# Estudo da Combustão de Briquetes Aditivados numa Salamandra

*Rodolfo Spencer Mafé Borges*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Orientador do INEGI: Victor Daniel Camilo Ferreira

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2020

*"Não basta que seja pura e justa a nossa causa.*
*É necessário que a pureza e a justiça*
*Existam dentro de nós."*

*Agostinho Neto*

# Resumo

A presente dissertação foi realizada no âmbito da Unidade Curricular Dissertação, enquadrada no Mestrado em Energia Térmica do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, lecionado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Este trabalho contribui para o projeto Biomassa-AP, no qual a unidade de Energia do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) está inserida, com o objetivo de promover a valorização energética de biocombustíveis.

Os objetivos do presente trabalho assentam no estudo do desempenho térmico de uma caldeira doméstica a lenha com seis tipos de briquetes aditivados: briquetes de tojo aditivados com amido, briquetes de tojo aditivados com caulino, briquetes de tojo, aditivados com glicerol, briquetes de videira aditivados com amido, briquetes de videira aditivados com caulino e briquetes de videira aditivados com glicerol. A produção destes foi realizada nas instalações do INEGI, sendo acompanhada de perto, e armazenada no mesmo. Usaram-se diferentes temperaturas de entrada da água na caldeira num intervalo de 30 a 45 ºC. Por outro lado, também se procurou descobrir a influência do tipo de briquetes utilizados nas emissões de poluentes e temperatura dos mesmos. Para concretizar estes objetivos, procedeu-se à montagem da instalação experimental que, para além da caldeira, inclui vários componentes utilizados nas medições ao longo dos ensaios.

No total, realizaram-se doze ensaios, monitorizando-se todas as variáveis das quais o rendimento térmico, as perdas térmicas e as emissões dos gases de exaustão dependiam, resultando na presente dissertação de base fundamentalmente experimental.

Assim sendo, foi monitorizada a composição molar, na base seca, dos gases de combustão ($O_2$, $CO_2$, CO, NO e $NO_2$), verificando-se maior emissão de CO nos ensaios em que se usaram briquetes de videira aditivados com caulino. O melhor rendimento térmico foi obtido com briquetes de tojo aditivados com glicerol, 60,95 %.

Atendendo aos resultados, conclui-se que o biocombustível mais vantajoso, daqueles que foram estudados, foram os briquetes de tojo aditivados com glicerol.

# Abstract

This dissertation was carried out within the scope of the Dissertation Curricular Unit, framed in the Master in Thermal Energy of the Integrated Master in Mechanical Engineering, taught at the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP). This work contributes to the Biomassa-AP project, in which the Energy unit of the Institute of Science and Innovation in Mechanical Engineering and Industrial Engineering (INEGI) is inserted, with the objective of promoting the energetic valorization of biofuels.

The objectives of the present work are based on the study of the thermal performance of a domestic wood boiler with six types of additive briquettes: gorse briquettes with starch, gorse briquettes with kaolin, gorse briquettes with glycerol, vine briquettes with starch, vine briquettes with kaolin and vine briquettes with glycerol. The production of these briquettes was carried out at INEGI's facilities, being closely monitored and stored there. Different water inlet temperatures were used in the range of 30 to 45 ºC. On the other hand, an attempt was also made to discover the influence of the type of briquettes used on pollutant emissions and temperatures. In order to achieve these objectives, the experimental installation was assembled, which, in addition to the boiler, includes several components used in measurements throughout the tests.

In total, twelve tests were carried out, monitoring all variables on which the thermal efficiency, thermal losses and emissions of the exhaust gases depended, resulting in the present dissertation with a fundamentally experimental basis. The molar composition of the combustion gases ($O_2$, $CO_2$, CO, NO and $NO_2$) was monitored on a dry basis. The highest CO emission in the tests were for grape briquettes with kaolin. The best thermal efficiency was for briquettes with glycerol

Taking into account all these results, it is concluded that the most advantageous biofuel, of those that were studied, was the gorse briquettes with glycerol.

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus Jeová todo o Poderoso, ao meu orientador e Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho, agradeço por todos os conhecimentos transmitidos não só no contesto académico mas também no âmbito sociocultural e histórico sobre a terra que nos viu nascer Angola, pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de dúvidas, pela orientação, sugestões e motivação ao longo deste trabalho, sem os quais a realização desta dissertação não teria sido possível.

Ao meu orientador no INEGI, Engenheiro Víctor Ferreira, agradeço pela disponibilidade demonstrada, pelas sugestões, conselhos e toda a ajuda facultada durante o projeto.

Agradeço ao INEGI por facultar as instalações necessárias para a realização desta dissertação.

Agradeço aos meus pais pelas oportunidades, pela confiança depositada, pelo infindável apoio, pela compreensão e a pela paciência demonstrada ao longo de todo o meu percurso académico, aos meus amigos e colegas da FEUP, o João Melo, o Pedro Morgado, o Marcelo Lainho, o Nuno Cardoso e o Tiago Marques.

# Índice de conteúdo

1. Introdução ..... 27

1.1 Enquadramento energético ..... 27

1.2 INEGI ..... 33

1.3 Objetivos do projeto ..... 33

2. Aditivos ..... 35

2.1 Considerações gerais sobre os aditivos ..... 35

2.2 O uso de aditivos na biomassa ..... 36

2.3 Outros usos dos aditivos ..... 39

3. Biomassa ..... 41

3.1 Considerações gerais ..... 41

3.2 Propriedades da biomassa ..... 43

3.2.1 Poder calorífico ..... 44

3.2.2 Teor de humidade ..... 45

3.2.3 Massa volúmica ..... 46

3.2.4 Quantidade de matérias voláteis e carbono fixo ..... 46

3.2.5 Teor de cinzas ..... 46

3.2.6 Teor de metais alcalinos ..... 47

3.2.7 Razão celulose/lenhina ..... 47

4. Tecnologias de conversão da biomassa ..... 49

4.1 Considerações gerais ..... 49

4.2 Processos físicos ..... 50

4.3 Processos termoquímicos ..... 52

4.4 Processos bioquímicos ..... 53

4.5 Processos físico-químicos ..... 54

5. Processo de briquetagem ..... 55
5.3 Pré-tratamento ..... 58
5.4 A briquetagem ..... 59
5.5 Pós-tratamento ..... 63
6. Combustão ..... 65
6.1 Introdução ..... 65
6.2 Estágios da combustão ..... 67
6.2.1 Ignição ..... 68
6.2.2 Secagem ..... 69
6.2.3 Pirólise ..... 69
6.2.4 Combustão do resíduo sólido carbonoso ..... 70
6.3 Poluentes resultantes da combustão ..... 70
6.4 Análise do rendimento da combustão ..... 72
6.4.1 Fornalha ..... 72
6.4.2 Permutador de calor ..... 74
6.5 Combustíveis ..... 76
6.5.1 Composição química dos briquetes ..... 76
6.5.2 Teor de humidade ..... 81
7. Instalação experimental ..... 83
7.1 Introdução ..... 83
7.2 Caldeira ..... 85
7.3 Balanças ..... 92
7.4 Caudalímetro ..... 93
7.5 Tubo de Pitot Standard ..... 93
7.6 Analisadores dos gases de combustão ..... 94
7.7 Ensaio do desempenho térmico ..... 95

7.7.1 Fase de arranque ..... 96
7.7.2 Regime permanente ..... 97
8. Procedimento de cálculo ..... 99
8.1 Introdução ..... 99
8.2 Determinação do caudal mássico ..... 100
8.3 Determinação do caudal mássico dos gases de combustão. ..... 101
8.4 Determinação da equação estequiométrica e completa ..... 102
8.5 Determinação da equação da combustão real ..... 103
8.6 Determinação do rendimento térmico da caldeira ..... 106
8.7 Determinação das perdas térmicas ..... 107
8.8 Determinação do teor de cinzas do combustível ..... 109
9. Resultados e discussão ..... 111
9.1 Introdução ..... 111
9.2 Análise do rendimento térmico ..... 113
9.3 Análise da emissão de poluentes ..... 116
10. Conclusões ..... 123
11. Sugestões de trabalhos futuros ..... 126
Referências ..... 129

# Nomenclatura

**Abreviaturas**

| | |
|---|---|
| AIE | Agência Internacional de Energia |
| BS | Base seca |
| DGEG | Direção Geral de Energia e Geologia |
| EES | *Engineering Equation Solver* |
| ESTGV | Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu |
| FER | Fontes de Energia Renovável |
| FEUP | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto |
| GEE | Gases de Efeito de Estufa |
| HAP | Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos |
| ICNF | Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas |
| INEGI | Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial |
| IPV | Instituto Politécnico de Viseu |
| OCDE | Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico |
| UE | União Europeia |

## Símbolos

| | |
|---|---|
| $A$ | Área da secção da conduta [$m^2$] |
| $AC$ | Razão ar-combustível |
| $B_i$ | Incerteza sistemática do parâmetro $i$ |
| $CA$ | Razão combustível-ar |
| $D$ | Diâmetro da conduta [m] |
| $e$ | Excesso de ar [-; %] |
| $erro_{eq}$ | Erro relativo do caudal mássico dos gases de combustão, recorrendo aos coeficientes da equação real de combustão [-; %] |
| $erro_{Pitot}$ | Erro relativo do caudal mássico dos gases de combustão, recorrendo ao tudo de Pitot Standard [-; %] |
| $f$ | Fator de correção |
| $h_{lv}$ | Entalpia latente de vaporização da água [J/kg; kJ/kg] |
| $H_{Pi}$ | Entalpia dos produtos no estado $i$ [J; kJ] |
| $H_{Ri}$ | Entalpia dos reagentes no estado $i$ [J; kJ] |
| $hum_{comb,h}$ | Humidade do combustível na base húmida [-; %] |
| $hum_{comb,s}$ | Humidade do combustível na base seca [-; %] |
| $M_i$ | Massa molecular do constituinte $i$ [kg/kmol] |
| $M_h$ | Massa molecular dos gases húmidos de combustão [kg/mol] |
| $m_{ag}$ | Massa de água [kg] |
| $m_{ar,h}$ | Massa de ar húmido [$kg/kg_{comb}$] |
| $m_{ar,s}$ | Massa de ar seco [$kg/kg_{comb}$] |
| $m_{at,s}$ | Massa de ar seco teórica [$kg/kg_{comb}$] |
| $m_{ab}$ | Massa registada pela balança 2 imediatamente antes de se colocarem os briquetes na caldeira [kg] |
| $m_{ac}$ | Massa registada pela balança 2 antes de se retirarem as cinzas da caldeira [kg] |
| $m_{comb,i}$ | Massa do combustível do tipo $i$ [kg] |

| | |
|---|---|
| $m_{db}$ | Massa registada pela balança 2 imediatamente depois de se colocarem os briquetes na caldeira [kg] |
| $m_{dc}$ | Massa registada pela balança 2 depois de se retirarem as cinzas da caldeira [kg] |
| $m_h$ | Massa húmida da amostra [kg] |
| $m_j$ | Massa da amostra no intervalo $j$ [kg] |
| $m_s$ | Massa seca da amostra [kg] |
| $\dot{m}_{ag}$ | Caudal mássico de água [kg/s; kg/min] |
| $\dot{m}_{ar,h}$ | Caudal mássico de ar húmido [kg/s] |
| $\dot{m}_c$ | Taxa de queima da partícula de carbono [kg/s] |
| $\dot{m}_{\mathrm{CO}}$ | Caudal mássico de monóxido de carbono nos produtos de combustão [kg/s] |
| $\dot{m}_{comb}$ | Caudal mássico de combustível [kg/s] |
| $\dot{m}_g$ | Caudal mássico dos gases de combustão [kg/s] |
| $\dot{m}_{geq}$ | Caudal mássico dos gases de combustão, recorrendo ao balanço mássico da equação real de combustão [kg/s] |
| $\dot{m}_{gPitot}$ | Caudal mássico dos gases de combustão, recorrendo ao tubo de Pitot Standard [kg/s] |
| $\dot{m}_{Pi}$ | Caudal mássico do produto $i$ [kg/s] |
| $\dot{m}_{Ri}$ | Caudal mássico do reagente $i$ [kg/s] |
| $n_{Pi}$ | Coeficientes estequiométricos dos produtos [kmol/$kg_{comb}$] |
| $n_{Ri}$ | Coeficientes estequiométricos dos reagentes [kmol/$kg_{comb}$] |
| $n'_{Pi}$ | Coeficientes da reação real de combustão dos produtos [kmol/$kg_{comb}$] |
| $n'_{Ri}$ | Coeficientes da reação real de combustão dos reagentes [kmol/$kg_{comb}$] |
| $P_{amb}$ | Pressão ambiente [Pa] |
| $P_{cham}$ | Pressão estática da chaminé [Pa] |
| $P_{din}$ | Pressão dinâmica [Pa] |
| $P_{est}$ | Pressão estática [Pa] |
| $P_{estg}$ | Pressão de estagnação [Pa] |
| $P_{\mathrm{O_2}}$ | Pressão parcial do oxigénio [Pa] |
| $PC_{\mathrm{CO}}$ | Poder calorífico do monóxido de carbono [J/kg; kJ/kg] |

| | |
|---|---|
| $PCI_{comb}$ | Poder calorífico inferior do combustível [J/kg; kJ/kg] |
| $PCI_{corr}$ | Poder calorífico inferior corrigido [J/kg; kJ/kg] |
| $\dot{Q}_{\mathrm{CO}}$ | Perda térmica por não queimados [W; kW] |
| $\dot{Q}_{forn}$ | Potência térmica libertada na combustão dos briquetes [W; kW] |
| $\dot{Q}_{g}$ | Perda térmica na corrente dos gases de exaustão [W; kW] |
| $\dot{Q}_{gl}$ | Perda térmica latente na corrente dos gases de exaustão [W; kW] |
| $\dot{Q}_{gs}$ | Perda térmica sensível na corrente dos gases de exaustão [W; kW] |
| $\dot{Q}_{outras}$ | Perda térmica pelas fontes não contabilizadas [W; kW] |
| $\dot{Q}_{\mathrm{útil}}$ | Potência térmica útil transferida para a água [W; kW] |
| $r$ | Riqueza da mistura [-] |
| $\bar{R}$ | Constante universal dos gases perfeitos [J/(kmol·K); kJ/(kmol·K] |
| $T_{AC}$ | Temperatura adiabática de chama real [K] |
| $T_{AC,est}$ | Temperatura adiabática de chama estequiométrica [K] |
| $T_{amb}$ | Temperatura ambiente [ºC; K] |
| $T_{chama}$ | Temperatura da chama [ºC; K] |
| $T_{ent}$ | Temperatura da água à entrada da caldeira [ºC; K] |
| $T_{g}$ | Temperatura dos gases de exaustão [ºC; K] |
| $T_{sai}$ | Temperatura da água à saída da caldeira [ºC; K] |
| $t_{cinzas,i}$ | Teor das cinzas do material $i$ [-] |
| $t_{ef}$ | Tempo efetivo do ensaio [s; min] |
| $t_{ent,j}$ | Instante de entrada da amostra na caldeira no intervalo $j$ [s; min] |
| $t_{j}$ | Tempo fictício do intervalo $j$ [s; min] |
| $t_{sai,j}$ | Instante de saída da amostra da caldeira no intervalo $j$ [s; min] |
| $\bar{u}$ | Velocidade média dos gases de combustão [m/s] |
| $u_{x}$ | Velocidade local dos gases de combustão [m/s] |
| $w_{ar}$ | Humidade absoluta do ar atmosférico [kg/kg$_{as}$] |
| $x_{h}(i)$ | Fração molar do elemento $i$ na base húmida [-] |

| | |
|---|---|
| $x_s(i)$ | Fração molar do elemento $i$ na base seca [-] |
| $x_s(\mathrm{O_2})_{ref}$ | Fração molar de referência do oxigénio na base seca [-] |
| $x_s(\mathrm{P})$ | Fração molar do poluente na base seca [-] |
| $x_s(\mathrm{P})_c$ | Fração molar corrigida do poluente na base seca (a 13% $O_2$) [-] |
| $x_t(\mathrm{CO_2})$ | Fração molar teórica de dióxido de carbono [-] |
| $y_h(i)$ | Fração mássica do elemento $i$ na base húmida [-] |
| $y_s(i)$ | Fração mássica do elemento $i$ na base seca [-] |

# Símbolos gregos

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | Fração mássica de água no combustível [kg/kg$_{comb}$] |
| $\Delta h_0$ | Entalpia específica de combustão [J/kg; kJ/kg]] |
| $\Delta t$ | Intervalo de tempo [s; min] |
| $\varepsilon$ | Porosidade da camada de cinzas |
| $\eta_{comb}$ | Rendimento da combustão [-] |
| $\eta_t$ | Rendimento térmico da caldeira [-] |
| $\eta_{TC}$ | Rendimento da transferência de calor [-] |
| $\mu$ | Viscosidade dinâmica [Pa·s] |
| $\rho$ | Massa volúmica do ar [kg/m$^3$] |
| $\rho_a$ | Massa volúmica da camada de cinzas [kg/m$^3$] |
| $\rho_g$ | Massa volúmica dos gases húmidos de combustão [kg/m$^3$] |
| $\rho_n$ | Massa volúmica do núcleo carbonoso [kg/m$^3$] |
| $\rho_p$ | Massa volúmica da partícula [kg/m$^3$] |
| $\varphi_j$ | Fração queimada no intervalo $j$ |

# Índice de figuras

Figura 1.1 - Consumo mundial de energia primária por fonte de energia, IEA(2017a)....30

Figura 1.2 - Consumo de energia primária no mundo em 2015: contribuição das fontes de energia primária a) e contribuição das regiões geográficas incluindo a categoria de bunkers para a contribuição da aviação internacional e da marinha b) IEA (2017b).....…33

Figura 1.3 - Consumo de energia primária no panorama energético português em 2016: contribuições das fontes de energia primária (à esquerda) e contribuição de cada FER no consumo de energia primária renovável (à direita), DGEG (2017)……...…..34
Figura 2.1 - Contribuição da biomassa para as energias renováveis (DGEG)…….....37

Figura 2.2 - a) Difração de pó de raio-X para o carbonato de cálcio armazenado sob condições……..…….....……..38

Figura 2.3 Aditivos naturais…….....……39

Figura 2.4 - Estrutura molecular dos lignosulfatos…….....…….39
Figura 2.5 – Soldadura usando um gás inerte como aditivo……..41
Figura 3.1 - Contribuição da energia elétrica, da biomassa e de outras renováveis na produção anual de energia renovável em Portugal, em 2016, DGEG (2017)…….....45

Figura 4.1 - Processos de conversão energético da biomassa ……...….51
Figura 5.1 - a) Prensa de pistão; b) Prensa de parafuso…….57
Figura 5.2 – Imagens da briquetadora COMAFER 70N presente no laboratório de combustão (Braga, 2019)…….59
Figura 5.3 - Briquetes do tipo TC, com 97% de tojo e 3% de caulino……..….62
Figura 5.4 - Briquete do TA com 97 % de biomassa e 3 % de amido…….63

Figura 5.5 - Briquete do tipo TG com 97 % de biomassa e 3 % de glicerol…….....63

Figura 5.6 - Briquetes do VA com 97 % de biomassa e 3 % de amido…….....64

Figura 5.7 - Briquetes do VC com 97 % de videira e 3 % de caulino…….....64

Figura 5. 8 - Briquetes do VG com 97 % de biomassa e 3 % de glicerol…….....…65

Figura.6. 1 - Representação gráfica da temperatura em função do ar de combustão (McGowan et al.,2010)…….....……69

Figura.6.2.- Representação gráfica da massa do material em função do tempo. Adaptado de: Ferreira (2013)…….....……...70

Figura.6.3 - Representação esquemática do processo de combustão nos dois momentos: fornalha e permutador de calor (Quaak et al., 1999; Silva 2018)…….....…74
Figura 6.4 - Combustão adiabática a pressão constante (Pinho 2011).....77

Figura 6.5 - Quatro dos seis tipos de briquetes fabricados no INEGI…….....….82

Figura 6.6 - Dois dos seis briquetes fabricados no INEGI…….....82

Figura 6.7 – Estufa laboratorial do INEGI (BINDER, 2018)…….....……..83

Figura 7. 1 - Representação esquemática da instalação experimental (Silva, 2018)…....85

Figura 7. 1 – Programa de aquisição no software DASYLab (Silva, 2018)….....87
Figura 7.3 - Representação esquemática da caldeira e dimensões exteriores. Solzaima (2015)…….....88
Figura 7.4 - Caldeira utilizada e câmara de combustão (Silva 2018)…….89
Figura 7.5 - Circuitos de alimentação de ar na caldeira (Silva, 2018)……...90

Figura 7.6 - Circulação dos gases de combustão na câmara inferior da caldeira (Silva, 2018)…….....91
Figura 7.7 - Representações esquemáticas do circuito dos gases na caldeira (Silva, 2018)……92

Figura 7.8 - Representação esquemática da caldeira e principais constituintes (Solzaima, 2017)……93

Figura 7.9 - Balança Kern EW6000-1M (Kern 2018)…….....….94

Figura 7.10 - Balança Gram Tortuga GL150 ( GRAM (2018)…….....…...94

Figura 7.11 – Localização do Tubo de Pitot na conduta de escape dos gases da caldeira (Silva, 2018)…….....……95

Figura 7.12 - Representação esquemática do circuito inicial dos gases na caldeira (Silva, 2018)…….....……96

Figura 9.1 - Rendimento térmico dos cinco dos ensaios realizados…….....…113

Figura 9.2 - Comportamento do oxigénio para briquetes (TA) aditivados com amido...116

Figura 9.3 - Comportamento do oxigénio para briquetes (VA) aditivados com amido...116

Figura 9.4 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (TA) aditivados com amido……...……..117

Figura 9.5-Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (VA) aditivados com amido…….117

Figura 9.6 - Comportamento do oxigénio para briquetes (TC) aditivados com caulino.....118

Figura 9.7 - Comportamento do oxigénio para briquetes (VC) aditivados com caulino……...118

Figura 9.8 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (VC) aditivados com caulino……...119

Figura 9.9 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (TC) aditivados com caulino……...119

Figura 9.10 - Comportamento do oxigénio para briquetes (VG) aditivados com glicerol-.....120

Figura 9.11 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (VG) aditivados com glicerol……..…120

Figura 9.12 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes (TG) aditivados com glicerol……..121

# Índice de tabelas

Tabela1.1 - Metas objetivas e obrigatórias para 2020,2030 e 2050.Fonte:DGEG(2018)…….....32

Tabela 2.1 - Constituintes lignocelulósicos de alguns exemplos de biomassa…….....….46

Tabela 3. - Comparação entre as propriedades e características dos péletes e briquetes.....53

Tabela 4.1 - Características técnicas da briquetadora COMAFER 70N…….....….58

Tabela 5.2 - Tipos de briquetes fabricados…….....…….....…...61

Tabela 6.1 - Análise química dos briquetes do tipo TC……..…….....……78

Tabela 6.2 - Análise química dos briquetes do tipo TA……..……..…….…….....79

Tabela 6.3 - Análise química dos briquetes do tipo TG…….…….....….79

Tabela 6.4 - Análise química dos briquetes do tipo VA……...…….....80

Tabela 6.5 - Análise química dos briquetes do tipo VC……..…….....…..80

Tabela 6.6 - Análise química dos briquetes do tipo VG …….....….81

Tabela 7.1 - Temperatura da água utilizada e a temperatura ambiente…….....……...84

Tabela 9.1 - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados.....114

Tabela 9.2 - Caudais mássicos de combustíveis, de ar e dos gases de combustão.....114

Tabela 9.3 - Rendimento térmico médio da caldeira nos ensaios realizados.....117

Tabela 9.4 - Análise das perdas dos ensaios realizados.....118

Tabela 9.5 - Composição dos gases de combustão dos ensaios realizados.....125

# 1. Introdução

Neste primeiro capítulo, contextualiza-se a situação energética atual no Mundo e em Portugal, seguida do enquadramento do tema do projeto. Apresentam-se, ainda, os objetivos do trabalho, a metodologia estratégica adotada e a respetiva organização da presente dissertação.

