



**Diana Neves  
Bastos**

**Avaliação do desempenho dum processo industrial de  
pirólise de biomassa**





**Diana Neves  
Bastos**

**Avaliação do desempenho dum processo industrial de  
pirólise de biomassa**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.



*"No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade"*

Albert Einstein



**o júri**

**presidente**

Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais  
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**vogais**

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho  
Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro  
(Orientador)

Professor Doutor Jorge Ribeiro Frade  
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da  
Universidade de Aveiro  
(Arguente)





## **agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço ao orientador Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho pela orientação e ajuda prestada ao longo deste trabalho de estágio e por ter contribuído na minha aprendizagem. Sem os seus conhecimentos jamais conseguiria concluir este trabalho.

Ao Eng.º Tiago Santos por todo o apoio e companheirismo ao longo do estágio. O seu apoio foi fundamental na minha integração com os funcionários da empresa.

A todos os meus amigos, pela compreensão, amizade e por toda a motivação que me deram para eu conseguir concretizar esta etapa.

Aos meus pais e irmãos, pelos esforços que sempre fizeram para que fosse possível concretizar este sonho ao nível da minha formação e por toda a confiança que depositaram em mim ao longo destes 5 anos.

À minha família em geral, por se preocuparem comigo e por terem estado sempre presentes quando eu mais precisei.

Por último, a uma das pessoas mais importantes da minha vida, ao meu namorado, Filipe Rios, que sempre esteve do meu lado nos momentos mais difíceis. A dedicação, compreensão, entrega, carinho, amor, amizade, apoio e confiança que me deu foram fundamentais para que conseguisse ultrapassar todas as barreiras. É uma das pessoas que mais acredita no meu sucesso e me faz lutar todos os dias pelos meus objetivos. Obrigada!



## palavras-chave

Biomassa, Pirólise, Temperatura, Efluente gasoso, Carvão vegetal.

## resumo

O aproveitamento da biomassa como fonte de energia pode ser feito através da conversão termoquímica. A tecnologia de pirólise é um processo eficiente de conversão da biomassa para a produção de carvão vegetal. No entanto, ainda existem algumas limitações neste método, principalmente no que respeita às emissões dos gases poluentes produzidos durante o processo. Assim, é fundamental caracterizar os gases emitidos para atmosfera durante este processo. Como alternativa a este problema surgiu a hipótese de incorporar a valorização energética dos produtos gasosos obtidos ao longo do processo.

O presente trabalho de estágio teve como principal objetivo caracterizar o desempenho do processo de pirólise de biomassa florestal num reator de leito fixo da empresa Ibero Massa Florestal S.A.. Para tal, realizou-se uma caracterização geral do processo, nomeadamente a caracterização de alguns parâmetros da biomassa, as condições operatórias e a caracterização do carbonizado, a monitorização dos produtos gasosos e posteriormente o cálculo dos balanços mássico e energético.

Após a análise de vários processos, verificou-se que em média cada processo apresenta uma duração média de 10 horas e a câmara de pirólise atinge uma temperatura de pico na gama de 550°C a 600°C. Relativamente ao caudal volumétrico de gases de exaustão, verificou-se um caudal máximo de 0,50 m<sup>3</sup>/s quando se atinge a temperatura máxima na câmara de pirólise. Os resultados obtidos da análise efetuada aos gases de exaustão evidenciaram concentrações superiores de CO e CO<sub>2</sub> na fase de pirólise e concentrações inferiores de O<sub>2</sub>. Quanto às partículas, verificou-se concentrações superiores quando o efluente gasoso atingiu valores máximos de CO e CO<sub>2</sub>. Quanto ao balanço mássico, constatou-se que os gases de pirólise são os reagentes que apresentam um caudal de carbono superior e nos produtos são os gases de exaustão. Do balanço energético realizado à instalação, verificou-se que cerca de 63% da energia produzida é perdida pelo sistema.

A tecnologia utilizada pela empresa Ibero Massa Florestal S.A. demonstrou ser apropriada para produzir carvão vegetal, contudo necessita de mais otimização dos parâmetros operatórios de forma a tornar todo o processo mais eficiente a todos os níveis.



**keywords**

Biomass, pyrolysis, temperature, gaseous effluent, charcoal.

**abstract**

The use of biomass as an energy source can be done by thermochemical conversion. Pyrolysis technology is an efficient biomass conversion process used for charcoal production. However, there are still some limitations to this method, particularly with respect to the emissions of greenhouse gases produced during the process. Thus, it is essential to characterize the gases emitted into the atmosphere during this process. Energy recovery of the gaseous products obtained in the process has arisen as a possible solution to this problem.

This aim of this work was to characterize the performance of the forest biomass pyrolysis process in a fixed bed reactor, located in the facilities of the Ibero Forest Massa S.A company. For this, there was a general characterization of the process, in particular, some parameters biomass, operating conditions and characterization of the carbonized material, monitoring of gaseous products and then calculation of the mass and energy balances.

After analyzing various methods, it was found that, on average, each process has a duration of 10 hours and the pyrolysis chamber reaches a peak temperature in the range of 550°C to 600°C. Regarding the volumetric flow rate of exhaust gases, there is a maximum flow of 0.50 m<sup>3</sup>/s when it reaches the maximum temperature in the pyrolysis chamber. The results obtained from the analysis performed on the exhaust gases showed higher concentrations of CO and CO<sub>2</sub> in the pyrolysis stage and lower concentrations of O<sub>2</sub>. As to the particles, there are higher concentrations when the gaseous effluent reached maximum values of CO and CO<sub>2</sub>. As for the mass balance, the pyrolysis gases are the reagents, which have a higher carbon flow, and the products are the exhaust gases. From the energetic balance performed at the installations, it was found that approximately 63% of the energy produced by the system is lost.

The technology used by the company proved suitable for the production of charcoal, but needs further optimization of the operating parameters so as to make the process more efficient at all levels.



## Índice

|   |     |
|---|-----|
| Índice de Figuras .....   | iv  |
| Índice de Tabelas .....   | vii |
| Lista de abreviaturas .....                                     | ix  |
| Nomenclatura .....  | x   |
| 1 Capítulo introdutório .....                                   | 1   |
| 1.1 Introdução .....  | 1   |
| 1.2 Objetivos .....   | 2   |
| 1.3 Estrutura da Tese.....                                      | 2   |
| 2 Pirólise de Biomassa .....                                    | 5   |
| 2.1 Biomassa .....  | 5   |
| 2.1.1 Biomassa como matéria-Prima .....                         | 6   |
| 2.1.2 Composição e propriedades da biomassa .....               | 8   |
| 2.2 Tecnologias de conversão de biomassa .....                  | 9   |
| 2.3 Pirólise .....  | 11  |
| 2.3.1 Parâmetros do processo .....                              | 12  |
| 2.3.2 Produtos do processo.....                                 | 13  |
| 2.4 Tecnologias para a produção de carvão vegetal.....          | 14  |
| 2.4.1 Sistemas de produção de carvão vegetal .....              | 15  |
| 2.4.1.1 Reator em Leito Fixo.....                               | 15  |
| 2.4.1.2 Reator em Leito Fluidizado .....                        | 16  |
| 2.4.1.3 Reator em Cone Rotativo .....                           | 17  |
| 2.4.2 Produção tradicional de carvão vegetal .....              | 18  |
| 2.4.3 Métodos tradicionais melhorados.....                      | 18  |
| 2.4.4 Tecnologias de produção industrial.....                   | 19  |
| 2.4.5 Tendência atual de produção de carvão vegetal .....       | 20  |
| 3 Produção de carvão vegetal na Ibero Massa Florestal S.A. .... | 23  |
| 3.1 Processo produtivo .....                                    | 23  |
| 3.2 Instalação.....   | 26  |
| 3.2.1 Sistema de produção.....                                  | 26  |
| 3.2.1.1 Estrutura.....  | 26  |
| 3.2.1.2 Fases do processo de produção de carvão vegetal .....   | 29  |
| 3.3 Produtos no Mercado.....                                    | 31  |
| 4 Metodologia .....   | 33  |
| 4.1 Caracterização da Instalação .....                          | 33  |
| 4.2 Caracterização Geral do processo .....                      | 35  |
| 4.2.1 Biomassa .....  | 35  |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.2.1.1 | Pré-processamento da biomassa .....                             | 35 |
| 4.2.1.2 | Caracterização da biomassa .....                                | 39 |
| 4.2.2   | Carbonizado.....  | 41 |
| 4.2.3   | Condições operatórias .....                                     | 42 |
| 4.2.3.1 | Temperatura e Pressão .....                                     | 42 |
| 4.2.3.2 | Consumo de combustível auxiliar .....                           | 43 |
| 4.2.3.3 | Caudal volumétrico de ar e dos gases de exaustão.....           | 43 |
| 4.2.3.4 | Caudal mássico de ar e dos gases de exaustão .....              | 46 |
| 4.3     | Caracterização dos gases de exaustão.....                       | 47 |
| 4.3.1   | Sistema de amostragem e Análise gasosa .....                    | 47 |
| 4.3.1.1 | Experiência 1 .....   | 47 |
| 4.3.1.2 | Experiência 2 .....   | 50 |
| 4.3.2   | Capacidade calorífica da mistura gasosa.....                    | 53 |
| 4.4     | Balanço mássico ao carbono .....                                | 54 |
| 4.5     | Balanço energético .....  | 56 |
| 4.5.1   | Energia dos reagentes.....                                      | 58 |
| 4.5.1.1 | Energia dos reagentes – Calor sensível.....                     | 58 |
| 4.5.1.2 | Energia dos reagentes – Calor Latente .....                     | 59 |
| 4.5.1.3 | Energia dos reagentes – Calor de reação .....                   | 60 |
| 4.5.2   | Energia dos produtos.....                                       | 60 |
| 4.5.2.1 | Energia dos produtos – Calor sensível .....                     | 60 |
| 4.5.2.2 | Energia dos produtos – Calor latente .....                      | 61 |
| 4.5.2.3 | Energia dos produtos – Calor de reação .....                    | 61 |
| 4.5.3   | Energia útil.....   | 62 |
| 4.5.4   | Energia perdida.....  | 62 |
| 5       | Apresentação e discussão dos resultados obtidos .....           | 63 |
| 5.1     | Caracterização da biomassa e do carbonizado.....                | 63 |
| 5.1.1   | Biomassa .....  | 63 |
| 5.1.2   | Carbonizado.....  | 64 |
| 5.2     | Temperatura e Pressão .....                                     | 65 |
| 5.3     | Caudal volumétrico de ar de combustão e gases de exaustão ..... | 69 |
| 5.4     | Análise gasosa .....  | 73 |
| 5.4.1   | Experiência 1 .....   | 73 |
| 5.4.2   | Experiência 2 .....   | 74 |
| 5.5     | Balanço mássico ao carbono .....                                | 79 |
| 5.6     | Balanço energético .....  | 80 |
| 5.7     | Análise de custos dos Processos (A1, A2, RE).....               | 82 |
| 5.8     | Efeito do aumento de escala no desempenho do processo.....      | 83 |
| 6       | Envolvimento com a Empresa .....                                | 87 |



|   |   |     |
|---|---|-----|
| 7 | Conclusões .....  | 89  |
| 8 | Sugestões para trabalho futuro .....                        | 93  |
| 9 | Bibliografia .....  | 95  |
|   | Anexo A- Determinação das características da biomassa ..... | 99  |
|   | Anexo B- Folhas de registo .....                            | 105 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- Tecnologias de conversão da biomassa. ....   | 10 |
| Figura 2- As três fases de degradação térmica de uma partícula sólida de biomassa sob uma atmosfera inerte (Neves et al., 2011). ....  | 11 |
| Figura 3-Rendimento do carvão (Y <sub>ch</sub> ), gás permanente (Y <sub>G</sub> ), o total de líquidos (Y <sub>tar</sub> +Y <sub>H<sub>2</sub>O</sub> ) e água da pirólise (Y <sub>H<sub>2</sub>O</sub> ) em função da temperatura de pico. • - “Taxa de aquecimento rápida” e O - “Taxa de aquecimento lenta” (Neves et al., 2011). .... | 14 |
| Figura 4- Reator em leito fixo (Bridgwater, 2003). ....  | 16 |
| Figura 5- Reator em leito fluidizado borbulhante (lado esquerdo) e reator em leito fluidizado circulante (lado direito) (Sadaka et al., 2009). ....  | 17 |
| Figura 6-Processo de pirólise num reator em cone rotativo (Kiuru et al., 2013). ....   | 17 |
| Figura 7- Representação do forno em poço de terra (lado esquerdo) e do forno em monte de terra (lado direito) (FAO, 1983). ....  | 18 |
| Figura 8- Fornos retangulares (Vilela et al., 2014). ....  | 19 |
| Figura 9 - Tecnologia CML França (Lyon et al., 2015). ....   | 20 |
| Figura 10- Tecnologia Lambiotte (Baltcarbon, 2009). ....   | 21 |
| Figura 11- Processo produtivo da empresa. ....   | 25 |
| Figura 12- Instalação dos fornos fixos de produção de carvão vegetal da Ibero Massa Florestal S.A. ....  | 26 |
| Figura 13- Representação da fornalha-reator de pirólise. ....  | 27 |
| Figura 14- Queimador externo (lado esquerdo) e o respetivo combustível auxiliar (lado direito). ..   | 28 |
| Figura 15 - Consola para controlo do sistema. ....   | 29 |
| Figura 16 - Sonda de temperatura (termopar tipo K) (lado esquerdo) e sensor de pressão (lado direito). ....  | 29 |
| Figura 17 - Representação da duração média de cada fase no reator de pirólise dentro da fornalha. ....   | 30 |
| Figura 18 - Sacos de carvão vegetal que a empresa apresenta no mercado. ....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19 - Representação dos diferentes subprodutos derivados do produto Iberochar.....   | 31 |
| Figura 20- Representação esquemática da instalação em estudo.....  | 34 |
| Figura 21 - Chegada do veículo à empresa com a biomassa. ....  | 36 |
| Figura 22 - Zona de armazenamento e corte da biomassa. ....  | 36 |
| Figura 23 - Cestos de rede com a biomassa cortada (lado esquerdo) e posteriormente a biomassa na estufa (lado direito).....      | 37 |
| Figura 24 - Esquema do secador modelo VSL. ....  | 38 |
| Figura 25- Representação dos valores retirados da consola de temperatura e pressão. ....   | 43 |
| Figura 26 - Localização dos pontos de amostragem da velocidade de escoamento na conduta. ...                                     | 44 |
| Figura 27 - Conduta da entrada de ar na câmara de combustão (lado esquerdo) e conduta dos gases de exaustão (lado direito). .... | 45 |
| Figura 28 - Representação esquemática dos pontos de monitorização do perfil de temperatura. .                                    | 46 |
| Figura 29- Representação esquemática do sistema da primeira amostragem para os gases de exaustão. ....                           | 48 |
| Figura 30- Analisador online de O <sub>2</sub> (sonda Oxy-Flex). ....  | 48 |
| Figura 31- Sonda utilizada para a amostragem dos gases secos de exaustão (CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ). ...            | 49 |
| Figura 32- Montagem do sistema de amostragem da Experiência 1. ....  | 49 |
| Figura 33- Analisador online (ADC WA-558G) utilizado para os gases secos CO, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> . ....             | 49 |
| Figura 34- Representação esquemática do sistema da segunda amostragem dos gases de exaustão. ....                                | 51 |
| Figura 35- Montagem do sistema de amostragem da Experiência 1. ....  | 52 |
| Figura 36- Representação esquemática do sistema de amostragem para as partículas.....  | 53 |
| Figura 37- Sonda de amostragem de partículas (Sonda TCR Tecora). ....  | 53 |
| Figura 38- Representação esquemática do balanço mássico realizado à instalação. ....   | 55 |
| Figura 39-Representação esquemática do balanço energético realizado à instalação. ....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 40- Perfis de temperatura e pressão dos três processos analisados.....  | 66 |
| Figura 41- Representação da variação do caudal de ar admitido na câmara de combustão ao longo dos dois processos.....  | 70 |
| Figura 42- Representação da variação do caudal de ar admitido na câmara de combustão através do ventilador do queimador externo ao longo dos dois processos..... | 71 |
| Figura 43- Representação da variação do caudal volumétrico dos gases de exaustão ao longo dos dois processos.....  | 72 |
| Figura 44- Composição de CO no gás seco de exaustão analisado na Experiência 1.....  | 73 |
| Figura 45- Composição de gás seco (CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ) e gás húmido (O <sub>2</sub> ) no gás de exaustão analisado na Experiência 1.....          | 74 |
| Figura 46- Composição de CO no gás seco da conduta de exaustão analisado na Experiência 2.....   | 76 |
| Figura 47- Composição do gás seco da conduta de exaustão analisado na Experiência 2.....   | 77 |
| Figura 48- Apresentação dos filtros depois da amostragem.....  | 78 |
| Figura 49- Dimensões dos dois tipos de fornalhas da Ibero Massa Florestal S.A.....   | 84 |
| Figura 50-Perfil de temperaturas dos processos das duas instalações.....   | 85 |
| Figura 51- Visita técnica dos alunos da Escola EB 2.3 D. Frei Caetano Brandão.....   | 87 |
| Figura 52- Grupo de formandos com o formador (1ª pessoa do lado esquerdo) nas instalações da empresa.....  | 88 |
| Figura 53- Representação dos pontos de amostragem de temperatura na instalação.....  | 94 |

## Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Distribuição das espécies mais abundantes no território português (Portal das Energias Renováveis, 2016). .....    | 7  |
| Tabela 2- Principais vantagens e limitações do uso da biomassa como fonte de energia (Florestal, 2014). .....                | 7  |
| Tabela 3- Composição química de alguns tipos de combustíveis da biomassa. ....   | 9  |
| Tabela 4- Parâmetros típicos para cada tipo de pirólise e o respetivo produto (Kiuru et al., 2013).12                        |    |
| Tabela 5 - Nomenclatura utilizada para diferenciar as amostras analisadas. ....  | 39 |
| Tabela 6 - Dimensões da conduta dos gases de exaustão e da entrada de ar na câmara de combustão. ....                        | 44 |
| Tabela 7 – Caudal volúmico ( $P=1\text{ atm}$ e $T=25^{\circ}\text{C}$ ) relativo ao $F_c$ máximo do queimador. ....         | 45 |
| Tabela 8 – Fator de capacidade ( $F_c$ ) do ventilador para cada nível de potência do queimador. ....                        | 45 |
| Tabela 9- Coeficientes de regressão da capacidade calorífica a pressão constante dos gases amostrados. ....                  | 54 |
| Tabela 10- Coeficientes de regressão múltipla do calor latente vaporização da água, $h_{wv}$ ( $\text{J.kg}^{-1}$ ).59       |    |
| Tabela 11- Coeficientes da função de regressão múltipla da pressão de vapor de saturação da água, $P_s$ (bar). ....          | 59 |
| Tabela 12- Análise elementar e poder calorífico dos diferentes tipos de biomassa. ....                                       | 63 |
| Tabela 13- Análise imediata das amostras de biomassa. ....   | 64 |
| Tabela 14- Análise elementar e poder calorífico do carvão vegetal produzido pela empresa. ....                               | 64 |
| Tabela 15- Análise imediata das amostras do carbonizado correspondentes a cada processo. ....                                | 65 |
| Tabela 16- Resumo das gamas de temperatura, pressão e consumo de combustível auxiliar nas diferentes fases do processo. .... | 69 |
| Tabela 17- Concentração de partículas de cada filtro amostrado. ....   | 78 |
| Tabela 18- Valores obtidos do balanço mássico ao carbono da instalação em estudo. ....                                       | 79 |
| Tabela 19-Valores das várias componentes do balanço energético realizado à instalação. ....                                  | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 20- Balanço energético global realizado à instalação em estudo.....                          | 81  |
| Tabela 21- Preço por cada tonelada de produto.....  | 82  |
| Tabela 22- Custos e o respetivo lucro de cada processo para a produção de carvão vegetal. ....      | 83  |
| Tabela B.1- Folha de registo para a monitorização da temperatura, pressão e consumo de energia..... | 105 |
| Tabela B.2- Folha de registo para a monitorização do caudal volumétrico. ....                       | 106 |
| Tabela B.3- Folha de registo para a monitorização da composição dos gases de exaustão.....          | 107 |

## **Lista de abreviaturas**

GEE- Gases com efeito de estufa

DGEG- Direção Geral de Energia e Geologia

LFB- Leito fluidizado borbulhante

LFC- Leito fluidizado circulante

PCI- Poder calorífico inferior

VSL- Ventilação Superior Longitudinal

A1- Processo 1 de Acácia

A2- Processo 2 de Acácia

RE- Processo de Raízes de Eucalipto

FSC- Forest Stewardship Council

## Nomenclatura

|  |                     |
|--|---------------------|
| A - Área   | [m <sup>2</sup> ]   |
| Ad – Conteúdo de cinzas da amostra em base seca                                      | [%m, bs]            |
| Btq - Base tal e qual  |                     |
| Bs - Base seca   |                     |
| Bssc- Base seca sem cinzas   |                     |
| CF – Conteúdo de carbono fixo da amostra em base seca                                | [%m, bs]            |
| $c_{pi}$ - Capacidade calorífica de cada espécie gasosa                              | [cal/mol.K]         |
| $\bar{c}_p$ - Valor médio do calor específico da mistura gasosa                      | [cal/mol.K]         |
| $C_{p\text{mistura}}$ - Capacidade calorífica da mistura gasosa                      | [cal/mol.K]         |
| D - Diâmetro   | [m]                 |
| Fc- Fator de capacidade do ventilador do queimador externo                           | [%]                 |
| $G_m$ - Caudal mássico   | [kg/s]              |
| $G_n$ - Caudal molar   | [mol/s]             |
| $G_{ni}$ – Caudal molar da espécie gasosa  | [mol i/s]           |
| $G_V$ - Caudal volumétrico   | [m <sup>3</sup> /s] |
| $G_{V\text{ ar ventilador}}$ - Caudal volumétrico de ar do ventilador                | [m <sup>3</sup> /s] |
| $G_{V\text{ gases de exaustão,d}}$ - Caudal volumétrico de gases de exaustão secos   | [m <sup>3</sup> /s] |
| $G_{V\text{ gases de exaustão,m}}$ - Caudal volumétrico de gases de exaustão húmidos | [m <sup>3</sup> /s] |
| $G_{Vi, d}$ - Caudal volumétrico da espécie gasosa i seca                            | [m <sup>3</sup> /s] |
| $h_{wv}$ - Calor latente de vaporização da água                                      | [J/s]               |
| $M_i$ – Massa molar da espécie gasosa  | [kg/kmol]           |
| $M_j$ - Massa molar do elemento químico j  | [kg/kmol]           |



|  |   |
|--|---|
| $M_{mistura}$ - Massa molar da mistura gasosa                                    | [kg/kmol]   |
| P- Pressão   | [Pa]  |
| P <sub>v</sub> - Pressão de vapor  | [bar]   |
| P <sub>s</sub> - Pressão de vapor de saturação                                   | [bar]   |
| $\dot{Q}_{reagentes}$ - Potência dos reagentes                                   | [kJ/s]  |
| $\dot{Q}_{produtos}$ - Potência dos produtos                                     | [kJ/s]  |
| $\dot{Q}_{perdas}$ - Potência perdida  | [kJ/s]  |
| $\dot{Q}_{sensível}$ - Calor sensível  | [kJ/s]  |
| $\dot{Q}_{latente}$ - Calor latente  | [kJ/s]  |
| $\dot{Q}_{reação}$ - Calor de reação   | [kJ/s]  |
| R – Constante universal dos gases perfeitos                                      | [J/mol.K]   |
| T <sup>0</sup> - Temperatura de referência                                       | [K]   |
| T- Temperatura   | [K]   |
| U <sub>w</sub> - Humidade relativa   | [%]   |
| V- Volume  | [m <sup>3</sup> ]   |
| V <sub>d</sub> – Conteúdo de voláteis da amostra em base seca                    | [%m, bs]  |
| y <sub>i</sub> – Fração volumétrica da espécie gasosa i da mistura gasosa        | [m <sup>3</sup> <sub>i</sub> /m <sup>3</sup> <sub>gás</sub> ]               |
| y <sub>i,d</sub> – Fração volumétrica da espécie gasosa i seca da mistura gasosa | [m <sup>3</sup> <sub>i</sub> /m <sup>3</sup> <sub>gás seco</sub> ]          |
| y <sub>v</sub> - Fração volumétrica de vapor                                     | [m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> <sub>ar atmosférico</sub> ] |
| W <sub>jR</sub> - Fração mássica do elemento químico j na biomassa               | [kg j/kg <sub>biomassa bs</sub> ]   |
| W <sub>WH</sub> – Fração mássica de humidade na amostra                          | [kg H <sub>2</sub> O/kg H]  |



# 1 CAPÍTULO INTRODUTÓRIO

## 1.1 INTRODUÇÃO

O presente relatório de estágio foi elaborado no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio, pertencente ao 5º ano do Mestrado Integrado de Engenharia do Ambiente do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, cujo tema proposto a desenvolver foi: "Avaliação do desempenho dum processo industrial de pirólise de biomassa". O local onde decorreu o estágio foi na empresa Ibero Massa Florestal S.A., tendo uma duração de cinco meses.

Com a escassez dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a proteção do meio ambiente, a utilização de recursos renováveis tem despertado cada vez mais interesse em todo o mundo (Yang et al., 2007). A biomassa como fonte de energia renovável é uma das alternativas mais eficazes para obter energia limpa e sustentável e desta forma superar o aquecimento global e a redução dos combustíveis fósseis (Morali et al., 2015).

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos vários trabalhos na área da conversão termoquímica da biomassa em biocombustíveis (bio óleo, carvão vegetal e biogás) através da tecnologia de pirólise, devido não só às suas vantagens relacionadas com questões socioeconómicas como também o facto de ser um método de conversão eficiente em comparação com outras tecnologias (Jahirul et al., 2012).

Contudo, os sistemas tradicionais de produção de carvão vegetal apresentam uma eficiência relativamente baixa e impactes ambientais significativos, principalmente no que diz respeito à emissão de gases poluentes durante o processo de pirólise. Por este motivo, é importante saber qual a composição e a quantidade de gases emitidos para a atmosfera durante o referido processo. De forma a melhorar o desempenho energético e ambiental dos processos de pirólise tem-se considerado como uma alternativa adequada o desenvolvimento de sistemas de pirólise que incorporem a valorização energética dos produtos gasosos obtidos durante o processo.

A Ibero Massa Florestal S.A. é a primeira empresa em Portugal a aplicar o sistema de pirólise de biomassa para a produção de carvão vegetal, com a colocação de um conjunto de cinco reatores em funcionamento à escala industrial que incorporam a valorização energética dos produtos gasosos de pirólise.

## **1.2 OBJETIVOS**

O trabalho desenvolvido durante o estágio na Ibero Massa Florestal S.A. tem como principais objetivos caracterizar o desempenho do processo de pirólise de biomassa florestal num reator de leito fixo à escala industrial e propor medidas para uma otimização energética e ambiental do processo de pirólise nos sistemas instalados nesta empresa.

## **1.3 ESTRUTURA DA TESE**

A tese está estruturada em 9 capítulos. Neste primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema ao processo de pirólise de biomassa, os objetivos a alcançar, bem como a organização do presente relatório.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica sobre o tema, onde são abordados aspetos sobre a biomassa, os parâmetros do processo de pirólise, os produtos resultantes e também são demonstradas tecnologias para a produção de carvão vegetal.

Uma breve descrição da empresa (Ibero Massa Florestal S.A.) onde foi desenvolvido o trabalho de estágio, o respetivo processo produtivo e o próprio sistema de produção são realizados no Capítulo 3.

A metodologia do trabalho desenvolvido é descrita no Capítulo 4. Para tal, é apresentada a forma como se realizou a caracterização de alguns parâmetros da biomassa, as condições operatórias, a monitorização dos produtos gasosos e o procedimento dos balanços mássico e energético do sistema integrado de produção de carvão vegetal.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos ao longo deste trabalho e a respetiva discussão dos mesmos.

O Capítulo 6 refere-se a uma descrição sobre as atividades desenvolvidas para além daquelas que estavam previstas para o desenvolvimento deste estudo. Este capítulo tem como objetivo demonstrar o envolvimento com a empresa.

As principais conclusões e medidas de melhoria para trabalho futuro são apresentadas nos Capítulos 7 e 8, seguindo-se a bibliografia no Capítulo 9.



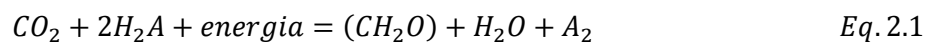
## 2 PIRÓLISE DE BIOMASSA

### 2.1 BIOMASSA

A biomassa é toda a matéria orgânica de origem vegetal, animal ou microrganismos, suscetível de ser transformada em energia (bioenergia) (Nunes et al., 2014). A directiva 2001/77/CE apresenta uma definição de biomassa onde é transcrito no Artigo 2º, ponto b): “a fração biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fração biodegradável de resíduos industriais e urbanos”.

A biomassa é um recurso que resulta da conversão do CO<sub>2</sub> presente no ar atmosférico, com a água e a luz solar, onde a energia solar é convertida em energia química através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos auto-tróficos (C. Matos, 2007). Se a biomassa for processada eficientemente, quer de forma química ou biológica, esta pode extrair a energia armazenada nas ligações químicas e os subsequentes produtos ligados com o oxigénio, sendo o carbono oxidado para produzir CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. O processo é cíclico, uma vez que o CO<sub>2</sub> fica disponível para produzir uma nova biomassa. Assim, através da energia disponível, a fotossíntese cria a base da vida no planeta Terra e pratica o sustento da vida animal (Mckendry, 2002a).

A equação química geral para a fotossíntese é traduzida por (Mckendry, 2002a):



Na equação 2.1, H<sub>2</sub>A representa um composto que pode ser oxidado, isto é, a partir do qual os eletrões podem ser retirados, e CH<sub>2</sub>O é a fórmula generalizada para os hidratos de carbono que se encontram incorporados na biomassa em crescimento. Usualmente H<sub>2</sub>A é água (H<sub>2</sub>O) e A<sub>2</sub> é oxigénio (O<sub>2</sub>), contudo em algumas bactérias fotossintéticas H<sub>2</sub>A é sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) (Mckendry, 2002a).

