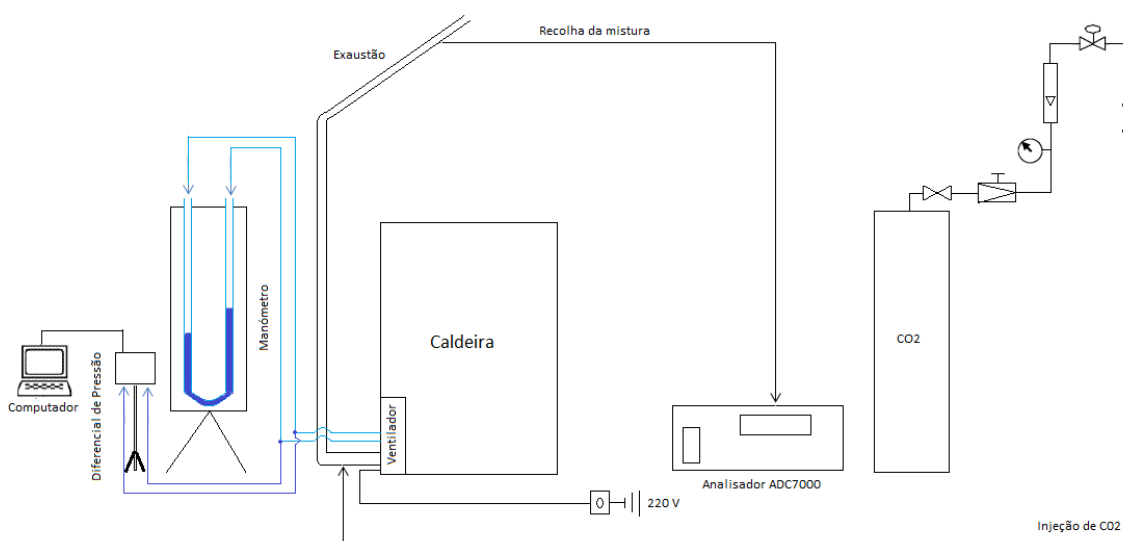
### B3. Calibração do ventilador principal da caldeira

A calibração do ventilador principal da caldeira teve como objetivo a determinação do caudal de gases de combustão que escoavam através do mesmo, durante os ensaios experimentais.

A calibração foi efetuada recorrendo ao método do gás traçador. Este método consiste na introdução de um gás de referência, com um caudal conhecido, no escoamento que se pretende estudar. No caso presente usou-se  $\text{CO}_2$  como gás traçador e, como é necessário conhecer-se o caudal gás de referência usado na calibração, foi também necessário calibrar um medidor de caudal (rotâmetro). A calibração do rotâmetro encontra-se descrita no parágrafo B4.

A calibração do ventilador principal consistiu então na injeção de um caudal mássico de  $\text{CO}_2$  conhecido (posição 10 do flutuador do rotâmetro 2D150, que correspondia a  $0,0001158 \text{ kg/s}$ ), depois do ventilador. Um tubo com cerca de 15 metros permitia o transporte do  $\text{CO}_2$  da instalação utilizada para este efeito até à caldeira e, da mistura de ar/ $\text{CO}_2$  da caldeira até ao analisador de gases (ADC-7000), previamente calibrado, Figura B.6. O ponto escolhido para a recolha da mistura foi a chaminé, para isso efetuou-se um furo na tubagem da chaminé um pouco antes da saída, de modo a permitir um comprimento suficiente para que ocorresse uma boa mistura entre o dióxido de carbono e o ar. No topo da chaminé colocou-se um “registo” com o objetivo de variar a quantidade de ar, permitindo assim diferentes caudais de ar. Duas tomas de pressão, uma antes e outra depois do ventilador, encontravam-se ligadas a um manómetro diferencial de coluna de água e a um transdutor diferencial de pressão FCO 34 da *Furness Controls Limited*. O transdutor estava ligado à placa NI USB 6008, utilizando o programa Labview 8.6 da *National Instruments* como programa para aquisição de dados.

A Figura B.6 representa esquematicamente a instalação experimental utilizada para a calibração do ventilador.