## 1.1 Enquadramento energético

Depois da crise petrolífera despoletada em 1973, a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), entidade com 34 países membros (incluindo Portugal), destinada à elaboração de estatísticas da vida económica dos seus países aderentes, impulsionou a criação da Agência Internacional de Energia (AIE). Coordenar as questões relacionadas com o aprovisionamento petrolífero, promover políticas de energia racional num contexto global, melhorar a estrutura do fornecimento e procura mundial de energia e aumentar a eficiência na utilização de energia são alguns dos objetivos da AIE (DGEG, 2018).

De acordo com o relatório anual *International Energy Outlook 2017* (IEA, 2017a), estima-se que o consumo mundial de energia aumente cerca de 28 % entre 2015 e 2040. Os países não pertencentes à OCDE apresentam um consumo de energia superior, com uma tendência fortemente crescente, sendo esta justificada pelo crescimento exponencial da população e desenvolvimento económico dos países em causa. Estima-se um aumento de 41 % no consumo de energia nos países não pertencentes à OCDE, em contraste com o aumento estimado de 9 % dos países pertencentes à mesma organização.

Na Figura 1.1, apresenta-se a evolução do consumo de energia primária mundial desde 1990 até 2015 e as previsões de 2015 até 2040, em função das cinco fontes de energia atualmente utilizadas, nomeadamente petróleo, carvão, gás natural, fontes de energia renovável (FER) e energia nuclear. Analisando a figura, constata-se que o carvão é o único combustível que não presenta uma tendência crescente, tal explica-se devido à desaceleração da produção de carvão na China resultante da nova política ambiental, e à diminuição do consumo nos Estados Unidos (IEA, 2017a). Apesar de se prever que as FER apresentem a maior taxa de crescimento, é ainda previsto que os combustíveis

fósseis continuem a ser os responsáveis pela maioria do consumo mundial de energia até 2040. ou seja, *grosso modo* até meados do século XXI.

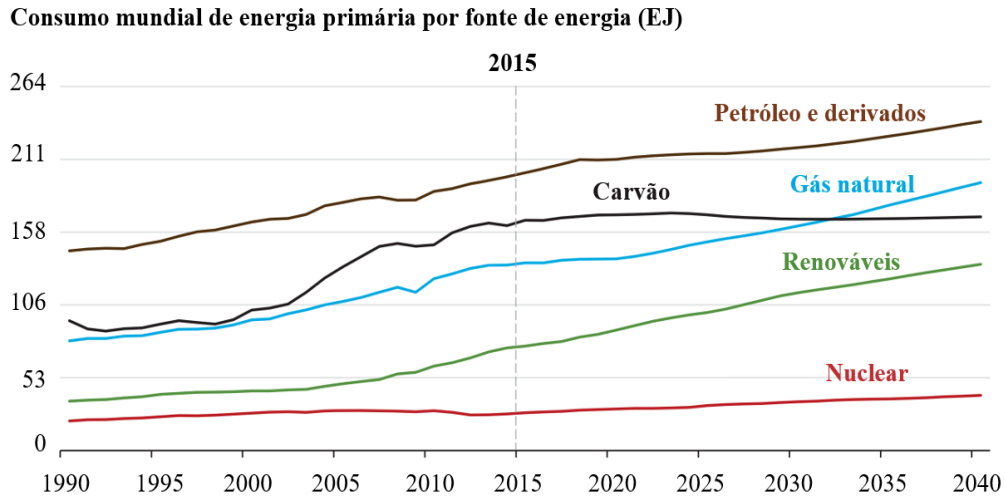



Figura .1.1 - Consumo mundial de energia primária por fonte de energia, IEA(2017a).

Estima-se que o consumo mundial de petróleo e derivados cresça de 95 milhões de barris por dia, em 2015, para 113 milhões de barris por dia em 2040. Mais de 80 % do aumento do consumo dos combustíveis supramencionados remete para os países asiáticos não pertencentes à OCDE, como é o caso da China e da Índia, sendo uma consequência do rápido crescimento do sector industrial e de transportes nestes países. Ainda de acordo com o mesmo relatório anual (IEA, 2017a), o setor industrial é o que predomina no consumo energético total, correspondendo a mais de 50 % do consumo entre 1990 e 2040.

Relativamente às emissões de dióxido de carbono relacionadas com o consumo energético mundial, estima-se uma redução da taxa de crescimento, sendo o reflexo da diminuição do consumo de carvão e do aumento da utilização das FER, como a eólica e a solar (IEA, 2017a). Segundo o relatório anual *BP Energy Outlook 2017* (BP, 2017), estima-se que o aumento das emissões de dióxido carbono entre 2015 e 2035 apresente a menor taxa de crescimento para períodos de 20 anos desde 1965, sendo cerca de um terço da taxa verificada nos passados 20 anos: 0,6 % por ano versus 2,1 % por ano.

No final do século XX, observou-se uma maior sensibilização e tomada de consciência face às alterações climáticas, sendo esta problemática atualmente reconhecida como o maior desafio do século XXI. De uma forma geral, as alterações climáticas são resultado do aquecimento global, em virtude da acumulação dos gases de efeito de estufa (GEE) nas camadas superiores da atmosfera, promovendo o aumento da

temperatura da superfície terrestre. No sentido de estabilizar as concentrações dos GEE na atmosfera, visando um desenvolvimento económico sustentável, têm sido organizadas diversas iniciativas das quais se encontra a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas e o Protocolo de Quioto, em 1997 (DGEG, 2018).

O Protocolo de Quioto foi o primeiro tratado jurídico internacional que explicitamente pretende limitar as emissões quantificadas dos GEE dos países desenvolvidos. A assinatura do mesmo impulsionou a criação do Programa Europeu para as Alterações Climáticas, lançado em 2000, com o principal objetivo de elaborar políticas e medidas com as quais a União Europeia (UE) se propunha a cumprir o desafio do Protocolo de Quioto. Em 2005, foi lançada a segunda fase do Programa Europeu para as Alterações Climáticas, alargando o seu horizonte de aplicabilidade (APA, 2018). Entretanto, no Conselho Europeu de março de 2007, foi estabelecido um plano de melhoria para a política climática e energética da UE conhecido como "Objetivos 20-20-20", estabelecendo metas objetivas e obrigatórias para 2020. Posteriormente, no Conselho Europeu de outubro de 2014, foram estabelecidas metas de energia e clima para 2030 e 2050. Estas metas encontram-se apresentadas na Tabela 1.1 e são entendidas como a base necessária à transição para uma economia europeia hipocarbónica competitiva (DGEG, 2018).

Tabela 1.1 - Metas objetivas e obrigatórias para 2020,2030 e 2050.Fonte:DGEG(2018)

| Metas | Objetivos |
|---|---|
| *2020* | • 20% de redução nas emissões dos GEE relativamente aos níveis de 1990;<br>• 20% de aumento na eficiência energética;<br>• 20% de aumento na energia proveniente de FER no consumo de energia final. |
| *2030* | • 40% de redução nas emissões dos GEE relativamente aos níveis de 1990;<br>• 27 – 30% de aumento na eficiência energética;<br>• 27% de aumento na energia proveniente de FER no consumo de energia final. |
| *2050* | • 80 – 95% de redução nas emissões dos GEE relativamente aos níveis de 1990. |

De acordo com o relatório *Total greenhouse gas emission trends and projections* (EEA, 2017), estima-se que a emissão dos GEE reduza em 26 % até 2020 relativamente aos níveis de 1990, permitindo superar a meta atribuída nos "Objetivos 20-20-20". Contudo, estima-se uma redução em apenas 30 a 32 % até 2030, não sendo previsível ultrapassar o objetivo da redução de 40 % para 2030. A evolução das emissões dos GEE na União Europeia desde 1990 até 2015, em função de cada setor de emissão, apresenta-se na Figura 1.2, observando-se a predominância no setor de energia, de transporte e industrial.

De seguida, são apresentadas estatísticas sobre o consumo mundial de energia primária, relativamente ao ano de 2015, para um consumo total de energia de 13.647 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) (IEA, 2017b). A Figura 1.3 a) representa a contribuição das fontes de energia primária no panorama energético mundial, em 2015, observando-se a supremacia dos combustíveis fósseis, representando 81,4 % do consumo total, seguindo-se as FER com 13,7 % e a energia nuclear com 4,9 %. Por sua vez, na Figura 1.3 (b) apresenta-se a contribuição de cada região geográfica no consumo mundial de energia primária, em 2015, observando-se a primazia da Ásia, com quase

metade do consumo mundial, corroborando a grande influência da China e da Índia mencionada anteriormente.

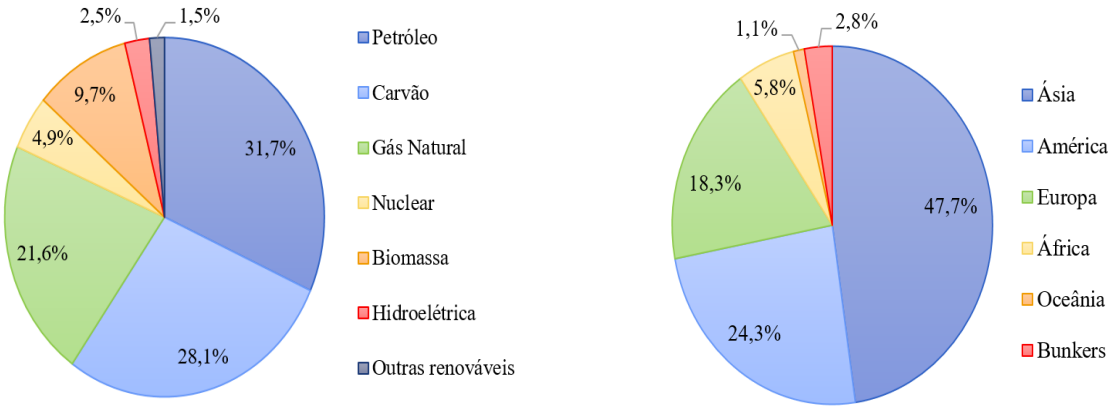



Figura 1.2 - Consumo de energia primária no mundo em 2015: contribuição das fontes de energia primária a) e contribuição das regiões geográficas incluindo a categoria de bunkers para a contribuição da aviação internacional e da marinha b) IEA (2017b

Também se considerou oportuno analisar os dados relativos ao panorama energético nacional, apresentando-se na Figura 1.4 a) a contribuição das fontes de energia no consumo total de energia primária em Portugal, em 2016, para um consumo total de 21.918 milhares de toneladas equivalentes de petróleo (ktep) (DGEG, 2017). Ainda na Figura 1.4 b) é possível analisar a contribuição de cada FER no consumo de energia primária renovável. Verifica-se que 25% da energia primária tem origem em fontes renováveis, sendo a biomassa a que representa a maior parcela, seguindo-se a hidroelétrica e a eólica. Importa referir que a biomassa, no gráfico seguinte, inclui lenhas e resíduos florestais, licores sulfitivos, péletes e briquetes, biogás, biocombustíveis líquidos e a fração renovável dos resíduos sólidos urbanos.

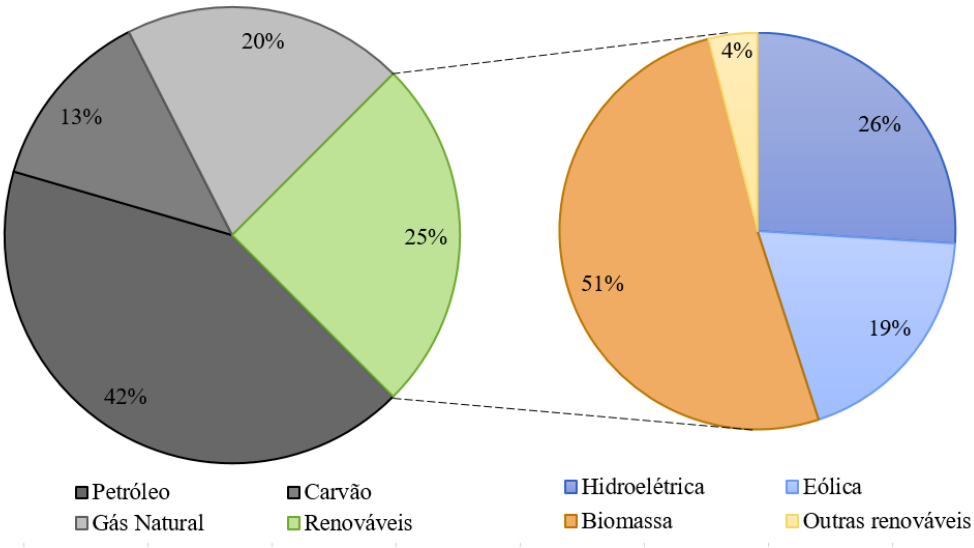



Figura 1.3 - Consumo de energia primária no panorama energético português em 2016: contribuições das fontes de energia primária (à esquerda) e contribuição de cada FER no consumo de energia primária renovável (à direita), DGEG (2017).

Como analisado na figura anterior, cerca de 75 % da energia consumida em Portugal provém de combustíveis fósseis. Sendo Portugal um país com escassos recursos energéticos fósseis, existe, consequentemente, uma elevada dependência energética do exterior, sendo o sétimo país membro da EU-28 com o valor mais elevado (Eurostat, 2017). Para combater a dependência energética, a Diretiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009 fixou, para Portugal, um objetivo para a incorporação das FER no consumo final bruto de energia de 31 %, até 2020. Ainda na mesma diretiva, estipulou-se a incorporação de 59,6 % de energia renovável na produção de eletricidade e a utilização de 10% de energia renovável no consumo energético registado no setor dos transportes, até à mesma data. Desde 2008, tem-se observado uma tendência crescente do contributo no consumo final bruto das FER, representando 28, 5% em 2016 (DGEG, 2017).

Deste modo, nos últimos anos, tem-se assistido a uma mudança gradual do modelo energético atual, procurando a diversificação das fontes através de um combinado energético efetivo e equilibrado, promovendo a contribuição cada vez maior das FER, de modo a aumentar a segurança energética portuguesa. Para tal, muito trabalho de investigação tem sido realizado, visando otimizar a exploração e a utilização da energia proveniente dos recursos renováveis. Seguindo essa linha de orientação, o presente trabalho incidirá no estudo sobre o aproveitamento da biomassa proveniente de limpezas

florestais e de madeiras de podas, averiguando a influência destes combustíveis no desempenho térmico de uma caldeira.

## 1.2 INEGI

O INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) é um instituto vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica, situado na interface Universidade-Indústria (INEGI, 2011). Neste instituto insere-se o laboratório de combustão que tem como principais objetivos promover o desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas de Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Combustão. Os ensaios de queima analisados nesta dissertação foram realizados no laboratório de combustão do INEGI.

## 1.3 Objetivos do projeto

Os principais objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Análise do desempenho térmico de uma caldeira queimando briquetes aditivados com caulino, amido e glicerol. As briquetes serão produzidas com tojo e resíduos de poda de vinha.
- Analisar as emissões de CO e $NO_x$ das queimas acima referidas.
- Verificar qual a influência das diferentes temperaturas de entrada do caudal de água no rendimento da caldeira

# 2. Aditivos

## 2.1 Considerações gerais sobre os aditivos

O uso de aditivos poderá ser uma forma para reduzir a emissão dos gases com efeito estufa e aproveitar melhor as propriedades dos briquetes. Geralmente são utilizados para melhorar a resistência e reduzir a porosidade. As vantagens dos aglutinantes (aditivos) para a produção de briquetes reside em apresentar uma taxa alta de aglomerante, a redução do material inerte da biomassa na composição dos briquetes, baixo custo, abundância, resistência mecânica, resistência a humidade e boas condições de operacionalidade (Van Soest et al., 1994).

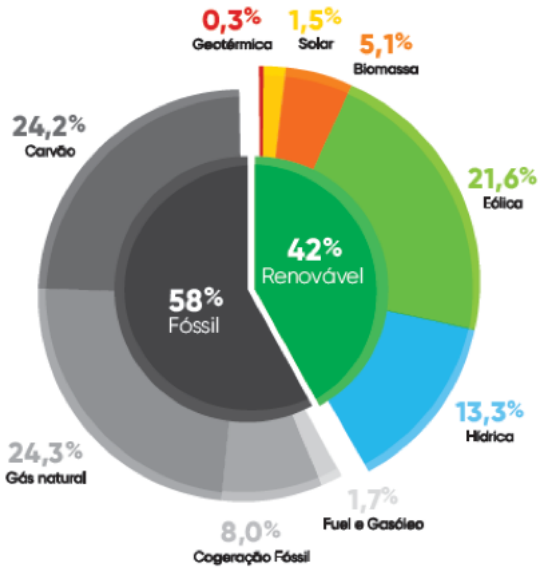



Figura 2.1 - Contribuição da biomassa para as energias renováveis (DGEG, 2017).

Aditivos são substâncias, geralmente de origem orgânica, que são adicionadas ou misturadas a outras substâncias com o objetivo de melhorar ou de conservar certas propriedades. Hoje em dia os aditivos são aplicados nas mais diversas áreas desde a indústria química como o uso de aditivos de ácidos carboxílicos para melhorar e sintonizar as propriedades físicas do carbonato de cálcio, incluindo a porosidade e a estabilidade de armazenamento, até à indústria alimentar (Sun et al., 2010)

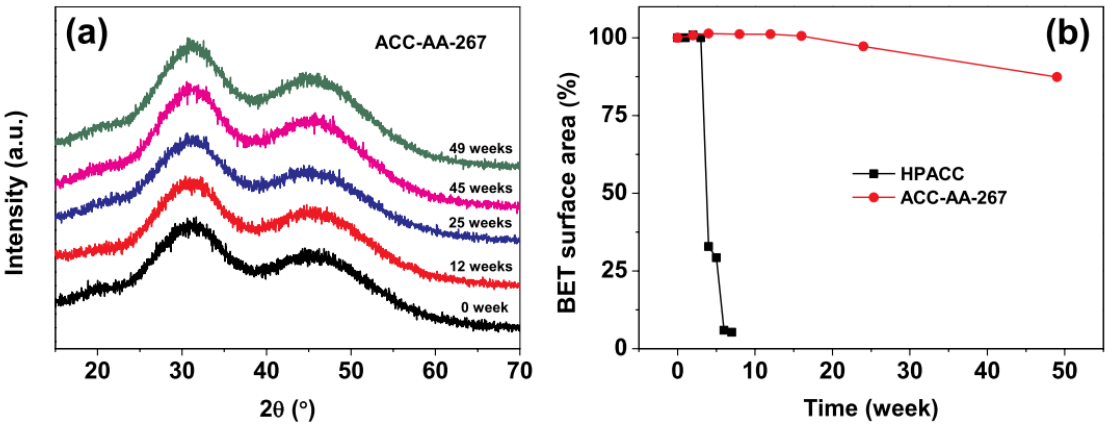



Figura 2.2 - a) Difração de pó de raio-X para o carbonato de cálcio armazenado sob condições ambientais durante várias semanas. b) Numa superfície BET(Brunauer-Emmett-Teller) armazenado sob condições semi-herméticas para diferentes tempos.