### 2.1.1 BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA

O potencial da biomassa abrange uma variedade muito alargada de resíduos por isso, a sua utilização como fonte de energia é importante no que se refere às políticas de desenvolvimento sustentável nos países desenvolvidos e emergentes, que contribuirão para reduzir a sua dependência energética dos combustíveis fósseis e assim reduzir as emissões dos GEE (Galindo et al., 2014).

A biomassa pode ser classificada em duas categorias principais: a biomassa lenhosa, que corresponde à biomassa que resulta dos processos florestais convencionais ou a biomassa procedente dos agrosíduos, resultado dos subprodutos da agricultura e/ou de processos agroindustriais (Arvelakis et al., 2002).

A biomassa é utilizada como fonte de energia desde dos primórdios da humanidade, sendo ainda a principal fonte de energia usada nos países em desenvolvimento (Jahirul et al., 2012). Hoje em dia, e apesar de nos países ocidentais o uso de combustíveis fósseis ser um dado adquirido, existem milhões de pessoas espalhadas pelo mundo, que utilizam a biomassa como fonte de energia para cozinhar os seus alimentos e para outros usos necessários (Ideias, 2008).

De acordo com a DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), Portugal é um país que apresenta uma elevada dependência energética devido à escassez de combustíveis fósseis, nomeadamente o petróleo, o carvão e o gás natural. Esta dependência energética em Portugal face ao exterior é de 79,4% (2012). Desta forma, é importante ampliar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica e biomassa.

Assim, a biomassa existente em Portugal deve ser vista como uma área estratégica de interesse, uma vez que cerca de 38% do território nacional é coberto por floresta (Portal das Energias Renováveis, 2016). A Tabela 1 apresenta de forma resumida a distribuição das espécies mais abundantes no território português.



Tabela 1- Distribuição das espécies mais abundantes no território português (Portal das Energias Renováveis, 2016).

| <b>Tipo de floresta</b> | <b>Área [10<sup>3</sup> x ha]</b> |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Pinhal e resinosas      | 1136,3                            |
| Montados                | 1196,4                            |
| Soutos e carvalhais     | 174,9                             |
| Eucalipto               | 695,1                             |
| Total                   | 3306,1                            |

Uma vez que a biomassa é indicada como um forte potencial de negócio ao nível do campo energético, é importante resumir as principais vantagens que o seu uso apresenta. No entanto, como qualquer outro tipo de combustível, o uso de biomassa como fonte de energia e todo o processo de logística associado também acarreta algumas limitações. A Tabela 2 apresenta as principais vantagens e limitações do seu uso.

Tabela 2- Principais vantagens e limitações do uso da biomassa como fonte de energia (Florestal, 2014).

| <b>Vantagens</b>   | <b>Limitações</b>  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da emissão de GEE;</li> <li>• Diminuição do risco de incêndio;</li> <li>• Elevada disponibilidade de biomassa por todo o país;</li> <li>• Aumento da diversidade de oferta de energia, e possibilidade de armazenamento de energia;</li> <li>• Dinamização e criação de florestas mais sustentáveis;</li> <li>• Criação de empreendimentos e emprego;</li> <li>• Reduzir a dependência energética.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustível taxado com 19% de IVA;</li> <li>• Reduzido conhecimento e experiência no aproveitamento energético de biomassa;</li> <li>• Informação reduzida quanto às políticas, incentivos e às tecnologias a usar;</li> <li>• Falta de equipamentos específicos de recolha de resíduos.</li> </ul> |

### 2.1.2 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DA BIOMASSA

A caracterização da biomassa quanto à sua composição e propriedades é um aspeto determinante na escolha da tecnologia mais adequada para o processo de conversão energética.

Em termos estruturais a biomassa é constituída por uma mistura de hemicelulose, celulose e lenhina. As proporções em massa destes constituintes é diferente consoante o tipo de matéria-prima (Raveendran, 1996). Para além destes, a biomassa também é constituída por outros componentes que são agrupados como extrativos (moléculas orgânicas geralmente menores ou polímeros como proteínas, ácidos, sais) e sais minerais (potássio, cálcio, sódio, silício, fósforo, magnésio e cloro) (Sharma et al., 2015). Os componentes mais abundantes na constituição da biomassa são a celulose e a hemicelulose em comparação com a lenhina e os outros componentes (A. Silva, 2009). Além disso, a decomposição de cada componente depende da taxa de aquecimento, temperatura e a presença de contaminantes devido às diferentes estruturas moleculares (Jahirul et al., 2012).

Das diversas propriedades que a biomassa apresenta, as que têm maior influência no processo de conversão são: a análise elementar que se refere ao conteúdo em carbono (C), hidrogénio (H), oxigénio (O), azoto (N) e enxofre (S), a análise imediata que corresponde aos teores de humidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo e não menos importante o poder calorífico. A Tabela 3 apresenta a composição de alguns tipos de combustíveis da biomassa.

Tabela 3- Composição química de alguns tipos de combustíveis da biomassa.

|  |                           | <b>Combustível</b>                     |                                    |   |
|--|---------------------------|--|------------------------------------|---|
|  |                           | Eucalipto<br>(Galindo et al.,<br>2014) | Pinheiro<br>(Wang et el.,<br>2005) | Acácia ( <i>Dealbata</i> )<br>(Saldarriaga et al.,<br>2015) |
| <b>Análise imediata</b>                  | Humidade [%massa, btq]    | 12,23                                  | 7,5                                | 8,75  |
|  | Cinzas [%massa, bs]       | 1,34                                   | nd                                 | 2,5   |
|  | Voláteis [%massa, bs]     | 83,01                                  | nd                                 | 87,87   |
|  | Carbono Fixo [%massa, bs] | 15,66                                  | nd                                 | 9,64  |
| <b>Análise elementar</b><br>[%massa, bs] | C                         | 46,78                                  | 49,90                              | 46,91   |
|  | H                         | 5,92                                   | 5,95                               | 6,15  |
|  | O                         | 45,55                                  | 44,05*                             | 44,43   |
|  | N                         | 0,324                                  | 0,10                               | 0,89  |
|  | S                         | 0,09                                   | nd                                 | nd  |

nd- Não determinado; \*Por diferença.

Para além das variações na composição da biomassa, existem outros fatores que também afetam o processo, tais como a baixa densidade energética e os elevados teores de humidade e de oxigénio presentes na biomassa. Por exemplo, o teor de humidade afeta o tempo de reação e o rendimento do carvão, uma vez que o próprio processo necessita de mais energia para o processo de carbonização (Kiuru et al., 2013). De referir ainda, que a biomassa em relação ao carvão apresenta teores superiores de humidade e de voláteis.

## 2.2 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA

O aproveitamento da biomassa como fonte de energia pode ser feito através de duas principais tecnologias de conversão: tecnologia de conversão termoquímica e tecnologia de conversão bioquímica (Figura 1), sendo a primeira a mais utilizada (Ferreira et al., 2009). A escolha do tipo de processo a utilizar é de acordo com alguns fatores, tais como o tipo e a quantidade de biomassa disponível como matéria-prima, a forma como se pretende obter

a energia, a situação económica e os requisitos ambientais (T. Silva, 2012).

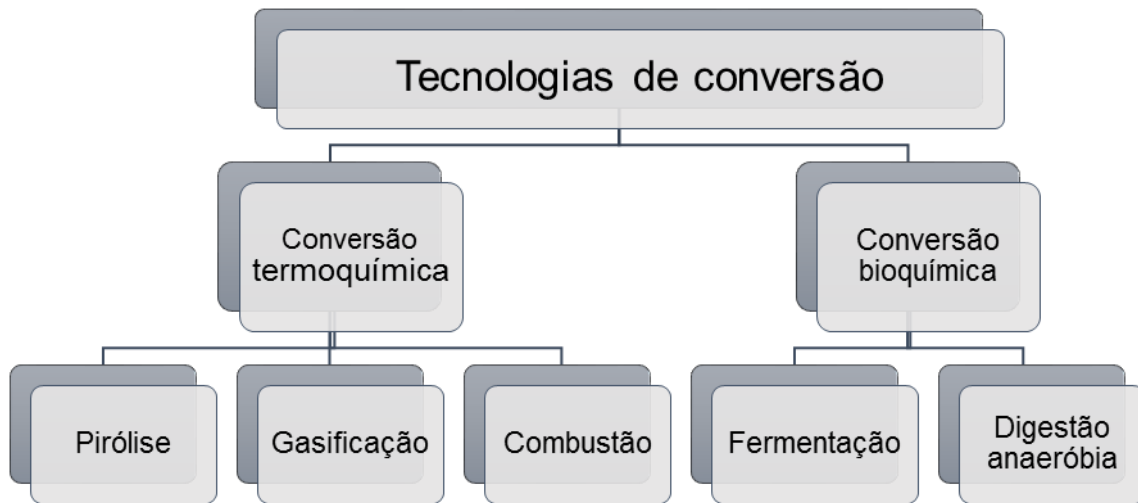


Figura 1- Tecnologias de conversão da biomassa.

De acordo com a Figura 1, na conversão termoquímica existem três opções de processo: pirólise, gasificação e combustão. O processo de pirólise corresponde à degradação térmica de uma partícula de biomassa na ausência de oxigénio ou com uma quantidade reduzida de agentes oxidantes (Demirbas et al., 2009). A gasificação é um processo de conversão termoquímica da biomassa num combustível gasoso, através da oxidação parcial num intervalo de temperaturas elevadas (800°C a 1100°C) (Lora et al., 2012). Relativamente à combustão, é um processo de queima de biomassa que usa o ar como agente oxidante, convertendo a energia química armazenada na biomassa em calor, energia mecânica ou em eletricidade (Mckendry, 2002b).

Apesar de existir estas três opções de conversão termoquímica da biomassa, neste trabalho apenas irá ser abordado o processo de pirólise, uma vez que é o processo utilizado para a produção de carvão vegetal.

O processo de conversão bioquímica corresponde à fermentação, que é utilizada ao nível comercial para produzir etanol, e à digestão anaeróbia, onde as bactérias transformam a matéria orgânica em biogás em condições anaeróbias (mistura de metano (CH<sub>4</sub>) com dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)) (Demirbas et al., 2009).

## 2.3 PIRÓLISE

A pirólise, tal como já foi referido anteriormente, é um processo de decomposição térmica duma partícula de biomassa quando submetida a aquecimento e em atmosfera inerte (Sharma et al., 2015). Este processo permite a transformação da biomassa numa gama de produtos sólidos, líquidos e gasosos.

A degradação térmica da biomassa (processo de pirólise) constitui três fases: secagem, pirólise primária e por último a pirólise secundária (Figura 2) (Neves et al., 2011).

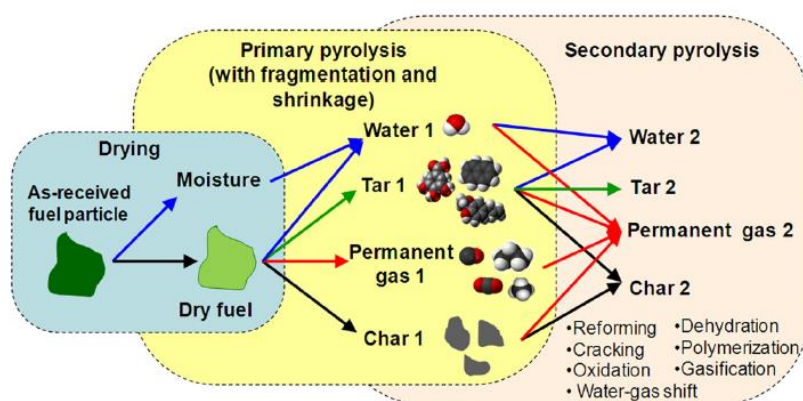


Figura 2- As três fases de degradação térmica de uma partícula sólida de biomassa sob uma atmosfera inerte (Neves et al., 2011).

Na primeira fase, designada por fase de secagem, a partícula de combustível é submetida a uma fonte de calor onde se dá a evaporação da humidade. Após esta fase, ocorre a pirólise primária onde são progressivamente libertados voláteis. A produção de voláteis primários é devido à cisão térmica de ligações químicas nos constituintes individuais da biomassa (celulose, hemicelulose, lenhina e extrativos). Para além destes, os voláteis primários também constituem espécies gasosas permanentes, como por exemplo  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{CH}_4$ , e também espécies condensáveis, tais como compostos orgânicos e água. A fase de pirólise primária é concluída a uma temperatura relativamente baixa, aproximadamente a  $500^\circ\text{C}$ , sendo obtido um produto sólido não volátil rico em carbono que é designado por carvão vegetal. Na fase de pirólise secundária, a temperaturas mais elevadas, alguns dos voláteis primários libertados podem participar em reações secundárias, ocorrendo separadamente ou em simultâneo com as reações primárias, obtendo-se outros produtos (descrito por "2" na Figura 2). Por exemplo, o carvão obtido na pirólise primária pode ser ativo durante as reações secundárias, ou seja, pode conduzir à polimerização de vapores

orgânicos para carbonizar o secundário. Além disso, o próprio carvão pode ser convertido em espécies gasosas através de reações de gasificação com  $H_2O$  e  $CO_2$  (Neves et al., 2011).

### 2.3.1 PARÂMETROS DO PROCESSO

No processo de pirólise, o rendimento e as propriedades do carvão vegetal produzido podem ser significativamente afetados. Para que tal não aconteça deve-se ter em conta alguns parâmetros, como as características físico químicas da biomassa, a temperatura de pico que corresponde à temperatura máxima atingida durante o processo de pirólise, a taxa ou velocidade de aquecimento, o tempo de residência e a hidrodinâmica do reator (Kiuru et al., 2013).

Dependendo das condições de operação, o processo de pirólise pode ser classificado em três subclasses: pirólise lenta (carbonização), pirólise rápida e pirólise flash. Na Tabela 4 são apresentadas as gamas dos principais parâmetros operacionais para cada tipo de pirólise.

Tabela 4- Parâmetros típicos para cada tipo de pirólise e o respetivo produto (Kiuru et al., 2013).

| <b>Tecnologia</b>    | <b>Tempo de residência sólido (s)</b> | <b>Taxa de aquecimento (°C/s)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Produto principal</b> |
|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Lenta (Carbonização) | 600-6 000                             | 0,1-1                             | 300-700                 | Carvão                   |
| Rápida               | 0,5-5                                 | 10-200                            | 600-1000                | Gás e líquido            |
| Flash                | <0,5                                  | ≥1000                             | 800-1000                | Gás e líquido            |

A pirólise lenta ocorre sob uma baixa taxa de aquecimento e é utilizada quando o objetivo é produzir carvão (Babu, 2008). Geralmente, a temperatura de pico é o parâmetro que mais afeta as propriedades do carvão vegetal, uma vez que ao aumentar a temperatura de pico, diminui o seu rendimento (Kiuru et al., 2013). Por outro lado, se o objetivo for produzir produtos líquidos e/ou gasosos a pirólise rápida é a mais indicada. Este tipo de pirólise ocorre com uma taxa de aquecimento rápida e requer elevadas temperaturas de operação e tempos de contacto muito curtos. A pirólise flash produz principalmente produtos gasosos devido à elevada taxa de aquecimento e ao tamanho da partícula ser muito reduzido (Babu, 2008).

### 2.3.2 PRODUTOS DO PROCESSO

O processo de pirólise produz carvão vegetal, que é constituído maioritariamente por carbono, juntamente com uma pequena fração de resíduos de alcatrão, cinzas, gases permanentes, alcatrões, alguns produtos químicos (principalmente ácido acético e metanol) e uma grande quantidade de água que é emitida como vapor na fase de secagem e na decomposição térmica da madeira (FAO, 1987).

A degradação térmica de lenhina e hemicelulose provoca uma perda considerável de massa sob a forma de produtos voláteis, ficando para trás uma matriz rígida de carbono amorfo, designado por carvão vegetal. A produção de carvão vegetal varia entre 10% a 35%, dependendo das condições de operação do processo de pirólise da biomassa. Para além da temperatura, as características físicas do carvão vegetal também são fortemente afetadas pelo tipo e forma do reator, o tipo de biomassa e o seu tratamento de secagem, o tamanho da partícula da matéria-prima, pressão, velocidade de aquecimento, tempo de residência, taxa de fluxo do gás inerte, entre outros (Jahirul et al., 2012).

Os gases resultantes do processo de pirólise são constituídos principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos leves (não condensáveis que podem ser aglomerados num único grupo, designado como C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>). De referir que o CO<sub>2</sub> e CO são os principais componentes do gás de pirólise resultantes da decomposição primária, embora que o CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> e H<sub>2</sub> possam também ser produzidos mas em quantidades mais reduzidas (Neves et al., 2011).

Como exemplo, através de um estudo realizado por Neves et al. é possível visualizar (Figura 3) a distribuição dos rendimentos dos produtos de pirólise expressos numa base seca sem cinzas (bssc), incluindo o carvão, os gases permanentes, os líquidos (alcatrão e água) e a água em função da temperatura. Os dados são apresentados em duas séries, uma pertencente à “taxa de aquecimento lenta” e outra à “taxa de aquecimento rápida”.

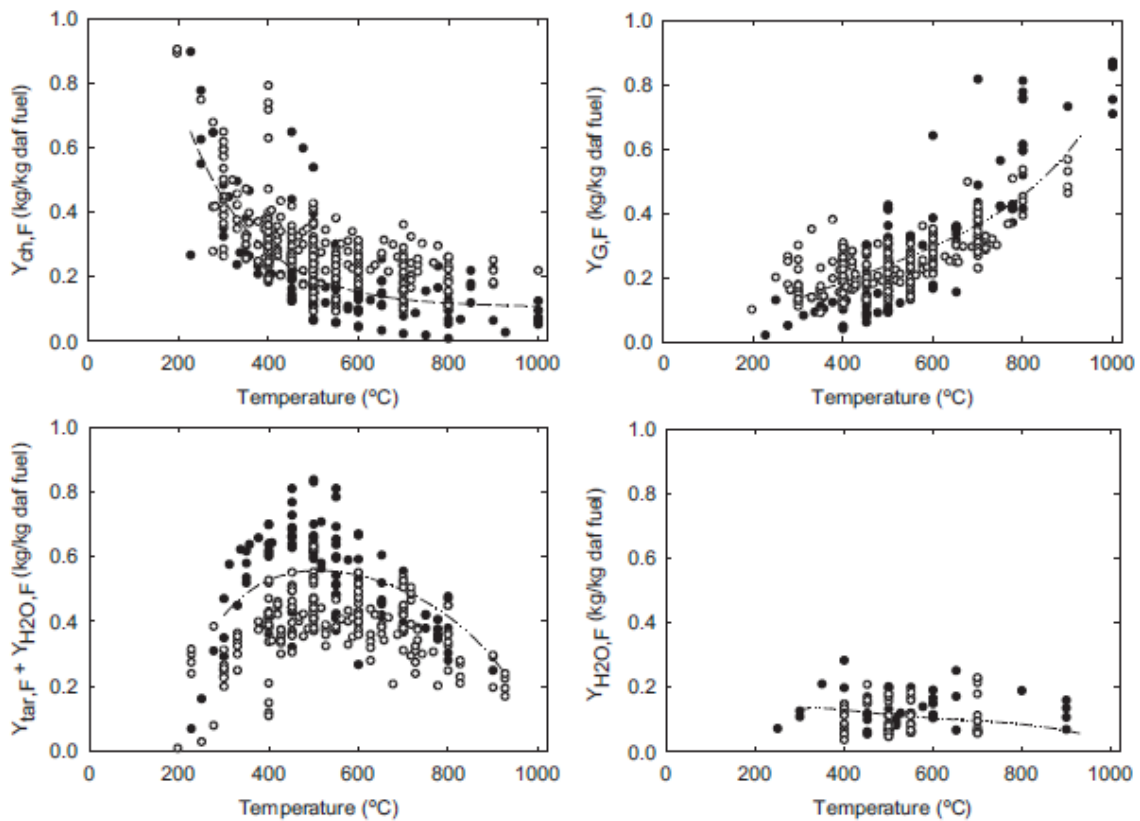


Figura 3-Rendimento do carvão ( $Y_{ch}$ ), gás permanente ( $Y_G$ ), o total de líquidos ( $Y_{tar}+Y_{H_2O}$ ) e água da pirólise ( $Y_{H_2O}$ ) em função da temperatura de pico. ● - “Taxa de aquecimento rápida” e ○ - “Taxa de aquecimento lenta” (Neves et al., 2011).

Analisando a Figura 3 verifica-se uma elevada variação dos dados para um determinado produto e temperatura, tanto para taxas de aquecimento “lenta” como para “rápida”. A razão pela qual se observa esta variação nos dados pode ser explicada devido a diferenças da matéria-prima, tipo de reator, condições de pirólise (tamanho da partícula, profundidade do leito, tempo de residência, taxa de aquecimento, entre outros) e procedimentos experimentais (Neves et al., 2011).

## 2.4 TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Desde da Idade da Pedra que os seres humanos produzem carvão vegetal e o utilizam como combustível para cozinhar. Nos países em desenvolvimento, o carvão vegetal ainda é muito usado por pessoas rurais e urbanas para fins domésticos. Grandes quantidades de carvão também são utilizadas para a produção de metais preciosos, assim como para produzir cobre e zinco (FAO, 1987).



Nos dias de hoje existem diversas tecnologias testadas para a produção de carvão vegetal, incluindo fornos tradicionais e processos com tecnologias mais avançadas, tais como reatores de leito fixo e fluidizado, reatores ablativos, reatores em cone rotativo, entre outros.

No entanto, estas tecnologias apresentam prós e contras sendo que muitas destas, quando usadas para aumentar a produtividade de carvão vegetal, ainda necessitam de alterações adicionais para aumentar a eficiência do processo de produção de carvão vegetal e a qualidade do produto final (Kiuru et al., 2013).

Os sistemas de produção de carvão vegetal podem ser caracterizados pela forma como o reator é alimentado com a biomassa e como o sistema é aquecido. Quanto à forma como o reator é alimentado, o sistema pode ser categorizado por:

- Sistemas contínuos: o reator é alimentado a uma taxa constante;
- Sistemas semi-contínuos: o processo opera a uma velocidade constante e a biomassa é separada por reatores em forma descontínua;
- Sistemas descontínuos (batch): o reator apenas é alimentado com nova biomassa depois do processo de pirólise estar concluído.

Relativamente à forma como o processo é aquecido, este pode ser diretamente aquecido, isto é, a biomassa entra em contacto direto com o transportador de calor ou por outro lado, o sistema é aquecido indiretamente, ou seja, a biomassa não tem contacto direto com o transportador de calor (Amos, 1998).

## 2.4.1 *SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL*

### 2.4.1.1 REATOR EM LEITO FIXO

O processo de pirólise num reator em leito fixo pode ser dividido em dois sistemas, em contra-corrente se o movimento do leito de combustível for ascendente à corrente do gás produzido, ou em co-corrente onde o movimento do fluxo do leito de combustível e de gás ocorre na mesma direção (Figura 4) (Kiuru et al., 2013). Ambos consistem num reator que apresenta um sistema de arrefecimento e limpeza dos gases obtidos. A limpeza dos gases pode ser feita através de ciclones, filtros de mangas ou por lavadores húmidos.

Tipicamente, um reator de leito fixo é feito de tijolos refratários, de aço ou de betão com uma unidade de alimentação de combustível, uma unidade de remoção de cinzas e uma saída de gás (Jahirul et al., 2012). Os reatores em leito fixo são uma tecnologia de construção simples e usualmente operam com uma elevada taxa de conversão de carbono, longos tempos de residência do sólido, a velocidade do gás é baixa e transporta um baixo teor de cinzas (Chopra et al., 2007).

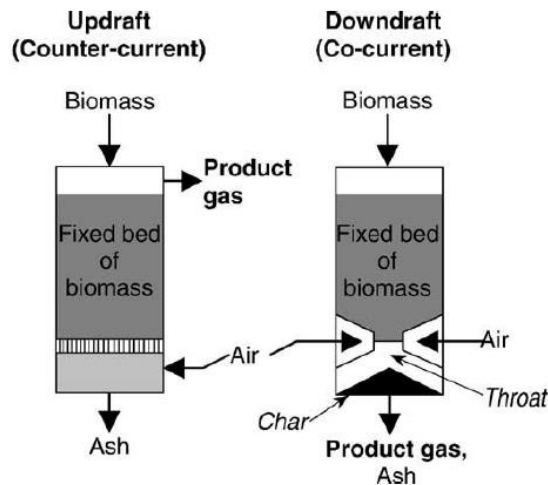


Figura 4- Reator em leito fixo (Bridgwater, 2003).

#### 2.4.1.2 REATOR EM LEITO FLUIDIZADO

Nos reatores em leito fluidizado, a transferência de calor para a biomassa é feita a partir de um leito composto por um material inerte, como por exemplo areia, que mantém uma ação de leito fluidizado com o ar que flui através do fundo da câmara de combustão (Quaak et al., 1999).

O processo de pirólise pode ocorrer em dois tipos diferentes de reatores de leito fluidizado, em leito fluidizado borbulhante (LFB) ou em sistemas de leito fluidizado circulante (LFC), dependendo da velocidade do ar que utilizam (Kiuru et al., 2013). Os pirolisadores em LFB são muito conhecidos, uma vez que são mais simples de construir em comparação com outros reatores, apresentam um bom contacto entre o gás e os sólidos, boa transferência de calor, elevada capacidade para armazenar o calor e um bom controlo da temperatura (Sadaka et al., 2009). Este tipo de sistema encontra-se dividido numa zona de leito fluido e numa zona de *freeboard*. Relativamente aos pirolisadores em LFC estes apresentam características semelhantes aos reatores em LFB, no entanto exibem tempos de residência

mais curtos para os carvões e vapores (Jahirul et al., 2012). Os tempos de residência curtos faz com que aumente a velocidade do gás no reator e teores mais elevados de carvão no bio-óleo em relação aos reatores de LFB (Sadaka et al., 2009).

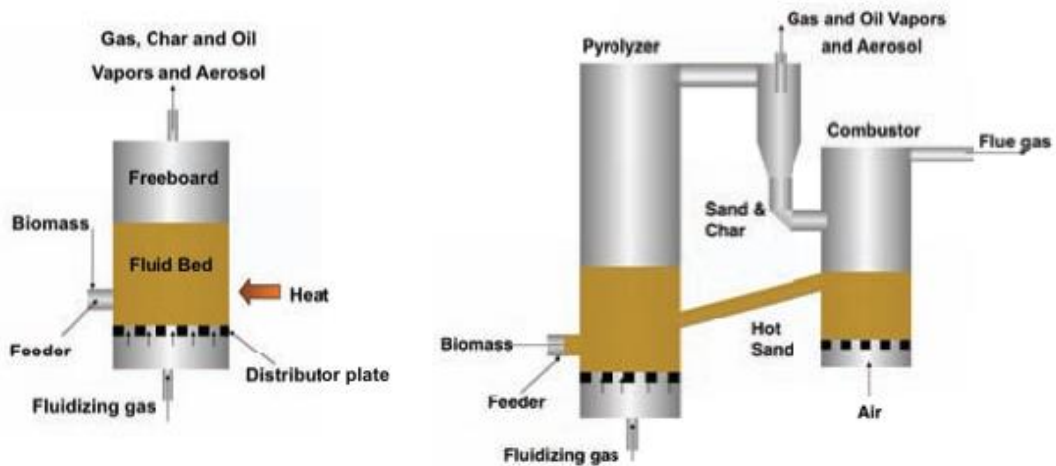


Figura 5- Reator em leito fluidizado borbulhante (lado esquerdo) e reator em leito fluidizado circulante (lado direito) (Sadaka et al., 2009).

#### 2.4.1.3 REATOR EM CONE ROTATIVO

Nos reatores em cone rotativo, a biomassa introduzida é misturada com areia quente para tornar mais eficaz a transferência de calor para a biomassa no processo de pirólise. A alimentação da biomassa e da areia é feita pela base do cone rotativo (Kiuru et al., 2013). Neste tipo de reator, o processo de pirólise ocorre através da mistura mecânica da biomassa e da areia quente, não sendo necessário utilizar gás inerte (Jahirul et al., 2012).

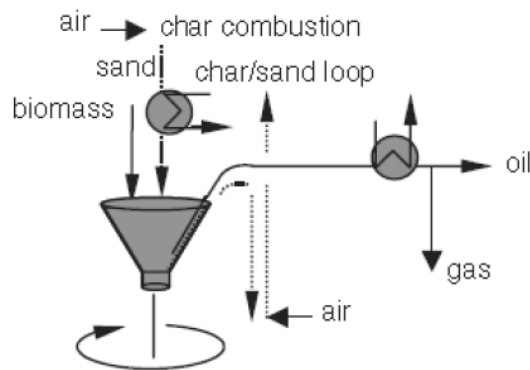


Figura 6-Processo de pirólise num reator em cone rotativo (Kiuru et al., 2013).

### 2.4.2 PRODUÇÃO TRADICIONAL DE CARVÃO VEGETAL

Até ao início do século XX, a produção de carvão vegetal era feita por métodos tradicionais. Os primeiros fornos de carvão vegetal eram poços de terra onde a madeira era enterrada e o processo de produção de carvão vegetal consistia numa combustão lenta no solo (Figura 7). Alternativamente, existem os fornos de monte que não é mais do que uma versão do forno de poço acima do solo, em que pilhas de madeira são cobertas por terra e a combustão é feita através de uma abertura na tampa de terra (Figura 7). Esta técnica permite um melhor controlo sobre o processo de combustão e carbonização relativamente ao método do poço de terra. Muitos países em desenvolvimento ainda utilizam estes métodos, principalmente por apresentarem um baixo custo. Contudo, estes métodos apresentam rendimentos muito reduzidos de produção, baixa qualidade e emitem uma grande quantidade de poluentes para a atmosfera (FAO, 1987).

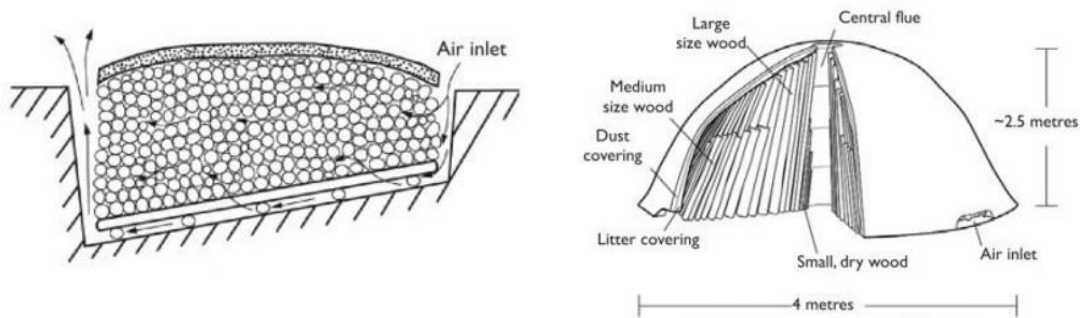


Figura 7- Representação do forno em poço de terra (lado esquerdo) e do forno em monte de terra (lado direito) (FAO, 1987).