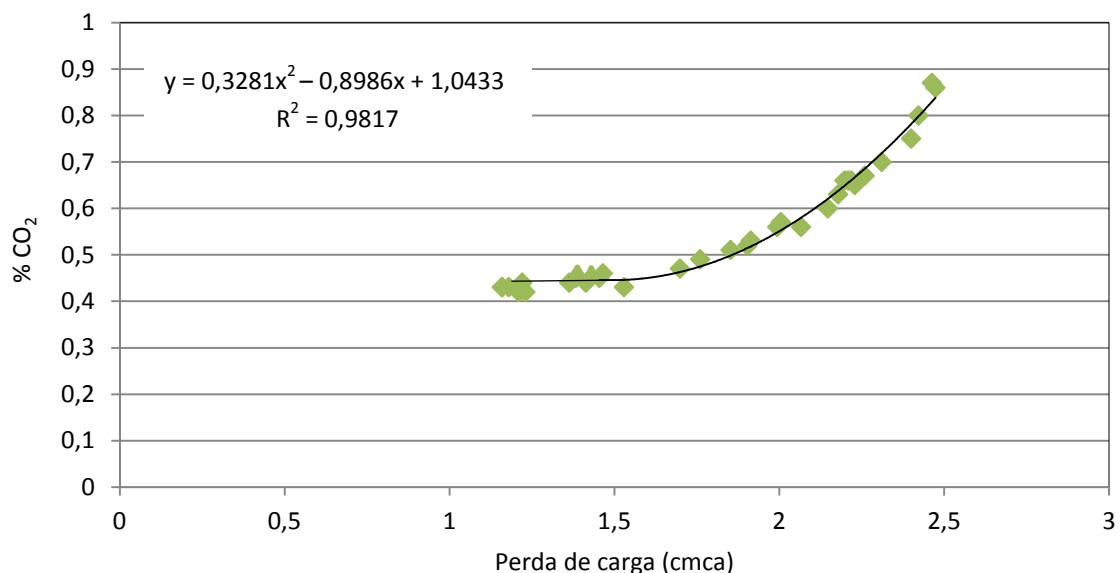
**Figura B.6:** Instalação experimental utilizada na calibração do ventilador.

A curva de calibração do ventilador foi conseguida através da variação da posição do “registo”. Para cada ponto de calibração correspondia uma posição diferente do “registo”, deste modo eram registadas as leituras do analisador de CO<sub>2</sub>, a altura manométrica lida no manómetro diferencial de coluna de água e a tensão no transdutor diferencial de pressão.

Como a quantidade de CO<sub>2</sub> injetada era constante, quando a posição do “registo” era alterada, permitia-se aumentar ou diminuir a quantidade de ar que escoava através do ventilador, alterando assim a percentagem de CO<sub>2</sub> medida na mistura.

O ar que escoava através do ventilador (que se encontrava ligado à corrente elétrica) era misturado com o CO<sub>2</sub>, a uma temperatura constante. Parte da mistura era então recolhida para análise da concentração de CO<sub>2</sub> e a restante escoava para a atmosfera.

A Figura B.7 representa a curva de calibração conseguida pelo método do gás traçador.



**Figura B.7:** Curva de calibração do ventilador - Perda de carga vs % CO<sub>2</sub>.

Tratando o ar e o CO<sub>2</sub> como gases perfeitos e efetuando um balanço de massa a ambos, obtêm-se (Paiva, 2001):

- Ar

$$(\dot{m}_{ar})_{ent} = (\dot{m}_{ar})_{sai} \Leftrightarrow \frac{P}{RT} [\dot{V}_{ar} (1 - X_{CO_2})]_{ent} = \frac{P}{RT} [\dot{V}_{mistura} (1 - X_{CO_2})]_{sai} \quad (B.3)$$

- CO<sub>2</sub>

$$(\dot{m}_{CO_2})_{ent} = (\dot{m}_{CO_2})_{sai} \Leftrightarrow \frac{P}{RT} (\dot{V}_{CO_2})_{ent} + \frac{P}{RT} (\dot{V}_{ar} X_{CO_2})_{ent} = \frac{P}{RT} (\dot{V}_{mistura} X_{CO_2})_{sai} \quad (B.4)$$

sendo  $\dot{V}_{ar}$  o caudal volúmico de ar,  $\dot{V}_{CO_2}$  o caudal volúmico de  $CO_2$ ,  $\dot{V}_{mistura}$  o caudal volúmico da mistura de  $CO_2$  e ar e  $X_{CO_2}$  a fração molar de  $CO_2$ .