Na indústria alimentar de acordo com a FDA (Food and Drug Administration, United States) e a Organização Mundial da Saúde (OMS), os aditivos químicos são classificados como substâncias não nutritivas incorporadas aos alimentos geralmente em pequenas quantidades. Ou seja substâncias adicionadas com o objetivo principal de conservar o valor nutritivo das vitaminas e sais minerais.

Desta forma pode se dizer que os aditivos alimentares correspondem a qualquer componente por adição intencional ou não em alimentos tecnologicamente processados, Figura 2.3.

## 2.2 O uso de aditivos na biomassa

A participação da biomassa na matriz energética em Portugal como fonte de matéria-prima vem aumentando nos últimos anos. No referente à produção de péletes e briquetes há uma enorme participação dos países do norte, principalmente dos países do norte da europa, onde uma boa parte da energia elétrica produzida é oriunda de centrais termoelétricas alimentadas com briquetes e péletes, os quais são também usados para o aquecimento doméstico.

A biomassa é usada com a finalidade de melhorar as propriedades dos combustíveis sólidos e reduzir a emissão de gases com efeitos nocivos para atmosfera.

O uso de aditivos afeta negativamente os custos de produção dos briquetes e péletes. Porém reduz o desgaste e aumenta a resistência mecânica do combustível,

originando briquetes ou péletes com maior dureza mecânica menor porosidade (Tumurulo, 2001).

Geralmente os aditivos mais empregados na produção de péletes e briquetes são o amido, lignosulfanato (cálcio), óleos vegetais, sendo o glicerol um caso particular destes, e a lignina. Os lignosulfatos são polímeros aniónicos solúveis em água, obtidos como subproduto do processo de polpação sulfatosa de madeira (Lebo et al, 2001), Figura 2.4. No entanto, ressalta-se que este é considerado o agente mais efetivo para a produção de péletes.



Figura 2.3 - Aditivos naturais.

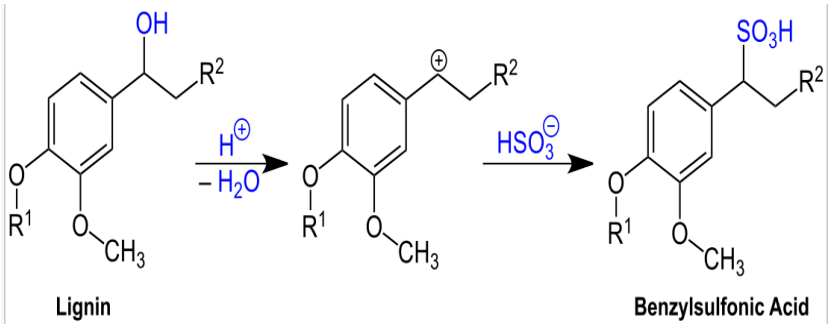



Figura 2.4 - Estrutura molecular dos lignosulfatos.

O amido é utilizado para aumentar a resistência na biomassa concretamente nos briquetes e nos péletes. Quimicamente falando é um polissacárido de reserva dos vegetais, armazenado por estes na forma de grânulos semi-cristalinos, formado por dois tipos de polímeros de glicose, amilose e a milopectina com estruturas e funcionalidades diferentes (Mali et al., 2010). A amilose é um polímero linear composto por unidades de D-glicose unidas por ligações alfa (1 a 4), com o grau de polimerização de 200 a 3000 variando em

função da fonte do amido. A amilopectina é um polímero altamente ramificado com unidades de D-glicose ligadas através de ligações alfas (1 a 4) e ramificações em alfa(1 a 6) (Ellis et al.,1998).

Na utilização do amido como agente ligante na produção de briquetes e péletes deve-se destruir uma estrutura granular semicristalina, originado assim uma matriz polimérica homogénea e essencialmente amorfa (Liu, 2005; Mali *et al*., 2010) onde se destaca o fenómeno de gelatinização e fusão para a destruição da organização dos grânulos de amido para a produção dos briquetes e dos péletes.

A gelatinização é a transformação irreversível do amido granular num fluido viscoelástico que ocorre com excesso de água rompendo as ligações de hidrogénio. A fusão consiste no aquecimento do amido por intermédio de uma pequena quantidade água e a uma elevada temperatura até acontecer a gelatinização. A seguir à gelatinização as moléculas de amido começam a se reassociar através das ligações de hidrogénio favorecendo a formação de uma estrutura mais ordenada (Van Soest *et al*., 1996; Mali *et al*., 2010)

Além da atuação como agente, o amido ligante atua também como lubrificante na matriz, facilitando o escoamento da matéria densificada (Tumurulo, 2011). As principais fontes do amido são o milho, a batata, o trigo e a mandioca (Ellis *et al*., 1998). Contudo, outros vegetais são igualmente fontes de amido para uso industrial, como por exemplo a batata-doce, o inhame, a ervilha, o feijão, o grão-de-bico e as lentilhas.

O glicerol é um composto oriundo do processo de transesterificação de óleos vegetais e gorduras a biodiesel, representa um subproduto que pode ser aproveitado na melhoria das propriedades físico-químicas da mistura combustível enriquecendo o produto final (Lacerda *et al*., 2014). O glicerol ou glicerina como é conhecido comercialmente, é miscível com água e álcool em óleos fixos e voláteis. Também não tem reatividade química com a água, possuindo um grau de pureza de até 99,5 %.

## 2.3 Outros usos dos aditivos

Os aditivos são usados em alguns processos tecnológicos, referindo-se aqui a fundição, como um caso exemplar. Uma das principais características do aditivo de fabricação com base na fusão e solidificação, é o uso de conhecimentos gerados por décadas na pesquisa sobre metalurgia e tecnologia de soldadura, com base no arco elétrico de alta energia (laser e feixe de eletrões). Compreender melhor o processo de fabrico de aditivo e as implicações sobre as características microestruturais das peças produzidas, incluindo a origem dos defeitos internos, como a morfologia dos defeitos, a localização e a quantidade de defeitos.

A maioria das aplicações industriais dos sistemas de aditivos de fabrico por feixes utilizam o laser, que sob o controlo do processo adequado produzem peças com boa precisão dimensional e acabamento da superfície predominante. Os sistemas à base de feixe de eletrões tendem a fornecer peças com melhores propriedades mecânicas, uma vez que o processo é desenvolvido numa câmara de vácuo a uma temperatura elevada uniforme o que diminui as tensões residuais que se acumulam durante a deposição da camada. Assim, salienta-se o aditivo de fabrico com arco elétrico e de plasma para peças de grande porte (Fernandes, 2007).

O TIG (Tungsten Inert gas) consiste na produção de um arco elétrico entre um elétrodo de tungsténio não consumível e a peça numa atmosfera dum gás inerte. O calor produzido pelo arco é suficiente para fundir a peça formando um banho de fusão ao qual se pode juntar um metal de adição para completar a soldadura (Fernandes, 2007), Figura 2.5.

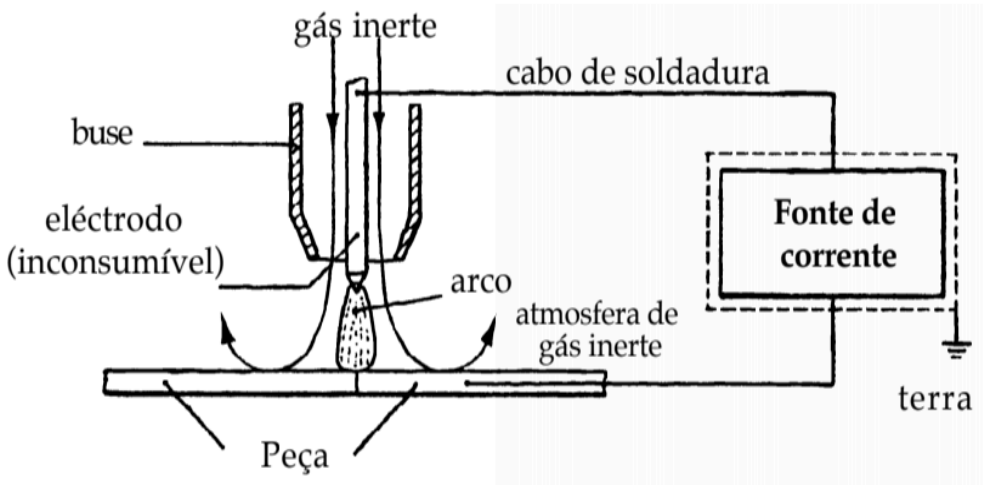



Figura 2.5 – Soldadura usando um gás inerte como aditivo

Neste processo usam-se elétrodos de tungsténio puro, e adiciona-se 1% a 2% (m/m) de tório sob a forma de óxido de tório ou zircónia (óxido de zircónio) como aditivos, trazendo vantagens evidentes para o processo. A adição destes óxidos ao tungsténio puro aumenta a emissão de eletrões melhorando deste modo o escorvamento (elemento usado para produzir explosão) do arco e a sua reignição, e portanto, a estabilidade do arco, ao mesmo tempo aumentam a duração dos elétrodos, e se reduz a possibilidade de introduzir inclusões no metal depositado.

# 3. Biomassa

## 3.1 Considerações gerais

As principais fontes de energia utilizadas globalmente, como o carvão e petróleo são responsáveis pela grande emissão de dióxido de carbono, óxido nitroso entre outros, contribuindo significativamente para a poluição do planeta, o que suscita a necessidade a procura de novas fontes de energias sustentáveis, principalmente fontes renováveis de energia (FER) como, a energia eólica, hídrica, geotérmica, solar, biomassa entre outros, que colaborem com o ciclo de carbono no meio ambiente (Toklu, 2017).

A biomassa corresponde a matéria orgânica utilizada para gerar energia limpa. Esta matéria provém de produtos e resíduos de origem biológica como sustâncias de origem animal e vegetal. Ela tem ainda a particularidade de poder ser convertida em combustíveis gasosos (nomeadamente biogás), líquidos (como por exemplo biodiesel, etanol ou metanol) ou sólidos (nomeadamente péletes, briquetes, etc.), o que não acontece com as restantes FER. A biomassa foi uma das primeiras fontes de energia a ser utilizada pela humanidade (Toklu, 2017).

Dentre as vantagens mais notórias do uso da biomassa para a produção de energia é possível citar:

- O baixo custo;
- O fato de ser uma fonte renovável;
- A capacidade de reaproveitamento de resíduos;
- O fato de ser menos poluente em comparação às tradicionais fontes não renováveis, como o carvão e o petróleo.

A biomassa pode ser considerada uma manifestação da energia solar, uma vez que tem origem no processo da fotossíntese. A energia solar incidente na superfície terrestre é cerca de 173.000 TW, o que corresponde a 17.000 vezes a energia que, atualmente, o Homem consome nos combustíveis fósseis. Por sua vez, a energia solar captada no processo da fotossíntese é apenas 140 TW, o que corresponde a uma percentagem mínima da energia solar incidente (0,08%) (Demirbas *et al.*, 2009; Abbasi e Abbasi, 2010)

Durante a fotossíntese, a energia solar é armazenada sob a forma de energia química através de reações entre a luz solar, água e dióxido de carbono, por intermédio

da clorofila, presente nas plantas verdes, algas e algumas bactérias. Durante os processos de conversão da biomassa em energia (via termoquímica ou bioquímica), ocorre a rutura das ligações químicas das moléculas de carbono, hidrogénio e oxigénio, libertando-se a energia química armazenada até então. O facto de ser o utilizador a decidir quando ocorrem estes processos de conversão e, consequentemente, o momento de libertação de energia, confere à biomassa um carácter único, não dependendo da intermitência da luz solar e sendo a única FER onde a energia do sol é facilmente armazenada à escala de vida humana (McKendry, 2002a; Abbasi e Abbasi, 2010). A expressão mais corrente da fotossíntese apresenta-se na equação 3.1.

$$\underset{\text{Dióxido de Carbono}}{6\,CO_2} + \underset{\text{Água}}{12\,H_2O} \xrightarrow[\text{Clorofila}]{\text{Luz Solar}} \underset{\text{Glicose}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{Oxigénio}}{6\,O_2} + \underset{\text{Água}}{6\,H_2O} \qquad (3.1)$$

Durante a combustão da biomassa liberta-se a mesma quantidade de dióxido de carbono que foi armazenada pela planta durante o seu crescimento (Zhang *et al*., 2010). Deste modo, a queima da biomassa, desde que gerida numa base de sustentabilidade, através de um plano adequado de reflorestação, não altera a composição da atmosfera em termos de $CO_2$ ao longo do tempo, em contraste com a queima dos combustíveis fósseis. Importa referir que o dióxido de carbono emitido nas atividades precedentes à combustão (como na produção e aplicação de fertilizantes, na sementeira e na colheita, transporte e densificação da biomassa) não está englobado na visão anterior, estando ainda estas emissões por contabilizar (Abbasi e Abbasi, 2010; Ferreira *et al*., 2013a).

Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em Portugal, entre 2008 e 2016, assistiu-se a um aumento da produção anual de energia renovável, passando de 4.242 ktep para 5.089 ktep (DGEG, 2017). Na Figura 3.1, apresenta-se a contribuição da energia elétrica, da biomassa e de outras renováveis (onde se inclui a solar térmica e a geotermia de baixa entalpia) na produção nacional de energia renovável, no ano de 2016, verificando-se que cerca de 60,5% da produção renovável provém da biomassa. É possível, ainda, analisar a contribuição das várias formas da biomassa, tais como lenha e resíduos florestais, licores sulfitivos, péletes e briquetes, biogás, biocombustíveis líquidos e outras (onde se inclui a fração renovável dos resíduos sólidos urbanos), na produção de energia renovável, em 2016.

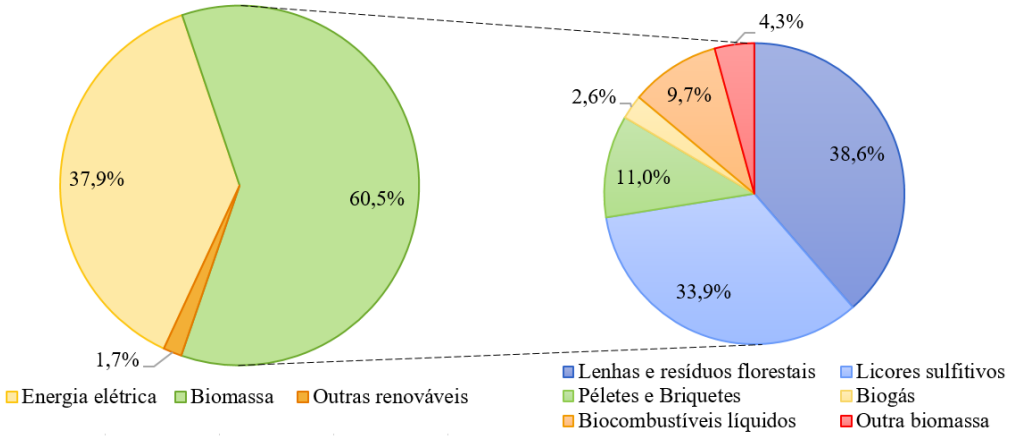



Figura 3.1 - Contribuição da energia elétrica, da biomassa e de outras renováveis na produção anual de energia renovável em Portugal, em 2016, DGEG(2017)

## 3.2 Propriedades da biomassa

A biomassa é constituída, essencialmente, por celulose, hemicelulose, lenhina, lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos e cinzas (Khan *et al.*, 2009). Os três primeiros são os principais constituintes da biomassa e compreendem cerca de metade da matéria da planta produzida por fotossíntese, representando a fonte orgânica renovável mais abundante da Terra (Abbasi e Abbasi, 2010). Na Tabela 3.1 apresenta-se a percentagem típica de hemicelulose, celulose e lenhina de alguns exemplos de biomassa (McKendry, 2002a).

Tabela 3.1 - Constituintes lignocelulósicos de alguns exemplos de biomassa

| Exemplos de biomassa | Hemicelulose | Celulose | Lenhina |
|---|---|---|---|
| Madeira de resinosas | 25 – 30 | 35 – 40 | 27 – 30 |
| Madeira de folhosas | 20 – 25 | 45 – 50 | 20 – 25 |
| Palha de trigo | 26 – 32 | 29 – 35 | 16 – 21 |
| Palha de cevada | 24 – 29 | 31 – 34 | 14 – 15 |
| Palha de centeio | 27 – 30 | 33 – 35 | 16 – 19 |
| Espiga de milho | 35 | 45 | 15 |
| Casca de noz | 25 – 30 | 25 – 30 | 30 – 40 |
| Bambo | 15 – 26 | 26 – 43 | 21 – 31 |

O poder calorífico, o teor de humidade, a massa volúmica, a quantidade de matérias voláteis, quantidade de carbono fixo, o teor de cinzas, o teor de metais alcalinos e a razão de celulose/lenhina são propriedades que afetam o desempenho da biomassa enquanto combustível (Ferreira *et al.*, 2013b).

### 3.2.1 Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível quantifica a energia despendida por unidade de massa, durante a combustão. Designa -se por poder calorífico superior (*PCS*) o valor máximo de energia que pode ser aproveitado da combustão, sob a condição de que a água formada durante a combustão se encontre no estado líquido. Por sua vez, o poder calorífico inferior (*PCI*) corresponde ao valor de energia caso tenha ocorrido a evaporação da água, sendo, portanto, a diferença entre o poder calorífico superior e o calor latente de vaporização da água (McKendry, 2002a; Pinho, 2011).

É de relevante importância referir que o poder calorífico apresenta desvantagens para a biomassa, tendo esta um valor mais reduzido do poder calorífico quando comparado com os combustíveis fósseis. Enquanto o carvão apresenta um *PCI* entre 25 e 30 MJ/kg, a maioria da biomassa apresenta um *PCI* entre 15 e 19 MJ/kg. No caso específico dos péletes de madeira com teor de humidade de 8 % (m/m, na base húmida), o *PCI* é cerca de 17,5 MJ/kg (EUBIA, 2017; Pinho, 2017).

### 3.2.2 Teor de humidade

O teor de humidade é o quociente entre a massa de água existente na biomassa e a sua massa total, podendo ser expresso em base húmida, em base seca e em base seca livre de cinzas. Sendo esta propriedade relevante para o comportamento da biomassa nos processos termoquímicos, em particular na combustão, é extremamente importante especificar a base utilizada na sua medição (Quaak *et al.*, 1999; McKendry, 2002a).

Dependentemente da biomassa (videira, tojo, kiwi e outros) existe uma vasta gama de teores de humidade, e do seu armazenamento, variando, na base húmida e em massa, entre 10 % (para os cereais) e 50 – 70 % (no caso de resíduos florestais e madeiras de poda de culturas agrícolas). Quanto maior for o teor de humidade, maior é a quantidade de água existente na biomassa, mais energia é utilizada na sua evaporação e, consequentemente, menor é a temperatura máxima possível de se obter no processo de combustão e maior é o tempo de residência necessário na câmara de combustão (Quaak *et al.*, 1999; Van Loo e Koppejan, 2008; Khan *et al*., 2009).

Sendo assim, quanto maior o teor de humidade, menor será o poder calorífico inferior do combustível (energia que se iria aproveitar), atingindo o valor nulo para um teor de humidade aproximadamente 87 % (na base húmida). No entanto, na prática, o teor de humidade não deve superar os 55 – 60 % na base húmida (Quaak *et al.*, 1999; Van Loo e Koppejan, 2008). Tal como referido, a biomassa com elevado teor de humidade provoca uma diminuição da temperatura na câmara de combustão, podendo ser tal que se atinja a temperatura mínima exigida para manter a combustão, impedindo a ignição do combustível e a consequente extração de energia. Por esta razão, antes dos processos termoquímicos é frequente proceder-se à secagem da biomassa para a transformar num produto apropriado para a queima. Saliente-se que, quanto maior for o teor de humidade inicial da biomassa, maior quantidade de energia será necessária nas etapa da secagem (Van Loo e Koppejan, 2008).

### 3.2.3 Massa volúmica

A massa volúmica é a propriedade física que relaciona a massa com o volume do objeto. Divide-se a massa volúmica em dois grupos: massa volúmica aparente (ou a granel) e a massa volúmica das partículas (Sui Lam e Sokhansanj, 2014).

Geralmente, o valor da massa volúmica aparente das diversas espécies de biomassa é mais reduzido quando comparado com a massa volúmica aparente do carvão betuminoso (entre 850 a 1000 kg/m$^3$) (Petrogal, 2018). Quanto menor for o valor desta propriedade, para uma dada massa, maior é o volume ocupado, levando a um aumento do espaço necessário para transportar e armazenar a biomassa e, consequentemente, maiores serão os custos de transporte e de armazenamento. Por outro lado, um reduzido valor desta propriedade leva a um reduzido valor do poder calorífico por unidade de volume, influenciando, portanto, o comportamento durante os processos de conversão energéticos da biomassa (McKendry, 2002a; Sui Lam e Sokhansanj, 2014). Assim sendo, é vantajoso proceder-se à densificação da biomassa, através de processos como a peletização e a briquetagem, com o intuito de aumentar a massa volúmica aparente. Esta propriedade pode passar de um valor de 50 – 125 kg/m$^3$ (biomassa não processada) para 450 – 650 kg/m$^3$ (no caso de péletes ou briquetes de madeira) (Werther *et al.*, 2000; Van Loo e Koppejan, 2008; Khan *et al*., 2009).