### 2.4.3 MÉTODOS TRADICIONAIS MELHORADOS

Entre 1970 e 1980, os métodos tradicionais para produção de carvão vegetal foram melhorados, os fornos de terra foram equipados com chaminés através de tambores de óleo e também com a introdução de fornos em pequena escala de aço ou de tijolo. De referir, que estes métodos dependem do calor proveniente da combustão da madeira para o processo de carbonização e do teor de humidade contido na madeira. Se o processo de fabrico ocorrer com boas práticas, é possível obter rendimentos de 1 kg de carvão vegetal através de 4 a 5 kg de madeira seca. No entanto, é comum rendimentos de 1 kg de carvão vegetal a partir de 6 a 8 kg de madeira seca. Devido a custos mais elevados na utilização de fornos a aço e tijolo, estes equipamentos são menos acessíveis aos fabricantes de

produção de carvão vegetal por métodos tradicionais. Assim, deveria haver um maior incentivo para a melhoria dos métodos tradicionais em pequena escala (FAO, 1987).

#### 2.4.4 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL

No século XX a procura de carvão vegetal a nível industrial despertou a necessidade de adotar novas tecnologias de maior dimensão com o principal objetivo de melhorar a produtividade e qualidade do produto. Deste modo, foram projetados diferentes tipos de réplicas em lotes operando em fornos de tijolos ou de metal de forma contínua, sendo notório um aumento considerável do rendimento (1 kg de carvão vegetal através de 5 a 7 kg de madeira), um produto de carvão vegetal muito mais uniformizado e com um teor de carbono fixo superior. Hoje em dia, existem muitas indústrias deste tipo em operação pela Europa e na América do Norte e do Sul. Contudo, permanece um grave problema com a poluição atmosférica, uma vez que as carvoarias emitem elevadas quantidades de fumo, felugem, partículas e um mau odor, sendo estes uma ameaça para a saúde pública (FAO, 1987). Na Figura 8 é apresentado um exemplo deste tipo de tecnologia.



Figura 8- Fornos retangulares (Vilela et al., 2014).

Estes fornos apresentam 13 m de comprimento, 4 m de largura e 3,5 m de altura, com capacidade para processar 200-700 m<sup>3</sup> de lenha. Para além disto, operam com ciclos que duram cerca de 15 dias e apresentam uma capacidade de produção de 2000 toneladas de carvão/ano (Vilela et al., 2014).

#### 2.4.5 TENDÊNCIA ATUAL DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Atualmente, a tendência das indústrias é produzir carvão vegetal com o objetivo de melhorar o desempenho ambiental dos equipamentos, mantendo e/ou melhorando o rendimento de carvão vegetal e a qualidade do mesmo. Desta forma, os reatores são preenchidos com madeira pré-seca e colocados em fornos de carbonização revestidos com tijolos cerâmicos. O gás que é produzido na combustão é utilizado para aquecer o forno, sendo o restante calor do forno utilizado na pré-secagem da madeira. Devido à boa gestão que é feita com o calor que é gerado neste equipamento é possível obter bons resultados, ou seja, 1 kg de carvão vegetal através de 3 a 4 kg de madeira seca (FAO, 1987).

Como na câmara de combustão são atingidas elevadas temperaturas, todas as partículas, alcatrões e os gases que são produzidos durante o processo são queimados completamente. Comparando os métodos tradicionais com as tecnologias que apresentam baixa emissão de poluentes e rendimentos mais elevados, estas últimas têm custos de investimento superiores. No entanto, em muitos casos verificaram que o facto de aumentar o rendimento leva a que o investimento se torne bastante compensatório, resultando numa melhoria nas taxas de emissões como bônus sem custos adicionais. Desta forma, nos últimos anos esta tecnologia relativamente recente tem sido utilizada não só nos países com consciência ambiental da União Europeia (França e Países Baixos), mas também na Europa Oriental (Estónia e Letónia) e nos países em desenvolvimento (China, Gana, África do Sul) (FAO, 1987). Na Figura 9 é apresentado um exemplo deste tipo de tecnologia.



Figura 9 - Tecnologia CML França (Lyon et al., 2015).

A tecnologia CML corresponde a uma unidade padronizada com 12 fornos fixos de produção ligados a um sistema de despoluição que incinera os gases residuais. Este tipo

de tecnologia é um processo económico e produz carvão vegetal com elevada qualidade, com boas condições de trabalho, respeitando as normas ambientais. O processo apresenta um rendimento entre 20% a 25% e produz em média 2500 toneladas de carvão vegetal por ano (Lyon et al., 2015).

A tecnologia Lambiotte é outro exemplo de produção de carvão vegetal. Muitos autores consideram que o Lambiotte é a tecnologia mais adequada para o processo de carbonização. Esta tecnologia foi desenvolvida em 1940 e existem dois tipos de sistemas, o SIFIC e o CISR (Rautiainen et al., 2012). O Lambiotte CISR corresponde a uma modificação do sistema Lambiotte SIFIC. As principais diferenças entre estes dois sistemas é que o SIFIC encontra-se equipado para efetuar a recuperação dos subprodutos, enquanto que no sistema CISR é omitido e, para além disto, o CISR apresenta uma dimensão mais reduzida e, portanto o investimento para adquirir este equipamento é menor (Kiuru et al., 2013).

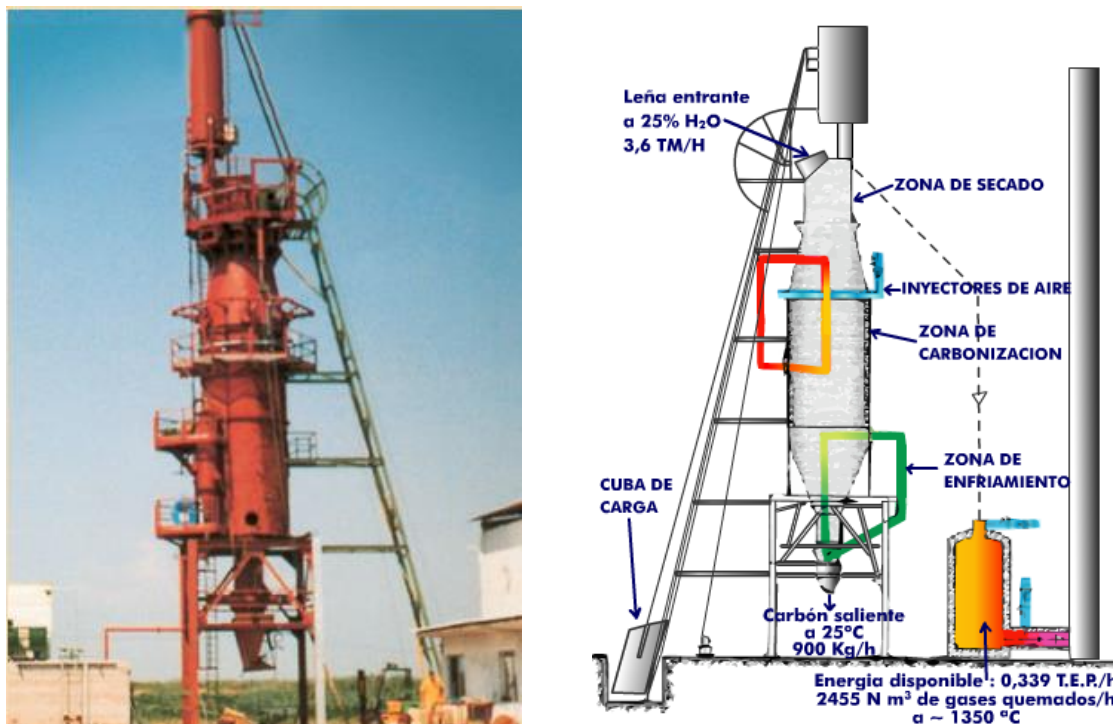


Figura 10- Tecnologia Lambiotte (Baltcarbon, 2009).

A fornalha do Lambiotte é de aço, possui uma forma cilíndrica e apresenta uma abertura na parte superior para introduzir a madeira e uma parte inferior para descarregar o carvão

vegetal produzido. A primeira zona do sistema Lambiotte corresponde à zona de secagem, onde a madeira perde a humidade através do contacto com os vapores quentes. Depois segue-se a zona de carbonização através da combustão dos gases produzidos no próprio processo de combustão e na pirólise, por último, na parte inferior, a zona onde o carvão vegetal produzido é arrefecido até à temperatura ambiente. Esta tecnologia apresenta uma capacidade produtiva de 2000 a 10000 toneladas por ano. O carvão produzido por este tipo de tecnologia apresenta uma boa qualidade, limpo, bastante homogéneo e com uma elevada percentagem de carbono fixo (Baltcarbon, 2009).

Atualmente existem dois tipos de Lambiotte SIFIC a operar na Letónia da empresa BaltCarbon que para além de produzirem carvão vegetal também geram eletricidade. Por exemplo, a unidade industrial ao produzir 8000 toneladas de carvão vegetal gera 1000 kW de eletricidade (Baltcarbon, 2009).



### **3 PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL NA IBERO MASSA FLORESTAL S.A.**

A empresa Ibero Massa Florestal S.A. foi criada em 2011, localiza-se em Avenal, município de Oliveira de Azeméis, e ocupa uma área bruta com cerca de 30000 m<sup>2</sup> e com uma área construída de 5300 m<sup>2</sup>.

É uma empresa pioneira na produção e comercialização de carvão vegetal em Portugal para utilização doméstica e agrícola. Nesta unidade industrial, desenvolve-se uma tecnologia inovadora através do processo de pirólise lenta, para a transformação da biomassa agrícola e florestal (Florestal, 2011).

Esta entidade apresenta uma missão baseada em diretrizes específicas, tais como:

- Reduzir as emissões de GEE;
- Melhorar os terrenos agrícolas;
- Gerar riqueza em Portugal.

#### **3.1 PROCESSO PRODUTIVO**

O processo produtivo foi dividido em dois fluxos: o fluxo de materiais e o fluxo de energia do processo secagem-pirólise-combustão.

Assim, a primeira etapa do processo corresponde à receção da biomassa onde é feita uma inspeção físico química por parte de um(a) técnico(a) da carga de madeira que chega à empresa transportada pelos veículos. De seguida, se a qualidade da biomassa se encontrar segundo os requisitos determinados pela empresa, o veículo segue para a balança onde é pesado, sendo posteriormente conduzido para a zona de armazenamento.

Com a ajuda de um camião que se encontra equipado com uma grua, a matéria-prima é descarregada formando uma pilha que deverá ser identificada de acordo com os procedimentos estabelecidos no manual de qualidade.

Após esta fase, a matéria-prima é cortada através de um cortador/rachador de lenha e é colocada em cestos de rede e encaminhada para a estufa para proceder-se à secagem da biomassa.

Depois desta etapa, os reatores são preenchidos com a biomassa seca e com o auxílio de um pórtilho, o reator é inserido na fornalha pelo topo desta. Assim, inicia-se o processo de pirólise para a produção de carvão vegetal.

Por último, depois do processo de pirólise estar concluído, o carvão vegetal é descarregado, são retiradas amostras para o controlo da qualidade e é pesado. Posto isto, se o carvão apresentar todos os critérios de qualidade, este é validado e é ensacado para ser vendido posteriormente. De referir, que o carvão produzido é designado pela empresa como Biopower e Carvão Zero (Figura 11).

Relativamente ao fluxo energético, o processo é iniciado com a introdução de calor na câmara de combustão através da queima de um combustível auxiliar (pellets de madeira) com o objetivo de aumentar a temperatura dentro do reator. Durante o processo é produzido vapor de água, gases voláteis e alcatrões que são incinerados na câmara de combustão. Para além disto, o calor transportado pelos gases de exaustão é utilizado na estufa para a secagem da matéria-prima.

Este processo de produção de carvão vegetal encontra-se esquematizado na Figura 11.

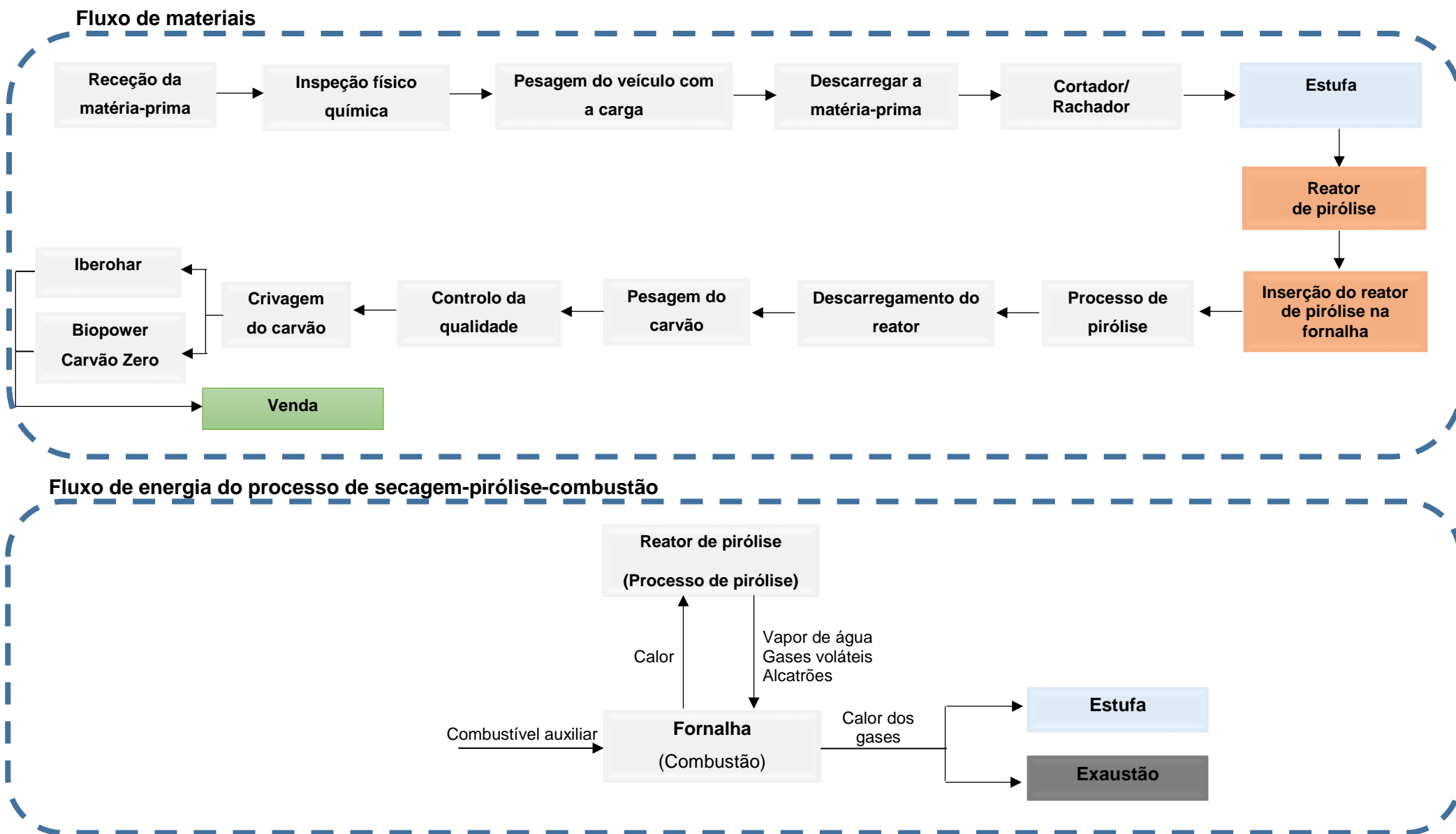


Figura 11- Processo produtivo da empresa.

## 3.2 INSTALAÇÃO

A empresa Ibero Massa Florestal S.A. é uma unidade industrial que apresenta 5 fornos fixos de produção e incinera diretamente os gases produzidos na câmara de combustão durante o processo de pirólise. Este sistema de produção tem capacidade para produzir 700 toneladas de carvão vegetal por ano.



Figura 12- Instalação dos fornos fixos de produção de carvão vegetal da Ibero Massa Florestal S.A..

### 3.2.1 SISTEMA DE PRODUÇÃO

#### 3.2.1.1 ESTRUTURA

Em termos de estrutura, o sistema de produção de carvão vegetal é constituído essencialmente pelos seguintes equipamentos: fornalha, reator de pirólise onde se encontra a biomassa a transformar em carvão vegetal, queimador externo, conduta de exaustão, ventilador, chaminé e um quadro elétrico (consola).

### 3.2.1.1.1 Reator de pirólise (Câmara de pirólise)

O reator de pirólise é onde se encontra a biomassa que irá sofrer o processo de pirólise, este apresenta uma forma cilíndrica com um volume aproximado de 2,00 m<sup>3</sup>, é constituído por aço inox de forma a ser resistente às altas temperaturas a que está sujeito, uma tampa em aço refratário provida com duas tomas, uma para a medir a pressão e outra para medir a temperatura e também apresenta duas válvulas de descompressão que funcionam como emergência. Ainda no topo do reator está aplicado um vedante para garantir que o reator fique totalmente fechado para que não haja qualquer entrada de ar durante o processo.

### 3.2.1.1.2 Fornalha (Câmara de combustão)

A combustão dos gases de pirólise libertados durante o processo ocorre no interior da fornalha. Tal como o reator de pirólise, a fornalha também apresenta uma forma cilíndrica e o seu corpo é constituído por três camadas isoladoras. A camada interior é de betão refratário para resistir às altas temperaturas que ocorrem no seu interior, a camada intermédia é de aço refratário que funciona como suporte ao betão e a última camada é de lã de rocha assegurando perdas de calor mínimas e uma baixa temperatura no exterior da fornalha. Para além disto, a camada de lã de rocha é revestida com chapa. Na sua estrutura, a fornalha ainda apresenta duas entradas de ar ajustáveis, uma de forma manual e outra automática, uma entrada para o queimador externo, dois óculos de observação, uma porta, duas tomas, uma para medir a pressão e outra para medir a temperatura, e uma saída de gases de exaustão. A depressão na fornalha é garantida através do ventilador e da chaminé.

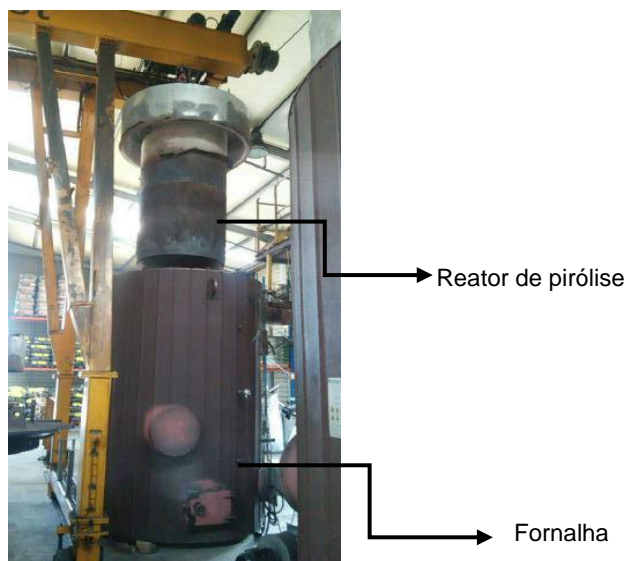


Figura 13- Representação da fornalha-reator de pirólise.

### 3.2.1.1.3 Queimador externo

Para a queima do combustível auxiliar é utilizado um queimador externo equipado com um sem-fim, de modo a proporcionar uma alimentação regular, ligado a um bidão que contém o combustível auxiliar. A Figura 14 demonstra o queimador externo do lado esquerdo e o combustível auxiliar (pellets de madeira) do lado direito.



Figura 14- Queimador externo (lado esquerdo) e o respetivo combustível auxiliar (lado direito).

### 3.2.1.1.4 Consola (controlo do processo)

Com o intuito de tornar o processo o mais automático possível, todo o controlo do processo é feito através de uma consola. Este sistema controla o funcionamento dos diversos componentes da instalação: ventilador de tiragem forçada (para manter as condições de depressão no interior da fornalha), abertura da válvula borboleta motorizada (para o ajuste necessário do valor de depressão) e acionamento do sistema de introdução de ar na câmara de combustão. Para além disto, também indica as temperaturas na câmara de combustão, na câmara de pirólise e na exaustão através de três termopares do tipo K que se encontram ligados a conversores individuais e indica a pressão na câmara de pirólise e a depressão no interior da fornalha com o auxílio de dois transmissores de pressão.



Figura 15 - Consola para controlo do sistema.



Figura 16 - Sonda de temperatura (termopar tipo K) (lado esquerdo) e sensor de pressão (lado direito).

### 3.2.1.2 FASES DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

O processo de produção de carvão vegetal dentro do reator de pirólise ocorre em três fases distintas: secagem, pirólise e arrefecimento.

#### **Secagem**

A secagem da biomassa é a primeira fase do processo onde ocorre apenas a libertação de vapor de água e é removido todo o teor de humidade do produto em tratamento. Esta fase termina quando a câmara de pirólise apresenta uma temperatura próxima dos 200°C. A energia consumida provém da queima de pellets de madeira com o auxílio de um

queimador externo. De salientar, que a duração desta fase varia consoante o teor de humidade da biomassa, isto é, quanto maior é o teor de humidade, maior é o tempo desta mesma fase.

### **Pirólise**

A fase de pirólise ocorre quando a madeira começa a ser quimicamente degradada e são libertados produtos voláteis. Nesta fase, a temperatura poderá atingir valores superiores a 550°C e apresenta uma duração média de quatro a cinco horas. A energia consumida nesta fase resulta da queima de pellets de madeira (até uma temperatura próxima dos 500°C) e dos gases de pirólise libertados.

### **Arrefecimento**

A fase de arrefecimento inicia quando deixa de existir produção de gás e conseqüente extinção da chama. O reator apenas é retirado da fornalha quando apresenta uma temperatura relativamente baixa, próxima dos 350°C. No entanto, a fase de arrefecimento só é concluída fora da fornalha, ou seja, quando o carvão se encontra a uma temperatura adequada para ser descarregado (temperatura ambiente). A fase de arrefecimento fora da fornalha é bastante importante de forma a evitar a perda total do produto uma vez que, o carvão ao apresentar uma temperatura elevada e em contacto com o ar pode iniciar a autocombustão. Desta forma, a fase de arrefecimento fora da fornalha poderá ter uma duração entre 10 a 12 horas.

A Figura 17 demonstra a duração típica de cada fase durante o processo de produção de carvão vegetal dentro da fornalha.

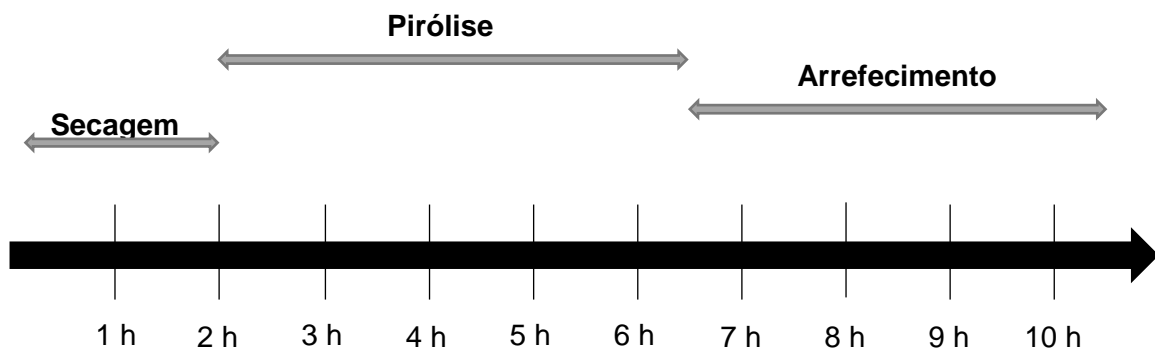


Figura 17 - Representação da duração média de cada fase no reator de pirólise dentro da fornalha.



### 3.3 PRODUTOS NO MERCADO

A empresa Ibero Massa Florestal S.A. apresenta no mercado sete tipos de sacos de carvão vegetal. Dos quais três sacos relativos ao Biopower, onde o verde corresponde a 15 dm<sup>3</sup>, o laranja a 40 dm<sup>3</sup> e o amarelo a 65 dm<sup>3</sup>. Os restantes quatro sacos dizem respeito ao Carvão Zero e inclui sacos de 7,5 dm<sup>3</sup>, 15 dm<sup>3</sup>, 30 dm<sup>3</sup> e 60 dm<sup>3</sup>.



Figura 18 - Sacos de carvão vegetal que a empresa apresenta no mercado.

Para além da produção de carvão vegetal, acresce ainda um subproduto deste designado por Iberochar (finos do carvão vegetal produzido). Este produto pode ser utilizado na Agricultura, Nutrição Animal e Tratamento de águas. Para cada tipologia existe um nome específico do produto tal como é possível visualizar na Figura 19.

|   |  |  |
|---|--|--|
| <p><b>ECOCHAR</b></p> <p>Reestruturador de solos agrícolas.</p>  | <p><b>HIDROCHAR</b></p> <p>Carvão para tratamento de águas domésticas e residuais.</p>  | <p><b>NUTRICHAR</b></p> <p>Fixador de toxinas-<br/>Complemento de alimentação animal.</p>  |
|---|--|--|

Figura 19 - Representação dos diferentes subprodutos derivados do produto Iberochar.



## **4 METODOLOGIA**

Neste capítulo é feita uma descrição sobre o trabalho desenvolvido durante o período de estágio na empresa Ibero Massa Florestal S.A.. Deste modo, é apresentado a forma como se realizou a caracterização de alguns parâmetros da biomassa, as condições operatórias, a caracterização do carbonizado, a monitorização dos produtos gasosos e o procedimento dos balanços mássico e energético.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO**

Antes de se proceder à caracterização do processo é importante saber as principais dimensões da instalação em estudo. A Figura 20 representa de forma esquemática a instalação com as respetivas dimensões.

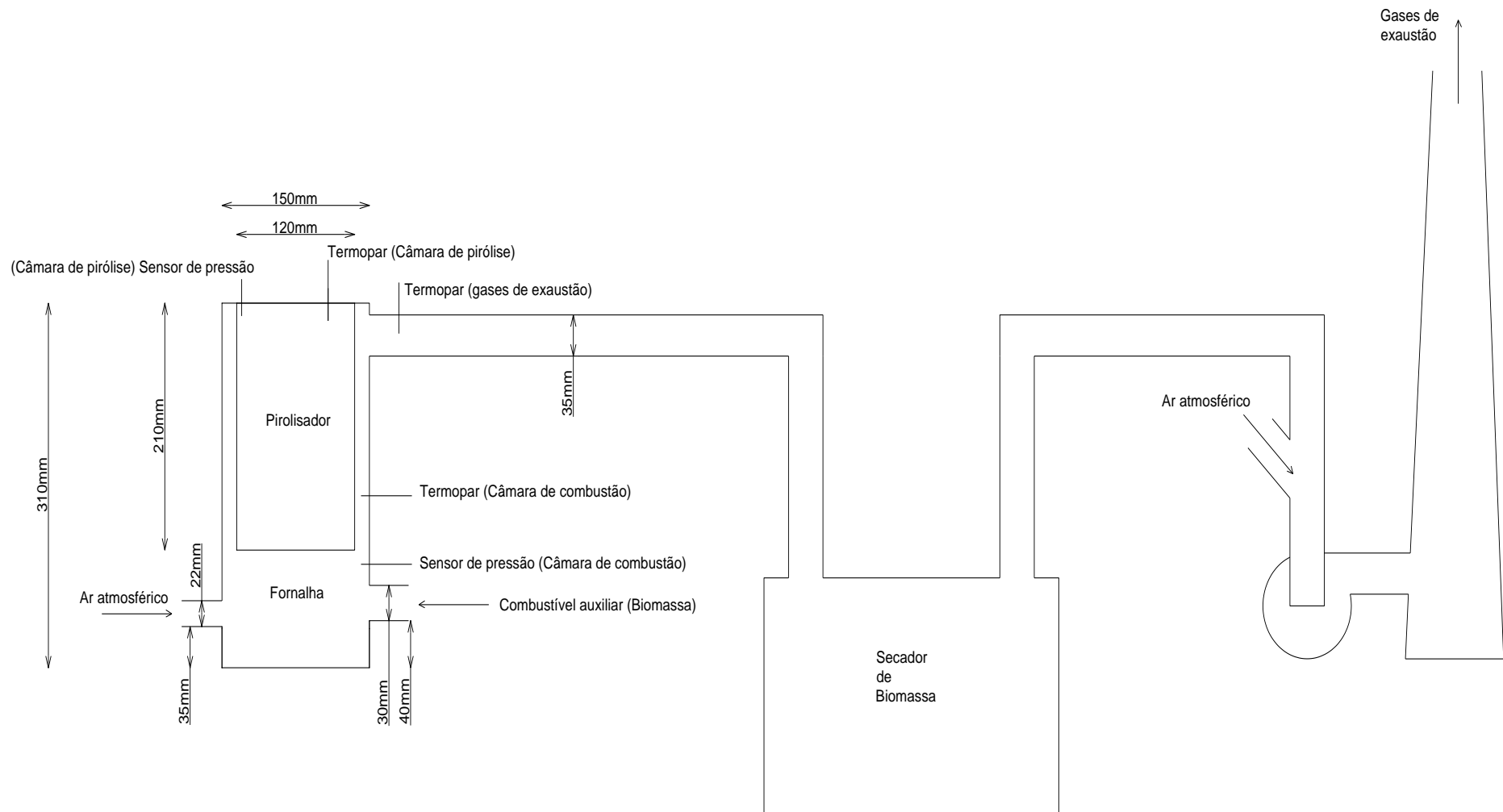


Figura 20- Representação esquemática da instalação em estudo.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO PROCESSO

De forma a caracterizar as principais operações e processos envolvidos na produção de carvão vegetal na unidade industrial Ibero Massa Florestal S.A., procedeu-se ao seguinte:

- Caracterização da biomassa utilizada no processo de pirólise e respetivo processo de pré-processamento;
- Sistema integrado fornalha-reator de pirólise e respetiva operação;
- Manuseamento e armazenamento do carbonizado.