Resolvendo as Equações (B.3) e (B.4) em ordem a  $\dot{V}_{ar}$  obtém-se a seguinte equação:

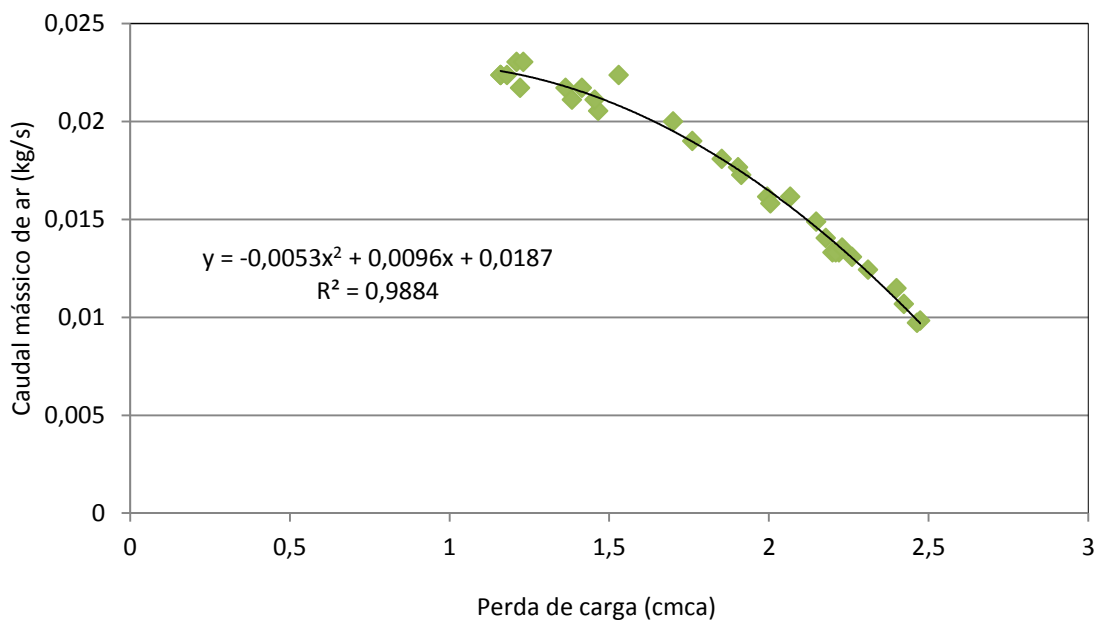
$$(\dot{V}_{ar})_{ent} = \frac{(1-X_{CO_2})_{sai}}{(X_{CO_2})_{sai} - (X_{CO_2})_{ent}} (\dot{V}_{CO_2})_{ent} \quad (B.5)$$

Depois de conhecido o caudal volúmico de ar, o caudal mássico foi calculado através da Equação (B.6).

$$\dot{m}_{ar} = \dot{V}_{ar} \cdot \rho_{ar} \quad (B.6)$$

onde  $\rho_{ar}$  representa a massa volúmica do ar.

A Figura B.8 representa a curva de calibração obtida através do método do gás traçador, que relaciona a perda de carga com o caudal mássico de ar.



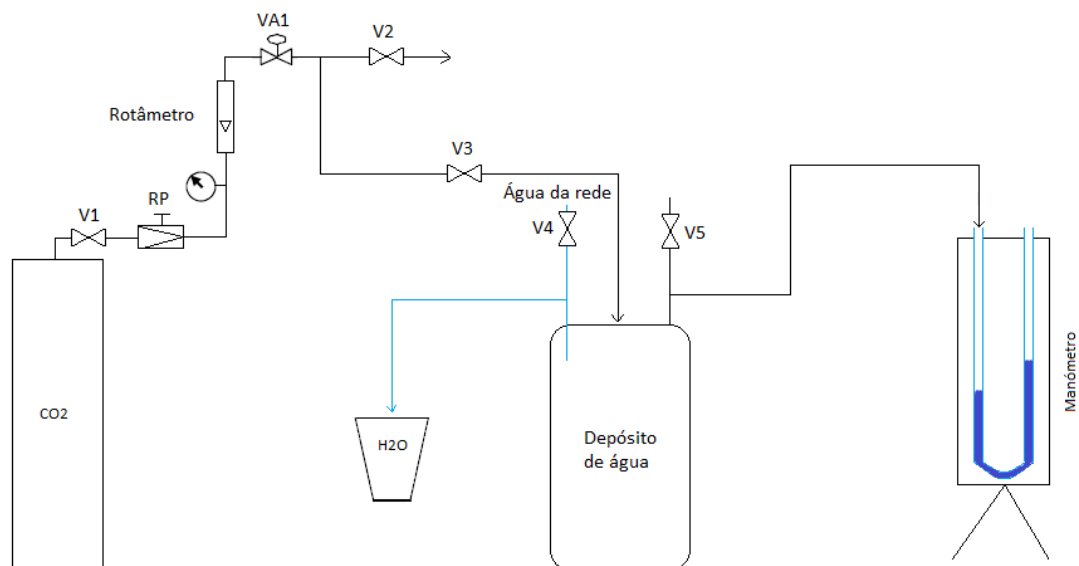
**Figura B.8:** Curva de calibração do ventilador - Perda de carga vs Caudal mássico de ar.