### 3.2.4 Quantidade de matérias voláteis e carbono fixo

O teor de voláteis é a parte libertada da biomassa e do aditivo que é libertada como gás, gás, incluindo o vapor de água, quando a biomassa é aquecida a uma temperatura de 950 °C durante 7 minutos (McKendry, 2002a; Abbasi e Abbasi, 2010). A massa restante, depois da libertação dos voláteis, corresponde ao carbono fixo. A biomassa apresenta elevadas quantidades de substâncias voláteis, geralmente superando os 80 % (Quaak *et al.*, 1999).

### 3.2.5 Teor de cinzas

As cinzas correspondem a formação de resíduos sólidos durante a conversão da biomassa nos processos termoquímicos e bioquímicos, contendo maioritariamente matéria mineral. As cinzas afetam negativamente os custos de manuseamento e podem causar sérios

problemas operacionais durante o processamento da biomassa, mais propriamente, durante a combustão e gasificação (Quaak *et al.*, 1999; Sui Lam e Sokhansanj, 2014).

O teor de cinzas varia de forma significativa entre os biocombustíveis, representando menos de 0,5 % nos derivados da madeira, 5 a 10 % nos diversos produtos resultantes das culturas agrícolas, podendo atingir entre 30 a 40 % nos resíduos das estufas (Quaak *et al*., 1999; Khan *et al.*, 2009).

### 3.2.6 Teor de metais alcalinos

O teor de metais alcalinos (tais como Na, K, Mg, P e Ca) é um importante fator nos processos termoquímicos, uma vez que, estes elementos reagem com a sílica presente na cinza, produzindo escória (líquido de viscosidade elevada). Este composto pode obstruir as superfícies de transferência de calor e as entradas de ar na fornalha, podendo causar sérios problemas operacionais durante a combustão (McKendry, 2002a).

### 3.2.7 Razão celulose/lenhina

Esta propriedade é apenas importante nos processos de conversão bioquímicos. Como a celulose apresenta uma biodegradabilidade superior à lenhina, as plantas com maior quantidade de celulose apresentam uma maior conversão de carbono, sendo um fator determinante na seleção do tipo de biomassa para estes processos de conversão (McKendry, 2002a). A lenhina é um componente essencial para as operações de peletização e briquetagem, uma vez que funciona como aglomerante natural, facilitando as operações de densificação supracitadas (Muazu *et al*., 2017).

# 4. Tecnologias de conversão da biomassa

## 4.1 Considerações gerais

A biomassa pode ser transformada em três formas de energia: eletricidade, e energia calorífica. Devido à sua elevada variabilidade, existem diversos processos de transformação da biomassa em energia, sendo necessário escolher o adequado de acordo com o tipo de biomassa e o tipo de aplicação térmica. A conversão da biomassa em energia útil pode ocorrer através de processos físicos, físico-químicos, termoquímicos e bioquímicos, tal como é possível observar na Figura 4.1 (McKendry, 2002b; ANEEL, 2009; Abbasi e Abbasi, 2010; Zhang *et al.*, 2010).

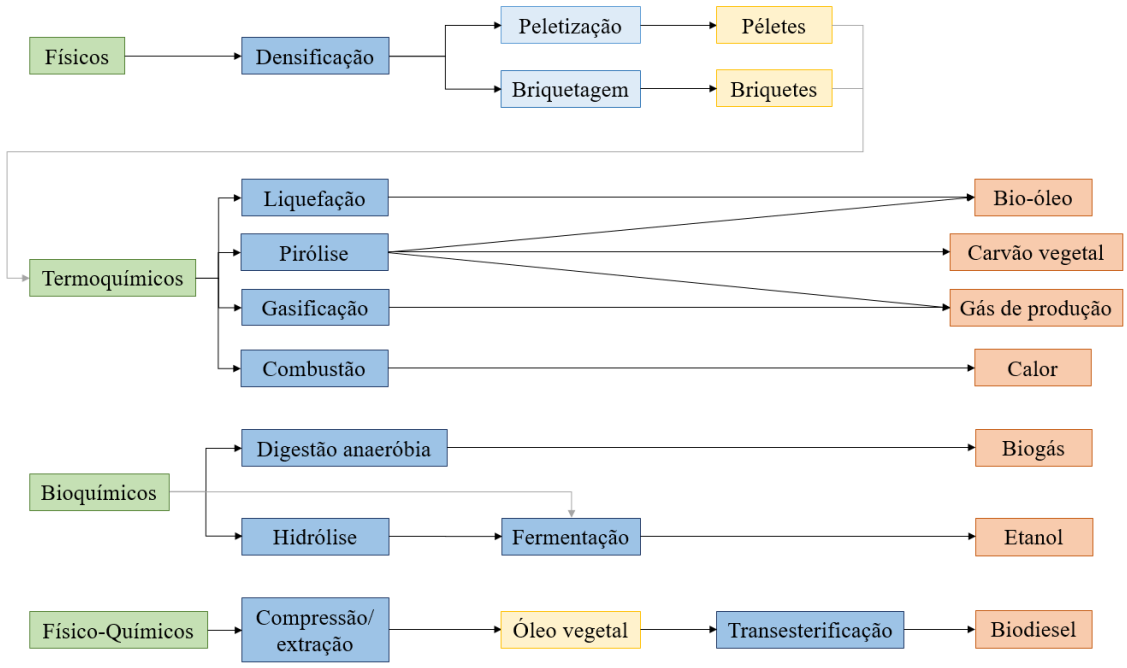



Figura 4.1 - Processos de conversão energético da biomassa (Silva 2018).

## 4.2 Processos físicos

Não são considerados exatamente um processo de conversão energética da biomassa, uma vez que atuam apenas fisicamente sobre toda a biomassa. Os processos físicos, tendo como matéria-prima resíduos florestais ou partículas de carvão vegetal, estão associados a todas as etapas primárias da transformação da biomassa, como o corte, a moagem da palha, a secagem, a densificação, entre outros (Werther *et al.*, 2000; PER, 2018).

Tal como foi referido anteriormente, a biomassa, no seu estado natural, apresenta várias desvantagens como combustível, nomeadamente na dificuldade de manuseamento, nos custos elevados de transporte e armazenamento e mesmo em questões energéticas verificadas no processo de combustão. Este combustível apresenta alto teor de humidade, geometria irregular e variável e, quando comparado com os combustíveis fósseis convencionais, reduzida massa volúmica aparente, reduzida densidade energética e composição química mais complexa (Almeida *et al.*, 2013; Ferreira *et al*., 2013a). A densificação é, então, um processo fundamental de compactação da biomassa, que consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligantes ou tratamento térmico (PER, 2018).

Como exemplos de processos de densificação destacam-se a peletização e a briquetagem. Estes processos envolvem complexas interações entre as partículas que constituem a biomassa, sendo influenciados pelas características da matéria-prima após o destroçamento (teor em humidade e distribuição das partículas) e pelas variáveis do próprio processo (pressão aplicada e temperatura atingida). Permitem melhorar as propriedades físicas da biomassa sólida, transformando-a num material densificado e com geometria regular, facilitando o manuseamento e diminuindo os custos de transporte e armazenamento (Ferreira *et al.*, 2013b; Almeida *et al*., 2014). Para além disto, estes processos provocam um aumento do valor do *PCI* da biomassa (podendo resultar num valor de mais de 5 vezes do *PCI* na forma não compactada) e permitem uma combustão mais uniforme, com menor emissão de partículas para a atmosfera (Werther *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2015).

O processo de briquetagem será abordado na próxima secção com maior detalhe, visto ser o processo de densificação dos combustíveis sólidos utilizados nos ensaios de

queima da presente dissertação. No entanto, nesta fase, considerou-se relevante fazer uma distinção entre os briquetes e os péletes, uma vez que são produtos resultantes de processos muito semelhantes. Os briquetes variam bastante na sua dimensão e forma, apresentando, na maioria das vezes, uma geometria cilíndrica e uma dimensão superior aos péletes (Kristoferson e Bokalders, 2011). O processo de peletização apresenta algumas vantagens face à briquetagem, incluindo uma maior gama de teor de humidade admissível da biomassa e uma maior produção. Por outro lado, a peletização também é um processo mais exigente, tanto ao nível do tratamento da biomassa antes do processo (corte, moagem e prensagem) como dos equipamentos requeridos. O processo de briquetagem apresenta, deste modo, custos de investimento e de operação mais reduzidos, bem como equipamentos menos sofisticados (Werther *et al*., 2000; Khan *et al*., 2009). Na Tabela 4.1, apresenta-se uma síntese das propriedades e características dos produtos de densificação supramencionados ( Van Loo e Koppejan, 2008).

Tabela 4.1-Comparação entre as propriedades e características dos péletes e briquetes

| | **Péletes de madeira** | **Briquetes de madeira** |
|---|---|---|
| Diâmetro [mm] | 4 – 10 | 40 – 120 |
| Comprimento [mm] | < 5 vezes o diâmetro | < 400 |
| Massa volúmica das partículas [t/m$^3$] | > 1,12 | > 1,00 |
| Teor de humidade admissível [%] | 10 – 20 | 10 – 15 |
| Produção máxima [t/h] | 4 – 6 | 1 – 1,5 |
| Energia consumida (corte e prensagem [kWh/t] | 80 – 90 | 40 – 50 |

## 4.3 Processos termoquímicos

Em relação à conversão via termoquímica, existem quatro tecnologias principais, como se pode observar na Figura 4.1: a liquefação, a pirólise, a gasificação e a combustão; permitindo a obtenção de energia sob a forma de calor ou de combustível (carvão vegetal, combustível líquido e combustível gasoso). No geral, estes processos envolvem a conversão da energia química armazenada na biomassa, através de processos térmicos, nomeadamente através do aquecimento da biomassa na presença de diferentes concentrações de oxigénio (Van Loo e Koppejan, 2008; Abbasi e Abbasi, 2010).

Os processos termoquímicos são caracterizados, de forma sucinta, de seguida:

- **Liquefação:** processo de conversão da biomassa em produtos essencialmente de matriz líquida, utilizando baixas temperaturas, compreendidas entre 250 e 350 °C, e altas pressões na gama de 100 a 200 bar, normalmente com uma elevada pressão parcial de hidrogénio e na presença de um catalisador. Deste processo, resulta maioritariamente um combustível em fase líquida, o bio-óleo (como identificado na Figura 4.1). Este pode ser transformado num combustível líquido para os motores de combustão interna ou usado diretamente na produção de eletricidade ou calor (Van Loo e Koppejan, 2008; Miguel, 2016; PER, 2018).

- **Pirólise:** consiste na degradação térmica da biomassa que ocorre na ausência de oxigénio, do qual podem resultar três produtos distintos: carvão vegetal carbonizado (resíduo sólido carbonoso), bio óleo e gás de produção (também designado gás de síntese ou *syngas)*. A fração de cada produto é função da temperatura de operação, do tempo de permanência, da taxa de aquecimento e, em menor escala, da pressão de operação (Demirbas *et al*., 2009; Zhang *et al.*, 2010). Dependendo destes fatores, a pirólise pode ser dividida em três subgrupos, pirólise rápida, pirólise intermédia e pirólise lenta. Na pirólise rápida, a biomassa é aquecida a uma temperatura na ordem dos 500 °C, durante um curto intervalo de tempo (1 segundo), e de seguida submetida a um arrefecimento rápido. Este processo favorece a formação de combustíveis líquidos, inibindo a formação de sólidos, sendo o bio óleo o seu principal produto. Por outro lado, a pirólise lenta, também designada carbonização, ocorre a uma temperatura mais reduzida (entre 300 e

400 °C) e com um tempo de duração mais longo, tendo como principal objetivo produzir carvão vegetal (McKendry, 2002b; Di Blasi, 2008; Zhang *et al.*, 2010).

- **Gasificação**: processo de decomposição térmica de um material sólido, rico em carbono, num combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas na ordem dos 800 a 1100 °C. Este processo ocorre na presença de pouca concentração de oxigénio, superior à pirólise e inferior à combustão (tipicamente cerca de 35% da concentração da combustão completa). O principal produto deste processo é o gás de produção, sendo constituído maioritariamente por $H_2$, CO, $CO_2$, $CH_4$ e hidrocarbonetos leves. Ao contrário da combustão cujo objetivo é geração de calor, na gasificação o intuito é formar produtos gasosos que podem ser usados diretamente na combustão ou armazenados para outras aplicações (McKendry, 2002b; Zhang *et al.*, 2010).

## 4.4 Processos bioquímicos

Enquanto os processos termoquímicos conseguem converter em energia a maioria dos componentes orgânicos da biomassa, os processos bioquímicos apenas convertem os compostos polissacarídeos. Estes processos são caracterizados pela utilização de agentes biológicos, como enzimas, bactérias e outros microrganismos, para converter a biomassa em açúcares e, posteriormente, em biocombustíveis líquidos ou gasosos (Abbasi e Abbasi, 2010; Zhang *et al.*, 2010). Neste grupo estão incluídos os processos de hidrólise, fermentação e digestão anaeróbia, caracterizados de seguida:

- **Hidrólise:** decomposição da biomassa lignocelulósica, composta por polissacarídeos, em açúcares mais simples e solúveis para eventual fermentação, pela ação de enzimas (Mata, 2017).

- **Fermentação:** processo biológico em que os açúcares provenientes da hidrólise são convertidos em etanol, com libertação de $CO_2$, por intermédio de microrganismos. A fermentação é a tecnologia mais empregue a nível mundial para a produção de etanol (McKendry, 2002b; Mata, 2017).

- **Digestão anaeróbia:** conversão da biomassa em biogás por intermédio de bactérias num ambiente pobre em oxigénio (McKendry, 2002b; Cantrell *et al.*, 2008).

## 4.5 Processos físico-químicos

Os processos de conversão físico-químicos consistem, inicialmente, numa compressão ou prensagem de matérias vegetais diversas (conversão mecânica), seguida da extração de óleos vegetais, para posterior transformação química, por exemplo, através do processo de transesterificação. Este processo tem como produto final o biodiesel e consiste numa reação química onde os óleos vegetais, mais propriamente os triglicerídeos que os constituem, reagem com um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador. O processo mais comum é a transesterificação alcoólica por via catalítica ácida, básica ou enzimática (Srivastava e Prasad, 2000; Ho *et al.*, 2016).

# 5. Processo de briquetagem

O processo de briquetagem por compactação direta pode ser alcançado através de prensas de pistão (hidráulicas ou mecânicas) ou prensas de parafuso, representada na figura seguinte. Nas prensas de parafuso, a biomassa é extrudida continuamente por um parafuso, através de uma matriz cónica. O parafuso é normalmente pré-aquecido de maneira a diminuir o atrito o atrito durante o movimento rotativo. Já nas prensas de pistão, como a que é utilizada na presente dissertação, a biomassa é pressionada para o interior de um molde, através de um pistão a alta pressão, num movimento descontínuo e periódico. Em ambas as tecnologias, a elevada pressão aplicada sobre a biomassa provoca um aumento da temperatura da mesma. A lenhina, com este aumento da temperatura, liquidifica, transformando-se num agente ligante natural (Grover e Mishra, 1996; Granada, 2002).

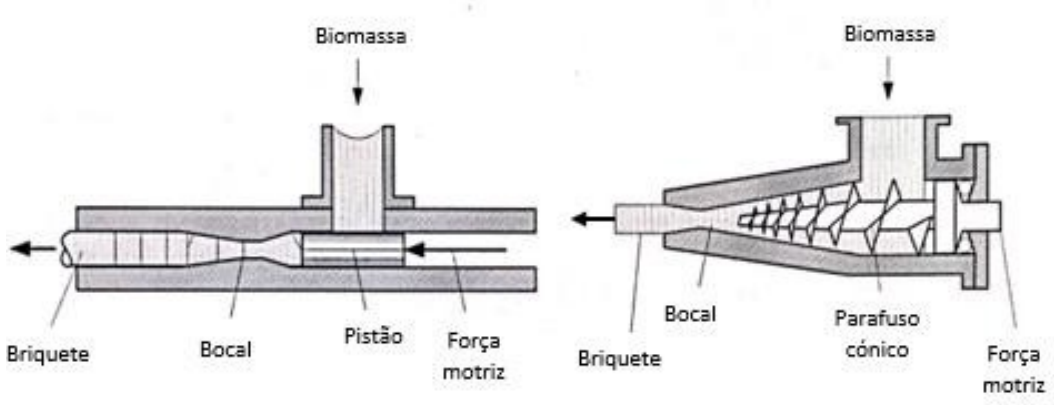



Figura 5.1 - a) Prensa de pistão; b) Prensa de parafuso.

### Briquetadora 70N

A máquina de briquetagem é uma máquina de pistão hidráulico, onde a força motriz do pistão é transmitida de um motor elétrico através de um sistema hidráulico de alta pressão (Tumuluru, 2010). As características técnicas da briquetadora utilizada estão descritas na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Características técnicas da briquetadora COMAFER 70N

| Característica | Valor |
|---|---|
| Produção indicativa | 30 a 60 kg/h |
| Diâmetro dos briquetes produzidos | 55 mm |
| Comprimento dos briquetes a cada compactação | 40 mm |
| | |
| Potência do motor | 5 kW |
| Voltagem | 400 V |
| Frequência | 50 Hz |
| | |
| Diâmetro dos cilindros | 120 mm |
| Número de cilindros | 3 |
| Valor máximo da pressão no sistema hidráulico | 200 bar |
| Valor máximo da pressão no cilindro de compactação | 120 bar |
| Valor máximo da pressão de compactação | 570 bar |
| Valor máximo da força de compactação | 13,5 t |
| | |
| Diâmetro da câmara de admissão | 1000 mm |
| Altura da câmara de admissão | 930 mm |
| Volume da câmara de admissão | 0,7 $m^3$ |
| Volume de matéria admissível na câmara de admissão | 100 kg |

A briquetadora COMAFER 70 N está representada na Figura 5.2. A numeração representa os diferentes componentes. Seguidamente será feita uma pequena descrição de cada componente. O conjunto de gaveta, que antecede o cilindro hidráulico azul observável na Figura 5.2 não é visível a olho nu e não se achou por bem desmantelar a máquina, pelo que não haverá componente a ser identificado pelo número 3. Os componentes hidráulicos estão dispersos no sistema pelo que não seria correto atribuir o número 6 a só um elemento (Braga, 2019).




Figura 5.2 – Imagens da briquetadora COMAFER 70N presente no laboratório de combustão (Braga, 2019).

1. **Conjunto de gaveta:** responsável pela distribuição da quantidade de material e restringimento da mesma, através da transferência da biomassa até à câmara de compressão, contribuindo para a pré-compressão da mesma. A gaveta admite a quantidade de biomassa a ser comprimida e transporta-a. Este conjunto é também dotado de um botão que varia o volume admitido. Aumentando a abertura da gaveta, o material admitido aumenta e consequentemente o tamanho dos briquetes.
2. **Unidade de compressão:** tem como função a compressão da biomassa, transformando-a num briquete sólido. É composto por um cilindro hidráulico de compactação, um pistão e câmaras de compressão e compactação. O pistão move o material pré-compactado até à câmara de compactação.
3. **Unidade de prensagem:** conjunto de continuidade da compressão do material. Tem a função de reter o briquete, impedindo o seu movimento progressivo, permitindo uma compressão extra pelo tubo de extrusão. É possível variar a secção do tubo de extrusão a partir de um cilindro hidráulico acoplado.
4. **Componentes hidráulicos:** sendo uma máquina hidráulica, esta prensa de pistão está

dotada de inúmeros componentes que possibilitam o seu bom funcionamento como válvulas de sequência, válvulas de inversão, bombas e cilindros hidráulicos. Não serão componentes extensamente abordados.

5. **Painel de controlo elétrico:** tem como função alimentar os componentes elétricos assim como permitir o comando da máquina a partir de um operador.

## 5.3 Pré-tratamento

O pré-tratamento do material corresponde à secagem do material, seguida do seu destroçamento e acondicionamento. Depende das condições em que a biomassa se encontra inicialmente e inclui todas as etapas, desde a colheita até ao processo de densificação. Depois da recolha da biomassa, é necessário efetuar a limpeza do material, reduzindo as impurezas contidas na matéria-prima (tais como terra, areias, partes de metais, vidros e plásticos). Deste modo, garante-se uma melhoria da qualidade do material, permitindo um melhor controlo do processo de densificação e um melhor comportamento dos briquetes durante a combustão (Van Loo e Koppejan, 2008).

A biomassa no seu estado natural apresenta um teor de humidade bastante variável, podendo atingir um valor da ordem dos 70 % (m/m), na base húmida (Muazu *et al.*, 2017). O processo de briquetagem é influenciado, entre outros fatores, pelo teor de humidade do material, devendo-se encontrar na gama entre 10 a 15 % (m/m), na base húmida (Werther *et al*., 2000). Se a matéria-prima estiver demasiado húmida, nem toda a humidade evapora durante o processo de briquetagem, aumentando o volume dos briquetes, levando a uma redução das suas propriedades mecânicas e comprometendo a sua eficiência durante o processo de conversão energético (Van Loo e Koppejan, 2008). A secagem permite, assim, uma melhoria no controlo do processo de briquetagem, uma otimização do processo de combustão, aumentando o seu rendimento e diminuindo as emissões associadas, e uma melhoria na qualidade dos briquetes, reduzindo o risco de degradação biológica pelo aparecimento de fungos. O processo de secagem consome bastante energia, podendo ser uma contribuição significativa para o total de energia consumida durante todo o processo da briquetagem, dependendo, logicamente, da quantidade de humidade a ser removida. A secagem também pode estar inerente a uma maior ou menor emissão dos GEE, dependendo do tipo de estufa, capacidade, temperatura e duração desta etapa (Van Loo e Koppejan, 2008; Muazu *et al.*, 2017).