### 4.2.1 BIOMASSA

Durante o período de estágio, a empresa encontrava-se a utilizar os seguintes tipos de biomassa: rolaria e raízes de Eucalipto, madeira de Acácia (Mimosa e Austrália) e pellets de madeira que são usados como combustível auxiliar. De referir, que neste trabalho não irá ser feita nenhuma distinção entre os dois tipos de Acácia.

#### 4.2.1.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DA BIOMASSA

Antes de iniciar o processo de pirólise, é necessário que a biomassa passe por uma fase de pré-processamento para garantir um bom desempenho do processo de pirólise. Este processo envolve um conjunto de etapas, tais como: recolha da biomassa, inspeção físico química, corte da madeira, secagem na estufa e, por último, o carregamento dos reatores com a biomassa.

##### 4.2.1.1.1 Recolha

A recolha da biomassa (Eucalipto e de Acácia) provém do abate de zonas com uma distância de um raio de 50 km da empresa. A madeira de eucalipto é retirada de culturas certificadas e como é obrigatório retirar os sobrantes do solo, ou seja, as raízes, estes também são utilizados pela empresa, tornando assim o processo mais viável a nível económico e sustentável. Relativamente à madeira de Acácia como é uma espécie infestante que ameaça a floresta portuguesa e se reproduz muito facilmente, impedindo o crescimento das plantas nativas, é necessário eliminá-la do território de forma a devolver a biodiversidade a cada ecossistema. Assim, a empresa aproveita a biomassa proveniente

da limpeza das matas. Depois do abate, a biomassa é transportada por um veículo para a empresa.



Figura 21 - Chegada do veículo à empresa com a biomassa.

#### 4.2.1.1.2 Inspeção físico química

A inspeção físico química compreende um conjunto de parâmetros, tais como: teor de humidade da biomassa, diâmetro dos toros, espécie e aspeto da carga.

A biomassa rececionada pela empresa apresenta em média entre 50% a 60% de humidade e a rolaria deve apresentar um diâmetro mínimo de 100 mm.

#### 4.2.1.1.3 Corte

Após a inspeção físico química, a biomassa é descarregada na zona de armazenamento sendo posteriormente cortada com o auxílio de um cortador/rachador de lenha. A biomassa rachada e cortada deverá apresentar uma espessura até 100 mm e um comprimento de 300 mm para garantir a máxima eficiência do processo, ou seja, aproveitar todo o espaço do reator.



Figura 22 - Zona de armazenamento e corte da biomassa.

#### 4.2.1.1.4 Secagem

Depois do corte, a biomassa é colocada em cestos de rede e estes são encaminhados para os secadores para que se proceda à secagem durante um ciclo de aproximadamente 36 horas.

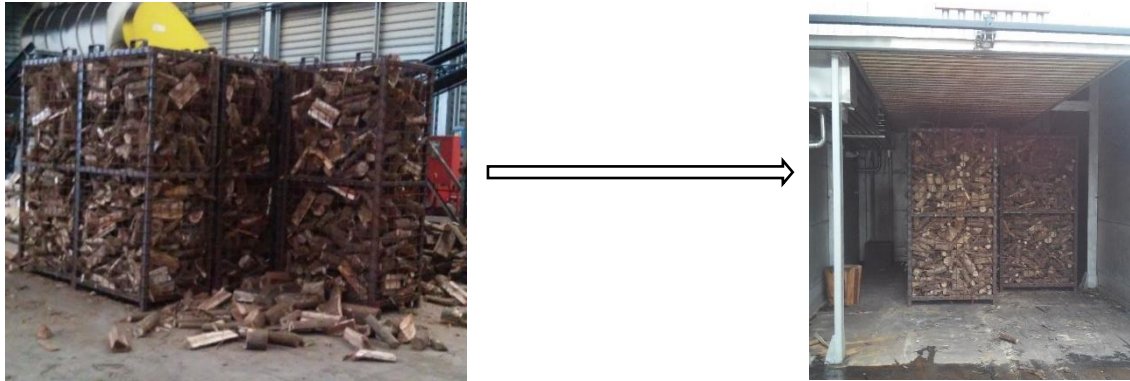


Figura 23 - Cestos de rede com a biomassa cortada (lado esquerdo) e posteriormente a biomassa na estufa (lado direito).

Os secadores instalados na empresa são denominados por secadores de madeira de Ventilação Superior Longitudinal (VSL). Os ventiladores (V) estão instalados por cima dos cestos da madeira, entre o teto do secador e o teto falso (S), e a entrada da carga de biomassa na câmara de secagem é feita longitudinalmente (L) à disposição dos ventiladores. Este equipamento é utilizado para a secagem e tratamento térmico de médias e grandes quantidades de madeira (Ibérica, S.A., 2015).



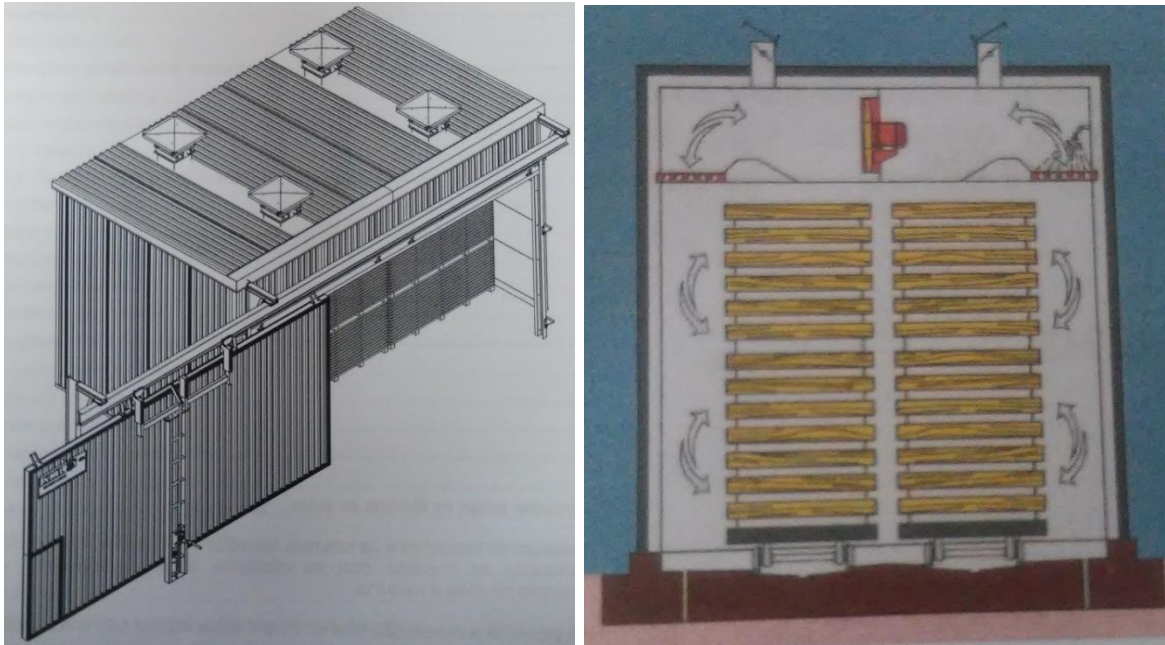


Figura 24 - Esquema do secador modelo VSL.

O sistema de aquecimento deste tipo de secador é constituído por baterias de tubos alhetados (permutadores de calor), dentro dos quais é mantido um fluxo de água quente, vapor de água ou termofluido. As baterias estão dispostas para que todo o ar em circulação as atravesse, absorvendo o calor dissipado (Ibérica, S.A., 2015).

O sistema de renovação do ar é composto por uma série de chaminés que possuem registos do tipo alapes (clapês) que abrem de forma simultânea, dispostos simetricamente em relação ao sistema de ventilação. As chaminés que se encontram a montante dos ventiladores aspiram ar fresco do exterior e as que estão a jusante dos ventiladores descarregam o ar saturado, e vice-versa no caso de ventilação reversível. A abertura dos clapês é controlada por servomotores específicos, comandados pelo controlador. Dependendo da humidade de controlo predefinida pelo controlador e de acordo com a humidade relativa do ar no interior da câmara, é dada ordem ao servomotor para abrir ou fechar os clapês (Ibérica, S.A., 2015).

A circulação do ar é feita através das baterias de aquecimento e dos cestos com a madeira por meio de ventiladores axiais. O secador de madeira dispõe de duas sondas (temperatura e de humidade do ar) que efetuam leituras que auxiliam no controlo do processo de secagem. É importante referir que o calor utilizado para a secagem da biomassa é proveniente do calor produzido de três fornalhas (Ibérica, S.A., 2015).



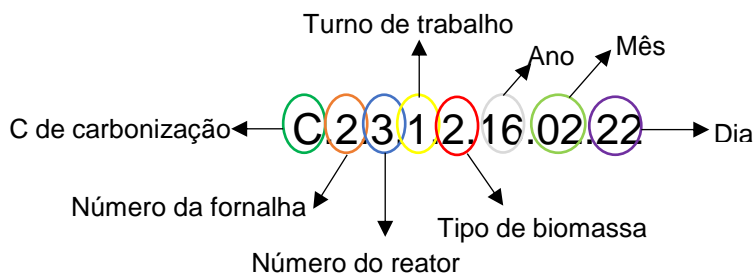
#### 4.2.1.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Uma das etapas com bastante importância a ser realizada neste trabalho refere-se à caracterização da biomassa como combustível sólido. Esta caracterização compreende a análise imediata que corresponde aos teores de humidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo, a análise elementar que se refere à composição dos componentes C (Carbono), H (Hidrogénio), O (Oxigénio), N (Azoto) e S (Enxofre) e ao poder calorífico inferior (PCI). Deste modo, para a análise imediata foram realizadas amostragens de três processos, ou seja, duas amostras de Acácia e uma amostra de Raízes de Eucalipto sendo estas analisadas no laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. A nomenclatura utilizada para cada tipo de amostra em análise encontra-se apresentada na Tabela 5. Relativamente à análise elementar e ao poder calorífico, estes foram baseados em dados recolhidos na literatura devido à escassez de resultados por parte da empresa e também à impossibilidade de ser realizada em laboratório.

Tabela 5 - Nomenclatura utilizada para diferenciar as amostras analisadas.

| Amostra                                  | Nomenclatura |
|--|--------------|
| Acácia (C.2.3.1.2.16.02.22)              | A1           |
| Acácia (C.5.2.1.2.16.02.23)              | A2           |
| Raízes de Eucalipto (C.3.2.1.3.16.02.22) | RE           |

Na empresa, cada amostra apresenta um código com o objetivo de diferenciar cada processo. O significado da nomenclatura utilizada pela empresa é o seguinte:



##### 4.2.1.2.1 Teor de humidade

Para a determinação deste parâmetro as amostras foram secas a  $(105 \pm 2^\circ\text{C})$  ao longo de um período de 120 minutos. A determinação deste parâmetro foi feita através do

procedimento estabelecido pela norma *CEN/TS 14774:2004 – Solid biofuels*. De referir que as amostras utilizadas para determinar estes parâmetros já tinham sido previamente secas na estufa da empresa.

O teor de humidade é então calculado pela equação 4.1.

$$W_{WH}(\%m, bs) = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad Eq. 4.1$$

Onde,

$m_1$  = massa do prato vazio, em (g);

$m_2$  = massa do prato mais a amostra antes da estufa, em (g);

$m_3$  = massa do prato mais a amostra depois da estufa, em (g);

#### 4.2.1.2.2 Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas corresponde a outro parâmetro de caracterização e é definido com base no cálculo da massa de resíduo que permanece nos cadinhos após a amostra ter sido aquecida sob condições de temperatura ( $550 \pm 10^\circ\text{C}$ ) e tempo rigorosamente controlados. Quando a amostra é sujeita a esta temperatura, uma parte da matéria é oxidada evaporando-se através do processo de combustão como  $\text{CO}_2$  e o restante que fica no cadinho corresponde às cinzas. De referir que foram realizadas três réplicas para cada amostra, seguindo o procedimento da norma internacional *CEN/TS 14775:2004 – Solid biofuels*. Desta forma, o teor de cinzas expresso em percentagem mássica base seca é então calculado utilizando a seguinte equação:

$$A_d(\%m, bs) = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad Eq. 4.2$$

Onde,

$m_1$  = massa do cadinho vazio, em (g);

$m_2$  = massa do cadinho mais a amostra antes da mufla, em (g);

$m_3$  = massa do cadinho mais a amostra depois da mufla, em (g);

#### 4.2.1.2.3 Matéria volátil

Relativamente à matéria volátil, este parâmetro é determinado como a perda de massa sem humidade quando o biocombustível sólido é aquecido sem contacto com o ar, sob

condições padronizadas. Na determinação deste parâmetro é essencial que a taxa de aquecimento, a temperatura final e a duração total do teste sejam rigorosamente controladas. Para além destes, também é fundamental, como já foi referido, não existir contacto com ar durante o aquecimento para evitar a oxidação. Para tal, foram realizadas três réplicas para cada amostra, seguindo o procedimento da norma internacional *CEN/TS 15148:2005 – Solid biofuels*. Assim, a matéria volátil presente na biomassa foi calculada pela seguinte equação:

$$V_d(\%m, bs) = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad Eq. 4.3$$

Onde,

$m_1$  = massa do cadinho vazio mais a tampa, em [g];

$m_2$  = massa do cadinho e a tampa mais a amostra antes da mufla, em [g];

$m_3$  = massa do cadinho e a tampa mais a amostra depois da mufla, em [g];

#### 4.2.1.2.4 Carbono Fixo

No decorrer do processo termoquímico, a energia que a biomassa contém encontra-se armazenada sob a forma de carbono fixo e matéria volátil. O teor de carbono fixo corresponde à massa de sólidos que permanece depois da libertação de voláteis, excluindo as cinzas e a humidade (A. Silva, 2009). Comparando a biomassa com os combustíveis fósseis, estes últimos apresentam teores de voláteis mais reduzidos e teores de carbono fixo mais elevados (Pinto, 2010).

O teor de carbono fixo é então calculado pela seguinte equação.

$$CF (\%m, bs) = 100 - (Ad (\%m, bs) - Vd (\%m, bs)) \quad Eq. 4.4$$

#### 4.2.2 CARBONIZADO

Quando o reator se encontra à temperatura ambiente, o carvão é descarregado para um bigbag com o auxílio da Manitou e do empilhador. Para caracterizar o carvão vegetal produzido são retiradas amostras que são encaminhadas para análise do laboratório da empresa. Esta análise compreende o teor de humidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo. A determinação destes parâmetros para este estudo corresponde às amostras já

descritas anteriormente e foram realizados através do procedimento estabelecido pela norma *EN 1860-2: 2005 (E)*. As fórmulas de cálculo para a determinação do teor de humidade, cinzas, voláteis e carbono fixo são as mesmas já utilizadas anteriormente para a caracterização da biomassa. Por este motivo, não são apresentadas novamente.

Para além da análise imediata, o carvão vegetal produzido também foi caracterizado através da análise elementar e do PCI, sendo a determinação destes parâmetros realizada por um laboratório exterior (Laboratório de análises do IST). No entanto, esta análise não foi efetuada no momento deste estudo, tendo já sido feita num período anterior.

#### 4.2.3 CONDIÇÕES OPERATÓRIAS

As condições operatórias monitorizadas ao longo deste trabalho foram a temperatura, pressão, consumo de combustível auxiliar, caudal volumétrico da entrada de ar na câmara de combustão, do ar ventilado pelo queimador externo e dos gases de exaustão.

##### 4.2.3.1 TEMPERATURA E PRESSÃO

Com o intuito de perceber a variação da temperatura e da pressão ao longo do processo de produção de carvão vegetal foram realizadas amostragens dos três processos já mencionados (A1, RE e A2). Foram retirados valores de temperatura na câmara de combustão, na câmara de pirólise e na exaustão com o auxílio de três termopares do tipo K. Relativamente à pressão, esta apenas é controlada na câmara de combustão e na câmara de pirólise através de dois transmissores de pressão. Para tal, foram amostrados valores de 5 em 5 minutos na fase inicial (aproximadamente durante duas horas) e depois de 15 em 15 minutos até o processo estar concluído. Na Figura 25, assinalado a vermelho, é demonstrado os locais e os valores de temperatura e pressão que foram monitorizados.

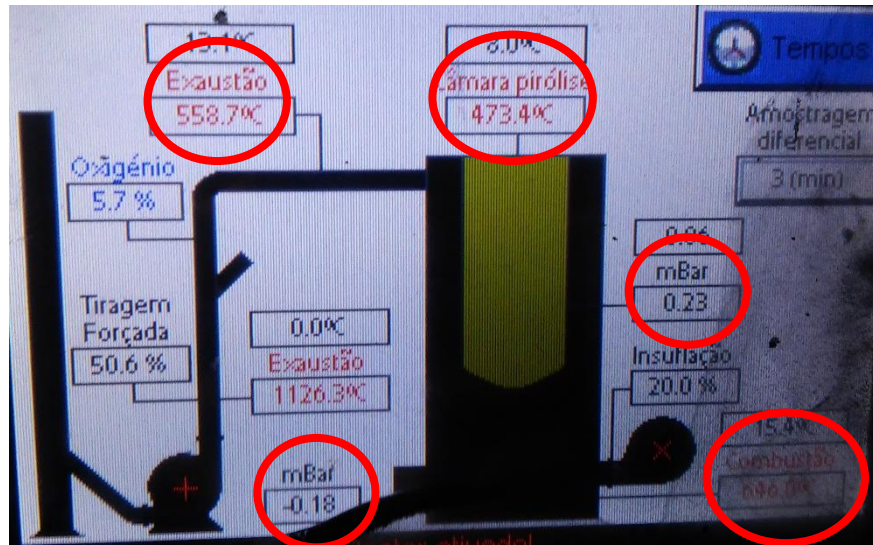


Figura 25- Representação dos valores retirados da consola de temperatura e pressão.

#### 4.2.3.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL AUXILIAR

O consumo de pellets de madeira está associado ao nível de potência utilizado no queimador externo e com a temperatura que a câmara de combustão e pirólise apresentarem. O nível de potência do queimador varia de 1 a 5 sendo este último correspondente ao nível máximo. Assim, com o intuito de saber o consumo de pellets ao longo do processo, foram realizadas pesagens, com o auxílio de uma balança, em intervalos de 30 minutos.

#### 4.2.3.3 CAUDAL VOLUMÉTRICO DE AR E DOS GASES DE EXAUSTÃO

Para determinar o caudal de ar admitido na câmara de combustão e dos gases de exaustão foi necessário monitorizar a velocidade de escoamento em cada conduta (exaustão e entrada de ar) através de um tubo de Pitot. Este dispositivo possibilita aceder à velocidade do gás a partir da diferença entre a pressão de estagnação (ou pressão dinâmica) e a pressão estática do gás no escoamento da conduta, utilizando a equação de Bernoulli. Contudo, a velocidade do gás não é sempre a mesma ao longo de toda a secção transversal da conduta, devido por exemplo aos efeitos de atrito viscoso por parte da parede da conduta. Por este motivo, realizou-se a monitorização em três pontos da secção da conduta (Figura 26).

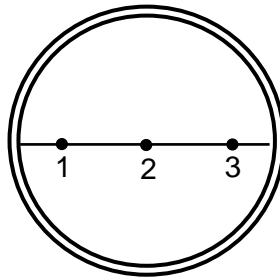


Figura 26 - Localização dos pontos de amostragem da velocidade de escoamento na conduta.

Na conduta da entrada de ar para a câmara de combustão foi necessário aplicar um tubo com 1,5 metros para garantir um perfil de velocidade estável como é evidenciado na Figura 27. Assim, sabendo a velocidade de escoamento e a área da secção da conduta calculou-se o caudal volumétrico ( $G_v$ ) de acordo com a seguinte equação:

$$G_v(m^3/s) = A(m^2) \times u(m/s) \quad Eq. 4.5$$

A Tabela 6 apresenta as dimensões relativamente à conduta dos gases de exaustão e da entrada de ar para a câmara de combustão.

Tabela 6 - Dimensões da conduta dos gases de exaustão e da entrada de ar na câmara de combustão.

|                               | Diâmetro (m) |
|-------------------------------|--------------|
| Conduta dos gases de exaustão | 0,35         |
| Conduta da entrada de ar      | 0,22         |



Figura 27 - Condução da entrada de ar na câmara de combustão (lado esquerdo) e condução dos gases de exaustão (lado direito).

Para além destes, o ventilador do queimador externo também injeta ar para a câmara de combustão, sendo este caudal de ar variável consoante o nível de potência do queimador. Neste caso, o caudal de ar foi determinado de acordo com um fator de capacidade ( $F_c$ ) relativamente ao nível de potência nominal do ventilador. Assim, com o conhecimento prévio do caudal de ar nominal do ventilador ( $F_c=100\%$ , Tabela 7), determinou-se o caudal relativo a cada nível de potência, tal como apresentado na Tabela 8.

Tabela 7 – Caudal volúmico ( $P=1\text{ atm}$  e  $T=25^\circ\text{C}$ ) relativo ao  $F_c$  máximo do queimador.

| $F_c$ [%] | $G_v$ ( $m^3/s$ ) |
|-----------|-------------------|
| 100       | 0,13              |

Tabela 8 – Fator de capacidade ( $F_c$ ) do ventilador para cada nível de potência do queimador.

| Nível de potência | $F_c$ [%] |
|-------------------|-----------|
| 1                 | 20        |
| 2                 | 37        |
| 3                 | 40        |
| 4                 | 43        |
| 5                 | 42        |

Deste modo, determinou-se o caudal através da seguinte equação:

$$G_{v \text{ ar ventilador}} = \frac{0,13 \text{ (m}^3/\text{s)} \times Fc(\%)}{100\%} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Exemplificando para o nível de potência 1,

$$G_{v \text{ ar ventilador}} = \frac{0,13 \text{ (m}^3/\text{s)} \times 20\%}{100\%} = 0,027 \text{ m}^3/\text{s}$$

Posteriormente, o caudal volumétrico de cada componente foi transformado em Nm<sup>3</sup>/s através da equação dos gases perfeitos.

De salientar ainda, que durante a monitorização da velocidade de escoamento nas diferentes condutas também se monitorizou o perfil de temperatura em diferentes pontos da instalação. Na Figura 28 estão visíveis os diversos pontos onde se realizou a amostragem da temperatura.

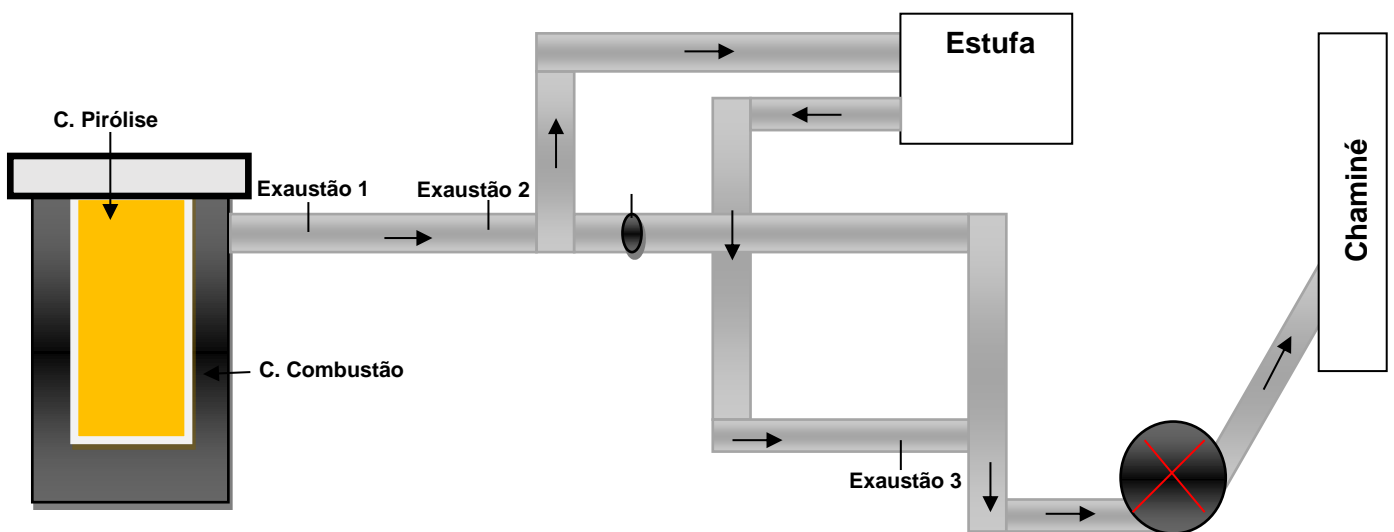


Figura 28 - Representação esquemática dos pontos de monitorização do perfil de temperatura.

#### 4.2.3.4 CAUDAL MÁSSICO DE AR E DOS GASES DE EXAUSTÃO

Considerando que os gases de combustão se comportam como gases ideais é possível determinar o caudal mássico através da equação dos gases perfeitos, sabendo o caudal volumétrico que foi determinado anteriormente. Para tal, pressupôs-se que a pressão do



ar admitido na câmara de combustão e dos gases de exaustão é igual à pressão atmosférica.

$$G_m(\text{kg/s}) = \frac{G_v(\text{Nm}^3/\text{s}) \times P(\text{Pa}) \times M_{\text{mistura}} \times 10^{-3}(\text{kg/mol})}{R(\text{J/mol.K}) \times T(\text{K})} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Onde,

$$M_{\text{mistura}}(\text{g/mol}) = \sum y_i \times M_i \quad \text{Eq. 4.8}$$

$i = \text{espécie gasosa } (\text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2, \text{N}_2 \text{ e } \text{H}_2\text{O})$

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO

#### 4.3.1 SISTEMA DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE GASOSA

A amostragem gasosa foi realizada no final da conduta de exaustão, isto é, após o fluxo gasoso ter passado pela estufa. A amostragem não foi realizada no início da conduta devido à elevada temperatura que os gases apresentavam (aproximadamente 600°C).

Para além disto, é também importante referir que a amostragem gasosa consistiu em duas experiências, ou seja, foi realizada em dois processos. A seguir é apresentada a metodologia para cada experiência.

##### 4.3.1.1 EXPERIÊNCIA 1

O primeiro sistema de amostragem foi composto por um analisador online de O<sub>2</sub> (húmido) (sonda de zircónia (Oxy-Flex), Figura 30), uma sonda para amostrar os gases secos CO, CO<sub>2</sub> e o O<sub>2</sub> (Figura 31), um sistema de condensação de três borbulhadores, uma bomba para aspirar o gás, um rotâmetro para regular o caudal de gás aspirado e 7 sacos para recolher o gás. Todos os equipamentos utilizados pertenciam ao laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. O sistema de amostragem para os gases secos CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> foi instalado de acordo com o seguinte procedimento:

- a) Colocou-se um filtro de lã cerablanket na ponteira da sonda de amostragem para realizar a filtração de partículas;

- b) Inseriu-se a sonda de amostragem no interior da conduta de exaustão de forma a ficar centrada;
- c) Através de um tubo de teflon, estabeleceu-se a ligação entre a sonda e o primeiro borbulhador;
- d) Colocou-se os três borbulhadores em série e foram conectados através de um tubo de silicone;
- e) Os três borbulhadores foram mergulhados num banho de gelo e água;
- f) Ligou-se o último borbulhador à bomba através de um tubo de teflon;
- g) Conectou-se a bomba ao rotâmetro;
- h) Por fim, estabeleceu-se a ligação ao saco.

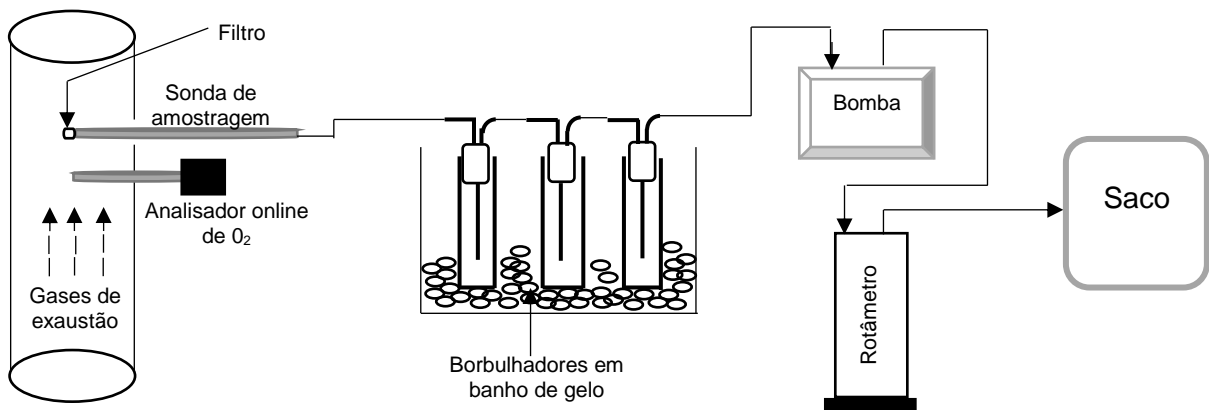


Figura 29- Representação esquemática do sistema da primeira amostragem para os gases de exaustão.



Figura 30- Analisador online de O<sub>2</sub> (sonda Oxy-Flex).



Figura 31- Sonda utilizada para a amostragem dos gases secos de exaustão (CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>).



Figura 32- Montagem do sistema de amostragem da Experiência 1.

A análise gasosa destas espécies presentes no efluente gasoso foi realizada no laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. A Figura 33 apresenta o analisador online (ADC WA-558G) utilizado para analisar o CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.



Figura 33- Analisador online (ADC WA-558G) utilizado para os gases secos CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

#### 4.3.1.2 EXPERIÊNCIA 2

A segunda experiência foi realizada com o objetivo de se obter mais resultados sobre a composição do efluente gasoso e também para adquirir os valores de forma mais contínua. Assim, este segundo sistema de amostragem consistiu em duas partes, uma para analisar os gases secos CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> continuamente através de um analisador online e para analisar a concentração de H<sub>2</sub>O e outra para amostrar as partículas presentes nos gases de exaustão.