## B4. Calibração do rotâmetro do CO<sub>2</sub>

O rotâmetro utilizado durante a calibração do ventilador da caldeira foi o 2D150 com flutuador de rubi, da marca *KDG FLOWMETERS*. O rotâmetro foi calibrado pelo método do deslocamento positivo. Este processo de calibração consiste na introdução de um determinado gás num reservatório que se encontre cheio de água. Assim, à medida que o gás é introduzido no reservatório a água lá contida é obrigada a sair. Pesando a massa de água que saiu num determinado intervalo de tempo determina-se o caudal mássico de água que saiu do reservatório, sendo posteriormente calculado o caudal de gás introduzido, uma vez que o caudal volúmico de gás introduzido é igual ao caudal volúmico de água que saiu (Pinho, 2012).

A calibração do rotâmetro consistiu na determinação do caudal mássico de CO<sub>2</sub> que correspondia a cada posição do rotâmetro.

Na Figura B.9 encontra-se representada a instalação utilizada para a calibração do rotâmetro.



**Figura B.9:** Instalação experimental utilizada para a calibração do rotâmetro.

A instalação experimental utilizada para a calibração do rotâmetro (Pereira, 2012a), consistia num reservatório de CO<sub>2</sub> que se encontrava conectado a um depósito de água e à atmosfera. O reservatório continha uma tubagem em “T” que permitia tanto o enchimento com água da rede, como a saída da água para um recipiente para o processo de calibração. O reservatório continha ainda uma toma de pressão ligada a um manómetro diferencial de coluna de água.

No início de cada ensaio de calibração, o depósito era completamente cheio de água encontrando-se a válvula V5 aberta. Foram calibradas as 10 posições do flutuador do rotâmetro, sendo o caudal desejado regulado pela válvula de agulha VA1. Através da válvula redutora de pressão, a pressão na linha de alimentação era regulada para 1 bar de pressão relativa, estando a válvula V2 aberta para permitir uma saída do CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Nesse momento a instalação encontrava-se pronta para o início do ensaio, deste modo a válvula V5 e seguidamente a V2 eram fechadas e a válvula V3 aberta. Instantaneamente era injetado CO<sub>2</sub> no depósito e a água lá contida começava a sair, sendo encaminhada para um recipiente secundário. Posteriormente, a água era dirigida para um recipiente previamente pesado e simultaneamente era iniciada a contagem do tempo. Durante o ensaio eram realizadas leituras consecutivas de pressão no manómetro de coluna de água, para ter em conta os efeitos de compressibilidade do CO<sub>2</sub>.

O ensaio terminava com a paragem na contagem do tempo e com o encaminhamento da água novamente para o recipiente secundário. De seguida era aberta a válvula V2 e fechada a válvula V3. A temperatura ambiente e a pressão atmosférica eram registadas no final de cada ensaio.

O recipiente era posteriormente pesado e preparado para um novo ensaio. A calibração de cada posição do flutuador foi repetida no mínimo 4 vezes.

O caudal volúmico de água foi calculado recorrendo à seguinte equação:

$$\dot{V}_{\text{água}} = \frac{m_{\text{água}}}{\Delta t \rho_{\text{água}}} \quad (\text{B.7})$$

onde  $m_{\text{água}}$  representa a massa de água colhida num ensaio,  $\Delta t$  o intervalo de tempo em que decorreu o ensaio e  $\rho_{\text{água}}$  a massa volúmica da água.