A etapa de destroçamento tem como objetivo a redução e homogeneização das partículas constituintes da biomassa. Neste processo, o material é cortado, triturado e moído, sendo na maioria das vezes utilizado um moinho de martelos. A energia consumida neste processo depende essencialmente da redução de tamanho exigida e do tipo e da morfologia da biomassa (Van Loo e Koppejan, 2008; Muazu *et al*., 2017).

Por sua vez, o processo de acondicionamento consiste na adição de vapor de água ou outros aditivos à matéria-prima, tendo como objetivo a formação de um filme de água superficial, melhorando os mecanismos de adesão e ligação das partículas durante o processo. Geralmente, não é necessária a adição de ligantes, pois devido à alta temperatura atingida durante o processo de briquetagem, a lenhina, polímero termoplástico, sofre um processo designado transição vítrea, atuando ela própria como um agente de ligação natural entre partículas (Furtado *et al*., 2010; Muazu *et al.*, 2017).

## 5.4 A briquetagem

Neste trabalho fabricaram-se seis tipos de briquetes com diferentes aditivos como consta na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tipos de briquetes fabricados.

| Tipo | Biomassa | Aditivo |
|---|---|---|
| TC | Tojo | Caulino |
| TA | Tojo | Amido |
| TG | Tojo | Glicerol |
| VC | Videira | Caulino |
| VA | Videira | Amido |
| VG | Videira | Glicerol |

Todos os briquetes foram feitos com as mesmas percentagens de biomassa nomeadamente tojo e videira com três tipos de aditivos (amido, caulino e glicerol), como

é mostrado nas figuras seguintes.

**Briquetes do tipo TC:** correspondem ao briquete com 97 % de tojo e 3 % de caulino (uma solução em pó de cor branca). o briquete apresenta uma cor esverdeada cor característica dos briquetes feito de tojo e um acabamento superficial rugoso caraterístico dos aditivos em pó, Figura 5.3.



Figura 5.3 - Briquetes do tipo TC, com 97% de tojo e 3% de caulino.

**Briquetes do tipo TA** correspondem ao briquete com 97 % de tojo e 3 % de amido (uma solução em pó de cor branca). o briquete também apresenta uma cor esverdeada cor característica dos briquetes feito de tojo e um acabamento superficial rugoso caraterístico dos aditivos em pó, Figura 5.4.



Figura 5.4 - Briquete do tipo TA com 97 % de biomassa e 3 % de amido.

**Briquetes do tipo TG** correspondem ao briquete com 97% de tojo e 3% de glicerol (uma solução líquida e com uma boa viscosidade). o briquete apresenta uma cor esverdeada e preta, cor característica dos briquetes feito de tojo e um acabamento superficial liso devido ao efeito do glicerol que melhorou a coesão entre as partículas de biomassa proporcionando assim o acabamento aparentemente mais polido, Figura 5.5.



Figura 5.5 - Briquete do tipo TG com 97 % de biomassa e 3 % de glicerol.

**Briquetes do tipo VA** correspondem a 97 % de videira e 3% de amido (uma solução em pó de cor branca). o briquete apresenta uma cor castanha, cor característica dos briquetes feito de videira e um acabamento superficial rugoso caraterístico dos aditivos em pó, Figura 5.6.



Figura 5.6 - Briquetes do tipo VA com 97 % de biomassa e 3 % de amido.

**Briquetes do tipo VC** corresponde ao briquete com 97% de biomassa (videira) e 3% de caulino (uma solução em pó de cor branca). o briquete apresenta uma cor castanha, cor característica dos briquetes feito de videira e um acabamento superficial rugoso caraterístico dos aditivos em pó, Figura 5.7.



Figura 5.7 - Briquetes do tipo VC com 97 % de videira e 3 % de caulino.

**Briquetes do tipo VG** corresponde ao briquete com 97% de biomassa (videira) e 3% de glicerol (uma solução líquida e viscosa), o briquete apresenta uma cor castanha, cor característica dos briquetes feito de videira e um acabamento superficial liso caraterístico dos aditivos líquido-viscoso, Figura 5.8.



Figura 5. 8 - Briquetes do tipo VG com 97 % de biomassa e 3 % de glicerol.

## 5.5 Pós-tratamento

Durante o processo de densificação, ocorre um aumento de temperatura dos briquetes, sendo, geralmente, necessário proceder-se a um arrefecimento cuidado do material, antes do seu empacotamento e armazenamento. Seguidamente, ocorre a triagem do material, onde pode ser necessário a remoção de finos dos briquetes produzidos, levando a uma homogeneização do material final. Para facilitar o transporte, a distribuição e, também, para proteger a biomassa do meio envolvente, os briquetes são normalmente embalados (Van Loo e Koppejan, 2008; Muazu *et al.*, 2017).

# 6. Combustão

## 6.1 Introdução

A combustão é uma reação exotérmica rápida de oxidação de um combustível. Os fenómenos deste processo apresentam elevada complexidade, sendo o seu estudo do domínio de três ramos da ciência, a Química, a Termodinâmica e a Aerodinâmica (Pinho, 2011). O processo de combustão depende tanto da aplicação da combustão como das propriedades do combustível, nomeadamente o teor de humidade, o tamanho de partícula, a composição elementar e imediata e o poder calorífico (Quaak *et al.*, 1999; Van Loo e Koppejan, 2008).

Para uma descrição completa da combustão é necessário conhecer a equação química referente ao processo. Primeiramente, importa referir que, durante a combustão, existe conservação da massa, pelo que o número de átomos de cada elemento é o mesmo, tanto nos reagentes como nos produtos (Pinho, 2011).

Nesta fase inicial, considera-se o combustível um hidrocarboneto simples, $C_xH_y$, e o comburente o ar atmosférico, sendo composto, simplificadamente, por 21 % de $O_2$ e 79 % de $N_2$ (em volume). Se nos produtos da combustão aparecerem moléculas combustíveis, como por exemplo monóxido de carbono, hidrogénio e hidrocarbonetos, a combustão diz-se incompleta. Em contrapartida, se todo o combustível for queimado, ou, por outras palavras, quando todos os elementos presentes no combustível (C, H, S, etc.) se combinam com o oxigénio do ar, produzindo produtos finais quimicamente estáveis, a combustão diz-se completa. A quantidade mínima de ar que fornece o $O_2$ necessário e suficiente para a combustão completa designa-se ar teórico, sendo, neste caso, a mistura ar/combustível conhecida por mistura estequiométrica (Nogueira *et al.*, 2005; Pinho, 2011). Atendendo a todos os conceitos introduzidos, a equação estequiométrica da reação de combustão entre um hidrocarboneto simples e o ar atmosférico é dada pela equação 6.1.

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3{,}76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2 \quad (6.1)$$

A quantidade de ar realmente fornecida ao processo é expressa em termos de percentagem de ar teórico. Para isso definiram-se parâmetros que são frequentemente utilizados na análise da combustão: a razão $AC$, sendo a razão entre a massa de ar e a massa do combustível; a razão $CA$, inverso do parâmetro anterior; e a riqueza da mistura $r$, definida pelo quociente entre $AC$ estequiométrica e $AC$ real. Deste modo, se $r = 1$ a combustão é neutra, sendo a mistura ar/combustível estequiométrica; se $r > 1$ a combustão é redutora, sendo a mistura rica e existindo excesso de combustível; e se $r < 1$ a combustão é oxidante, sendo a mistura pobre e existindo excesso de ar. No caso geral da combustão em fornalhas, as misturas são predominantemente pobres, empregando-se o conceito de excesso de ar $e$, definido na equação 6.1 (Pinho, 2011). Contudo, a determinação prática do excesso de ar é realizada por intermédio da medição da composição dos gases de combustão, na base seca.

$$e = \frac{1-r}{r} \tag{6.2}$$

Apesar da combustão dever processar-se com excesso de ar, para garantir a queima do combustível, importa referir que quanto maior o valor do excesso de ar, menor o comprimento da chama e menores as temperaturas da corrente de gases de combustão, diminuindo a energia térmica disponível. Na Figura 6.1, apresenta-se a dependência da temperatura da câmara de combustão com o ar de combustão, identificando a zona da combustão incompleta, a zona ótima e a zona inconveniente dado a temperatura dos gases ser muito reduzida (zona da combustão a baixa temperatura). O valor ótimo do excesso de ar depende da fornalha, do combustível e do sistema de combustão, sendo que, valores típicos para a queima de madeira em caldeiras sofisticadas encontram-se na gama de 160 a 250 % (Quaak *et al.*, 1999).

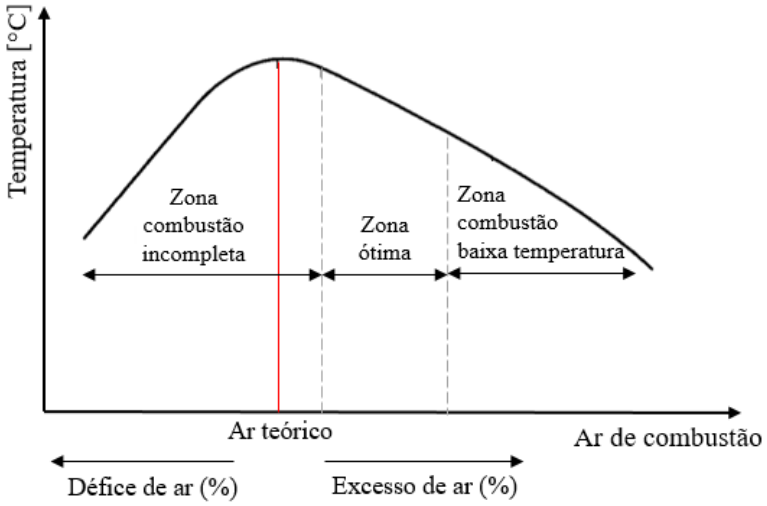



Figura.6. 1 - Representação gráfica da temperatura em função do ar de combustão (McGowan *et al*., 2010).

Introduzindo, agora, o conceito de excesso de ar, a reação de combustão oxidante completa de um hidrocarboneto simples é dada pela equação 6.3.

$$C_xH_y + \left(1 + \frac{e}{100}\right)\left(x + \frac{y}{4}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + \frac{e}{100}\left(x + \frac{y}{4}\right)O_2 + \left(1 + \frac{e}{100}\right)3{,}76\left(x + \frac{y}{4}\right)N_2 \quad (6.3)$$

Contudo, na prática, a combustão oxidante não é completa, mas incompleta, como é o caso apresentado na presente dissertação. Neste tipo de combustão, os produtos de combustão, para além de $CO_2$, $H_2O$, $O_2$ e $N_2$, ainda englobam CO, $NO_x$, $H_2$, hidrocarbonetos não queimados e partículas sólidas (Pinho, 2011).

## 6.2 Estágios da combustão

A combustão da biomassa inicia-se quando ocorre a ignição do combustível. A fase seguinte designa-se secagem, processo que envolve a evaporação da água contida na biomassa. O peso de cada uma destas fases é dependente do tipo de combustível e respetivas propriedades (Khan *et al*., 2009). À medida que a biomassa perde humidade, a sua temperatura aumenta, seguindo-se a fase da pirólise (volatilização), onde são libertadas as espécies voláteis do combustível. Assim sendo, a secagem e a pirólise

provocam uma drástica perda de massa do material, como é possível verificar na Figura 6.2. Seguidamente, inicia-se a combustão do resíduo sólido carbonoso, restando no final do processo a parte inorgânica da biomassa, as cinzas (Quaak *et al.*, 1999; Van Loo e Koppejan, 2008; Khan *et al*., 2009).

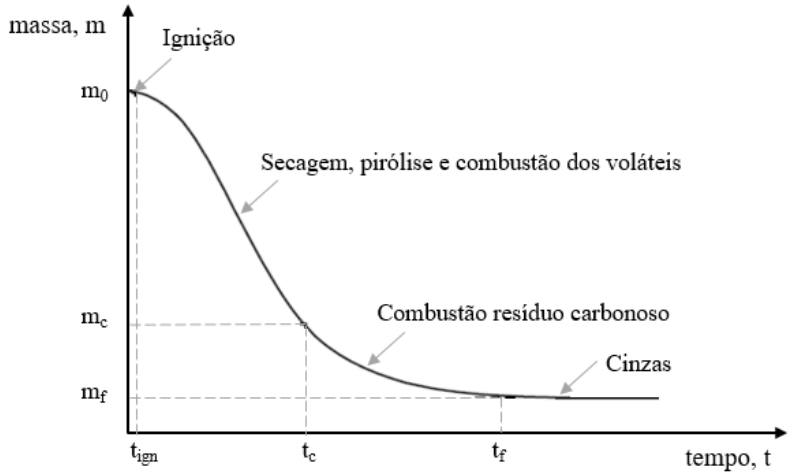



Figura.6.2 - Representação gráfica da massa do material em função do tempo. Adaptado de: Ferreira (2013).

De seguida, são caracterizados os vários estágios do processo da combustão.

## 6.2.1 Ignição

A ignição de uma mistura combustível/comburente pode ocorrer de duas formas distintas: espontânea ou forçada. A primeira é um fenómeno pouco habitual, ocorrendo quando se observam certas condições de pressão, temperatura e composição, levando ao embalo da velocidade da reação de oxidação, iniciando-se a combustão viva. À temperatura mínima a partir da qual se inicia a combustão viva chama-se temperatura de auto-inflamação (Pinho, 2011).

A ignição forçada, mais usual, ocorre por meio da aplicação de uma fonte de calor exterior. Neste caso, ocorre a auto-inflamação numa pequena parte da mistura, podendo, sob certas condições, as reações de combustão propagarem-se a todo o volume da mistura. Saliente-se que a ignição de uma mistura exige uma quantidade mínima de energia designada energia mínima de ignição, a qual depende essencialmente da composição da mistura combustível/comburente (Pinho, 2011).

### 6.2.2 Secagem

Consiste na evaporação da água contida no material. Uma vez que a secagem é um processo endotérmico, utiliza a energia proveniente da combustão, tendo como consequência a redução da temperatura da câmara de combustão, aumentando o tempo de residência necessário e, consequentemente, atrasando o processo. A biomassa não deve ter um teor de humidade superior a 60 %, para ser possível a ignição do combustível. (Quaak *et al.*, 1999; Pinho, 2011)

### 6.2.3 Pirólise

Quando a temperatura da biomassa é suficientemente elevada, inicia-se a fase da pirólise, também designada volatilização, decorrendo assim o processo de decomposição térmica do combustível em gases voláteis e resíduo sólido carbonoso. A libertação de voláteis impede que o oxigénio externo penetre no interior das partículas, pelo que a pirólise é caracterizada pelo estágio na ausência de oxidante (Quaak *et al.*, 1999).

A volatilização inicia-se com a quebra de ligações químicas dos principais constituintes da matéria seca da biomassa (hemicelulose, celulose e lenhina). Inicialmente, a uma temperatura entre 200 e 380 °C, ocorre a pirólise da hemicelulose, sendo, portanto, o componente com maior reatividade. Na gama de temperaturas entre 280 e 430 °C, ocorre a pirólise da celulose, seguindo-se a pirólise da lenhina entre as temperaturas 280 e 580 °C, sendo este último o componente com menor reatividade (Zhao *et al.*, 2017).

Os produtos resultantes deste processo são gases e carvão vegetal carbonizado, sendo que a quantidade e o tipo de produtos libertados dependem tanto da composição do combustível, como das condições de operação (temperatura, pressão, taxa de aquecimento e tempo de reação) (Werther *et al*., 2000; Van Loo e Koppejan, 2008). Dentro dos gases que se formam nesta fase, encontram-se o vapor de água, óxidos de carbono (tanto $CO_2$ como CO), $H_2$ e hidrocarbonetos leves ($CH_4$, $C_2H_2$), incluindo moléculas de massa molecular mais elevada que condensam à temperatura ambiente (alcatrões). Relativamente à matriz sólida carbonizada, este produto é constituído por cinzas e um elevado teor de carbono, geralmente com quantidades superiores a 75% (em massa), sendo que a sua estrutura e composição é função do tipo de material original e da fase de pirólise (Van Loo e Koppejan, 2008; Zhao *et al*., 2017). (Silva 2018).

Após a pirólise, ocorre a combustão dos gases voláteis libertados, caracterizada pelas chamas maioritariamente amarelas. No processo de combustão, estes gases podem representar cerca de 70% do poder calorífico associado à biomassa (Quaak *et al*., 1999; Werther *et al*., 2000).

### 6.2.4 Combustão do resíduo sólido carbonoso

O resíduo sólido carbonoso, produto final depois da libertação dos voláteis da biomassa, é essencialmente constituído por carbono e cinzas, com pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre. A combustão deste resíduo carbono é caraterizada pelas chamas maioritariamente azuis, sendo as cinzas o produto restante do processo de combustão da biomassa (Quaak *et al.*, 1999).

## 6.3 Poluentes resultantes da combustão

Os poluentes mais comuns resultantes do processo de combustão são: os óxidos de azoto ($NO_x$), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre ($SO_x$), os hidrocarbonetos não queimados (HC), o dióxido de carbono ($CO_2$) e as partículas sólidas (na maioria menores do que 10 μm, e designadas na linguagem técnica e científica por PM10) (Nussbaumer, 2003; Pinho, 2011).

Geralmente estes poluentes estão integrados em dois grupos, os poluentes não queimados (resultantes da combustão incompleta) e os poluentes relativos a cada tipo de combustível. A emissão dos poluentes não queimados é fortemente dependente do sistema de queima, tanto do equipamento como das condições do processo; neste grupo, inclui-se o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos não queimados (HC), os voláteis condensados, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e as partículas de carvão. A formação destes poluentes resulta da baixa temperatura de combustão, da mistura deficiente entre o combustível e o ar e do período insuficiente de residência do combustível na câmara de combustão (Werther *et al.*, 2000; Khan *et al.*, 2009; Verma *et al*., 2012).

Relativamente ao segundo grupo, a formação e emissão destes poluentes dependem da composição da biomassa, onde se destacam os compostos de azoto ($NO_x$), os óxidos de enxofre (sobretudo $SO_2$), os gases ácidos (como HCl), os metais pesados (como Pb, Zn e Cd) e as cinzas. No caso do enxofre e dos metais pesados, face ao baixo

teor na biomassa florestal, geralmente as emissões são insignificantes (Werther *et al*., 2000; Khan *et al.*, 2009).

Dos poluentes mencionados, o monóxido de carbono e os óxidos de azoto são os que terão maior destaque na presente secção. O monóxido de carbono, quando inalado, combina-se com a hemoglobina, reduzindo a capacidade do sangue em transportar oxigénio dos pulmões aos tecidos, podendo conduzir à morte (Pinho, 2011). Tal como referido, as emissões de CO relacionam-se com a combustão incompleta, pertencendo ao grupo dos não queimados. Elevados diâmetros de partículas e elevado teor de cinzas contribuem para maiores emissões deste gás (Khan *et al.*, 2009).

A formação de CO ocorre em duas situações distintas, nas regiões de mistura rica e nas regiões de mistura pobre. No primeiro caso, quando existe deficiência de ar, a mistura ar/combustível é dificultada, não existindo oxigénio suficiente para a oxidação completa e, consequentemente existe libertação de CO. Em contrapartida, nas situações com elevado excesso de ar, ocorre a diminuição da temperatura de combustão, permitindo a formação de CO (Johansson *et al*., 2004; Van Loo e Koppejan, 2008; Roy *et al*., 2013).

Por outro lado, os óxidos de azoto ($NO_x$) constituem, de uma maneira geral, o conjunto formado pelo óxido nítrico (NO) e pelo dióxido de azoto ($NO_2$), sendo o primeiro o principal óxido de azoto emitido durante a combustão. Estes poluentes participam em reações atmosféricas, produzindo partículas prejudiciais, nomeadamente ozono troposférico (*smog*) e chuvas ácidas (Werther *et al*., 2000; Khan *et al*., 2009).

O óxido nítrico é formado a partir da oxidação do azoto molecular existente no ar de combustão ou existente no combustível. Existem três mecanismos para a formação deste composto, resultando no NO-térmico, no NO-combustível e no NO-imediato. Para temperaturas elevadas, superiores a 1000 °C, o óxido de azoto é maioritariamente originado pelo mecanismo térmico e imediato (Werther *et al.*, 2000; Nussbaumer, 2003).