Este sistema de amostragem foi constituído por uma sonda que se encontra representada na Figura 31, dois sistemas de condensação que continham três borbulhadores cada (com tamanhos diferentes), um contador de gás seco, uma bomba, um borbulhador em forma de U, dois filtros, um analisador contínuo online e uma balança. O sistema de amostragem foi instalado de acordo com o seguinte procedimento:

- a) Colocou-se um filtro de lã cerablanket na ponteira da sonda de amostragem para realizar a filtração de partículas;
- b) Inseriu-se a sonda de amostragem no interior da conduta de exaustão de forma a ficar centrada;
- c) Através de um tubo de teflon, estabeleceu-se a ligação entre a sonda e o primeiro borbulhador;
- d) Conectou-se o primeiro sistema de condensação ao primeiro borbulhador do segundo sistema de condensação através de um tubo de teflon;
- e) Colocou-se os borbulhadores de cada sistema em série e foram conectados através de tubo de silicone;
- f) Os borbulhadores foram mergulhados num banho de gelo e água;
- g) Ligou-se o último borbulhador do segundo sistema ao contador de gás seco através de um tubo de teflon;
- h) Conectou-se o contador de gás seco a um filtro;
- i) Ao filtro, ligou-se a bomba e a esta conectou-se o borbulhador em forma de U;
- j) Colocou-se novamente um filtro a jusante do borbulhador;

- k) Por fim, estabeleceu-se a ligação ao analisador online de CO e CO<sub>2</sub> e ao analisador online de O<sub>2</sub>.

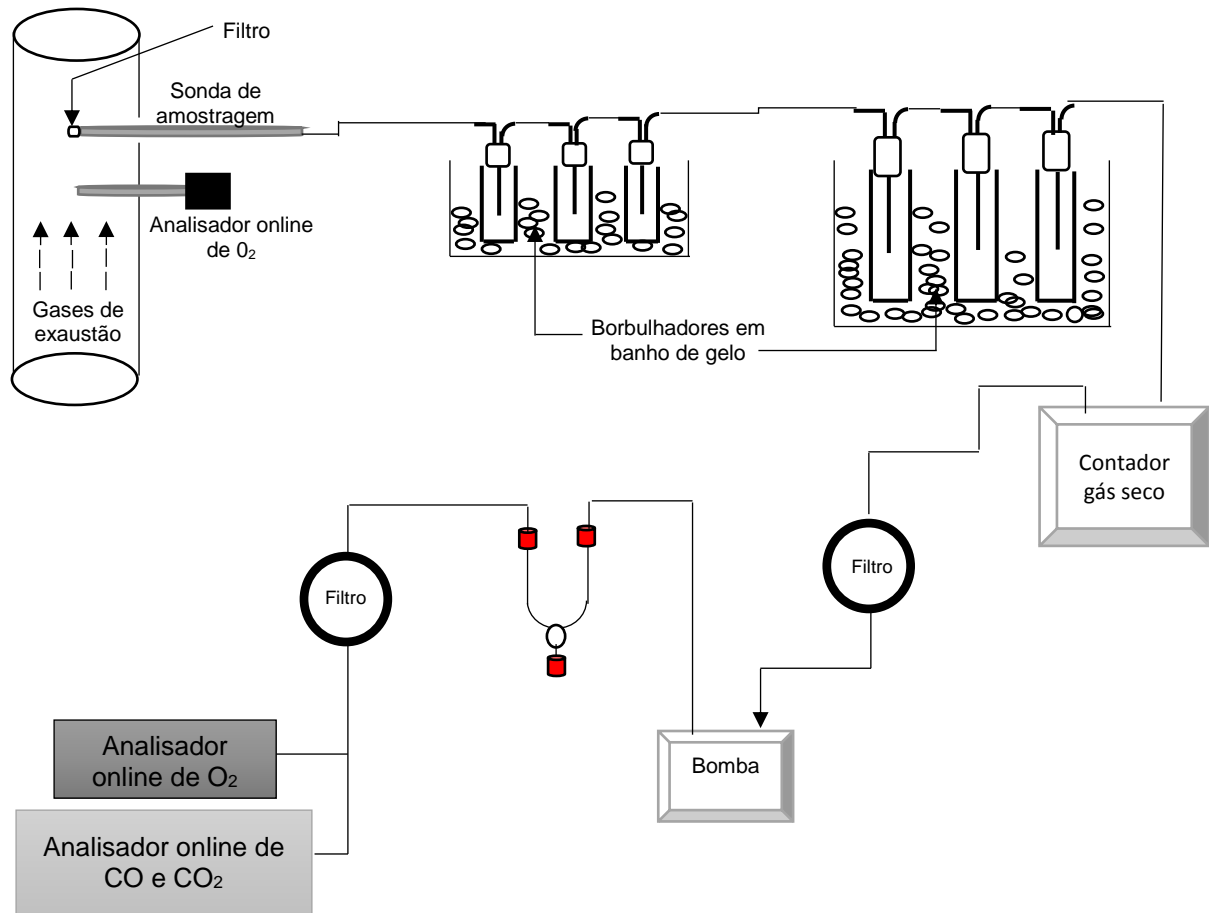


Figura 34- Representação esquemática do sistema da segunda amostragem dos gases de exaustão.

Para determinar a concentração de H<sub>2</sub>O presente no efluente gasoso, esta componente foi monitorizada em períodos de 30 minutos. Através da pesagem dos borbulhadores e da contabilização do volume amostrado determinou-se a respetiva concentração através das seguintes equações:

$$m_{H_2O}(g) = m_{borbulhador+H_2O}(g) - m_{borbulhador}(g) \quad Eq. 4.9$$

$$Concentração_{H_2O}(mg/Nm^3) = \frac{m_{H_2O}(g) \times 10^3}{V(Nm^3)} \quad Eq. 4.10$$

$$y_{H_2O}(Nm^3 H_2O/Nm^3 H_2O total) = \frac{V_{H_2O}}{V_{H_2O total}} \quad Eq. 4.11$$

Por último, por diferença determinou-se a fração volumétrica de  $N_2$ .

$$y_{N_2}(v/v) = 1 - [y_{CO_2} + y_{CO} + y_{O_2} + y_{H_2O}] \quad Eq. 4.12$$



Figura 35- Montagem do sistema de amostragem da Experiência 1.

A amostragem das partículas foi realizada com a ajuda de um aluno bolseiro que no decorrer deste trabalho se encontrava a trabalhar conjuntamente com o Professor Luís Tarelho no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e a respetiva análise foi efetuada com os equipamentos desta instituição. O sistema de amostragem para as partículas foi composto por uma sonda, sete filtros de quartzo, uma bomba, um sistema de condensação, um rotâmetro e um contador de gás seco. Este sistema de amostragem foi instalado de acordo com o seguinte procedimento:

- a) Inseriu-se a sonda na conduta de amostragem;
- b) Conectou-se a sonda ao sistema de condensação através de um tubo de teflon;
- c) O condensador encontrava-se em banho de gelo e água;
- d) Ligou-se o sistema de condensação à bomba com o auxílio de um tubo de teflon;
- e) Novamente, através de um tubo de teflon, conectou-se a bomba ao rotâmetro;
- f) Por último, estabeleceu-se a ligação do rotâmetro ao contador de gás seco.

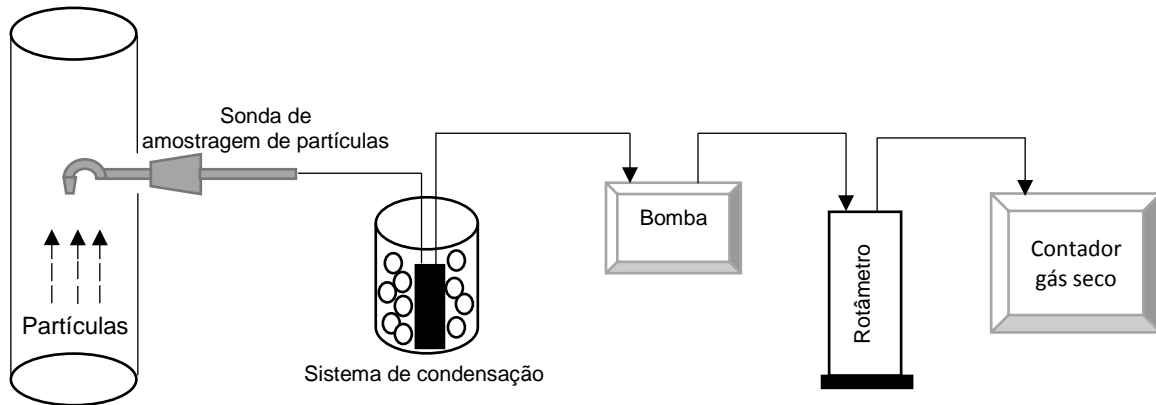


Figura 36- Representação esquemática do sistema de amostragem para as partículas.



Figura 37- Sonda de amostragem de partículas (Sonda TCR Tecora).

#### 4.3.2 CAPACIDADE CALORÍFICA DA MISTURA GASOSA

No cálculo da entalpia, para a realização do balanço energético, o parâmetro que importa determinar é o valor médio do calor específico da mistura gasosa entre a temperatura de referência ( $T^0$ ) e a temperatura em que ocorre o processo ( $T$ ), isto é:

$$\overline{cp}(T) = \frac{1}{T - T^0} \int_{T^0}^T cp_{mistura}(T) dT \quad Eq. 4.13$$

Onde,

$$cp_{mistura} = \sum y_i \cdot cp_i \quad Eq. 4.14$$

$i = \text{espécie gasosa } (CO_2, CO, O_2, N_2 \text{ e } H_2O)$

Para o cálculo da capacidade calorífica de cada espécie gasosa ( $cp_i$ ) recorreu-se a modelos de regressão. A expressão de regressão utilizada para estimar a capacidade calorífica dos gases (Matos et al., 2007) foi:

$$cp \text{ (cal/mol.K)} = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3(1/T)^2 + a_4T^3(k) \quad Eq. 4.15$$

Tabela 9- Coeficientes de regressão da capacidade calorífica a pressão constante dos gases amostrados.

| Gás              | $a_0$    | $a_1$    | $a_2$     | $a_3$     | $a_4$     |
|------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| CO <sub>2</sub>  | 6,05E+00 | 1,23E-02 | -6,63E-06 | -2,22E+04 | 1,29E-09  |
| O <sub>2</sub>   | 5,48E+00 | 4,94E-03 | -2,65E-06 | 2,40E+04  | 5,33E-10  |
| CO               | 6,11E+00 | 2,10E-03 | -2,33E-07 | 1,84E+04  | -9,31E-11 |
| H <sub>2</sub> O | 7,13E+00 | 2,04E-03 | 1,10E-06  | 1,62E+04  | -4,28E-10 |
| N <sub>2</sub>   | 6,35E+00 | 1,27E-03 | 3,85E-07  | 1,46E+04  | -2,33E-10 |
| Air              | 5,97E+00 | 2,64E-03 | -1,03E-06 | 2,17E+04  | 2,60E-10  |

#### 4.4 BALANÇO MÁSSICO AO CARBONO

O balanço mássico a um sistema de combustão compreende essencialmente em determinar a composição e quantidade dos gases de combustão e a composição e quantidade de resíduos incinerados produzidos, em estado estacionário e de acordo com um determinado conjunto de condições operatórias (Matos et al., 2014).

Neste trabalho, apenas se realizou o balanço mássico ao carbono do sistema devido à impossibilidade de se amostrar as espécies gasosas produzidas no reator de pirólise. Para tal, com conhecimento da composição elementar do combustível auxiliar, da composição dos gases de exaustão e da concentração de partículas determinou-se por defeito o caudal mássico de carbono correspondente ao gás de pirólise, através das Equações 4.16 e 4.24.

$$\begin{aligned}
 G_{mC\_pellets} (kg C/s) + G_{mC\_{gás\ pirólise}} (kg C/s) &= \\
 = G_{mC\_{gases\ exaustão}} (kg C/s) + G_{mC\_{partículas}} (kg C/s) & \quad Eq. 4.16
 \end{aligned}$$

A Figura 38 representa esquematicamente os fluxos a ter em conta para o cálculo do balanço mássico ao carbono da instalação em estudo.



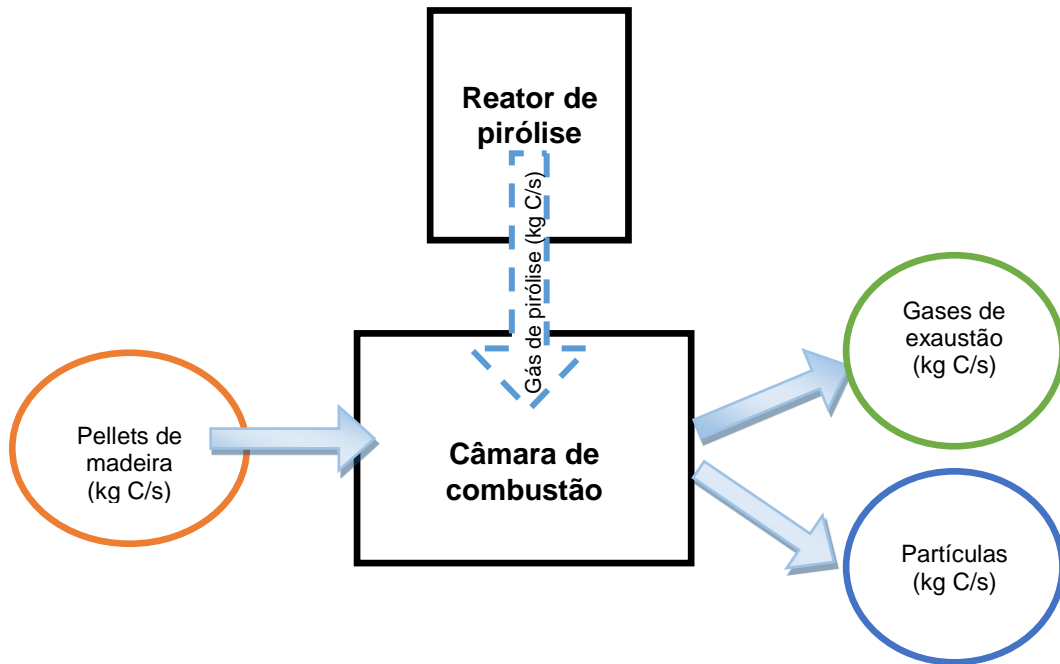


Figura 38- Representação esquemática do balanço mássico realizado à instalação.

Antes de iniciar a determinação do balanço mássico, primeiro foi necessário calcular o caudal mássico ( $G_m$  (kg C/s)) referente aos pellets de madeira e aos gases de exaustão.

Relativamente ao combustível auxiliar (pellets de madeira), o caudal mássico em quilogramas de carbono por segundo foi determinado através da composição elementar deste componente. A Equação 4.17 representa o referido cálculo.

$$G_{mC\_pellets} \text{ (kg C/s)} = G_m \text{ (kg pellets/s)} \times W_{CR} \text{ (kg C/kg pellets, bs)} \quad \text{Eq. 4.17}$$

Para os gases de exaustão, primeiramente foi necessário transformar o caudal volúmico para uma base seca, tendo em conta a seguinte equação:

$$G_{v \text{ gases de exaustão,d}} = G_{v \text{ gases de exaustão,m}} \times (1 - y_{H_2O}) \quad \text{Eq. 4.18}$$

De seguida, sabendo o caudal volúmico dos gases de exaustão em base seca, determinou-se o mesmo para cada espécie gasosa amostrada (Equação 4.19).

$$G_{v_{i,d}} = y_{i,d} \times G_{v \text{ gases de exaustão,d}} \quad \text{Eq. 4.19}$$

$$i = \text{espécie gasosa (CO}_2 \text{ e CO)}$$

Considerando que os gases de exaustão se comportam como gases perfeitos, calculou-se o caudal molar para cada espécie gasosa.

Exemplificando para o CO<sub>2</sub>,

$$P \times G_{vCO_2,d} = G_{nCO_2} \times R \times T \leftrightarrow G_{nCO_2} (\text{mol/s}) = \frac{P(\text{Pa}) \times G_{vCO_2,d} (\text{Nm}^3/\text{s})}{R(\text{J/mol.K}) \times T(\text{K})} \quad \text{Eq. 4.20}$$

Por último, sabendo o número de moles de carbono que corresponde a cada espécie gasosa determinou-se o caudal mássico correspondente aos gases de exaustão.

$$1 \text{ mol } CO_2/\text{s} \rightarrow 1 \text{ mol } C/\text{s}$$

$$1 \text{ mol } CO/\text{s} \rightarrow 1 \text{ mol } C/\text{s}$$

$$\begin{aligned} G_{mC_{\text{gases exaustão}}} (\text{kg } C/\text{s}) &= \\ &= \left( G_{nCO_2} (\text{mol } CO_2/\text{s}) + G_{nCO} (\text{mol } CO/\text{s}) \right) \times M_C (\text{kg } C/\text{mol } C) \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.21}$$

A determinação do teor de carbono presente nas partículas foi baseado no cálculo da massa de resíduo que não permaneceu nos cadinhos após a amostra ter sido aquecida a (550±10°C) durante uma hora na mufla. A Equação 4.22 exemplifica o referido cálculo.

$$W_C (\text{kg } C/\text{kg } \text{partículas}) = [m_1 (\text{g}) - m_2 (\text{g})] \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 4.22}$$

Onde,

m<sub>1</sub> = massa de partículas + filtro antes da mufla (g);

m<sub>2</sub> = massa de partículas + filtro após a mufla (g).

Assim, o caudal mássico de carbono das partículas determinou-se através da Equação 4.23.

$$G_{mC_{\text{partículas}}} (\text{kg } C/\text{s}) = G_{m_{\text{partículas}}} (\text{kg } \text{partículas}/\text{s}) \times W_C (\text{kg } C/\text{partículas}) \quad \text{Eq. 4.23}$$

Por defeito, determinou-se o caudal mássico de carbono relativo ao gás de pirólise.

$$G_{mC_{\text{gás pirólise}}} (\text{kg } C/\text{s}) = G_{mC_{\text{gases exaustão}}} + G_{mC_{\text{partículas}}} - G_{mC_{\text{pellets}}} \quad \text{Eq. 4.24}$$

## 4.5 BALANÇO ENERGÉTICO

O principal objetivo do desenvolvimento do balanço energético a uma instalação consiste essencialmente no cálculo das diferentes formas energéticas presentes em todos os

intervenientes do sistema, pelo que é necessário determinar primeiramente o balanço mássico.

O balanço energético baseia-se no balanço de entalpia do sistema. O balanço realizado à instalação em estudo é expresso através da Equação 4.25 e encontra-se esquematizado na Figura 39.

$$\dot{Q}_{reagentes}(kJ/s) = \dot{Q}_{produtos}(kJ/s) + \dot{Q}_{útil}(kJ/s) + \dot{Q}_{perdida}(kJ/s) \quad Eq. 4.25$$

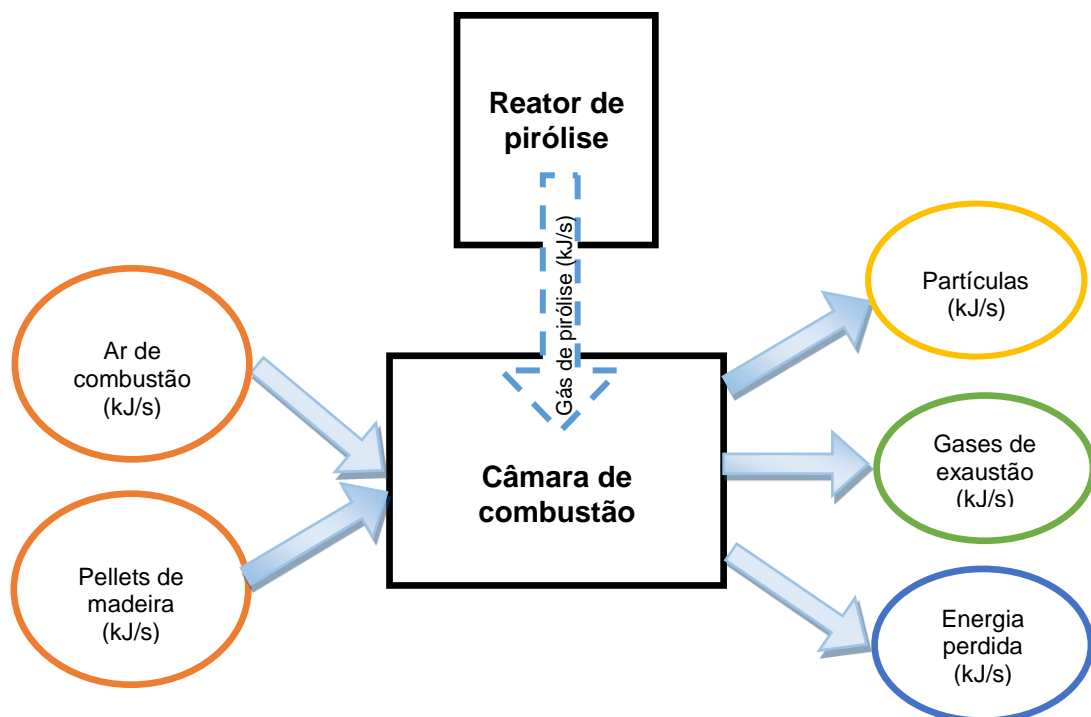


Figura 39-Representação esquemática do balanço energético realizado à instalação.

As várias formas energéticas que incluem o balanço energético são:

### 1) Calor sensível

Define-se calor sensível a energia térmica que é armazenada numa massa material e é proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura de referência (Matos et al., 2014).

## 2) Calor latente

Entende-se por calor latente a energia térmica contida numa substância quando muda de fase, particularmente no caso da água, que consiste na humidade, para o sistema em estudo (M. A. Matos, 2014).

## 3) Calor de reação

Define-se calor de reação a entalpia de reação de combustão a pressão constante e à temperatura de referência  $T^0$  (M. A. Matos, 2014).

### 4.5.1 ENERGIA DOS REAGENTES

A energia dos reagentes refere-se à energia presente nos pellets de madeira, no ar de combustão e no gás de pirólise. Mais uma vez, tal como no balanço mássico, o cálculo da energia contida no gás de pirólise também é determinado pela diferença entre os restantes fluxos.

$$\dot{Q}_{reagentes}(kJ/s) = \dot{Q}_{sensível} + \dot{Q}_{latente} + \dot{Q}_{reação} \quad Eq. 4.26$$

#### 4.5.1.1 ENERGIA DOS REAGENTES – CALOR SENSÍVEL

O calor sensível presente nos reagentes corresponde à energia transmitida pelo combustível auxiliar e pelo ar de combustão.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,reagentes}(kJ/s) &= \dot{Q}_{s,ar\ de\ combustão} + \dot{Q}_{s,pellets\ de\ madeira} = \\ &= [G_m\ ar\ de\ combustão \times \bar{c}p_{ar\ de\ combustão} \times (T - T^0)] \\ &+ [G_m\ pellets \times c p_{pellets} \times (T \\ &- T^0)] \end{aligned} \quad Eq. 4.27$$

O ar de combustão corresponde ao ar que entra pela conduta da fornalha e ao ventilado pelo queimador externo, como referido anteriormente. A potência térmica do ar de combustão foi determinada ao longo do processo, uma vez que o caudal é variável. Para o cálculo, assumiu-se que o ar de combustão é igual ao ar atmosférico e que a temperatura (T) é igual à temperatura ambiente (298 K). A capacidade calorífica do efluente gasoso (ar atmosférico), à temperatura de 298 K, foi determinada de acordo com os coeficientes de regressão referidos na Tabela 8 do subcapítulo 4.3.2.

Relativamente à capacidade calorífica dos pellets de madeira utilizou-se o seguinte valor:

$$c_{p_{\text{pellets de madeira}}} = 1,850 \text{ kJ/kg.K}$$

#### 4.5.1.2 ENERGIA DOS REAGENTES – CALOR LATENTE

Tal como já foi mencionado anteriormente, esta componente corresponde à energia necessária para evaporar a humidade presente no ar atmosférico à temperatura de referência  $T^0$ .

$$\dot{Q}_l(\text{kJ/s}) = G_{m,H_2O}(\text{kg/s}) \times h_{wv,T^0}(\text{J/kg}) \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 4.28}$$

O calor latente de vaporização da água, tendo como temperatura de referência,  $T^0 = 273\text{K}$ , foi determinado através do seguinte modelo de regressão:

$$h_{wv,T^0}(\text{J/kg}) = 10^3 \times \left( a_0 + a_1 T + a_2 \left( \frac{1}{T} \right) + a_3 T^2 + a_4 \left( \frac{1}{T} \right)^2 + a_5 T^3 \right) (K) \quad \text{Eq. 4.29}$$

Tabela 10- Coeficientes de regressão múltipla do calor latente vaporização da água,  $h_{wv}$  ( $\text{J.kg}^{-1}$ ).

| $a_0$       | $a_1$        | $a_2$        | $a_3$        | $a_4$        | $a_5$        | gama (K) | $r^2$    | n  |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----|
| 0,19310E+04 | -0,30710E+02 | 0,237195E+07 | 0,811664E-01 | -0,32922E+09 | -0,67648E-04 | 273-630  | 0,999336 | 51 |

Contudo, é importante referir, que o caudal mássico de água ( $G_{m,H_2O}$ ) presente no ar de combustão era desconhecido. Para tal, pressupôs-se que a humidade relativa ( $U_w$ ) do ar atmosférico era 40% e através das seguintes equações determinou-se o caudal mássico de água.

$$U_w(\%) = \frac{P_v(\text{bar})}{P_s(\text{bar})} \times 100 \quad \text{Eq. 4.30}$$

A pressão de vapor de saturação foi determinada através da expressão de regressão (Equação 4.31), incluindo as condições de aplicabilidade e os coeficientes de regressão.

$$P_s(\text{bar}) = \text{Exp} \left( a_0 + a_1 T + a_2 \left( \frac{1}{T} \right) + a_3 T^2 + a_4 T^3 \right) (K) \quad \text{Eq. 4.31}$$

Tabela 11- Coeficientes da função de regressão múltipla da pressão de vapor de saturação da água,  $P_s$  (bar).

| $a_0$         | $a_1$          | $a_2$          | $a_3$         | $a_4$          | gama (K) | $r^2$    | n  |
|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------|----------|----|
| 0,2251156E+02 | -0,2029054E-01 | -0,6333500E+04 | 0,1587325E-04 | -0,3161718E-08 | 273-625  | 0,999999 | 50 |

$$P_v(\text{bar}) = \frac{U_w(\%)}{100} \times P_s(\text{bar}) \quad \text{Eq. 4.32}$$

$$y_v(\%, v/v) = \frac{P_v}{P} \times 100\% \quad \text{Eq. 4.33}$$

Com,

$$P_{\text{ar de combustão}} = 1,01325 \text{ bar}$$

Assim,

$$G_{v,H_2O}(\text{Nm}^3/\text{s}) = G_{v,\text{ar de combustão}}(\text{Nm}^3/\text{s}) \times y_v(\text{Nm}^3\text{H}_2\text{O}/\text{Nm}^3\text{ar combustão}) \quad \text{Eq. 4.34}$$

Por último,

$$G_{m,H_2O}(\text{kg}/\text{s}) = \frac{P(\text{Pa}) \times G_{v,H_2O}(\text{Nm}^3/\text{s}) \times M_{\text{ar de combustão}} \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{mol})}{R(\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}) \times T(\text{K})} \quad \text{Eq. 4.35}$$

#### 4.5.1.3 ENERGIA DOS REAGENTES – CALOR DE REAÇÃO

O calor de reação presente nos reagentes corresponde à entalpia de reação do combustível auxiliar e é expresso por:

$$\dot{Q}_{r,\text{reagentes}} = \dot{Q}_{r,\text{pellets de madeira}}(\text{kJ}/\text{s}) = G_{m,\text{pellets de madeira}}(\text{kg}/\text{s}) \times PCI(\text{kJ}/\text{kg}) \quad \text{Eq. 4.36}$$

#### 4.5.2 ENERGIA DOS PRODUTOS

A energia dos produtos refere-se à energia dos gases de exaustão e das partículas e é expressa pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{\text{produtos}}(\text{kJ}/\text{s}) = \dot{Q}_{\text{sensível}} + \dot{Q}_{\text{latente}} + \dot{Q}_{\text{reação}} \quad \text{Eq. 4.37}$$

##### 4.5.2.1 ENERGIA DOS PRODUTOS – CALOR SENSÍVEL

O calor sensível dos produtos corresponde à energia transmitida pelos gases de exaustão e pelas partículas (Equação 4.38).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{s,produtos} &= \dot{Q}_{s,gases\ de\ exaust\til{a}o} + \dot{Q}_{s,part\acute{i}culas} \\
 &= [G_{m,gases\ de\ exaust\til{a}o} \times \overline{cp}_{gases\ de\ exaust\til{a}o} \times (T - T^0)] \\
 &+ [G_{m,part\acute{i}culas} \times cp_{part\acute{i}culas} \times (T - T^0)]
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.38}$$

A capacidade calorífica do efluente gasoso (gases de exaustão) foi determinada de acordo com os coeficientes de regressão referidos na Tabela 9 do subcapítulo 4.2.3.2 e das partículas foi utilizado o seguinte valor:

$$cp_{part\acute{i}culas} = 1,600\ kJ/kg.K$$

#### 4.5.2.2 ENERGIA DOS PRODUTOS – CALOR LATENTE

O calor latente dos produtos corresponde à energia necessária para evaporar a humidade contida nos gases de exaustão à temperatura de referência  $T^0$ .

$$\dot{Q}_l(kJ/s) = G_{m,H_2O}(kg/s) \times h_{wv,T^0}(J/kg) \times 10^{-3} \tag{Eq. 4.39}$$

O calor latente de vaporização da água foi determinado através do modelo de regressão apresentado na Equação 4.29.

#### 4.5.2.3 ENERGIA DOS PRODUTOS – CALOR DE REAÇÃO

O calor de reação diz respeito aos produtos inqueimados, isto é, ao carbono presente nas partículas (Equação 4.40).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{r,produtos} &= \dot{Q}_{r,part\acute{i}culas}(kJ/s) = \\
 &= G_{m,part\acute{i}culas}(kg/s) \times W_C(kg\ C/kg\ part\acute{i}culas) \\
 &\times PCI_{carbono}(kJ/kg\ C)
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.40}$$

$$PCI_{carbono,@\ 298K}[kJ/kg\ carbono] = 32,79 \times 10^3$$

#### 4.5.3 ENERGIA ÚTIL

A energia útil aplica-se quando existe um permutador que remove o calor da fornalha. Como no sistema em estudo não existe recuperação de calor, a determinação desta componente não se aplica para o cálculo do balanço energético.