Considerando o CO<sub>2</sub> como um gás ideal, mas tendo em conta os efeitos de compressibilidade, o caudal volúmico de CO<sub>2</sub> pode ser calculado através da Equação (B.8).

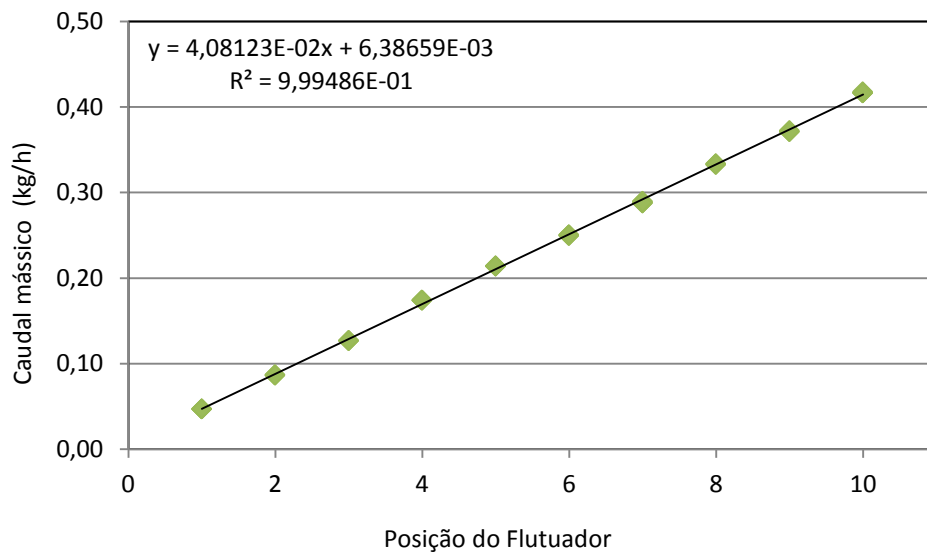
$$\dot{V}_{CO_2} = Z \dot{m}_{CO_2} \frac{\bar{R}}{M_{CO_2}} \frac{T_{CO_2}}{P_{CO_2}} \quad (\text{B.8})$$

onde Z representa o fator de compressibilidade do CO<sub>2</sub>,  $\bar{R}$  é a constante universal dos gases perfeitos,  $M_{CO_2}$  representa a massa molecular do CO<sub>2</sub>,  $T_{CO_2}$  e  $P_{CO_2}$  representam respetivamente a temperatura e pressão do CO<sub>2</sub>.

Igualando as Equações (B.7) e (B.8) e considerando que a  $T_{CO_2} = T_{\text{ambiente}}$  e  $P_{CO_2} = P_{\text{atm.}} + \Delta P$ , em que  $\Delta P$  é a média da pressão diferencial lida no manómetro de coluna de água, o caudal mássico de CO<sub>2</sub> foi calculado através da seguinte equação:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{m_{\text{água}}}{\Delta t \rho_{\text{água}}} \frac{1}{Z} \frac{M (\Delta P + P_{\text{atm.}})}{\bar{R} T_{\text{amb.}}} \quad (\text{B.9})$$

A Figura B.10 representa a curva de calibração do rotâmetro para as 10 posições do flutuador à pressão relativa de 1 bar.



**Figura B.10:** Curva de calibração do rotâmetro, com CO<sub>2</sub> à pressão relativa de 1 bar.

## Anexo C - Análise de incertezas

Neste anexo são apresentadas as incertezas associadas a algumas das medições efetuadas durante o presente trabalho, nomeadamente a concentração molar dos gases de exaustão, as temperaturas, o caudal mássico de peletes e o caudal mássico de água.

A medição de qualquer variável tem associada uma incerteza experimental que pode ser de origem sistemática ou aleatória. Na análise detalhada de incertezas, o procedimento passa pela pesquisa das fontes elementares de erro e pela determinação da sua contribuição através da estimativa das incertezas sistemáticas e aleatórias de cada variável medida (Coleman e Steele, 1999).