O NO térmico resulta da reação de oxidação do azoto molecular presente no ar de combustão a temperaturas elevadas na ordem dos 1300 °C, sendo este processo designado mecanismo de Zeldovich (Pinho, 2011; Roy *et al.*, 2013). Por outro lado, o NO combustível é consequência do conteúdo de azoto presente no combustível, sendo libertado a temperaturas relativamente baixas (Werther *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2013). O último, conhecido por NO imediato, súbito ou instantâneo, é formado devido às rápidas reações na frente de chama, envolvendo reações de radicais livres de hidrocarbonetos

com o azoto molecular, frequentemente em chamas com defeito de ar (Pinho, 2011; Verma *et al.*, 2011)

## 6.4 Análise do rendimento da combustão

Para analisar o processo de combustão, optou-se por dividi-lo, concetualmente, em dois momentos (espaços): a fornalha (local onde o combustível é queimado e de onde saem os produtos de combustão) e o permutador de calor (local onde o calor da corrente dos gases de combustão é utilizado para aquecer um fluido, como água, vapor ou ar) (Quaak *et al*., 1999). Na Figura 6.3, apresenta-se um esquema do balanço de massa no processo de combustão, estando representados os dois espaços mencionados anteriormente.

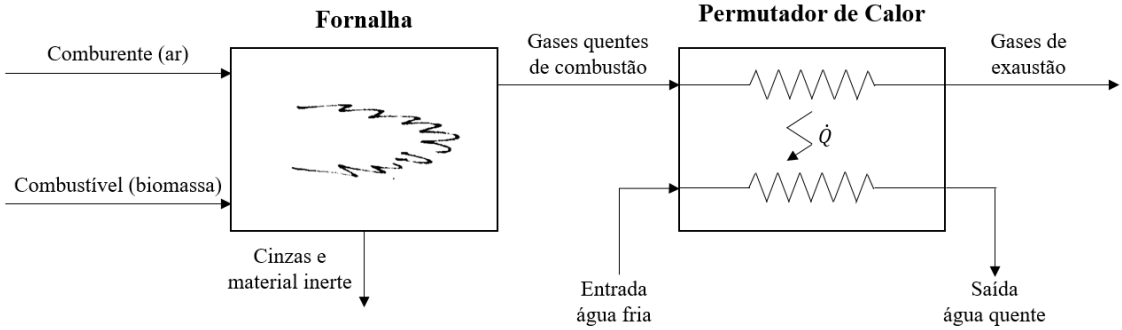



Figura.6.3 - Representação esquemática do processo de combustão nos dois momentos: fornalha e permutador de calor (Quaak et al., 1999; Silva 2018; Braga 2019).

### 6.4.1 Fornalha

A fornalha é espaço onde ocorre a queima propriamente dita e onde têm origem os produtos de combustão. Alberga também a câmara de combustão, no qual se desenvolve a chama e se completa a combustão. De uma forma geral, a fornalha deve evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar a temperatura do combustível até à combustão, proporcionar a condição ideal para uma combustão completa, criando turbulência para misturar o ar e o combustível, e impedir a troca de calor entre os gases quentes de combustão e o ambiente. Deste modo, as paredes interiores da fornalha têm de suportar altas temperaturas, apresentar elevada resistência ao choque térmico, reduzida dilatação térmica e devem ser revestidas com uma camada de tijolos refratários, responsáveis por reter o calor no interior da fornalha (Nogueira *et al.*, 2005).

A alimentação da fornalha consiste no combustível (neste caso os briquetes aditivados de biomassa) e no comburente (ar atmosférico), como é possível visualizar na Figura 6.3.1. Durante a combustão, as ligações químicas do combustível são quebradas e, consequentemente, liberta-se energia térmica, ficando esta disponível na corrente dos gases quentes de combustão, Figura 6.3.

A energia contida no combustível que não foi transferida para a corrente de gases de combustão, na forma de energia térmica, é, deste modo, perdida. Estas perdas englobam:

- As cinzas voláteis, partículas de pequenas dimensões que são arrastadas pela corrente de gases de combustão, passando através do permutador de calor, sem que a sua energia térmica seja utilizada;
- Partículas não queimadas nas cinzas, partículas de maiores dimensões que ficam no fundo da fornalha, cuja energia química armazenada não é libertada;
- os compostos não queimados na corrente de gases, como o monóxido de carbono, cuja energia química armazenada é armazenada durante a combustão;
- as perdas para o ambiente, nomeadamente as perdas por radiação e convecção (Quaak *et al.*, 1999).

Relativamente à fornalha, é possível calcular o rendimento da combustão $\eta_{comb}$, recorrendo à equação 6.4.

$$\eta_{comb} = \frac{\text{energia térmica disponível na corrente de gases quentes de combustão}}{\text{energia química na biomassa}} \tag{6.4}$$

Os valores típicos dos rendimentos térmicos da combustão, baseados no PCI do combustível, encontram-se no intervalo entre 65 % e 99 %, para caldeiras bem isoladas com sistemas de combustão sofisticados (Quaak *et al.*, 1999; Silva, 2018). Este rendimento é fortemente dependente da reação ser ou não completa e das perdas existentes na fornalha. A energia térmica disponível para a transferência de calor com o outro fluido (água) é tanto maior quanto maior for a sua temperatura. No permutador de calor, a energia térmica disponível nos gases quentes de combustão é então transferida para a água, aquecendo-a. Deste modo, a saída do permutador corresponde à corrente dos gases de combustão à temperatura de exaustão na chaminé, sendo que a diferença entre

as temperaturas é diretamente proporcional à quantidade de calor que foi transferida para a água (Quaak *et al.*, 1999).

### 6.4.2 Permutador de calor

O aproveitamento energético dos gases quentes provenientes da combustão da biomassa no aquecimento da água que alimenta a caldeira é feito no permutador. A energia térmica disponível para a transferência de calor com o outro fluido (água) é tanto maior quanto maior for a sua temperatura. No permutador de calor, a energia térmica disponível nos gases quentes de combustão é então transferida para a água, aquecendo-a. Deste modo, a saída do permutador corresponde à corrente dos gases de combustão à temperatura de exaustão na chaminé, sendo que a diferença entre as temperaturas é diretamente proporcional à quantidade de calor que foi transferida para a água (Quaak *et al.*, 1999).

O rendimento da transferência de calor $\eta_{TC}$ é calculado pela equação 6.5.

$$\eta_{TC} = \frac{\text{energia térmica disponível na água}}{\text{energia térmica disponível na corrente de gases de combustão}} \tag{6.5}$$

Na prática, calcula-se normalmente um outro rendimento, o rendimento térmico $\eta_t$, através da equação 6.6,

$$\eta_t = \eta_{comb} \cdot \eta_{TC} = \frac{\text{energia térmica disponível na água}}{\text{energia química na biomassa}} \tag{6.6}$$

No entanto, é possível calcular um valor aproximado da temperatura dos gases de combustão imediatamente antes da transferência de calor para a água, desprezando todas as perdas de calor para o exterior, considerando assim a fornalha num sistema adiabático. Deste modo, a temperatura dos produtos da combustão a calcular designa-se temperatura adiabática de chama e é definida como a temperatura máxima que os produtos podem atingir nesta reação (Pinho, 2011).

Neste caso, como não há calor trocado durante a combustão (nem trocas de trabalho), recorrendo à primeira Lei da Termodinâmica, a entalpia do sistema permanece constante, como é possível verificar na Figura 6.4 pela representação do processo 1 – 2 numa linha horizontal.

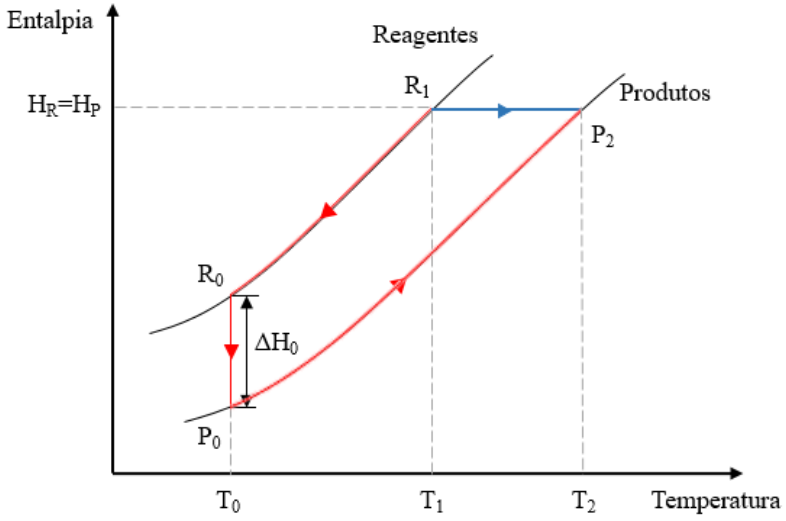



Figura 6.4 - Combustão adiabática a pressão constante (Pinho 2011).

Deste modo, o balanço de energia pode-se escrever segundo a equação 6.7

$$
\begin{aligned}
&{}_1Q_2 = H_{P2} - H_{R1} = (H_{P2} - H_{P0}) + (H_{P0} - H_{R0}) + (H_{R0} - H_{R1}) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow 0 = H_{P2} - H_{R1} = (H_{P2} - H_{P0}) + (H_{P0} - H_{R0}) + (H_{R0} - H_{R1})
\end{aligned}
\tag{6.7}
$$

onde $H_{P2}$ é a entalpia dos produtos no estado 2, $H_{P0}$ é a entalpia dos produtos no estado de referência 0, $H_{R1}$ é a entalpia dos reagentes no estado 1 e $H_{R0}$ é a entalpia dos reagentes no estado de referência 0.

Esta última equação pode ser aproximada, considerando regime permanente e que os reagentes e os produtos são misturas de gases perfeitos, resultando na equação 6.8,

$$
\sum_i \dot{m}_{Pi}\left(\tilde{c}_{P_{Pi}}\right)(T_2 - T_0) + \dot{m}_{comb}\Delta h_0 + \sum_i \dot{m}_{Ri}\left(\tilde{c}_{P_{Ri}}\right)(T_0 - T_1) = 0 \tag{6.8}
$$

onde $\dot{m}_{comb}$ é o caudal mássico de combustível, $\dot{m}_{Ri}$ é o caudal mássico do reagente $i$, $\dot{m}_{Pi}$ é o caudal mássico do produto $i$, $\tilde{c}_{P_{Ri}}$ é o calor específico mássico do reagente $i$ a pressão constante à temperatura média (entre $T_0$ e $T_1$), $\tilde{c}_{P_{Pi}}$ é o calor específico mássico do produto $i$ a pressão constante à temperatura média (entre $T_0$ e $T_2$) e $\Delta h_0$ é a entalpia específica de combustão, aproximadamente igual ao simétrico do valor do *PCI*.

## 6.5 Combustíveis

Para a realização do ensaio do desempenho térmico, foram utilizados diferentes tipos de combustíveis sólidos. Nos ensaios iniciais que se realizaram à instalação, utilizaram-se briquetes de tojo-amido, com o principal objetivo de testar o programa de aquisição de dados, familiarizar-se com os aspetos relacionados com o funcionamento da caldeira e organizar uma metodologia experimental para a realização dos ensaios. Deste modo foram realizados a análise química de todos os briquetes utlizados, a análise foi feita no laboratório do INEGI. De seguida apresenta-se os resultados da análise química de cada tipo de briquete utlizado nesta dissertação.

### 6.5.1 Composição química dos briquetes

Nas tabelas seguintes, 6.1 a 6.6 apresentam-se as composições químicas das briquetes.

Tabela 6.1 - Análise química dos briquetes do tipo TC.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC (%)* | CEN-1477-1 | 11,0 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 80,0 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 3,5 |
| *Carbono fixo(%) B.S.* | Cálculo | 16,5 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba | 18,46 |
| *P.C.I (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba | 16,97 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 46,9 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutividade térmica | 0,94 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,91 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. (*) | 0,091 |

(*) Método indireto

(Obs. Eliminei as duas colunas das especificações que não tinham nada. Rodolfo, agora alinhe todas as tabelas ao centro)

Tabela 6.2 - Análise química dos briquetes do tipo TA.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC(%)* | CEN-1477-1 | 10,8 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 78,0 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 3,4 |
| *Carbono fixo(%) B.S.* | Cálculo | 18,6 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 18,58 |
| *P.C.I (B.S MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 17,10 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 46,8 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutibilidade térmica | 0,97 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,85 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. | 0,105 |

Tabela 6.3 - Análise química dos briquetes do tipo TG.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC (%)* | CEN-1477-1 | 11,5 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 78,8 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 2,6 |
| *Carbono fixo.(%) B.S.* | Cálculo | 18,6 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 19,16 |
| *P.C.I (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 17,72 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 47,3 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutividade térmica | 0,85 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,68 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. | 0,12 |

Tabela 6.4-Análise química dos briquetes do tipo VA.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC (%)* | CEN-1477-1 | 0,3 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 77,5 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 2,9 |
| *Carbono fixo (%) B.S.* | Cálculo | 19,6 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 17,58 |
| *P.C.I (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 16,20 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 46,0 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutividade térmica | 0,52 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,38 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. | 0,055 |

Tabela 6.5 - Análise química dos briquetes do tipo VC.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC (%)* | CEN-1477-1 | 12,4 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 77,5 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 5,0 |
| *Carbono fixo (%) B.S.* | Cálculo | 20,0 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 16,03 |
| *P.C.I (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 14,62 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 47,0 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutividade térmica | 0,81 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,53 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. | 0,044 |

Tabela 6.6 - Análise química dos briquetes do tipo VG.

| *Parâmetros* | *Métodos analíticos* | *Resultados* |
|---|---|---|
| *Perda a 105 ºC (%)* | CEN-1477-1 | 13,5 |
| *Matéria volátil a 900 ºC B.S.* | CEN-15148 | 75,5 |
| *Cinzas a 550 ºC (%) B.S.* | CEN-14775 | 3,7 |
| *Carbono fixo (%) B.S.* | Cálculo | 20,8 |
| *P.C.S (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 17,62 |
| *P.C.I (B.S. MJ/kg)* | Calorimetria-bomba isoperibol | 16,23 |
| *Carbono (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 45,7 |
| *Azoto (%) B.S.* | Condutividade térmica | 0,56 |
| *Hidrogénio (%) B.S.* | Absorção infravermelha | 6,44 |
| *Enxofre (%) B.S.* | M.I. | 0,099 |

Importa referir que a composição química de apenas uma amostra de cada briquete pode, eventualmente, ser uma aproximação grosseira, podendo não ser representativa de todos os briquetes de cada tipo de combustível.

Saliente-se que o valor do teor de humidade apresentado nas Tabela 6.4 para os briquetes do tipo VA diferem dos valores apresentados pelo laboratório do INEGI, por isso a humidade a usar nos cálculos determinou-se através da equação 6.9.

A composição química dos briquetes apresentada na tabela anterior é fornecida na base seca, sendo possível passar para base húmida, em fração, segundo a equação 6.9,

$$y_h(i) = y_s(i)\frac{1 - hum_{comb,h}}{1} \tag{6.9}$$

onde $y_h(i)$ é a fração mássica do constituinte $i$ na base húmida e $y_s(i)$ é a fração mássica do constituinte $i$ na base seca .

Depois da análise química dos briquetes, realizaram-se ensaios de queima com briquetes produzidos no INEGI. A presente dissertação se integra no projeto Biomassa-

AP, com o objetivo de estudar o potencial energético da biomassa com incorporação de resíduos florestais (tojo) e a partir de aparas de poda de videira. Nas Figuras 6.5 e 6.6 estão apresentados os seis tipos de briquetes utilizados.

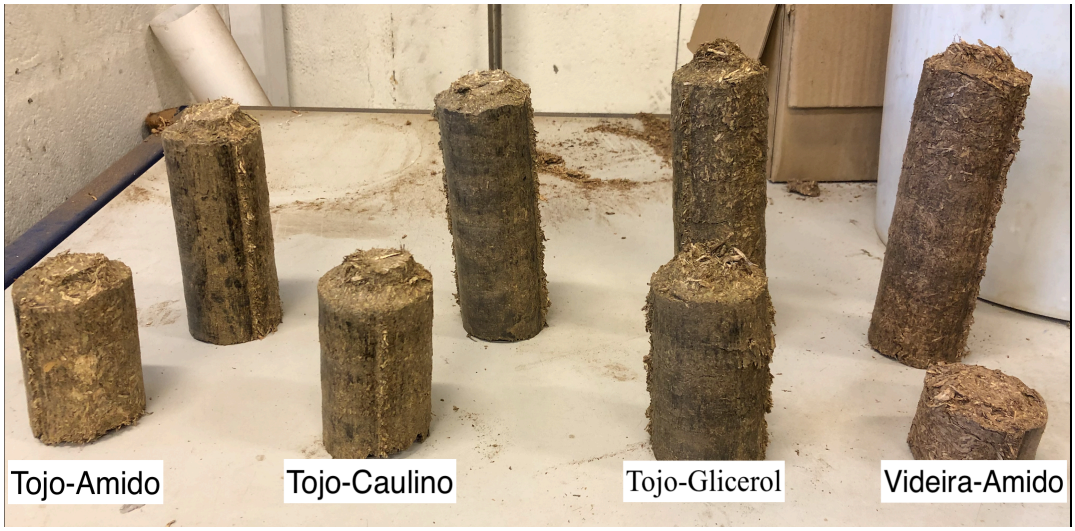



Figura 6.5 - Quatro dos seis tipos de briquetes fabricados no INEGI.

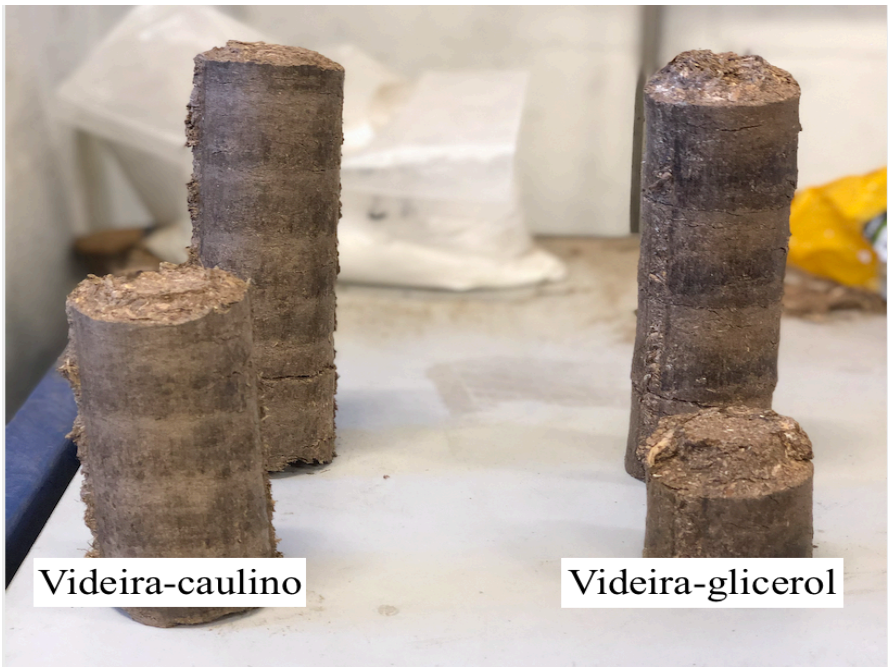



Figura 6.6 - Dois dos seis briquetes fabricados no INEGI.

Todos os briquetes têm diâmetros similares e aproximadamente constantes em toda a população.

## 6.5.2 Teor de humidade

O teor de humidade da biomassa foi determinado utilizando uma amostra de cada tipo de combustível, através da perda de massa da mesma, segundo a norma FprEN 14774-2:2009. As amostras, previamente pesadas, foram colocadas numa estufa laboratorial, modelo *FD-115* da *Binder* (apresentada na Figura 6.7), e secas à temperatura de 105 °C, durante um período de 24 horas. Posteriormente, foram pesadas e colocadas novamente na estufa, durante um período de 24 horas. No final, foram novamente pesadas, verificando-se se a sua massa se mantinha inalterada, assegurando, deste modo, que se tinha eliminado toda a água contida na amostra.



Figura 6.7 – Estufa laboratorial do INEGI (BINDER, 2018).

A fração de humidade das amostras, na base húmida $hum_{comb,h}$ e na base seca $hum_{comb,s}$, foi calculada através das equações 6.10 e 6.11, respetivamente.

$$hum_{comb,h} = \frac{m_h - m_s}{m_h} \tag{6.10}$$

$$hum_{comb,s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \tag{6.11}$$

onde $m_h$ é a massa húmida da amostra (massa inicial) e $m_s$ é a massa seca da amostra (massa final).

O teor de humidade, na base húmida, de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 6.7, acompanhado do diâmetro médio dos briquetes utilizados.

Tabela 6.7 - Combustíveis lenhosos utilizados nos ensaios: diâmetro e teor de humidade.

| Combustível | Diâmetro médio [cm] | Teor de humidade (B.H.) [%] |
|---|---|---|
| Tojo-amido | 7 | 10,8 |
| Tojo-caulino | 7 | 11,0 |
| Tojo-glicerol | 7 | 11,5 |
| Videira-amido | 7 | 11,4 |
| Videira-caulino | 7 | 12,4 |
| Videira-glicerol | 7 | 13,5 |

# 7. Instalação experimental

## 7.1 Introdução

Considerou-se conveniente representar esquematicamente a instalação, apresentando todos os componentes utilizados nas medições necessárias, para a realização dos ensaios da presente dissertação, como é mostrado na Figura 7.1 (Silva, 2018).