#### 4.5.4 ENERGIA PERDIDA

Quanto ao fluxo de energia que é perdida, este foi determinado tendo em conta ao calor perdido na conduta de exaustão e na estufa (entre a Exaustão 1 e 2 e entre a Exaustão 2 e 3 (ver Figura 28)).

$$\dot{Q}_{perdida} (kJ/s) = (\dot{Q}_{exaustão\ 2} - \dot{Q}_{exaustão\ 1}) + (\dot{Q}_{exaustão\ 3} - \dot{Q}_{exaustão\ 2}) \quad Eq. 4.41$$

Por último, determinou-se, por defeito, a energia correspondente ao gás de pirólise através da Equação 4.42.

$$\dot{Q}_{gás\ de\ pirólise} (kJ/s) = \dot{Q}_{produtos} - \dot{Q}_{pellets\ de\ madeira} - \dot{Q}_{ar\ de\ combustão} \quad Eq. 4.42$$



## 5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do trabalho desenvolvido ao longo do período de estágio, incluindo a informação sobre as características da biomassa e do carbonizado, condições operatórias e os balanços mássico e energético realizados à instalação em estudo.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA E DO CARBONIZADO

#### 5.1.1 BIOMASSA

Depois do pré-processamento da biomassa foi realizada a sua caracterização físico química quanto à análise elementar, poder calorífico e análise imediata (teores de humidade, cinzas e voláteis de acordo com os procedimentos descritos no Anexo A).

No presente trabalho de estágio não se efetuou a análise elementar e o poder calorífico aos diferentes tipos de biomassa, no entanto, na Tabela 12 são apresentadas as composições típicas da biomassa utilizada pela empresa que a literatura apresenta.

Tabela 12- Análise elementar e poder calorífico dos diferentes tipos de biomassa.

| Biomassa                  | Análise elementar [%massa, bs] |      |        |      |      | PCI<br>[MJ/kg i bs] | Referências            |
|---------------------------|--------------------------------|------|--------|------|------|---------------------|------------------------|
|                           | C                              | H    | O      | N    | S    |                     |                        |
| <b>Eucalipto</b>          | 46,78                          | 5,92 | 45,55  | 0,32 | 0,09 | 18,06               | (Galindo et al., 2014) |
| <b>Acácia</b>             | 46,91                          | 6,15 | 44,43  | 0,89 | nd   | 17,1                | -                      |
| <b>Pellets de Madeira</b> | 47,50                          | 6,20 | 45,89* | 0,09 | nd   | 18,0                | -                      |

\*por diferença; nd- não determinado

**Nota:** Os valores apresentados para a caracterização da Acácia e dos Pellets de Madeira foram fornecidos pelo laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Relativamente à análise imediata, esta foi realizada para as diferentes amostras de cada processo. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para os teores de humidade, cinzas, voláteis e carbono fixo para cada amostra.

Tabela 13- Análise imediata das amostras de biomassa.

| <b>Amostra</b>           | <b>Humidade [%massa, btq]</b> |               | <b>Cinzas [%massa, bs]</b> |               | <b>Voláteis [%massa, bs]</b> |               | <b>Carbono Fixo [%massa, bs]</b> |               |
|--------------------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
|                          | Média                         | Desvio Padrão | Média                      | Desvio Padrão | Média                        | Desvio Padrão | Média                            | Desvio Padrão |
| Acácia 1 (A1)            | 14,43                         | 3,70          | 0,42                       | 0,064         | 88,97                        | 0,31          | 10,60                            | -             |
| Acácia 2 (A2)            | 16,86                         | 3,16          | 0,39                       | 0,0071        | 89,45                        | 0,23          | 10,16                            | -             |
| Raízes de Eucalipto (RE) | 14,29                         | 1,17          | 0,55                       | 0,044         | 89,83                        | 1,09          | 9,62                             | -             |

Analisando a Tabela 13, verifica-se que os três tipos de amostras apresentam composições semelhantes. O teor de humidade está na gama de 14% a 17% (%massa, btq), as cinzas na gama de 0,4% a 0,6% (%massa, bs) e os voláteis na gama de 88% a 90% (%massa, bs). De uma forma geral, não se observam diferenças significativas entre a biomassa de Acácia (A1 e A2) e de Raízes de Eucalipto (RE), com exceção do teor de cinzas que é ligeiramente superior na amostra de RE.

### 5.1.2 CARBONIZADO

Após o processo de pirólise estar concluído e o reator ter arrefecido, o carvão vegetal produzido é descarregado. A caracterização do carbonizado foi realizada através da análise elementar, da análise imediata e do PCI. A Tabela 14 apresenta os resultados da análise elementar e do PCI e a Tabela 15 demonstra os valores obtidos dos parâmetros da análise imediata.

Tabela 14- Análise elementar e poder calorífico do carvão vegetal produzido pela empresa.

| <b>Análise elementar [%massa, bs]</b> |         |
|---------------------------------------|---------|
| C                                     | 91,4    |
| H                                     | <1,8    |
| O                                     | 6,3     |
| N                                     | 0,5     |
| S                                     | nd      |
| <i>PCI [MJ/kg] (bs)</i>               | 30605,4 |

nd- não determinado

Tabela 15- Análise imediata das amostras do carbonizado correspondentes a cada processo.

| <b>Amostra do carbonizado</b> | <b>Humidade [%massa, btq]</b> | <b>Cinzas [%massa, bs]</b> |               | <b>Voláteis [%massa, bs]</b> |               | <b>Carbono Fixo [%massa, bs]</b> |               |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
|                               |                               | Média                      | Desvio Padrão | Média                        | Desvio Padrão | Média                            | Desvio Padrão |
| A1                            | 2,05                          | 1,81                       | 0,054         | 6,30                         | 0,20          | 91,90                            | 0,244         |
| A2                            | 2,22                          | 1,56                       | 0,014         | 6,51                         | 0,23          | 91,92                            | 0,242         |
| RE                            | 2,05                          | 1,74                       | 0,082         | 4,71                         | 0,11          | 93,55                            | 0,146         |

De acordo com a Tabela 15, verifica-se uma diferença pouco significativa entre os resultados obtidos para os três tipos de amostras. De um modo geral, as amostras de carbonizado contêm baixos teores de cinzas e voláteis (<2% e <7%, respetivamente) e um elevado teor de carbono fixo (> 91%).

## 5.2 TEMPERATURA E PRESSÃO

A temperatura e a pressão são duas variáveis com bastante importância que devem ser monitorizadas durante o processo de produção de carvão vegetal. O conhecimento do seu comportamento ao longo do sistema permite perceber a evolução do processo e compreender o comportamento das diferentes espécies gasosas produzidas. A observação do comportamento da temperatura e da pressão foi realizada em três processos, como referido anteriormente.

Através dos perfis de temperatura, é possível distinguir as diferentes fases (secagem, pirólise e arrefecimento) que ocorrem no interior do reator de pirólise. Na fase de pirólise é onde se verificam valores mais elevados de temperatura, diminuindo gradualmente até atingir a fase de arrefecimento (Figura 40). A pressão monitorizada corresponde à pressão da câmara de pirólise relativa à câmara de combustão. O perfil de pressão no reator de pirólise atinge valores mais acentuados quando existem picos de temperatura e também poderá ser um indicador que estão a ser produzidas espécies gasosas no reator de pirólise. Através da Figura 40 é possível observar a variação dos perfis de temperatura e pressão de cada processo analisado. É importante referir que aos perfis de temperatura também está associado o nível de potência do queimador utilizado durante cada processo com o intuito de perceber a quantidade de pellets de madeira que foi necessário utilizar como combustível auxiliar.

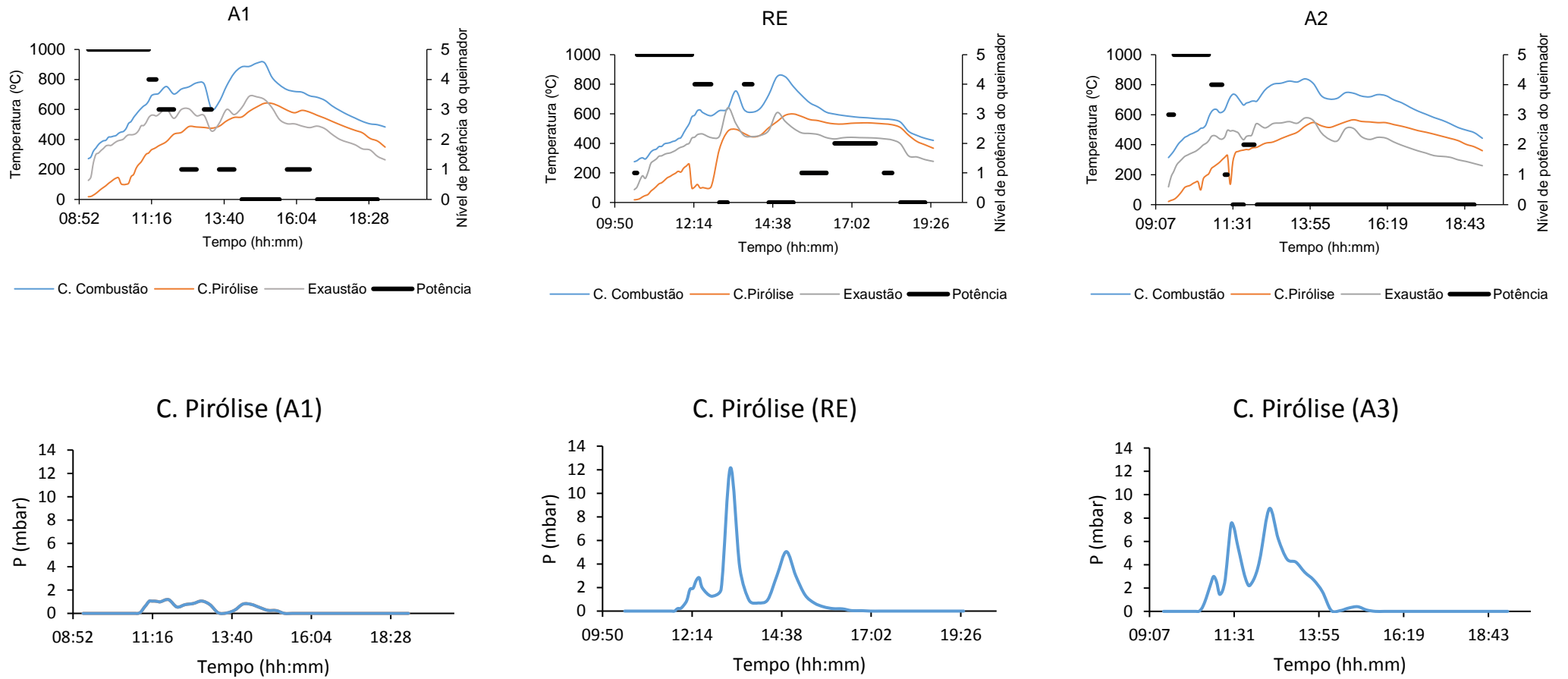


Figura 40- Perfis de temperatura e pressão dos três processos analisados.

Primeiramente, analisando de forma geral os três processos, verifica-se um comportamento semelhante do perfil de temperatura na câmara de combustão, na câmara de pirólise e na exaustão, ou seja, quando existe um aumento ou uma descida de temperatura na câmara de combustão o mesmo também se verifica na câmara de pirólise e na exaustão.

No primeiro processo (A1), verifica-se que a temperatura na câmara de pirólise aumenta gradualmente, observando-se uma ligeira descida por volta dos 150°C até aproximadamente aos 100°C o que, neste caso, pode estar relacionado com a libertação de vapor de água da biomassa. Depois disto, a temperatura volta a subir, onde atinge um valor máximo, voltando a diminuir até à fase de arrefecimento (aproximadamente nos 500 °C). Após alcançar a fase de arrefecimento, o reator foi retirado da fornalha quando apresentava uma temperatura próxima dos 350°C. Relativamente à temperatura na câmara de combustão, esta evoluiu de forma idêntica à da pirólise na fase inicial do processo. Após esta fase, observam-se três picos de temperatura, constando-se o mesmo no gráfico da pressão, podendo então, estes picos de temperatura serem justificados pelo aumento de pressão no reator de pirólise. De forma a diminuir a temperatura na câmara de combustão, reduziu-se o nível de potência do queimador uma vez que, como estava a ser produzido gás no reator de pirólise (aumento de pressão) não era necessário estar a queimar a mesma quantidade de pellets de madeira sendo o gás de pirólise utilizado como combustível. Em relação à temperatura na conduta da exaustão observa-se o mesmo comportamento da câmara de combustão. Olhando para o nível de potência do queimador, constata-se que apenas foi utilizado o nível de potência máximo (nível 5) no início do processo, diminuindo e aumentando posteriormente consoante a necessidade de estabilizar a temperatura na câmara de combustão.

O perfil de temperatura do processo RE apresenta algumas variações em relação ao último analisado (processo A1). Na primeira fase do processo, aproximadamente até aos 250 °C, observa-se uma subida progressiva da temperatura. Após esta temperatura, verifica-se uma descida acentuada da temperatura que se deveu a uma má leitura por parte do termopar. Depois de resolvido o problema, a temperatura voltou a subir rapidamente. Uma vez que o nível de potência do queimador que se estava utilizar também era alto (nível 4), devido à temperatura no reator de pirólise estar baixa, a pressão no reator de pirólise também alcançou um valor máximo de aproximadamente 12 mbar. De forma a diminuir a pressão, reduziu-se o nível de potência do queimador para 0, isto é, o combustível que se

estava a utilizar correspondia apenas ao gás de pirólise. Após este acontecimento, observa-se uma descida de temperatura e de pressão, sendo necessário voltar a ligar o queimador para auxiliar o aumento de temperatura na câmara de combustão e consequentemente na câmara de pirólise. Depois de aumentar o nível de potência do queimador, a temperatura e a pressão voltaram a aumentar e atingiram um novo pico. Para controlar estes dois parâmetros voltou-se a desligar o queimador.

Por último, analisando o perfil de temperatura do processo A2, constata-se que não ocorreram flutuações significativas de temperatura. Na câmara de pirólise, apenas ocorreram duas descidas de temperatura que poderão estar relacionadas com o vapor de água libertado pela biomassa. Neste processo, observa-se também que apenas foi utilizado combustível auxiliar na fase inicial (aproximadamente nas duas primeiras horas). Em relação ao perfil de pressão, verifica-se que foram atingidos três valores máximos que correspondem aos picos de temperatura obtidos na câmara de combustão. Este ganho de pressão justifica o facto de apenas se ter utilizado combustível auxiliar no início do processo.

No geral, o valor do pico de temperatura ocorrido na câmara de pirólise dos três processos encontra-se na gama de 550°C a 600°C, o que corresponde ao intervalo apresentado na Tabela 4 dos parâmetros típicos para a pirólise lenta.

Quanto ao perfil de pressão na câmara de combustão, este parâmetro não é apresentado graficamente uma vez que, a câmara de combustão encontra-se sempre em depressão e a variação deste parâmetro é pouco significativa. Contudo, através da Tabela 16 é possível visualizar a gama de pressão atingida na câmara de combustão.

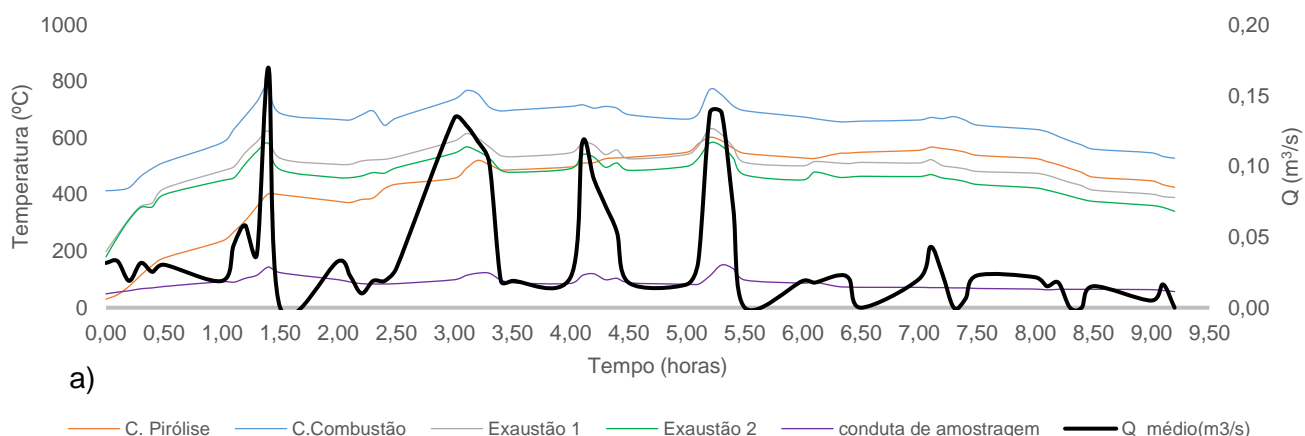
Em resumo, a Tabela 16, apresenta os valores médios de temperatura e pressão, bem como o consumo de combustível auxiliar, nas diferentes fases do processo.

Tabela 16- Resumo das gamas de temperatura, pressão e consumo de combustível auxiliar nas diferentes fases do processo.

| Parâmetro                                      | Fases do processo |                  |                        |
|--|-------------------|------------------|------------------------|
|  | I<br>(Secagem)    | II<br>(Pirólise) | III<br>(Arrefecimento) |
| Temperatura na câmara de combustão (°C)        | 250-550           | 550-800          | 650-450                |
| Temperatura na câmara de pirólise (°C)         | 20-250            | 250-600          | 550-370                |
| Pressão relativa na câmara de combustão (mbar) | -0,35             | -0,25            | -0,10                  |
| Pressão na câmara de pirólise (mbar)           | 0                 | 1,5              | 0                      |
| Consumo de combustível auxiliar (kg)           | 55                | 65               | 0                      |

### 5.3 CAUDAL VOLUMÉTRICO DE AR DE COMBUSTÃO E GASES DE EXAUSTÃO

Ao longo do processo de produção de carvão vegetal foi monitorizado o caudal volumétrico da entrada de ar na câmara de combustão e dos gases de exaustão em função da temperatura. O período de monitorização para este parâmetro foi ao longo de dois processos (representado como a) e b) nas figuras que se seguem). O caudal de ar admitido na câmara de combustão encontra-se apresentado nas Figuras 41 e 42 e dos gases de exaustão é representado na Figura 43.



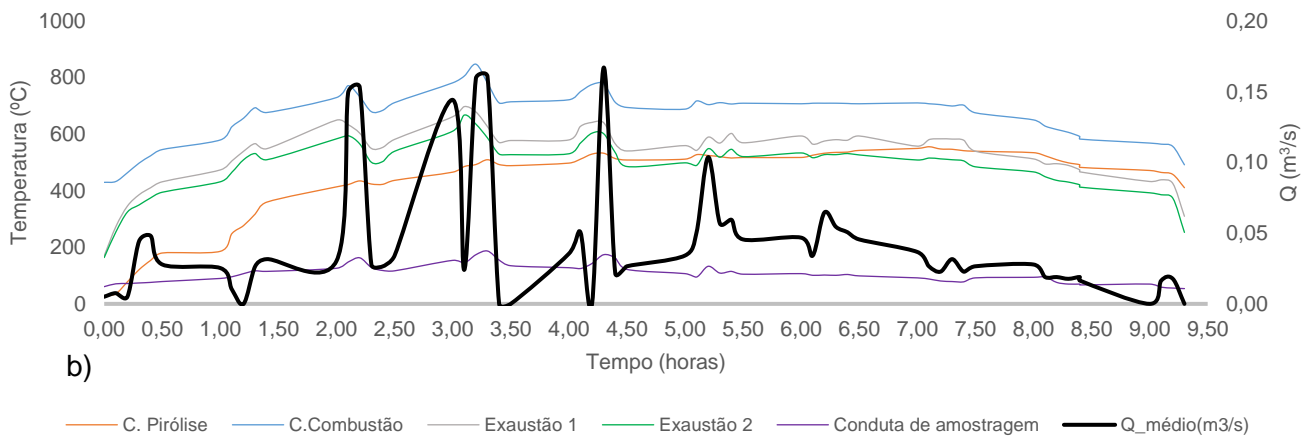
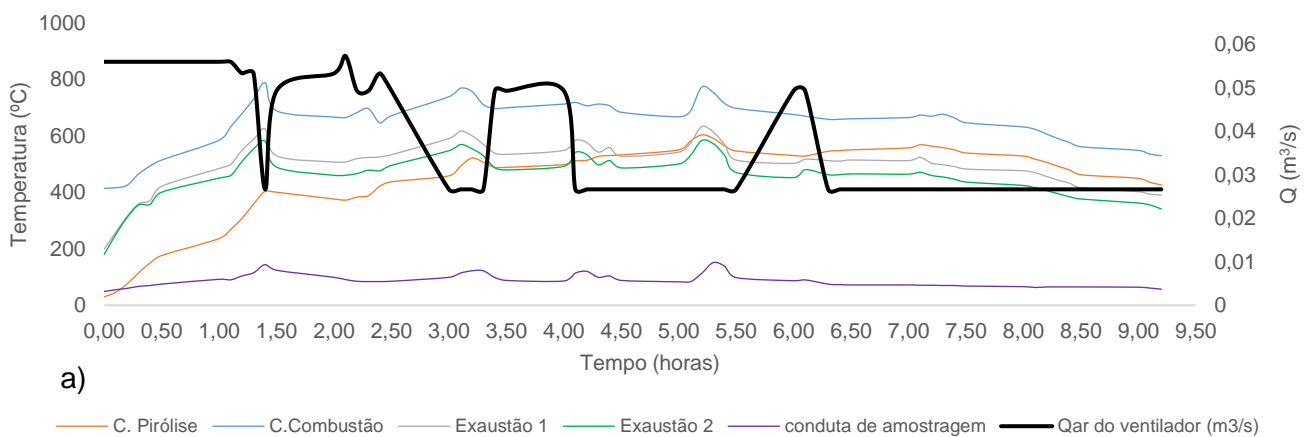


Figura 41- Representação da variação do caudal de ar admitido na câmara de combustão ao longo dos dois processos.

Quanto ao caudal de ar admitido na câmara de combustão (Figura 41), verifica-se que é necessário introduzir mais ar quando existem picos de temperatura. Ao admitir um caudal superior de ar na câmara de combustão a temperatura diminui. Na fase crucial do processo, ou seja, na fase de pirólise é onde se verifica a necessidade de injetar um caudal superior de ar. Comparando os dois processos, observa-se um comportamento semelhante entre ambos.





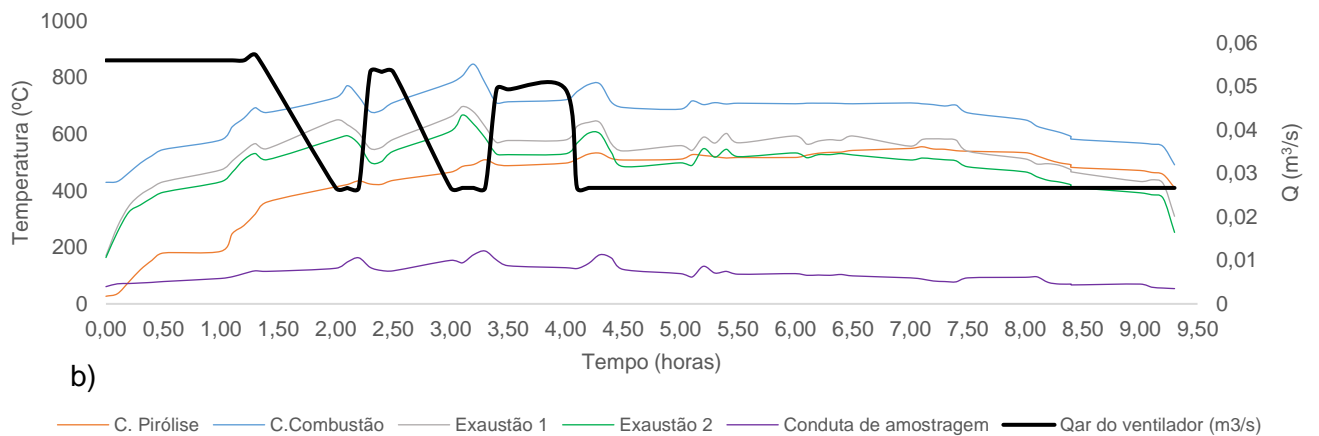


Figura 42- Representação da variação do caudal de ar admitido na câmara de combustão através do ventilador do queimador externo ao longo dos dois processos.

Analisando a Figura 42, verifica-se que neste caso, o caudal é superior na fase inicial do processo. Isto deve-se ao facto de que é no início do processo que é utilizado o nível de potência máximo do queimador, ou seja, quando o ar está a ser ventilado com uma velocidade superior. Apesar de este caudal ser mínimo, não deverá ser ignorado, uma vez que, irá sempre influenciar na temperatura da câmara de combustão. Na fase final dos dois processos, constata-se que o caudal de ar é constante e não é nulo porque quando o queimador não está a ser utilizado, este apenas deixa de alimentar o combustível auxiliar e continua a injetar ar em nível de potência 1 com o objetivo de salvaguardar o ventilador do queimador.

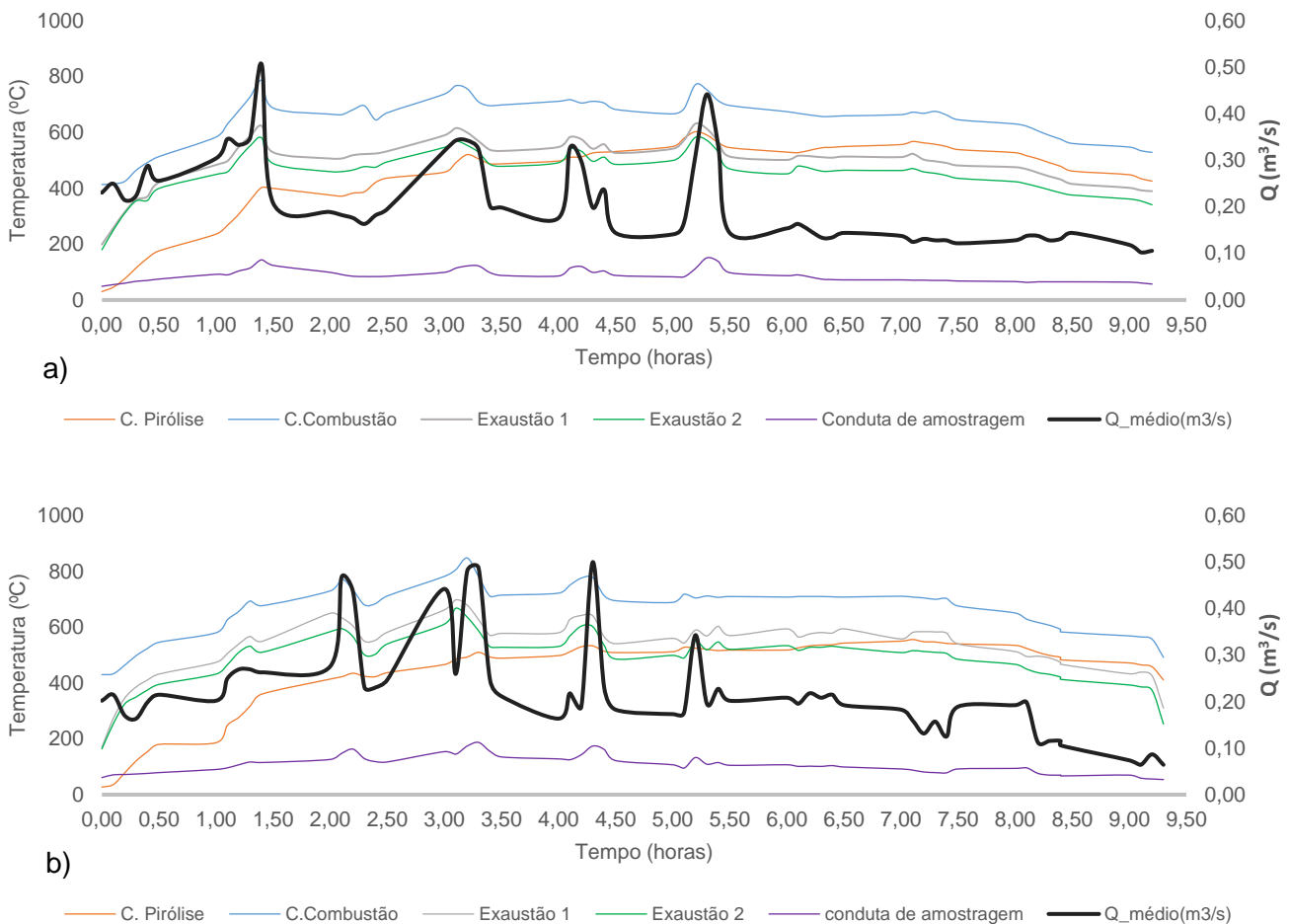


Figura 43- Representação da variação do caudal volumétrico dos gases de exaustão ao longo dos dois processos.

A análise da Figura 43 permite averiguar a evolução do comportamento do caudal volumétrico dos gases de exaustão ao longo dos dois processos em função do perfil de temperatura. Assim, observando os resultados obtidos constata-se uma tendência análoga nos dois processos apesar de se notar uma maior variação no segundo processo. Verifica-se que durante a fase de libertação e combustão dos voláteis, isto é, na fase de pirólise, se atingem valores máximos de caudal, próximos dos  $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , diminuindo progressivamente à medida que o processo avança para valores abaixo dos  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Outro aspeto que se constata também, é o facto dos valores máximos de caudal corresponderem aos picos de temperatura observados. De salientar ainda que, se compararmos estes resultados com a Figura 41, constata-se que quando o caudal de gases de exaustão aumenta, o caudal de ar admitido na câmara de combustão também aumenta com o intuito de diminuir a temperatura e conseqüentemente diminui o caudal de gases de exaustão. A gama de tempos de residência do gás na câmara de combustão é

de 2,4-12,5 segundos no primeiro processo (a) e de 2,6-20,7 segundos para o segundo processo (b).

## 5.4 ANÁLISE GASOSA

Para a análise das espécies gasosas da exaustão foram realizadas duas experiências de acordo com a metodologia descrita no subcapítulo 4.3.1. Os resultados das respetivas experiências são apresentados a seguir.