Segundo Coleman e Steele (1999), um resultado experimental  $r$  é uma função das variáveis medidas  $X_i$ , de acordo com a equação de redução de dados:

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_J) \quad (C.1)$$

A incerteza total associada à medição de uma variável com um nível de confiança de 95% pode ser calculada da seguinte forma:

$$U_r^2 = B_r^2 + P_r^2 \quad (C.2)$$

onde,

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

e

$$P_r^2 = \sum_{i=1}^J \theta_i^2 P_i^2 \quad (C.4)$$

em que  $U_r$  representa a incerteza total associada à medição da variável  $X_i$ ,  $B_r$  e  $P_r$  são as incertezas sistemáticas e aleatórias associadas à variável  $X_i$ ,  $B_{ik}$  é o estimador de covariância e  $\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i}$ .

### C.1 Incerteza associada à medição de concentração molar dos gases de exaustão

Na determinação da incerteza associada à medição da concentração molar dos gases de exaustão foram apenas consideradas as incertezas relativas à exatidão e resolução do analisador. A tabela seguinte ilustra, de acordo com o fabricante, a resolução e exatidão referentes à medição da concentração de oxigénio, de monóxido de carbono, de óxido de azoto e de dióxido de carbono.

**Tabela C.1:** Resolução e exatidão do analisador Testo 350.

|                                       | <b>Resolução</b> | <b>Exatidão</b>                                    |
|---------------------------------------|------------------|--|
| Oxigénio (O <sub>2</sub> )            | 0,01% (vol.)     | ± 0,2% (vol.)                                      |
| Monóxido de carbono (CO)              | 1 ppm            | ± 10 ppm (0 ... 99 ppm)                            |
|                                       |                  | ± 5% da leitura (100 ... 1999 ppm)                 |
|                                       |                  | ± 10% da leitura (no resto da gama)                |
| Óxido de azoto (NO)                   | 1 ppm            | ± 5 ppm (0 ... 99 ppm)                             |
|                                       |                  | ± 5% da leitura (100 ... 1999 ppm)                 |
|                                       |                  | ± 10% da leitura (no resto da gama)                |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | 0,01% (vol.)     | ± 0,3% (vol.) ± 1% da leitura (0 ... 25% (vol.))   |
|                                       |                  | ± 0,5% (vol.) ± 1,5% da leitura (no resto da gama) |

Foi calculada a incerteza na medição da concentração dos gases de exaustão, nas três cargas térmicas (“reduzida”, “média” e “alta”), devido às diferentes concentrações medidas. Os valores médios de concentração utilizados correspondem aos valores típicos dos ensaios de peletes de pinho.

Para cada gás, considerou-se a incerteza aleatória associada à medição como sendo igual a metade da resolução do analisador. Os valores da incerteza aleatória calculados encontram-se representados na Tabela C.2.

**Tabela C.2:** Incertezas aleatórias associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.

| $P_{O_2}$ (% vol.) | $P_{CO}$ (% vol.) | $P_{NO}$ (% vol.) | $P_{CO_2}$ (% vol.) |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| 0,005              | 0,00005           | 0,00005           | 0,005               |

As incertezas sistemáticas foram calculadas de acordo com a exatidão do analisador e encontram-se representadas na Tabela C.3.

**Tabela C.3:** Incertezas sistemáticas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.

| Carga      | $B_{O_2}$ (% vol.) | $B_{CO}$ (% vol.) | $B_{NO}$ (% vol.) | $B_{CO_2}$ (% vol.) |
|------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| “reduzida” | 0,2                | 0,0284            | 0,0005            | 0,388               |
| “média”    | 0,2                | 0,00375           | 0,0005            | 0,382               |
| “alta”     | 0,2                | 0,00198           | 0,0005            | 0,379               |

A incerteza total associada à medição da concentração de cada gás de exaustão foi calculada recorrendo à Equação (C.5).

$$U_{gás} = \sqrt{P_{gás}^2 + B_{gás}^2} \quad (C.5)$$

Na Tabela C.4 apresentam-se os resultados da determinação da incerteza total associada à medição da concentração dos gases de exaustão.

**Tabela C.4:** Incertezas totais associadas à medição dos gases de exaustão.

| Carga      | $U_{O_2}$ (% vol.) | $U_{CO}$ (% vol.) | $U_{NO}$ (% vol.) | $U_{CO_2}$ (% vol.) |
|------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| “reduzida” | 0,200              | 0,02840           | 0,0005            | 0,3880              |
| “média”    | 0,200              | 0,00375           | 0,0005            | 0,3820              |
| “alta”     | 0,200              | 0,00198           | 0,0005            | 0,3790              |

## C.2 Incerteza associada à medição da temperatura dos gases de exaustão

A temperatura dos gases de exaustão foi medida recorrendo a um termopar tipo K ligado a um sistema de aquisição de dados *PICO TC08*; deste modo, foi considerada a incerteza relativa à medição do termopar e à do sistema de aquisição de dados. Segundo o fabricante, a exatidão do sistema de aquisição é de  $\pm 0,2\%$  da leitura  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ; relativamente ao termopar, o mesmo fabricante indica uma exatidão de  $1,1\%$  da gama de temperaturas medidas.