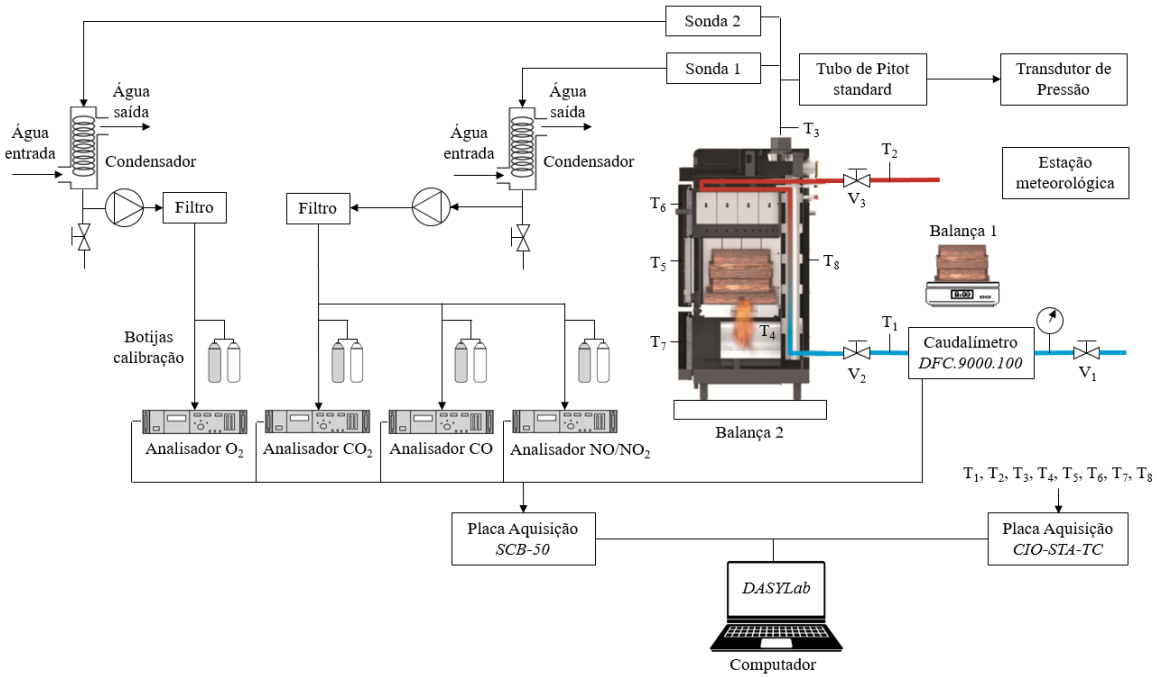



Figura 7. 1 - Representação esquemática da instalação experimental (Silva, 2018).

Segundo a representação esquemática (Figura 7.1), utilizaram-se duas balanças no decorrer dos ensaios: a balança 1 para pesar os briquetes antes de serem colocados dentro da caldeira e a balança 2, sobre a qual está colocada a caldeira, serviu para avaliar a diminuição da massa total da caldeira devido ao consumo dos briquetes durante o ensaio e para pesar as cinzas no final do ensaio.

Em cada ensaio, monitorizou-se a temperatura da água, dos gases de exaustão, da chama e das superfícies exteriores da caldeira, recorrendo a termopares do tipo K, estando as temperaturas identificadas na Figura 7.1 como $T_i$, onde $T_1$ é a temperatura da água à entrada da caldeira, $T_2$ é a temperatura da água à saída da caldeira, $T_3$ é a temperatura dos

gases de exaustão, $T_4$ é a temperatura da chama, $T_5$ é a temperatura da parede do lado direito da caldeira, $T_6$ é a temperatura da porta superior da caldeira, $T_7$ é a temperatura da porta inferior da caldeira e $T_8$ é a temperatura da parede do lado esquerdo. Ainda na Figura 7.1, é possível observar a existência do caudalímetro e do tubo de Pitot standard, utilizados na medição do caudal mássico de água e do caudal mássico dos gases de combustão, respetivamente. Durante os ensaios, recorrendo à estação meteorológica, modelo *PTU301* da *Vaisala*, existente no laboratório, foi possível obter a pressão, a temperatura e a humidade do ar ambiente.

Relativamente ao sistema de aquisição dos gases de combustão, foi necessário utilizar duas sondas para ser possível um circuito com duas bombas em paralelo, uma bomba destinada apenas para o analisador de oxigénio e outra para os restantes analisadores, de dióxido de carbono, monóxido de carbono e óxidos de azoto. A razão de se ter optado por duas bombas foi para aumentar o caudal lido no analisador de oxigénio, permitindo uma melhoria de leitura e de rapidez de resposta. Também é importante referir que a composição dos gases de exaustão, para cada analisador, é dada na base seca, pelo que, entre a tubagem de exaustão e os analisadores, foi necessário colocar, em ambos os circuitos, um condensador, para permitir a condensação do vapor de água existente nos gases de exaustão.

Como é possível verificar na Figura 7.1, das várias temperaturas, do caudal mássico de água e a composição dos gases de exaustão foram registados automaticamente no computador, utilizando o *software DASYLab*. Para tal, foi necessário criar um programa de aquisição de dados neste ambiente informático, estando o esquema de funcionamento esquematizado na Figura 7.2.

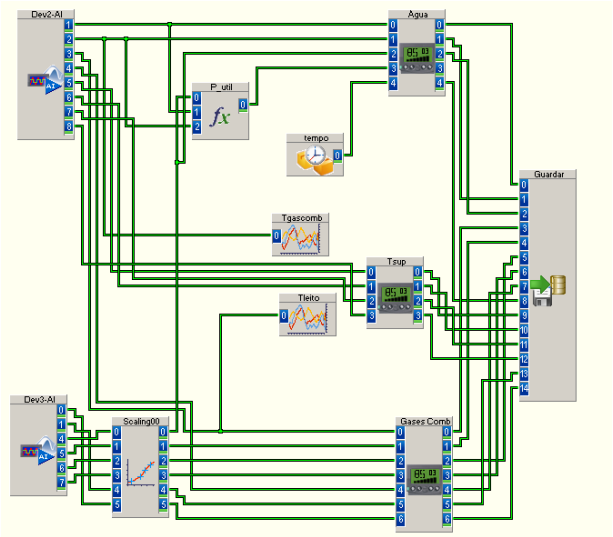



Figura 7. 2 – Programa de aquisição no ambiente DASYLab.

## 7.2 Caldeira

Utilizou-se a caldeira da marca *Solzaima*, modelo Caldeira de Lenha *SMZ IW,* para os ensaios da queima dos briquetes*,* com uma potência térmica nominal de 24 kW, destinada ao aquecimento de água para uso em instalações de aquecimento central e para uso doméstico. Na Figura 7.3, mostra-se a representação esquemática da caldeira em vista frontal, lateral e de cima, acompanhada das suas principais dimensões exteriores em milímetros – 1520 × 560 × 1070 –, altura, largura e profundidade, respetivamente (Solzaima, 2015; Braga 2019).

| A [mm] | B [mm] | C [mm] | D [mm] | E [mm] | F [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| 505 | 1520 | 860 | 1070 | 50 | 55 |

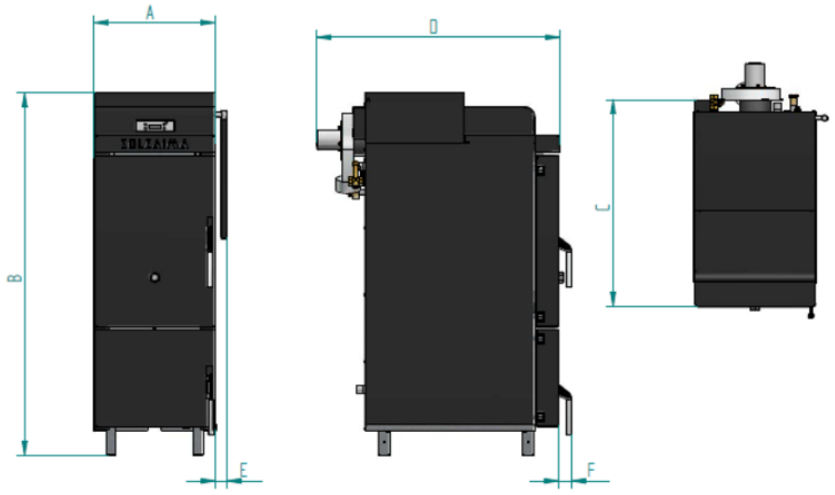



Figura 7.3 - Representação esquemática da caldeira e dimensões exteriores (Solzaima, 2015).

A estrutura da caldeira pesa 383 kg e admite um volume de água de 73 litros, apresentando um valor de massa total de 456 kg, valor importante para a seleção da balança a colocar sobre a caldeira (balança 2). A caldeira tem uma capacidade máxima de carga igual a 30 kg, com um comprimento máximo admissível dos briquetes de 475 mm (Solzaima, 2015).

Na Figura 7.4 apresentam-se fotografias da caldeira utilizada, sendo possível observar a divisão da câmara de combustão em duas partes, na câmara superior (6) e na câmara inferior (9). A alimentação da caldeira não é automática, sendo que os briquetes são colocados, manualmente, na câmara superior, sendo para tal necessário abrir a porta superior durante o decorrer do ensaio. O orifício visor (4) possibilita a visualização do interior da câmara de combustão superior sem ser necessário abrir a porta (Silva, 2018).




| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Balança 2 | Mostrador digital | Porta superior | Orifício visor | Porta inferior | Câmara superior | Canal superior | Canal inferior | Câmara inferior |

Figura 7.4 - Caldeira utilizada e câmara de combustão (Silva 2018).

Para melhor compreensão do normal funcionamento da caldeira, é necessário ter conhecimento dos locais de entrada do comburente na caldeira e da respetiva circulação dos gases de combustão. A caldeira tem dois canais por onde o ar pode entrar para a câmara de combustão, canal superior por onde entra o ar primário (representado pelo número 7 na Figura 7.4) e canal inferior por onde entra o ar secundário (representado pelo número 8 na Figura 7.4). O canal inferior tem a possibilidade de estar aberto ou fechado, alterando a circulação do comburente na caldeira, como representado na Figura 7.4. Caso o canal inferior esteja aberto, a entrada de ar na caldeira ocorre pelos dois canais, entrando na câmara de combustão pelos orifícios existentes na câmara superior e na zona entre a câmara superior e a inferior, como apresentado no caso 1 da Figura 7.4. No caso do canal inferior se encontrar fechado, a entrada de ar na caldeira ocorre apenas pelo canal superior, entrando na câmara de combustão pelos orifícios existentes na câmara superior, como apresentado no caso 2 da Figura 7.4. Ainda na Figura 7.5, apresenta-se em pormenor esta questão da alimentação de ar, sendo possível observar com maior clareza os dois tipos de orifícios existentes na câmara de combustão (Silva 2018)

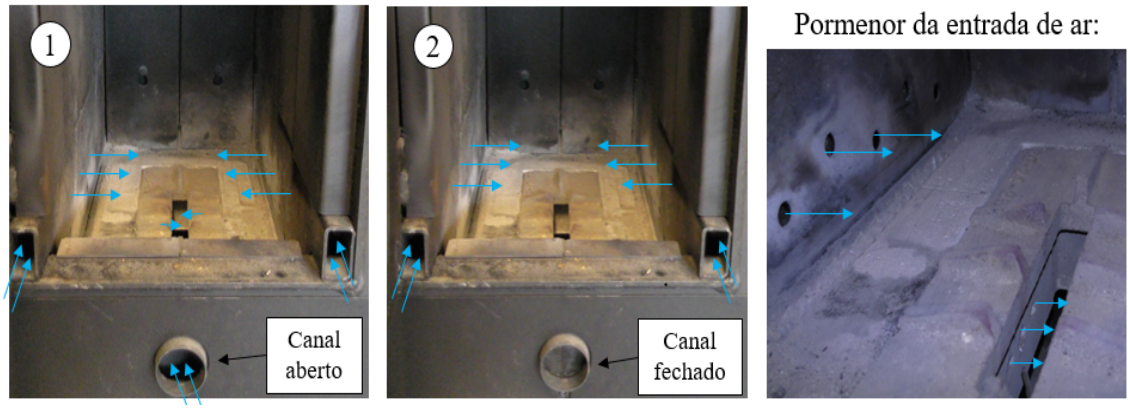



Figura 7.5 - Circuitos de alimentação de ar na caldeira (Silva, 2018).

Os gases da combustão são extraídos através um extrator de gases de combustão responsável pela sucção dos mesmos através das tubagens de circulação dos gases, situado na caldeira. A caldeira tem um extrator de gases de combustão responsável pela sucção dos mesmos através das tubagens de circulação dos gases. Estas tubagens têm início na câmara de combustão inferior, pelo que a depressão causada pelo extrator faz com que os gases de combustão desçam da zona de combustão para a câmara inferior e entrem nas tubagens. As caldeiras com este tipo de funcionamento designam-se caldeiras de chama invertida, fazendo com que a combustão ocorra em leito fixo com o comburente a circular em sentido descendente. Segundo o fabricante, este tipo de caldeira baseia o seu funcionamento no princípio de gasificação da lenha. A Figura 7.6 é uma fotografia da câmara inferior da caldeira, na qual se representa esquematicamente a circulação dos gases em sentido descendente. Ainda nesta figura pode-se visualizar o termopar colocado para a medição da temperatura da chama, devidamente identificado (Silva, 2018).

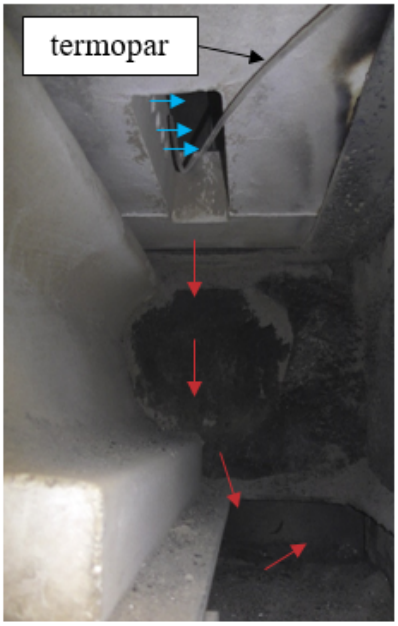



Figura 7.6 - Circulação dos gases de combustão na câmara inferior da caldeira (Silva, 2018).

No início da fase de arranque da combustão, o canal inferior deve-se encontrar aberto para permitir a entrada de ar na zona intermédia da câmara de combustão, o que funciona como uma "barreira" ao escoamento de ar descendente, facilitando a ignição do combustível. Esta situação encontra-se apresentada esquematicamente no caso 1 da Figura 7.7, verificando-se que esta fase ocorre, essencialmente, na câmara superior. Quando a ignição tiver sido assegurada, o canal inferior deve ser fechado, ocorrendo a combustão nas duas câmaras da caldeira. Na câmara superior ocorre a secagem do material e a posterior libertação dos voláteis contidos no combustível. Os voláteis gerados passam para a câmara de combustão inferior, onde entram em combustão, através de uma chama descendente, podendo esta zona atingir temperaturas superiores a 1000 °C. Esta situação encontra-se apresentada esquematicamente no caso 2 da Figura 7.7 (Silva 2018).

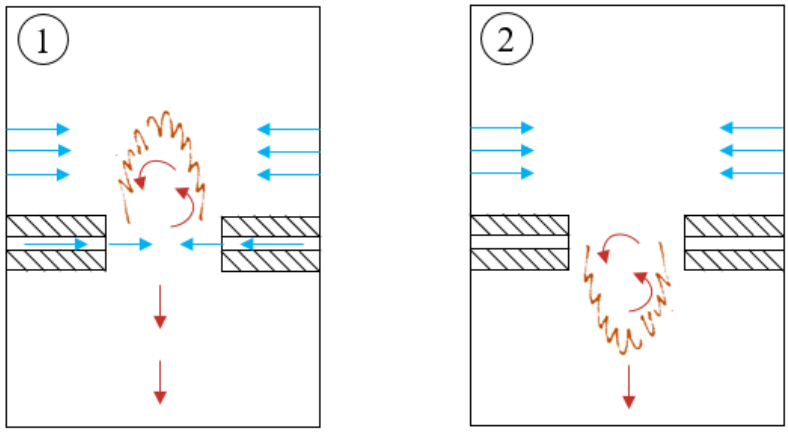
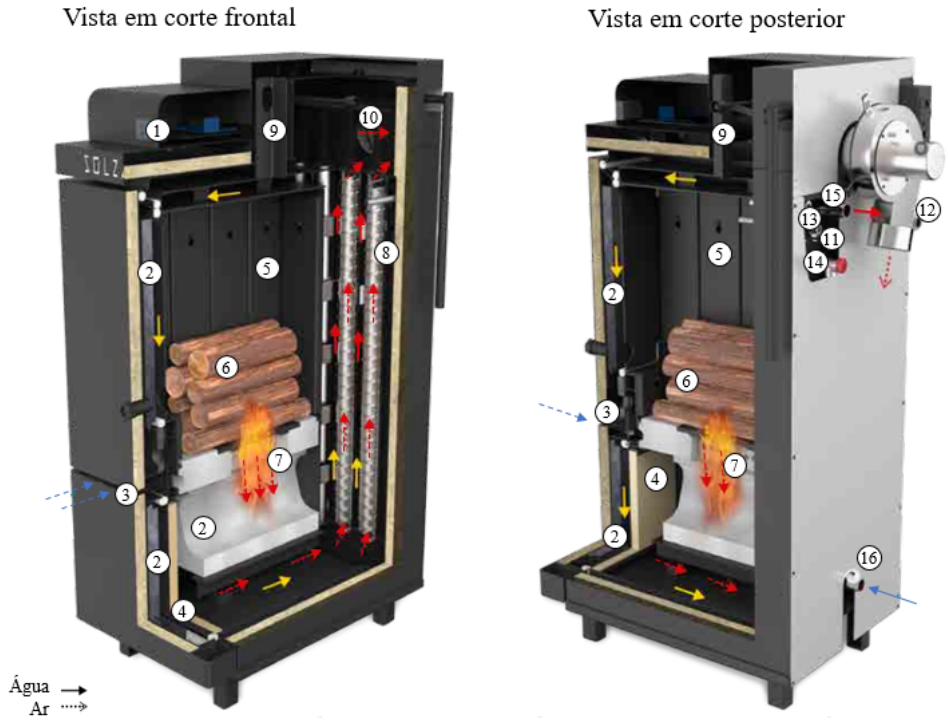



Figura 7.7 - Representações esquemáticas do circuito dos gases na caldeira (Silva, 2018).

A figura 7.8 mostra a representação esquemática do funcionamento da caldeira em corte frontal (representação à esquerda) e em corte posterior (representação à direita), juntamente com os principais constituintes da caldeira, devidamente identificados. A energia gerada durante a combustão, mais propriamente a energia térmica contida nos gases de combustão, promove o aquecimento da água que circula no permutador de calor (componente 8 na Figura 7.8), processo identificado com setas a traço contínuo vermelho. Também é possível distinguir o circuito de circulação do ar (representado a traço interrompido) e de circulação da água (representado a traço contínuo). O depósito de água na caldeira encontra-se à volta da câmara de combustão, identificado com setas a traço contínuo amarelo (Silva, 2018).




| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mostrador digital | Material refratário | Entrada de ar para combustão | Vermiculite | Chapas de proteção | Zona de colocação dos briquetes | Zona de combustão | Permutador de calor |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Sonda de temp. da água | Extrator dos gases | Válvula de descarga térmica | Sonda de temp. dos gases | Sensor de pressão | Válvula de segurança | Saída da água | Entrada da água |

Figura 7.8 - Representação esquemática da caldeira e principais constituintes (Solzaima, 2015).

O controlo da caldeira é feito através da interface digital (1), que permite monitorar em tempo real a temperatura dos gases de exaustão da chaminé e a temperatura da água, sendo que as temperaturas fornecidas pela caldeira serviram para controlar a temperatura da água para que não ultrapassasse os 80 ºC (sonda 9) como consequência de haver a evaporação da água e acionar o alarme (sonda 12) da caldeira desligando assim o seu funcionamento. A pressão do circuito hidráulico (definida para o intervalo de funcionamento entre 0,5 e 2,9 bar (relativos), medida pelo sensor 13) (Solzaima, 2015). Quando a temperatura da água à saída da caldeira excede o valor limite definido, o sistema de controlo da caldeira autorreduz o nível de potência, diminuindo a temperatura (Silva, 2018).

## 7.3 Balanças

Foram necessárias duas balanças. A balança digital 1, modelo *EW6000-1M* da *Kern*, foi utilizada para pesar os aditivos (amido, caulino e glicerol) que se misturam com a biomassa (tojo e videira) na produção dos briquetes. E também foi utilizada para pesar os briquetes antes de estes serem colocados na caldeira, no decorrer do ensaio para avaliar o desempenho térmico da caldeira. Esta balança também foi utilizada para pesar as amostras colocadas na estufa laboratorial durante o processo de determinação do respetivo teor de humidade.

Por sua vez, a balança 2, modelo *Tortuga GL1500* da *Gram*, colocada sobre a caldeira, foi utilizada para determinar a taxa de consumo dos briquetes, durante os ensaios para avaliar o desempenho térmico, num determinado intervalo de tempo. Esta balança foi ainda utilizada para se determinar, através de uma análise simplista, o teor de cinzas dos combustíveis sólidos utilizados, como se verá adiante. Nas Figuras 7.9 e 7.10, apresentam-se fotos das balanças.




Figura 7.9 - Balança Kern EW6000-1M (Kern 2018).



Figura 7.10 - Balança Gram Tortuga GL150 (GRAM, 2018).