### 5.4.1 EXPERIÊNCIA 1

Nas Figuras 44 e 45 é apresentada a composição dos gases de exaustão ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ) em função da temperatura na câmara de combustão, na câmara de pirólise, na exaustão e na conduta de amostragem ao longo de todo o processo de produção de carvão vegetal.

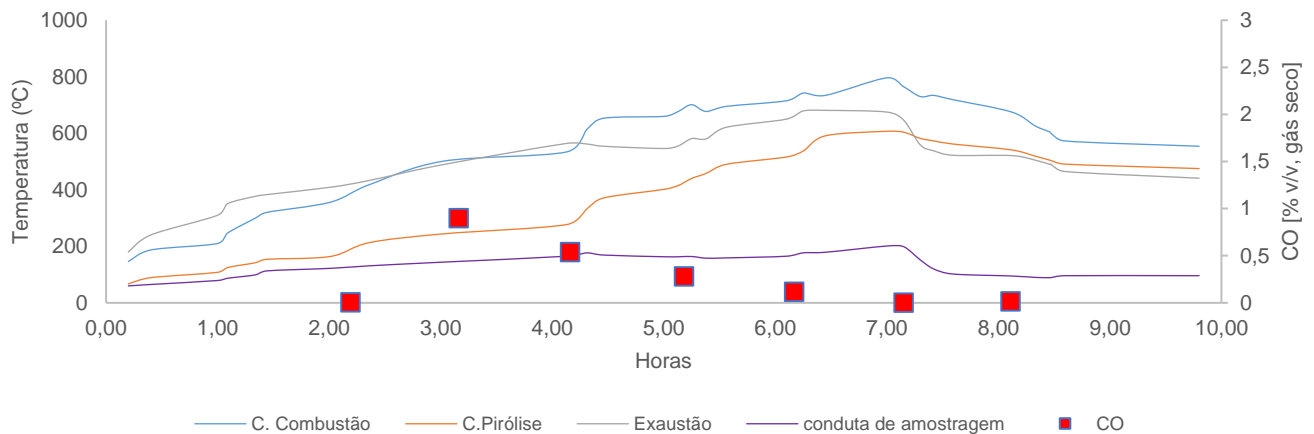


Figura 44- Composição de CO no gás seco de exaustão analisado na Experiência 1.

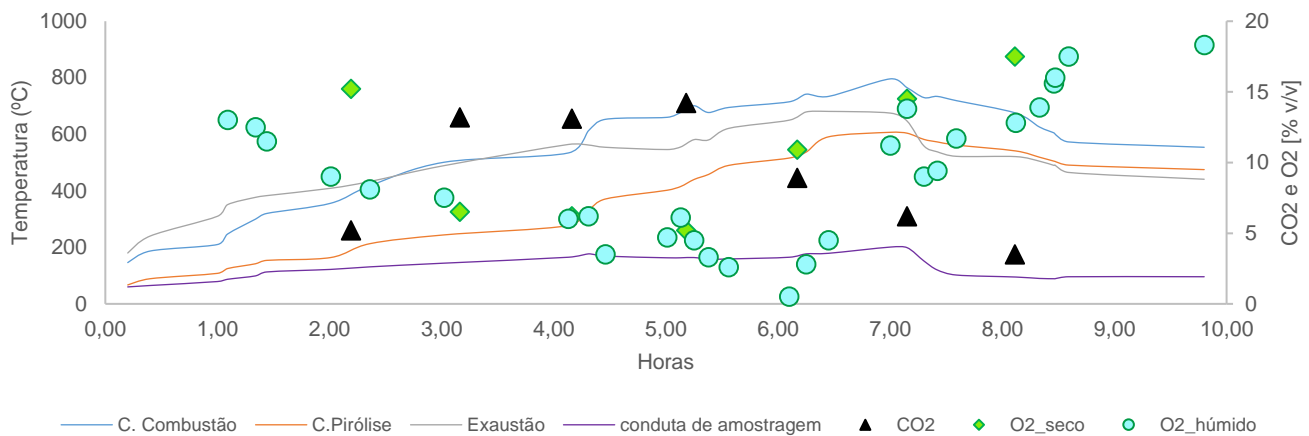


Figura 45- Composição de gás seco ( $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ) e gás húmido ( $\text{O}_2$ ) no gás de exaustão analisado na Experiência 1.

Analisando o perfil de concentração de CO (Figura 44) verifica-se um valor máximo de 0,9% no início da fase de pirólise (aproximadamente nos 250°C na câmara de pirólise) diminuindo depois até ao final do processo. Contudo, observa-se apenas uma concentração nula no início e no fim do processo o que quer dizer que durante a fase de pirólise a combustão não é completa sendo emitida uma quantidade significativa de CO pela exaustão e para a atmosfera.

Quanto ao perfil de concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  (Figura 45) ao longo do processo constatam-se concentrações mais acentuadas durante toda a fase de pirólise de  $\text{CO}_2$  e concentrações inferiores de  $\text{O}_2$ . Quando é alcançada a fase de arrefecimento verifica-se que concentração de  $\text{CO}_2$  diminui e a de  $\text{O}_2$  aumenta. Para além disto, é importante realçar o facto de a concentração de  $\text{O}_2$  húmido na fase de pirólise ter alcançado valores quase nulos o que quer dizer que a câmara de combustão encontrava-se com uma percentagem insuficiente de oxigénio.

#### 5.4.2 EXPERIÊNCIA 2

A monitorização do efluente gasoso na experiência 2 consistiu nas espécies gasosas CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e nas partículas. A Figura 46 apresenta a composição volumétrica do CO e a Figura 47 do  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  em função da temperatura dos diferentes locais de monitorização bem como da potência utilizada no queimador externo de pellets de madeira. Em relação às partículas, a Figura 47 apenas demonstra os pontos onde foram amostradas (F10, F1,

F9, F4, F7, F3 e F8). Contudo, através da Figura 48 é possível visualizar o aspeto dos diferentes filtros amostrados e a Tabela 17 apresenta a concentração em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  de partículas de cada filtro.

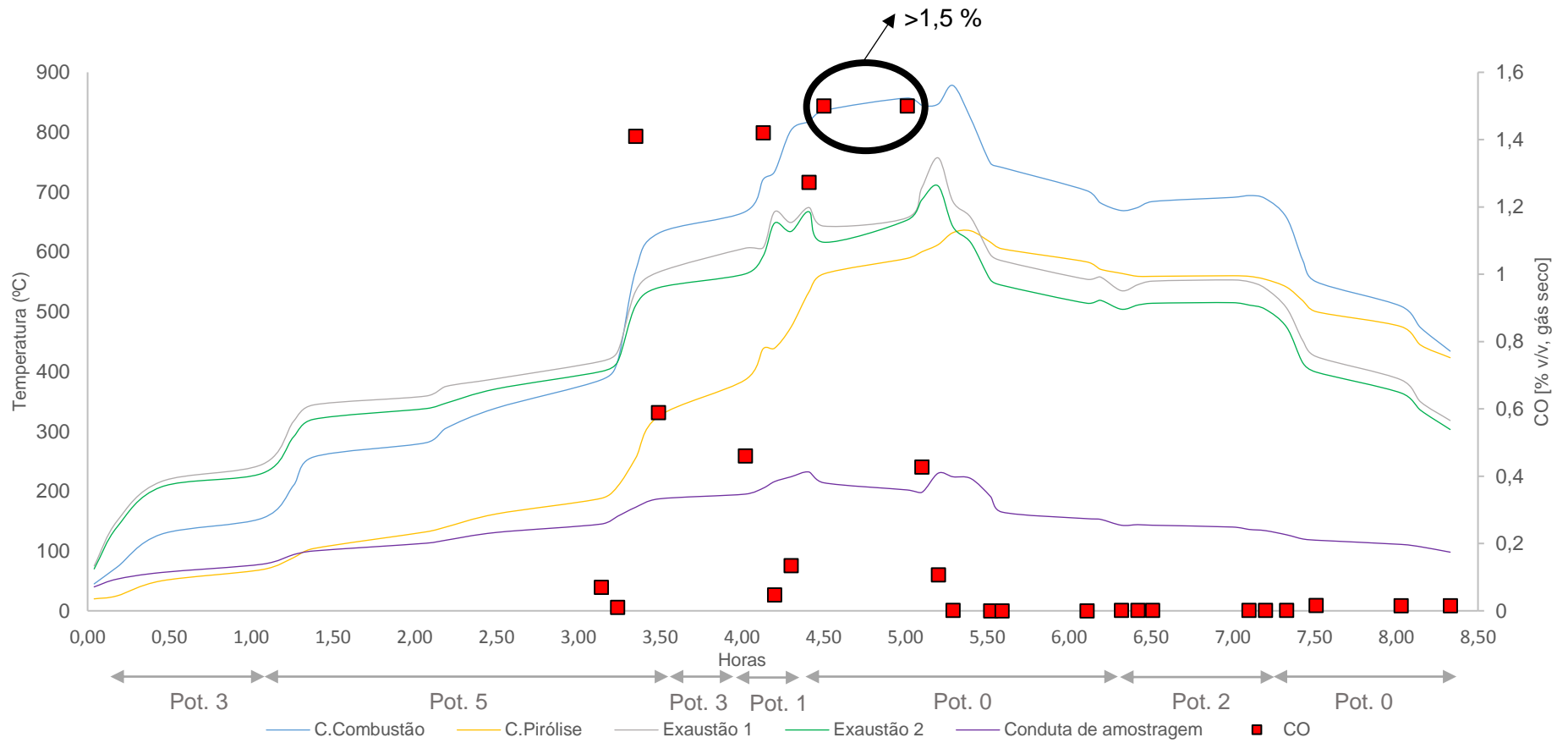


Figura 46- Composição de CO no gás seco da condução de exaustão analisado na Experiência 2.

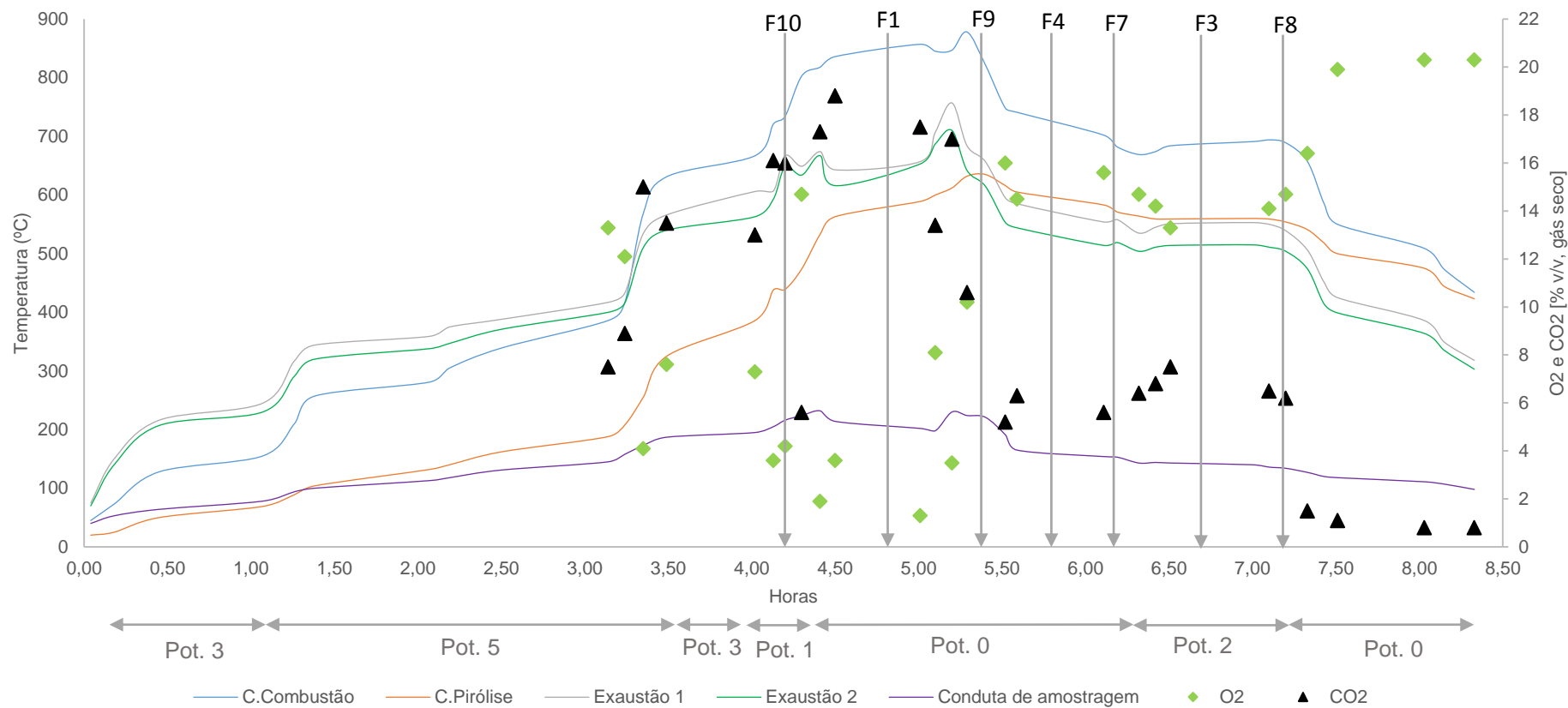


Figura 47- Composição do gás seco da condução de exaustão analisado na Experiência 2.

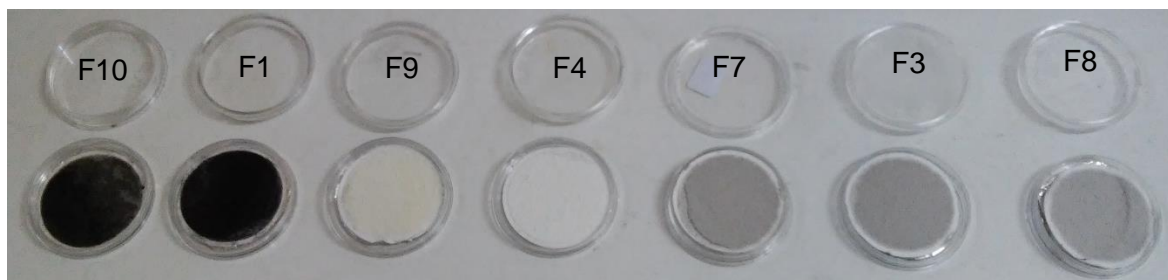


Figura 48- Apresentação dos filtros depois da amostragem.

Tabela 17- Concentração de partículas de cada filtro amostrado.

| <i>Filtro</i> | <i>Concentração de partículas [mg/Nm<sup>3</sup>]</i> |
|---------------|---|
| F10           | 4,42  |
| F1            | 7,50  |
| F9            | 1,08  |
| F4            | 0,68  |
| F7            | 0,24  |
| F3            | 0,32  |
| F8            | 0,45  |

Numa primeira análise às Figuras 46 e 47, verifica-se uma variação na concentração das espécies gasosas, ou seja, o perfil de concentração para cada espécie não é constante ao longo de todo o processo, uma vez que este também não opera em estado estacionário. Contudo, estas flutuações na concentração de CO<sub>2</sub> e CO podem estar relacionadas com aspetos como o tipo de biomassa que se utiliza para a produção de carvão vegetal, o combustível auxiliar e a percentagem de O<sub>2</sub> na câmara de combustão. Verifica-se que a concentração de CO e CO<sub>2</sub> é superior na fase de pirólise, quando a temperatura na câmara de combustão se encontra na gama de temperatura de 700°C a 800°C e a câmara de pirólise entre os 500°C e 600°C. Relativamente à concentração de O<sub>2</sub>, observa-se o inverso, nestas gamas de temperatura atinge valores inferiores a 4%. A partir do momento em que a temperatura desce, a concentração de CO<sub>2</sub> também diminui. Contudo, no final do processo verifica-se que a concentração de CO<sub>2</sub> aumenta ligeiramente devido à necessidade de voltar a queimar pellets de madeira para manter a temperatura na câmara de pirólise por mais algum tempo.



Quanto às partículas presentes no efluente gasoso (Figuras 47 e 48 e Tabela 17), verifica-se uma maior concentração no intervalo de tempo em que se atingem também valores superiores de CO<sub>2</sub> e CO. Os filtros F10 e F1 são os que exibem uma concentração superior de partículas, seguindo-se o F9 e F4. Apesar do filtro F4 apresentar uma cor branca, a concentração de 0,37 mg/Nm<sup>3</sup> poderá estar influenciada com algum teor de H<sub>2</sub>, que neste estudo, não foi possível quantificar. Para além disto, constata-se também que os últimos filtros amostrados (F3 e F8) apresentam uma concentração superior de partículas em relação ao filtro F7, podendo este facto estar relacionado com a queima de pellets de madeira na câmara de combustão.

## 5.5 BALANÇO MÁSSICO AO CARBONO

Recorrendo às equações 4.16 a 4.24, determinou-se o balanço mássico ao carbono realizado à instalação em estudo. As Tabelas 18 e 19 apresenta os valores obtidos do balanço mássico.

Tabela 18- Valores obtidos do balanço mássico ao carbono da instalação em estudo.

| Hora  | Reagentes       |                                |                                | Produtos                                  |                            |                                |            |                                |
|-------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|
|       | Pellets Madeira |                                | Gás pirólise                   | Gases exaustão                            |                            |                                | Partículas |                                |
|       | Gm (kg/s)       | Gm <sub>carbono</sub> (kg C/s) | Gm <sub>carbono</sub> (kg C/s) | Gm <sub>CO2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /s) | Gm <sub>CO</sub> (kg CO/s) | Gm <sub>carbono</sub> (kg C/s) | Gm (kg/s)  | Gm <sub>carbono</sub> (kg C/s) |
| 12:13 | 7,41E-03        | 3,52E-03                       | 5,42E-02                       | 5,31E-02                                  | 4,68E-03                   | 5,77E-02                       | 4,32E-07   | 3,93E-09                       |
| 12:50 | 0,00E+00        | 0,00E+00                       | 5,15E-02                       | 4,77E-02                                  | 3,81E-03                   | 5,15E-02                       | 5,80E-08   | 7,77E-10                       |
| 13:29 | 0,00E+00        | 0,00E+00                       | 3,10E-02                       | 3,10E-02                                  | 2,93E-06                   | 3,10E-02                       | 1,07E-08   | 1,93E-11                       |
| 13:52 | 0,00E+00        | 0,00E+00                       | 1,45E-02                       | 1,45E-02                                  | 0,00E+00                   | 1,45E-02                       | 6,76E-09   | 1,55E-11                       |
| 14:11 | 0,00E+00        | 0,00E+00                       | 1,43E-02                       | 1,43E-02                                  | 0,00E+00                   | 1,43E-02                       | 2,42E-09   | 4,35E-12                       |
| 14:42 | 8,20E-03        | 3,89E-03                       | 1,10E-02                       | 1,49E-02                                  | 2,20E-06                   | 1,49E-02                       | 3,30E-09   | 7,59E-12                       |
| 15:10 | 8,20E-03        | 3,89E-03                       | 1,28E-03                       | 1,66E-02                                  | 2,56E-06                   | 1,67E-02                       | 4,36E-09   | 8,28E-12                       |

Através da análise da Tabela 18, observa-se que nos reagentes o gás de pirólise é o que apresenta um caudal mássico de carbono superior e nos produtos são os gases de exaustão. Por outro lado, constata-se que as partículas é o produto que apresenta um caudal inferior de carbono. Para além disto, verifica-se também um caudal mássico superior às 12h13. Por último, observa-se que o caudal mássico de carbono que entra no sistema é igual ao que sai, o que seria de espera pois o caudal mássico de carbono correspondente ao gás de pirólise foi determinado por diferença entre os produtos e o caudal mássico dos pellets de madeira.

## **5.6 BALANÇO ENERGÉTICO**

Para o balanço energético realizado à instalação recorreu-se às equações 4.25 a 4.42. Através das Tabelas 19 e 20 é possível visualizar os resultados obtidos do balanço energético determinado.

Tabela 19-Valores das várias componentes do balanço energético realizado à instalação.

| Hora  | $\dot{Q}_{reagentes}$       |                 |                            |                           |                                  | $\dot{Q}_{produtos}$        |            |                            |                           | $\dot{Q}_{perdas}$             |                                |
|-------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|       | $\dot{Q}_{sensível}$ [kJ/s] |                 | $\dot{Q}_{latente}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{reação}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{gás\ pirólise}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{sensível}$ [kJ/s] |            | $\dot{Q}_{latente}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{reação}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{Exaustão2-1}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{Exaustão3-2}$ [kJ/s] |
|       | Ar combustão                | Pellets Madeira | H <sub>2</sub> O           | Pellets de Madeira        |                                  | Gases Exaustão              | Partículas | H <sub>2</sub> O           | Partículas                |                                |                                |
| 12:13 | 2,95E+00                    | 3,43E-01        | 2,26E+00                   | 1,33E+02                  | 3,33E+03                         | 2,44E+03                    | 4,19E-04   | 1,03E+03                   | 1,29E-04                  | 1,39E+02                       | 2,08E+03                       |
| 12:50 | 1,77E+00                    | 0,00E+00        | 1,35E+00                   | 0,00E+00                  | 2,91E+03                         | 2,10E+03                    | 5,97E-05   | 8,16E+02                   | 2,55E-05                  | 2,17E+02                       | 1,71E+03                       |
| 13:29 | 6,85E+00                    | 0,00E+00        | 5,25E+00                   | 0,00E+00                  | 3,03E+03                         | 2,07E+03                    | 1,17E-02   | 9,69E+02                   | 6,32E-07                  | 3,08E+02                       | 1,60E+03                       |
| 13:52 | 6,18E+00                    | 0,00E+00        | 4,74E+00                   | 0,00E+00                  | 2,79E+03                         | 1,93E+03                    | 6,43E-06   | 8,71E+02                   | 5,09E-07                  | 3,20E+02                       | 1,45E+03                       |
| 14:11 | 2,43E+00                    | 0,00E+00        | 1,87E+00                   | 0,00E+00                  | 1,87E+03                         | 1,16E+03                    | 2,14E-06   | 7,18E+02                   | 1,43E-07                  | 1,92E+02                       | 8,85E+02                       |
| 14:42 | 2,70E+00                    | 3,79E-01        | 2,07E+00                   | 1,48E+02                  | 1,42E+03                         | 1,06E+03                    | 2,88E-06   | 5,09E+02                   | 2,49E-07                  | 1,54E+02                       | 8,43E+02                       |
| 15:10 | 2,80E+00                    | 3,79E-01        | 2,15E+00                   | 1,48E+02                  | 2,20E+03                         | 1,61E+03                    | 3,83E-06   | 7,41E+02                   | 2,71E-07                  | 2,65E+02                       | 1,26E+02                       |

Tabela 20- Balanço energético global realizado à instalação em estudo.

| Hora  | Entrada                      | Saída                       |                           |
|-------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|       | $\dot{Q}_{reagentes}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{produtos}$ [kJ/s] | $\dot{Q}_{perdas}$ [kJ/s] |
| 12:13 | 3,47E+03                     | 3,47E+03                    | 2,22E+03                  |
| 12:50 | 2,92E+03                     | 2,92E+03                    | 1,93E+03                  |
| 13:29 | 3,04E+03                     | 3,04E+03                    | 1,91E+03                  |
| 13:52 | 2,80E+03                     | 2,80E+03                    | 1,77E+03                  |
| 14:11 | 1,88E+03                     | 1,88E+03                    | 1,08E+03                  |
| 14:42 | 1,57E+03                     | 1,57E+03                    | 9,97E+02                  |
| 15:10 | 2,35E+03                     | 2,35E+03                    | 3,91E+02                  |

Analisando os fluxos de entrada e saída determinados para a realização do balanço energético, observa-se que os gases de pirólise e da exaustão são os que apresentam uma entalpia superior. Para além disto, verifica-se que em média 63% da energia dos produtos diz respeito às perdas do sistema, com exceção do último valor monitorizado (15h10) em que as perdas correspondem a 17%. Para a realização do balanço energético, considerou-se que as perdas de energia correspondiam à diferença de energia entre o ponto da exaustão 2 e 1 e à energia utilizada na estufa para a secagem da biomassa (entre a Exaustão 3 e 2). Deste modo, constata-se que cerca de 54% da energia dos produtos é utilizada para a secagem da biomassa e o restante 9% é perdido pelas paredes da conduta de exaustão. Relativamente ao último valor monitorizado, cerca de 5% é utilizado para a secagem da biomassa e 12% é perdido na conduta da exaustão.

### 5.7 ANÁLISE DE CUSTOS DOS PROCESSOS (A1, A2, RE)

Outro estudo interessante a fazer aos três processos realizados (A1, RE e A2) é a análise de custos associados para produzir uma fornada de carvão vegetal. Deste modo, a Tabela 21 apresenta o preço para cada produto e a Tabela 22 demonstra os respetivos custos e o lucro associado.

Tabela 21- Preço por cada tonelada de produto.

|                      | <i>Matéria-Prima</i> |                     | <i>Combustível auxiliar</i> | <i>Carvão vegetal</i> |
|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
|                      | Acácia               | Raízes de Eucalipto | Pellets de madeira          |                       |
| <b>Custo (€/ton)</b> | 35                   | 20                  | 120                         | 1100                  |

Tabela 22- Custos e o respetivo lucro de cada processo para a produção de carvão vegetal.

|                             | <i>Processo A1</i> | <i>Processo RE</i> | <i>Processo A2</i> |        |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|
| <b>Matéria-prima</b>        | Peso (kg)          | 958                | 631                | 873    |
|                             | Custo (€)          | 33,53              | 12,62              | 30,56  |
| <b>Combustível auxiliar</b> | Consumo (kg)       | 142,25             | 160,15             | 80,90  |
|                             | Custo (€)          | 17,10              | 19,22              | 9,71   |
| <b>Carvão vegetal</b>       | Peso (kg)          | 180                | 159                | 186    |
|                             | Custo (€)          | 198                | 174,9              | 204,6  |
| <b>Lucro (€)</b>            |                    | 146,94             | 143,06             | 164,33 |

Analisando a Tabela 22, constata-se que em média cada processo apresenta um lucro de 151 €. No entanto, este lucro foi determinado tendo em conta apenas com os gastos do combustível auxiliar e com o custo da matéria-prima, ou seja, não estão associados os gastos com a mão-de-obra e com a energia elétrica que é necessária para os quadros elétricos e ventiladores.

## 5.8 EFEITO DO AUMENTO DE ESCALA NO DESEMPENHO DO PROCESSO

A empresa, em Maio de 2016, entrou em funcionamento com uma nova unidade de produção que apresenta 10 fornos fixos com o triplo da capacidade da instalação em estudo. O esquema da Figura 49 apresenta o aumento de escala de uma instalação para a outra.

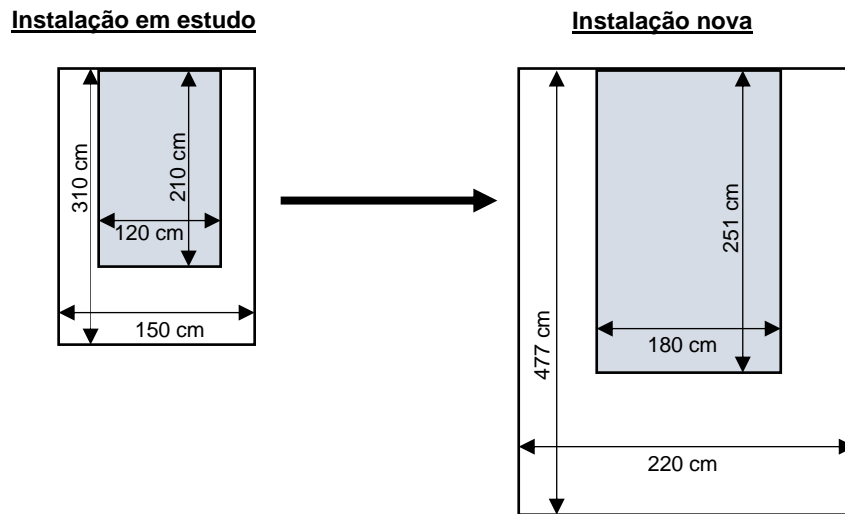


Figura 49- Dimensões dos dois tipos de fornalhas da Ibero Massa Florestal S.A.

Com intuito de perceber se o aumento de escala do sistema influenciava o desempenho do processo, analisou-se o perfil de temperaturas na câmara de combustão, na câmara de pirólise e na exaustão de um processo da instalação em estudo e da instalação nova (Figura 50).

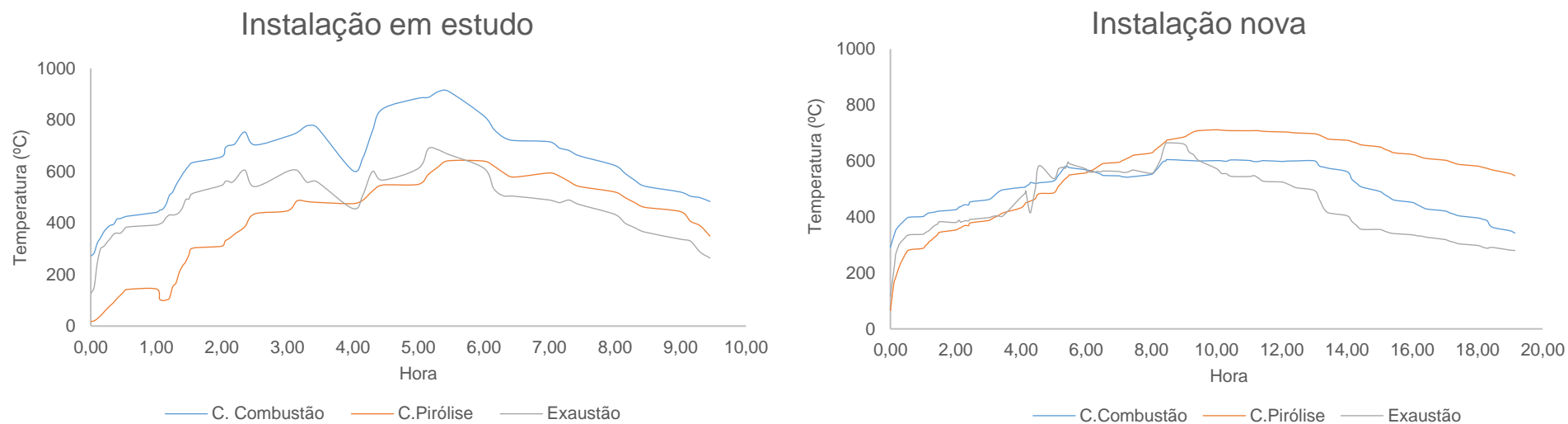


Figura 50-Perfil de temperaturas dos processos das duas instalações.