As incertezas sistemáticas associadas ao termopar ( $B_K$ ) e ao sistema de aquisição de dados ( $B_{Sist.}$ ), foram igualmente calculadas de acordo com a exatidão fornecida pelo respetivo fabricante. Relativamente à incerteza aleatória ( $P_T$ ), considerou-se igual a metade da resolução da leitura utilizada. A incerteza sistemática total foi calculada de acordo com a Equação (C.6) e a incerteza total associada à medição da temperatura dos gases de exaustão foi calculada através da Equação (C.7).

$$B_T = \sqrt{B_K^2 + B_{Sist.}^2} \quad (C.6)$$

$$U_T = \sqrt{B_T^2 + P_T^2} \quad (C.7)$$

A Tabela C.5 representa as incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases de exaustão para as três cargas térmicas testadas.

**Tabela C.5:** Determinação das incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases.

| Carga      | Temp. (°C) | B <sub>k</sub> (°C) | B <sub>Sist.</sub> (°C) | P <sub>T</sub> (°C) | B <sub>T</sub> (°C) | U <sub>T</sub> (°C) | U <sub>T</sub> /T (%) |
|------------|------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| “reduzida” | 100        | 1,10                | 0,70                    | 0,05                | 1,30                | 1,30                | 1,30                  |
| “média”    | 150        | 1,65                | 0,80                    | 0,05                | 1,83                | 1,83                | 1,22                  |
| “alta”     | 240        | 2,64                | 0,98                    | 0,05                | 2,82                | 2,82                | 1,18                  |

### C.3 Incerteza associada à medição do caudal mássico de peletes

Um dos métodos utilizados na medição do consumo de peletes consistiu na medição da massa inicial dos peletes, antes de colocados no depósito, e da massa restante no final do ensaio, depois de retirados. O caudal mássico de peletes queimados é a razão entre a diferença de massas e o intervalo de tempo que demorou o ensaio, Equação (C.8).

$$\dot{m}_{peletes} = \frac{m_{peletes}}{\Delta t_{ensaio}} \quad (C.8)$$

A massa de peletes foi determinada utilizando uma balança (*Precisa 6200*), com uma exatidão de 0,1 g e uma reprodutividade de 0,05 g. Considerou-se que a exatidão na medição do tempo foi de 0,1 s em 1 hora. Deste modo, a incerteza aleatória na medição da massa de peletes ( $P_{massa}$ ) foi de 0,05 g. Relativamente à incerteza sistemática na medição da massa de peletes ( $B_{massa}$ ), considerou-se igual a 0,1 g; a incerteza sistemática associada à medição do tempo foi de 0,15 s, uma vez que, em média, a duração de um ensaio era de 90 minutos.

Para calcular a incerteza associada à medição do caudal mássico de peletes, foram consideradas as incertezas relativas à medição da massa de peletes e da duração do ensaio, através da equação de propagação de incertezas:

$$B_{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{massa\ inicial} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{massa\ final} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} B_{tempo} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.9)$$

Substituindo as derivadas e dividindo ambos os membros pelo caudal mássico de água ( $\dot{m}$ ), vem:

$$\frac{B_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{B_{massa\ inicial}}{m_i} \right)^2 + \left( \frac{B_{massa\ final}}{m_f} \right)^2 + \left( \frac{B_{tempo}}{t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.10)$$

A incerteza aleatória associada à medição do caudal mássico de peletes foi calculada de acordo com a Equação (C.11).

$$P_{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial m_i} P_{massa\ inicial} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial m_f} P_{massa\ final} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.11)$$

Substituindo as derivadas e dividindo ambos os membros pelo caudal mássico de água ( $\dot{m}$ ), vem:

$$\frac{P_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{P_{massa\ inicial}}{m_i} \right)^2 + \left( \frac{P_{massa\ final}}{m_f} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.12)$$

Por último, a incerteza total associada à medição do caudal mássico de peletes foi determinada através da seguinte equação:

$$\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \left[ \left( \frac{P_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{B_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.13)$$

Na Tabela C.6 são apresentadas as incertezas associadas à medição do caudal mássico de peletes para as três cargas testadas, no caso dos ensaios realizados com o pinho.

**Tabela C.6:** Determinação da incerteza associada à medição do caudal mássico de peletes.

| Carga      | t (s) | $m_i$ (g) | $m_f$ (g) | $B_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%) | $P_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%) | $U_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%) |
|------------|-------|-----------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| “reduzida” | 5400  | 5000      | 3000      | 0,00478                   | 0,00167                   | 0,00506                   |
| “média”    | 5400  | 5000      | 2500      | 0,00526                   | 0,00224                   | 0,00572                   |
| “alta”     | 5400  | 6000      | 850       | 0,0122                    | 0,00594                   | 0,01357                   |

#### C.4 Incerteza associada à medição do caudal mássico de água

Segundo o fabricante, o medidor de caudal de turbina utilizado na medição do caudal mássico de água tem uma exatidão de  $\pm 2\%$  e uma precisão de  $\pm 1\%$ . Deste modo, a incerteza na medição do caudal mássico de água foi calculada de acordo com a Equação (C.14). Na Tabela C.7 são apresentadas as incertezas na medição do caudal mássico de água utilizando a turbina.

$$U_{Turbina} = \sqrt{B_{Turbina}^2 + P_{Turbina}^2} \quad (C.14)$$

**Tabela C.7:** Incerteza associada à medição do caudal mássico de água.

| $\dot{m}_{\text{água}}$ (l/min) | $B_{Turbina}$ (l/min) | $P_{Turbina}$ (l/min) | $U_{Turbina}$ (l/min) | $U_T/\dot{m}_{\text{água}}$ (%) |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 10                              | 0,2                   | 0,1                   | 0,224                 | 0,0224                          |

### C.5 Incerteza associada à medição das temperaturas da água

As temperaturas da água à entrada e à saída da caldeira foram medidas através de dois termopares tipo K, ligados a um sistema de aquisição de dados *PICO TC08*, o mesmo utilizado na medição da temperatura dos gases de exaustão.

As incertezas sistemáticas associada ao termopar ( $B_K$ ) e ao sistema de aquisição de dados ( $B_{Sist.}$ ) foram calculadas de acordo com a exatidão fornecida pelo fabricante. Quanto à incerteza aleatória ( $P_T$ ), considerou-se igual a metade da resolução da leitura utilizada. A incerteza sistemática total ( $B_T$ ) foi calculada de acordo com a Equação (C.15) e a incerteza total associada à medição das temperaturas da água foi calculada segundo a Equação (C.16).

$$B_T = \sqrt{B_K^2 + B_{Sist.}^2} \quad (C.15)$$

$$U_T = \sqrt{B_T^2 + P_T^2} \quad (C.16)$$

Nas Tabelas C.8 e C.9 são apresentadas as incertezas na medição da temperatura da água à entrada e saída da caldeira, respetivamente.

**Tabela C.8:** Incerteza associada à medição da temperatura da água à entrada da caldeira.

| $T_{entrada}$ (°C) | $B_K$ (°C) | $B_{Sist.}$ (°C) | $P_T$ (°C) | $B_T$ | $U_T$ | $U_T/T$ (%) |
|--------------------|------------|------------------|------------|-------|-------|-------------|
| 14                 | 0,15       | 0,53             | 0,05       | 0,55  | 0,55  | 3,93        |

**Tabela C.9:** Incerteza associada à medição da temperatura da água à saída da caldeira.

| Carga      | $T_{saída}$ (°C) | $B_k$ (°C) | $B_{Sist.}$ (°C) | $B_T$ (°C) | $P_T$ (°C) | $U_T$ (°C) | $U_T/T$ (%) |
|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------|------------|-------------|
| “reduzida” | 19               | 0,21       | 0,538            | 0,578      | 0,05       | 0,580      | 3,05        |
| “média”    | 21               | 0,23       | 0,542            | 0,589      | 0,05       | 0,591      | 2,81        |
| “alta”     | 31               | 0,34       | 0,562            | 0,631      | 0,05       | 0,633      | 2,04        |