Comparando os dois perfis de temperaturas apresentados na Figura 50, verifica-se um comportamento semelhante nos dois processos. Contudo, ao aumentar a escala do sistema constata-se que o tempo de duração do processo aumenta para o dobro, isto é, o processo da instalação nova apresenta uma duração de aproximadamente mais 10 horas comparando com o processo da instalação em estudo. No entanto, apesar dos processos na instalação nova ostentarem o dobro da duração, produzem três vezes mais, uma vez que um processo da instalação em estudo produz em média 160 kg (para uma carga média de 850 kg de madeira) e o da instalação nova produz em média 450 kg (para uma carga média de 2300 kg de madeira). Deste modo, conclui-se que ao aumentar o volume do reator de pirólise para o triplo, o processo requer o dobro do tempo, mas produz três vezes mais carbonizado tornando assim a instalação nova mais produtiva.



## 6 ENVOLVIMENTO COM A EMPRESA

Durante o período de estágio na empresa Ibero Massa Florestal S.A., para além das atividades previstas para desenvolver o meu trabalho, realizei outras tarefas em conjunto com os colaboradores desta entidade.

A primeira atividade efetuada com a empresa foi acompanhar um grupo de alunos da Escola EB 2.3 D. Frei Caetano Brandão numa visita técnica à empresa. O objetivo desta visita era os alunos e as respetivas docentes ficarem a conhecer as instalações da empresa e todo o processo envolvente para a produção de carvão vegetal através da tecnologia de pirólise lenta.



Figura 51- Visita técnica dos alunos da Escola EB 2.3 D. Frei Caetano Brandão.

Para além desta atividade, apoiei os responsáveis pelo controlo dos fornos na respetiva operação. Todos os dados adquiridos em cada processo de produção (temperatura, pressão, consumo de combustível auxiliar, o operador, as horas de início de cada fase, peso e tipo da matéria-prima, peso do carvão vegetal produzido, entre outros) têm de ser inseridos no sistema informático de forma a ser realizado um mapa de produção diário para dar a conhecer ao setor administrativo. Em muitos momentos, esta tarefa foi realizada por mim. Através deste acompanhamento no controlo dos fornos fiquei capacitada a acompanhar e operar os processos de forma autónoma.

Por último, já no período final do estágio, assisti a uma formação sobre Certificação FSC realizada nas instalações da empresa. FSC é a sigla de Forest Stewardship Council, uma expressão inglesa que, em Português, significa "Conselho de Manejo Florestal". O FSC é uma organização independente, sem fins lucrativos, fundada em 1993 (UK), a partir da necessidade de garantir a conservação ambiental e o desenvolvimento sustentável das florestas em todo o mundo. A Certificação FSC garante que os produtos resultam de florestas com uma boa gestão e que oferecem benefícios económicos, ambientais e

sociais. Uma empresa ao adquirir a certificação FSC beneficia o acesso a novos mercados (Portugal, 2006).



Figura 52- Grupo de formandos com o formador (1ª pessoa do lado esquerdo) nas instalações da empresa.

Por último, todo trabalho desenvolvido e o envolvimento com a empresa durante este período de estágio, proporcionou a oportunidade de realizar um estágio profissional com esta entidade com o intuito de dar continuidade ao trabalho já efetuado.

## 7 CONCLUSÕES

Das diversas tecnologias de conversão termoquímica da biomassa, o processo de pirólise lenta é a tecnologia mais eficiente para a produção de carvão vegetal. Contudo, para se obter um bom desempenho do processo, é importante ter em conta alguns fatores como o tipo de biomassa, o seu pré-processamento e as condições operatórias.

O principal objetivo deste trabalho desenvolvido na empresa Ibero Massa Florestal S.A. era caracterizar o desempenho do processo de pirólise de biomassa florestal num reator de leito fixo à escala industrial. Para este efeito, foi necessário caracterizar a matéria-prima e o carbonizado produzido, analisar as condições operatórias (temperatura, pressão, consumo de combustível auxiliar e o caudal volumétrico) durante o processo, monitorizar o efluente gasoso e através dos resultados obtidos determinar os balanços mássico e energético da instalação.

Para a produção de carvão vegetal, a empresa utiliza dois tipos de matéria-prima, biomassa de Acácia e de Eucalipto e, para além destes, também usa pellets de madeira como combustível auxiliar. Os resultados obtidos, relativos à caracterização físico química (análise elementar e imediata), evidenciam que os dois tipos de biomassa (Acácia e Eucalipto) são constituídos maioritariamente por carbono e oxigénio. Relativamente à análise imediata, a matéria-prima utilizada apresenta um baixo teor de humidade e de cinzas e um alto teor de voláteis. Por outro lado, o carbonizado produzido exhibe teores de humidade, cinzas e voláteis reduzidos e um alto teor em carbono fixo.

Os parâmetros operatórios que mais influenciam o processo de pirólise são a temperatura e a pressão. Através da análise do comportamento destes parâmetros é possível perceber a evolução do processo e compreender o comportamento das diferentes espécies gasosas. Neste sistema integrado de pirólise e combustão efetuou-se a observação dos perfis de temperatura e pressão em três processos de produção de carvão vegetal. O perfil de temperatura na câmara de combustão e na câmara de pirólise revelou-se idêntico, apesar de haver ligeiras oscilações nos três processos, ou seja, a temperatura na fase inicial (secagem) aumenta gradualmente até ao início da fase de pirólise, observando-se de seguida um comportamento com algumas variações até atingir um valor máximo de temperatura. Após a fase de pirólise segue-se uma diminuição de temperatura, designada pela fase de arrefecimento. A temperatura de pico observada na câmara de pirólise encontra-se na gama dos 550°C a 600°C. Em relação ao perfil de pressão, este parâmetro

é superior na fase de pirólise devido ao facto de nesta fase estarem a ser produzidas espécies gasosas.

Outro aspeto a referir, é o consumo de combustível auxiliar que é utilizado para iniciar a queima na câmara de combustão. Tendo em conta a análise dos perfis de temperatura em função da potência utilizada pelo queimador externo, apresentado na Figura 40, conclui-se que é necessário queimar combustível auxiliar até a câmara de pirólise atingir uma temperatura próxima dos 500°C. Neste caso, o ideal seria apenas ser necessário auxiliar a queima na câmara de combustão na primeira fase do processo, isto é, na fase da secagem da biomassa. Este acontecimento poderá estar relacionado com problemas de transferência de calor da câmara de combustão para a câmara de pirólise.

Quanto ao caudal volumétrico de gases de exaustão, verificou-se que este atinge valores máximos (0,50 m<sup>3</sup>/s) na fase de libertação e combustão de voláteis. Relativamente ao ar introduzido na câmara de combustão, o caudal volumétrico que corresponde ao ventilado pelo queimador, é superior quando é utilizado o nível de potência máximo e pela conduta de entrada de ar, o caudal aumenta com o aumento de temperatura na câmara de combustão.

Relativamente à análise gasosa, ambas as experiências efetuadas, evidenciam que as concentrações das espécies gasosas analisadas não são constantes ao longo de todo o processo uma vez que, o processo não opera em estado estacionário. Constatou-se que os gases de exaustão apresentam concentrações superiores de CO e CO<sub>2</sub> durante a fase de pirólise e concentrações mais reduzidas de O<sub>2</sub>. Quanto às partículas, estas apenas foram analisadas na segunda experiência. Os resultados obtidos demonstraram concentrações superiores de partículas no mesmo intervalo de tempo onde o efluente gasoso atingiu valores máximos de CO e CO<sub>2</sub>. Para além disto, verificou-se também que a concentração de partículas aumenta ligeiramente quando a câmara de combustão se encontra a queimar pellets de madeira. Para além disto, é importante referir que apesar dos filtros apresentarem uma cor bastante escura, a concentração de partículas dos mesmos não é muito significativa, o que não era expectável acontecer.

Após a monitorização dos gases de exaustão, determinou-se o balanço mássico e energético da instalação em estudo. Os valores obtidos para o balanço mássico demonstram que os gases de pirólise é o reagente que apresenta um caudal de carbono superior e nos produtos são os gases de exaustão. Verificou-se também que o caudal mássico de carbono que entra no sistema é igual ao que sai. No entanto, este resultado poderá não representar a realidade uma vez que o caudal mássico de carbono

correspondente aos gases de pirólise foi determinado através da diferença entre os outros fluxos. Quanto ao balanço energético, constatou-se que cerca de 63% da energia produzida pelo sistema é perdida. Contudo, em média 54% da energia perdida é utilizada para a secagem da biomassa.

Em suma, depois de todo o trabalho desenvolvido durante o período de estágio, conclui-se que apesar de a instalação ser adequada para produzir carvão vegetal de forma eficiente, facilmente se percebe, que o estudo, a perceção e otimização de todos os parâmetros do processo abordados são essenciais para que todo o processo integrado de pirólise-combustão seja o mais rentável e eficiente possível.



## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Com o objetivo de melhorar o desempenho do processo de pirólise de biomassa para a produção de carvão vegetal na empresa Ibero Massa Florestal S.A. são propostas algumas sugestões para trabalho futuro, nomeadamente:

- Desenvolver e aplicar uma metodologia para caracterizar e quantificar os gases de pirólise;

Um dos principais objetivos deste trabalho era caracterizar os gases de pirólise produzidos. Contudo, devido à elevada temperatura do reator de pirólise e o facto de os gases serem incinerados diretamente na câmara de combustão, não foi possível determiná-los. Desta forma, era fundamental elaborar uma metodologia para quantificar os gases de pirólise, uma vez que a empresa ainda não tem esse conhecimento e era importante para a determinação do balanço energético da instalação.

- Instalar um analisador online de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no reator de pirólise;

O conhecimento da concentração destas espécies gasosas em tempo real é fundamental para caracterizar o desempenho do processo e permite também analisar a variação de outros parâmetros operatórios.

- Criar condições de trabalho para monitorizar os gases produzidos;

Neste momento, a temperatura sentida na área envolvente de cada fornalha é muito elevada o que dificulta a realização de trabalhos de monitorização. Assim, era bastante importante que fossem criadas condições para realizar uma melhor caracterização da instalação.

- Instalar um equipamento que monitorize em contínuo o caudal dos gases de pirólise e da exaustão;

Neste estudo, a monitorização do caudal volumétrico dos gases de exaustão foi realizada através de um Tubo de Pitot em registo manual, em intervalos de tempo, ao longo de cada processo. Assim, dificulta o conhecimento do caudal real em contínuo e a ocorrência de erros humanos. Ao ser instalado um equipamento que faça a monitorização do caudal possibilita a determinação do balanço mássico com maior rigor.

- Acrescentar mais pontos de amostragem para a monitorização da temperatura.

Recomendaria a instalação de mais dois termopares na câmara de pirólise, na câmara de combustão e na exaustão. Através destes é possível analisar o perfil de temperatura em

diferentes pontos da instalação e perceber algumas perdas de calor para o exterior, que poderão ser aproveitadas para outros fins. Os respetivos pontos de amostragem encontram-se esquematizados na Figura 53 a vermelho.

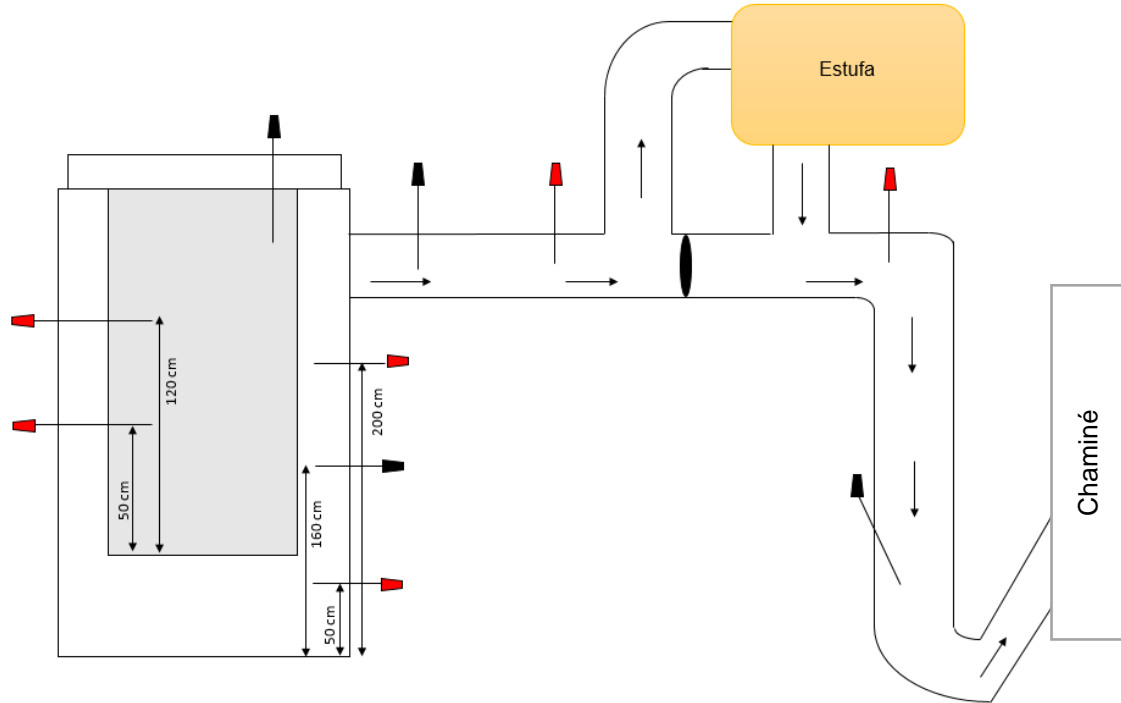


Figura 53- Representação dos pontos de amostragem de temperatura na instalação.

- Fazer a integração do processo de forma a minimizar as perdas de energia térmica nos gases de exaustão e promover a sua valorização, por exemplo, em operações de aquecimento para outro reator.



## 9 BIBLIOGRAFIA

- Amos, W. A. (1998). *Report on Biomass Drying Technology*. Golden, Colorado.
- Arvelakis, S., Gehrmann, H., Beckmann, M., & Koukios, E. G. (2002). Effect of leaching on the ash behavior of olive residue during fluidized bed gasification. *Elsevier Science Ltd*, 22, 55–69.
- Babu, B. V. (2008). Biomass pyrolysis : a state-of- the-art review, 31, 393–414.
- Baltcarbon. (2009). LAMBIOTTE technology. Disponível em: <https://www.baltcarbon.lv/?mode=about&lang=en>. [Consult. 28 outubro 2016].
- Bridgwater, a. . V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2–3), 87–102.
- Chopra, S., & Jain, A. (2007). A review of fixed bed gasification systems for biomass. *Agricultural Engineering International: CIGR ...*, IX(5), 1–23.
- Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). *Potential contribution of biomass to the sustainable energy development*. *Energy Conversion and Management* (Vol. 50). Elsevier.
- FAO. (1983). Simple technologies for charcoal making. Disponível em: <http://www.fao.org/home/en/>. [Consult. 6 junho 2016]
- Ferreira, S., Moreira, N., & Monteiro, E. (2009). Bioenergy overview for Portugal. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1567–1576.
- Florestal, I. M. (2011). Ibero Massa Florestal. Disponível em: <http://www.imflorestal.com/>. [Consult. 5 outubro 2015].
- Florestal, I. M. (2014). Estudo do potencial energético de calor de cada biomassa / resíduo agrícola e vegetal. Projeto n.º34001, Oliveira de Azemeis: Encasp.
- Galindo, A. L., Lora, E. S., Andrade, R. V., Giraldo, S. Y., Jaén, R. L., & Cobas, V. M. (2014). Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and Bioenergy*, 61, 236–244.
- Ideias, P. M. C. (2008). *Influência da matéria volátil na combustão de biomassa em leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). *Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review*. *Energies* (Vol. 5).
- Kiuru, T., & Hyytiäinen, J. (2013). *Review of Current Biocoal Production Technology*. *Baltic Bioenergy and Industrial Charcoal* (Vol. 4).
- Lora, E. E. S., Andrade, R. V., Ángel, J. D. M., Leite, M. A. H., Rocha, M. H. R., & Sales, C. A. V. B. (2012). Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In *Biocombustíveis - Volume 1* (p. 1200).
- Lyon, R. C. S., & Naf, C. (2015). *Technical brochure CML carbonization process* (Vol. 33).

Irigny - France.

Matos, A., & Pereira, F. (2007). PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES GASOSOS. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

Matos, C. (2007). *Valorização Energética Sustentável de Biomassa dos Resíduos Florestais*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.

Matos, M. A. (2014). Capítulo 4 – Caso de estudo 2 - Balanço mássico e balanço energético em processos de combustão de combustíveis. Universidade de Aveiro, Departamento de Ambiente e Ordenamento.

Mckendry, P. (2002a). Energy production from biomass ( part 1 ): overview of biomass, 83(July 2001), 37–46.

Mckendry, P. (2002b). Energy production from biomass ( part 2 ): conversion technologies, 83(July 2001), 47–54.

Morali, U., & Şensöz, S. (2015). *Pyrolysis of hornbeam shell (Carpinus betulus L.) in a fixed bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char*. *Fuel* (Vol. 150).

Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., & Gómez-Barea, A. (2011). Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(5), 611–630.

Nunes, A. P., Teixeira, L. F., Gracielly, A., & Colen, N. (2014). Biomassa : uma visão dos processos de pirólise. *Revista Liberato*, 15(24), 105–212.

Pinto, J. (2010). *Lixiviação de biomassa e seu efeito nos produtos de combustão*. Universidade de Aveiro.

Portal das Energias Renováveis. (2016). Actualidade: Biomassa sólida. Disponível em: <http://energiasrenovaveis.com/>. [Consult.10 abril 2016]

Portugal, F. (2006). Certificação FSC. Disponível em: <https://pt.fsc.org/pt-pt/certificacao>. [Consult 10 agosto 2016]

Quaak, P., Knoef, H., & Stassen, H. (1999). Energy from Biomass a review of combustion and gasification technologies. *World Bank Technical Paper*, (422), 1–78.

Rautiainen, M., Havimo, M., & Gruduls, K. (2012). Biocoal Production, Properties and Uses, 1–28.

Raveendran, K. (1996). Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. *Fuel*, 75(8), 987–998.

Sadaka, S., & Boateng, A. a. (2009). Pyrolysis and Bio-Oil. *Agriculture and Natural Resources*, 1–6.

Saldarriaga, J. F., Aguado, R., Pablos, A., Amutio, M., Olazar, M., & Bilbao, J. (2015). Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis. *Fuel*, 140, 744–751.

Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis — A review of modelling ,

process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>

Silva, A. (2009). *Simulação da combustão de biomassa em leito fluidizado – balanço de massa*. Universidade de Aveiro.

Silva, T. (2012). *Características da cinza da combustão de diferentes tipos de biomassa*. Universidade de Aveiro.

Vilela, A., Lora, E. S., Quintero, Q. R., Vicintin, R. A., & Pacceli da Silva e Souza, T. (2014). A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. *Biomass and Bioenergy*, 69, 222–240.

Wang, X., Kersten, S. R. A., Prins, W., & Swaaij, W. P. M. Van. (2005). Biomass Pyrolysis in a Fluidized Bed Reactor . Part 2: Experimental Validation of Model Results. *American Chemical Society*, 8786–8795.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). *Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis*. *Fuel* (Vol. 86).

### **Documentos Legais**

Directiva 2001/77/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Setembro, Jornal Oficial das Comunidades Europeias L 283, 2001.

### **Manual de instruções**

Ibérica, S.A., Silvino Lindo. (2015). SML. Manual de instruções dos Secadores de Madeira.



## **ANEXO A- DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA**

### **1. Determinação do teor total de humidade da amostra de biomassa**

(Adaptado da Norma CEN/TS 14774-1:2004)

#### Material laboratorial:

1. Estufa capaz de controlar a temperatura dentro da gama de  $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$  e que possibilite a renovação do ar atmosférico entre 3 a 5 vezes por hora. A velocidade do ar deve ser tal para que as partículas da amostra não sejam retiradas da caixa;
2. Caixas de alumínio;
3. Balança com uma precisão de 0,5 mg;
4. Exsicador, para evitar a absorção de humidade por parte da amostra de biomassa.

#### Preparação das amostras:

1. As amostras para a determinação da humidade total deverão ser preparadas de acordo com as Normas CEN/TS 14778 e CEN/TS 14780 e recolhidas em recipientes hermeticamente fechados e resistentes à água;
2. A massa da amostra deve estar compreendida entre 300 a 500 g.

#### Procedimento Laboratorial:

1. Identificar as caixas de alumínio com o respetivo código da amostra e colocá-las na estufa a uma temperatura de  $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos;
2. Retirar as caixas de alumínio da estufa, colocar as mesmas num exsicador e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;
3. Pesas as caixas ( $m_1$ );
4. Pesas as caixas com as respetivas amostras ( $m_2$ ) e uniformizar o espaço da caixa;
5. Colocar as caixas de alumínio com as respetivas amostras na estufa a uma temperatura de  $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$  durante 120 minutos (2 horas);
6. Retirar as caixas, com as amostras secas da estufa, colocar num exsicador com sílica e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;

7. Pesar as amostras secas ( $m_3$ );
8. Repetir o processo de secagem na estufa, por períodos de 60 minutos, até que a variação da massa da amostra não exceda os 0,2%. O tempo de secagem por norma é de 2 ou 3 horas.

(**NOTA:** Para evitar perdas desnecessárias de material volátil, por norma o tempo de secagem não deve exceder as 24 horas).

Procedimento de cálculo:

O teor de humidade total ( $W_{WH}$ ) presente na amostra de biomassa, expresso em [%m, btq] deverá ser calculado através da seguinte equação:

$$W_{WH}[\%m, btq] = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Onde,

$m_1$  - massa da caixa de alumínio, em [g];

$m_2$  - massa da caixa de alumínio mais amostra antes de ir a estufa, em [g];

$m_3$  - massa da caixa de alumínio mais amostra depois de ir a estufa, em [g];

## **2. Determinação do teor de cinzas**

(Adaptado da Norma CEN/TS 14775:2004)

Material laboratorial:

1. Cadinhos de porcelana;
2. Mufla com capacidade de manter a temperatura uniforme durante o tempo necessário para o processo de aquecimento;
3. Balança com uma precisão de 0,5 mg;
4. Exsicador, com e sem sílica;
5. Luvas resistentes a altas temperaturas;
6. Tijolo ou grelha metálica.

Preparação das amostras:

1. As amostras para a determinação do teor de cinzas deverão ser preparadas de acordo com a Norma CEN/TS 14780:2005;

2. Às amostras devem ser retiradas o teor de humidade com base no procedimento estabelecido pela Norma CEN/TS 14774-2:2004, de forma a garantir uma base seca.

Procedimento Laboratorial:

1. Calcinação

- Identificar os cadinhos com os respetivos códigos das amostras;
- Aquecer os cadinhos vazios na mufla a uma temperatura  $(550\pm 10)^{\circ}\text{C}$  durante pelos menos 60 minutos;
- Remover os cadinhos da mufla e deixar arrefecer sobre uma placa resistente ao calor (por exemplo um tijolo) durante 5 a 10 minutos e, de seguida, transferir para um exsiccador sem dessecante e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;
- Quando os cadinhos estiverem arrefecidos pesar e registar a sua massa ( $m_1$ );

2. Colocar aproximadamente 1,0 g de amostra bem homogeneizada no cadinho e espalhar de forma uniforme por toda a sua superfície (não ultrapassar  $0,1\text{g}/\text{cm}^2$  da área de fundo do cadinho), pesar e registar o valor ( $m_2$ ). Fazer o mesmo procedimento para as restantes amostras.

3. Combustão

- Colocar os cadinhos, devidamente identificados, com as respetivas amostras na mufla fria;
- Aumentar a temperatura da mufla de forma uniforme até  $250^{\circ}\text{C}$  durante um período de 50 minutos (isto é, aumentar a temperatura  $50^{\circ}\text{C}$  de 10 em 10 minutos). Manter esta temperatura durante 60 minutos para permitir que os compostos voláteis se libertem antes da ignição.
- Continuar a aquecer a mufla uniformemente até aos  $(550\pm 10)^{\circ}\text{C}$  durante 50 minutos (isto é, aumentar a temperatura  $50^{\circ}\text{C}$  de 10 em 10 minutos) e manter esta temperatura durante um período de 120 minutos.
- Retirar os cadinhos da mufla e deixar arrefecer em cima de uma material resistente ao calor (por exemplo um tijolo) durante 5 a 10 minutos;

- Após este período transferir os cadinhos para o exsiccador sem sílica e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;
- Depois do arrefecimento, pesar os cadinhos com as cinzas e registar o seu valor ( $m_3$ ).

(**NOTA:** Se existir dúvidas que não tenha havido combustão completa, colocar os cadinhos novamente na mufla a  $(550\pm 10)^\circ\text{C}$  durante períodos de 30 minutos até se obter uma massa constante (com uma variação igual ou inferior a 0,2 mg).

Procedimento de cálculo:

O teor de cinzas ( $A_d$ ) presente na amostra de biomassa expresso em [%m, bs] deverá ser calculado através da seguinte equação:

$$A_d[\%m, bs] = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

Onde,

$m_1$  = massa do cadinho vazio, em [g];

$m_2$  = massa do cadinho mais a amostra antes da mufla, em [g];

$m_3$  = massa do cadinho mais a amostra depois da mufla, em [g];

### **3. Determinação da matéria volátil**

(Adaptado da Norma CEN/TS 15148:2005)

Material laboratorial:

1. Cadinhos de sílica e as respetivas tampas;
2. Mufla com capacidade de manter a temperatura uniforme  $(900\pm 10)^\circ\text{C}$  durante o tempo necessário para o processo de aquecimento em meio não oxidante;
3. Balança com uma precisão de 0,5 mg;
4. Exsiccador, com e sem sílica;
5. Luvas resistentes a altas temperaturas;
6. Tijolo ou grelha metálica.



Preparação das amostras:

1. As amostras para a análise do teor de voláteis deverão ser preparadas de acordo com a Norma CEN/TS 14780;
2. Às amostras devem ser retiradas o teor de humidade com base no procedimento estabelecido pela Norma CEN/TS 14774-2:2004.

Procedimento Laboratorial:

1. Calcinação

- Identificar os cadinhos com os respetivos códigos das amostras;
- Colocar os cadinhos vazios com as respetivas tampas no suporte metálico e inserir na câmara da mufla o mais centrado possível;
- Calcinar à temperatura  $(900\pm 10)^{\circ}\text{C}$  durante 7 minutos;
- Retirar os cadinhos da mufla, com as mãos protegidas com as luvas, e deixar arrefecer sobre um material resistente ao calor (tijolo) durante 15 a 20 minutos;
- Transferir os cadinhos com as tampas para o exsiccador e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;
- Depois de arrefecidos pesar os cadinhos com as tampas e registar o seu valor ( $m_1$ );

2. Colocar aproximadamente 1,0 g de amostra bem homogeneizada no cadinho e espalhar de forma uniforme por toda a sua superfície (não ultrapassar  $0,1\text{g}/\text{cm}^2$  da área de fundo do cadinho), pesar e registar o valor ( $m_2$ ). Fazer o mesmo procedimento para as restantes amostras.

3. Desvolatilização

- Colocar o suporte metálico com os cadinhos e as respetivas amostras na mufla a uma temperatura  $(900\pm 10)^{\circ}\text{C}$  durante 7 minutos;
- Retirar o suporte metálico da mufla e deixar arrefecer sobre o tijolo durante 15 a 20 minutos;
- Transferir o suporte metálico com os cadinhos para o exsiccador e deixar arrefecer até à temperatura ambiente;
- Depois das amostras arrefecidas pesar e registar o seu valor ( $m_3$ ).

Procedimento de cálculo:

O teor de matéria volátil ( $V_d$ ) presente na amostra de biomassa, expresso em [%m, bs] deverá ser calculado através da seguinte equação:

$$V_d[\%m, bs] = \left[ \frac{(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} \right] \times 100$$

Onde,

$m_1$  = massa do cadinho vazio mais a tampa, em [g];

$m_2$  = massa do cadinho e a tampa mais a amostra antes da mufla, em [g];

$m_3$  = massa do cadinho e a tampa mais a amostra depois da mufla, em [g];

## ANEXO B- FOLHAS DE REGISTO

Tabela B.1- Folha de registo para a monitorização da temperatura, pressão e consumo de energia.

| Código da amostra | Tipo de matéria-prima | Peso [kg] | Temperatura [°C] |      |            |            | Pressão [mbar] |      | Belimos  |                | Queimador |              | Massa de carvão produzida [kg] |
|-------------------|-----------------------|-----------|------------------|------|------------|------------|----------------|------|----------|----------------|-----------|--------------|--------------------------------|
|                   |                       |           | C.C              | C.P. | Exaustão 1 | Exaustão 2 | C.C.           | C.P. | E.Ar [%] | Tiragem F. [%] | Pot.      | Energia (kg) |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |
|                   |                       |           |                  |      |            |            |                |      |          |                |           |              |                                |

Tabela B.2- Folha de registo para a monitorização do caudal volumétrico.

| Horas | Conduta de amostragem |         |         |         |         |         | Entrada de ar    |         |         |         |         |         |
|-------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | $\Delta P$ [hPa]      |         |         | V [m/s] |         |         | $\Delta P$ [hPa] |         |         | V [m/s] |         |         |
|       | Ponto 1               | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 1 | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 1          | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 1 | Ponto 2 | Ponto 3 |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |
|       |                       |         |         |         |         |         |                  |         |         |         |         |         |

Tabela B.3- Folha de registo para a monitorização da composição dos gases de exaustão.

| Hora | Temperatura (°C) |     |            |            |                       | Gases de exaustão [%] |                 |                | Partículas |  | Borbulhadores |              |              | Queimador                                |                |      |
|------|------------------|-----|------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|----------------|------------|--|---------------|--------------|--------------|--|----------------|------|
|      | C.C              | C.P | Exaustão 1 | Exaustão 2 | Conduta de amostragem | CO                    | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | Filtro     | V <sub>amostrado</sub> [m <sup>3</sup> ] | Massa 1 (kg)  | Massa 2 (kg) | Massa 3 (kg) | V <sub>amostrado</sub> [m <sup>3</sup> ] | m_pellets (kg) | Pot. |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |
|      |                  |     |            |            |                       |                       |                 |                |            |  |               |              |              |  |                |      |