## 7.4 Caudalímetro

Para a determinação do caudal mássico de água foi instalado um caudalímetro do tipo turbina, modelo *DFC.9000.100* da *Parker*, alimentado com 5 Volts de corrente contínua e ligado a uma placa de aquisição *SCB-50*. O sinal analógico proveniente do caudalímetro foi então transmitido para o computador, através da placa *SCB-50*, onde, recorrendo ao *software DASYLab*, se registou o valor com uma taxa de aquisição de 1 Hz (um ponto por segundo)

## 7.5 Tubo de Pitot Standard

O caudal mássico foi calculado a partir da medição da velocidade de escoamento dos gases em diferentes pontos da conduta de exaustão, com 77 mm de diâmetro, recorrendo a um tubo de Pitot Standard. Este instrumento foi instalado num orifício existente na conduta de exaustão para facilitar o movimento do mesmo ao longo das medições. Dentro dos tubos de Pitot Standard disponíveis no laboratório, selecionou-se o que apresentava o menor diâmetro (igual a 4 mm), para afetar o menos possível o escoamento dos gases, minimizando o erro criado pelo efeito de bloqueamento originado pelo instrumento. Este aparelho possui tomadas de pressão para medir a pressão estática $P_{est}$ e a pressão de estagnação $P_{estg}$, identificadas na Figura 7.11 (Silva, 2018).

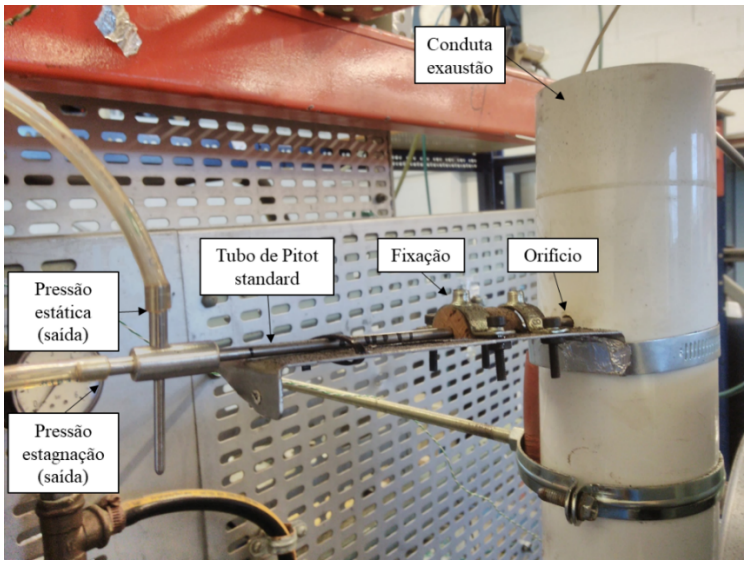



Tabela 7.11 – Localização do Tubo de Pitot na conduta de escape dos gases da caldeira (Silva, 2018).

Recorrendo a um transdutor de pressão, modelo *Alnor EBT730 TSI*, foi possível obter o valor da pressão estática da chaminé $P_{cham}$, sendo igual à pressão sentida por uma partícula de fluido, à medida que se desloca à mesma velocidade do escoamento local. Foi ainda determinado o valor da pressão dinâmica do escoamento $P_{din}$, sendo igual à diferença entre a pressão de estagnação e a pressão estática.

Destaca-se ainda que o tubo de Pitot Standard é um instrumento relativamente insensível a desalinhamentos até um desvio de ±15°. Durante as medições, a sonda foi ligeiramente rodada até medir o máximo do sinal, condição que indica que a sonda está efetivamente alinhada com o escoamento (Coelho, 2014).

## 7.6 Analisadores dos gases de combustão

Utilizou-se quatro analisadores para a determinação da composição dos gases de exaustão: o analisador de oxigénio ($O_2$), do modelo *8000M* da *Signal*; o analisador de dióxido de carbono ($CO_2$), do modelo *7000FM* da *Signal*; o analisador de monóxido de carbono (CO), do modelo *MGA3000* da *ADC*; o analisador de óxidos de azoto (NO e $NO_2$), do modelo *MIR 9000CLD* da *Environnement S.A*. Os sinais analógicos provenientes dos analisadores foram transmitidos para o computador, através da placa de aquisição *SCB-50*, utilizando o *software DASYLab*, registando-se a fração molar dos gases mencionados, na base seca, em cada segundo.

Durante os períodos entre ensaios, os analisadores ficavam permanentemente ligados, embora em repouso. No final de cada ensaio, confirmava-se a calibração dos analisadores utilizados. As frações molares utilizadas nos cálculos dizem sempre respeito aos valores corrigidos após a calibração.

No tratamento dos resultados, de forma a ser possível comparar os valores das emissões dos poluentes foi necessário convertê-los numa base comum de referência de teor de oxigénio. Segundo a Norma Europeia EN 14785:2008, referente a aparelhos domésticos para aquecimento ambiente que utilizam granulados de madeira, como é o caso do presente estudo, utiliza-se um teor de oxigénio de referência de 13 % (n/n), na base seca. O valor da emissão de determinado poluente corrigido é calculado através da equação seguinte (Silva 2018),

$$x_s(\mathrm{P})_c = x_s(\mathrm{P})\ \frac{0{,}21 - x_s(\mathrm{O_2})_{ref}}{0{,}21 - x_s(\mathrm{O_2})} \tag{7.1}$$

onde $x_s(\mathrm{P})_c$ é a fração molar corrigida do poluente na base seca (a 13% $O_2$), $x_s(\mathrm{P})$ é a fração molar do poluente medida na base seca, $x_s(\mathrm{O_2})_{ref}$ é a fração molar de referência do oxigénio na base seca (neste caso igual a 0,13), $x_s(\mathrm{O_2})$ é a fração molar do oxigénio medida na base seca e $0{,}21$ é o valor aproximado da fração molar do oxigénio no ar.

## 7.7 Ensaio do desempenho térmico

A presente dissertação tem como objetivos avaliar o desempenho térmico da caldeira em condições aproximadas de regime permanente utilizando seis tipos de combustíveis sólidos. Assim sendo foram realizados doze ensaios diferentes no total. O número de ensaios realizados, bem como a temperatura de entrada da água na caldeira, apresenta-se na tabela 7.1.

Importa referir que o tempo de alimentação da caldeira variou dependentemente do tipo de briquete, muito influenciado pelo tipo de aditivo, sendo que, os que tiveram um tempo de alimentação mais curto foram os briquetes aditivados com glicerol. A elevada volatilidade do glicerol ajudou acelerar a queima da biomassa. Os briquetes que necessitaram de mais tempo para serem alimentados foram os briquetes aditivados com caulino pois este aditivo atua como um retardante da queima por ser um inerte.

O ensaio do desempenho térmico divide-se em duas partes. A primeira parte envolve a fase de arranque e a segunda parte a fase de regime permanente, que será abordada a seguir.

Tabela 7.1 - Temperatura da água utilizada e a temperatura ambiente

| Tipo de combustível | Temperatura Ambiente [ºC] | Temperatura de entrada da água [ºC] |
|---|---|---|
| Tojo-amido | 19,5-18,6 | 47,49 |
| Tojo-caulino | 19-17,2 | 45,28 |
| Tojo-glicerol | 19,2-17,5 | 37,40 |
| Videira-amido | 19,4-15 | 45,10 |
| Videira-caulino | 19,5-18,5 | 45,27 |
| Videira-glicerol | 19,7-16 | 40,15 |

### 7.7.1 Fase de arranque

A fase de arranque inicia o ensaio de combustão, contemplando a ignição do combustível. Após colocação de uma quantidade de combustível, previamente pesado, na câmara de combustão, a ignição era iniciada com auxílio de uma chama auxiliar alimentada por gás butano e recorrendo-se ainda a acendalhas. É importante salientar que o canal inferior, nesta fase inicial, deve encontrar-se aberto de modo a permitir a entrada de ar na zona intermédia da câmara de combustão. Esta entrada de ar funciona como impedimento ao escoamento descendente dos gases de combustão, mantendo-os na câmara superior, facilitando a ignição do combustível. A situação descrita encontra-se representada sob forma de esquema na Figura 7.12 (Silva, 2018). Estando a ignição da biomassa garantida, interrompia-se a alimentação de comburente através do canal inferior, fechando o mesmo.

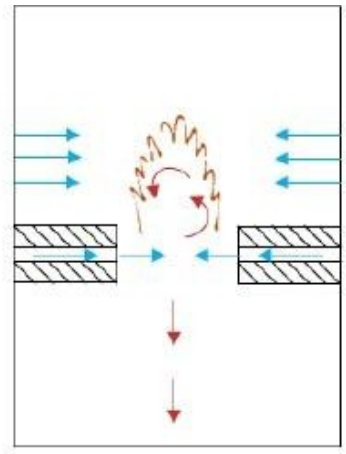


Figura 7.12 - Representação esquemática do circuito inicial dos gases na caldeira (Silva, 2018).

A fase de arranque terminava quando se atingissem as condições próximas de regime permanente, caracterizadas pela estabilização da temperatura da água à saída da caldeira e da temperatura dos gases de exaustão. A composição destes gases não foi determinada na fase de arranque do ensaio.

### 7.7.2 Regime permanente

Assim que se atingem as condições de regime permanente, liga-se os analisadores e as respetivas bombas, iniciando-se assim a aquisição de dados referente a composição dos gases de exaustão. A alimentação de combustível na caldeira era cronometrada, sendo inserido 3 kg de biomassa de 20 em 20 minutos, ao longo de todo o ensaio, com o objetivo de que a potência nominal fosse o mais uniforme possível exceto para os briquetes aditivados com caulino que teve um tempo de alimentação de 24 em 25 minutos. Estas condições de alimentação foram idênticas para todos os ensaios, de modo a avaliar a influência dos diferentes tipos de combustível.

Importa referir que, sendo a alimentação da caldeira manual, o regime permanente foi constantemente afetado sempre que se abria a porta superior, verificando-se oscilações nos parâmetros medidos, nomeadamente o decréscimo da temperatura dos gases de combustão e variação da composição dos mesmos. Assim sendo, desprezou-se os dados relativos ao intervalo de tempo após abertura da porta até que os parâmetros referidos voltassem a estabilizar. Após cada procedimento de alimentação, mediu-se, manualmente, a pressão estática e dinâmica na chaminé da caldeira, recorrendo ao tubo de Pitot Standard registando o valor das mesmas assim como os valores lidos na estação meteorológica, referentes as condições ambientais (Silva, 2018).

Durante a fase de regime permanente, foram registados automaticamente, através do programa *DasyLab*, os valores das temperaturas e do caudal mássico da água assim como da temperatura e da composição dos gases de combustão em cada segundo, seguindo a metodologia adotada por Silva (2018).

Estas oscilações no regime de funcionamento da caldeira, com o processo de alimentação do combustível foram idênticos aos detetados nos trabalhos anteriormente efetuados nesta instalação (Silva, 2018, Morgado, 2019, Braga, 2019) e são uma limitação inerente ao tipo de caldeira em causa, que requer alimentação manual de combustível.

# 8. Procedimento de cálculo

## 8.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para os cálculos necessários à avaliação do desempenho térmico da caldeira, descrevendo-se o procedimento utilizado na determinação das variáveis a medir durante o decorrer do ensaio em fase de regime permanente, bem como no tratamento matemático das mesmas.

Como o objetivo central da presente dissertação é a avaliação do desempenho térmico da caldeira, calculou-se o rendimento térmico da mesma, utilizando o método direto. Para tal, foi necessário determinar o valor médio dos valores de cada uma das variáveis medidas ao longo do ensaio, durante a fase de regime permanente.

Relativamente às temperaturas de entrada e saída e ao caudal mássico de água $\dot{m}_{ag}$, estes foram monitorizados, como já foi referido, no computador disponível no laboratório, através do programa de aquisição de dados do *software DasyLab*, sendo registados com frequência de 1 Hz. O valor médio destas variáveis foi obtido com uma média aritmética simples de todos os valores adquiridos durante a fase de regime permanente. Foi também possível, graças ao *software*, a aquisição dos valores das frações molares dos gases de combustão, através dos analisadores dos mesmos. Os valores médios das frações molares foram obtidos para zonas estáveis do regime permanente, excluindo os intervalos de abertura e fecho da porta da caldeira.

Durante o regime permanente, também se registaram as condições ambientais a que esteve exposto o laboratório: a pressão e temperatura ambiente $P_{amb}$ e $T_{amb}$ respetivamente, a humidade absoluta do ar atmosférico $w_{ar}$, com um espaçamento temporal de 20 minutos, assim como a pressão estática da chaminé $P_{cham}$ e a pressão dinâmica do escoamento $P_{din}$ em diferentes pontos ao longo do diâmetro da conduta de exaustão. Durante os intervalos de 20 minutos foram também calculados o caudal mássico de combustível $\dot{m}_{comb}$ e o caudal mássico dos gases de combustão, recorrendo ao tubo de Pitot *standard* $\dot{m}_{gPitot}$, estando os procedimentos de cálculo nas Secções 8.1 e 8.2, respetivamente.

Para o cálculo do rendimento da caldeira, foi ainda desenvolvida a equação característica da reação estequiométrica e a equação da reação real de combustão, utilizando os procedimentos apresentados nas Secções 8.3 e 8.4, respetivamente. Finalmente, depois de se apresentar o procedimento para o cálculo do rendimento térmico da caldeira através do método direto, na Secção 9.5, assim como o cálculo das perdas térmicas, na Secção 9.6, apresentam-se, ainda os procedimentos de cálculo do teor de cinzas dos combustíveis (ainda que de uma maneira muito simplista) e da temperatura adiabática de chama, nas secções 9.7 e 9.8, respetivamente.

## 8.2 Determinação do caudal mássico

Os briquetes, aquando da sua inserção na caldeira, eram previamente pesados utilizando a balança 1, de modo a atingir a homogeneidade de 3 kg. O valor do caudal mássico de combustível foi calculado pelo quociente da variação da massa, registada na balança 2, e o intervalo de tempo em causa, segundo

$$\dot{m}_{comb\ i} = \frac{m_{db,i-1} - m_{ab,i}}{\Delta t} \tag{8.1}$$

onde $\dot{m}_{comb,i}$ é o caudal mássico de combustível no intervalo de tempo $i$, $m_{db,i-1}$ é a massa registada pela balança 2 imediatamente depois de se colocarem os briquetes na caldeira no intervalo de tempo anterior a $i-1$, $m_{ab,i}$ é a massa registada pela balança 2 imediatamente antes da colocação dos briquetes na caldeira no intervalo de tempo $i$ e $\Delta t$ é o intervalo de tempo em questão.

O caudal mássico dos briquetes de um ensaio foi calculado pela média aritmética dos caudais mássicos obtidos para cada intervalo de 20 minutos, embora quando se queimavam briquetes aditivados com caulino se tenha usado um intervalo de 25 min. É importante mencionar que o caudal mássico não poderia ser calculado utilizando apenas a massa de briquetes lida na balança 1, para um dado intervalo temporal, dado que a colocação dos briquetes não implica necessariamente que estes sejam consumidos na sua

totalidade no período em questão. Assim, utilizando a equação 8.1, a variação de massa é efetivamente aquela que foi consumida no intervalo de tempo em questão.

## 8.3 Determinação do caudal mássico dos gases de combustão.

Como referido no início do presente capítulo, o caudal de gases de exaustão foi determinado durante os mesmos intervalos de tempo definidos para a alimentação da caldeira, recorrendo ao tubo de Pitot *standard*, a partir da pressão dinâmica do escoamento. A velocidade local do escoamento num determinado ponto da conduta de exaustão é determinada por, (Munson, 2012)

$$u_x = \sqrt{\frac{2(P_{estg} - P_{est})}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2P_{din}}{\rho_g}} \tag{8.2}$$

onde $u_x$ corresponde à velocidade local dos gases de combustão e $\rho_g$ corresponde à massa volúmica dos gases húmidos de combustão. A determinação desta variável será demonstrada ao longo da Secção 9.4.

Para determinar os locais de medição ao longo do diâmetro da conduta escolheram-se três pontos já utilizados por Silva (2018), sendo o ponto 1 definido por $0{,}081D$, o ponto 2 por $0{,}500D$ e o ponto 3 por $0{,}0919D$, sendo $D$ o diâmetro da conduta. Calculadas as velocidades referentes a cada ponto, a velocidade média do escoamento é determinada pela equação 6.3.

$$\bar{u} = \frac{1}{5}[u_2 + 2(u_1 + u_3)] \tag{8.3}$$

onde $\bar{u}$ é a velocidade média do escoamento dos gases de combustão e $u_x$ corresponde à velocidade local no ponto $x$. Conhecida a velocidade médio dos gases na conduta, é possível então calcular o caudal mássico do escoamento segundo

$$\dot{m}_{gPitot} = A\rho_g\bar{u} \tag{8.4}$$

onde $\dot{m}_{gPitot}$ é o caudal mássico dos gases de combustão recorrendo ao tubo de Pitot standard e $A$ é a área da secção da conduta.

## 8.4 Determinação da equação estequiométrica e completa

Para uma melhor compressão da proveniência de cada componente presente na equação química da reação, procedeu-se à apresentação de um índice em cada molécula da mesma. O índice $ar$ remete para os constituintes atmosféricos, ou dele provenientes, o índice $b$ remete para a composição química dos briquetes, ou deles provenientes, e, finalmente, o índice $c$ está associado aos elementos com origem na combustão. Assim sendo, a equação estequiométrica é apresentada seguidamente.

$$n_{R1}(\mathrm{C})_b + n_{R2}(\mathrm{H_2})_b + n_{R3}(\mathrm{O_2})_b + n_{R4}(\mathrm{N_2})_b + n_{R5}(\mathrm{S_2})_b + n_{R0}(\mathrm{O_2} + 3{,}76\mathrm{N_2})_{ar} \rightarrow n_{P1}(\mathrm{CO_2})_c + n_{P2}(\mathrm{H_2O})_c + n_{P3}(\mathrm{N_2})_t + n_{P4}(\mathrm{SO_2})_c \quad (8.5)$$

onde os $n_{Ri}$ se referem aos coeficientes estequiométricos dos reagentes e $n_{Pi}$ aos coeficientes estequiométricos dos produtos. Importa referir que a equação 6.5 foi escrita considerando 1 kg de combustível, sendo os coeficientes mencionados exprimidos em kmol/$\mathrm{kg_{comb}}$.

Os coeficientes estequiométricos dos reagentes assinalados com índice $b$ são calculados recorrendo-se à composição química dos briquetes, na base húmida.

$$n_{Ri} = \frac{y_h(i)}{M_i} \quad (8.6)$$

sendo $M_i$ a massa molecular do constituinte $i$.

Assim sendo, desconhecem-se apenas quatro dos coeficientes descritos na equação 8.6 ($n_{R0}$, $n_{P1}$, $n_{P2}$, $n_{P3}$). O valor dos coeficientes é calculado recorrendo ao princípio de conservação de massa, sendo necessário efetuar um balanço de carbono, hidrogénio, oxigénio e azoto. Mais detalhes sobre o procedimento podem ser consultados em Silva (2018).

A partir da equação estequiométrica, calcularam-se então as incógnitas ($n_{R0}$, $n_{P1}$, $n_{P2}$, $n_{P3}$) com os respetivos coeficientes do combustível, obtidos a partir dos resultados da análise química dos briquetes no laboratório. De realçar que o cálculo das incógnitas teve-se como principal objetivo o cálculo de $n_{R0}$, que posteriormente foi usado na equação real da combustão. A Tabela 8.1 mostra os respetivos resultados do cálculo. Onde TA

(tojo-amido), TC(tojo-caulino), TG(tojo-glicerol), VA (videira-amido), VC (videira-caulino), VG (videira-glicerol).

## 8.5 Determinação da equação da combustão real

Na secção anterior, apresentou-se a equação estequiométrica da reação de combustão completa. Contudo, na prática, a reação de combustão é incompleta e ocorre com excesso de ar, sendo necessário reescrever a equação química. Novamente começou-se com o anteriormente desenvolvido por Silva (2018) e equação da reação real de combustão é então:

$$n'_{R1}(\mathrm{C})_b + n'_{R2}(\mathrm{H_2})_b + n'_{R3}(\mathrm{O_2})_b + n'_{R4}(\mathrm{S_2})_b + n'_{R5}(\mathrm{N_2})_b + n_{R0}\left(1+\frac{e}{100}\right)(\mathrm{O_2} + 3{,}76\mathrm{N_2})_{ar} \rightarrow n'_{P1}(\mathrm{CO_2})_c + n'_{P2}(\mathrm{H_2O})_c + n'_{P3}(\mathrm{N_2})_t + n'_{P4}(\mathrm{SO_2})_c + n'_{P5}(\mathrm{O_2})_{ar} + n'_{P6}(\mathrm{CO})_c \quad (8.7)$$

onde $e$ é o excesso de ar, $n'_{Ri}$ são os coeficientes dos reagentes da reação real de combustão e $n'_{Pi}$ são os coeficientes dos produtos da reação real de combustão. Usando o mesmo raciocínio do caso anterior, também a equação da reação real de combustão foi escrita considerado 1 kg de combustível, encontrando-se os coeficientes $n'_{Ri}$ e $n'_{Pi}$ em kmol/kg$_{comb}$.

Em ambas as equações (estequiométrica ou real) não se contabilizam os óxidos de azoto, já que as suas emissões contribuem minimamente para os cálculos efetuados no balanço energético Assim sendo, os valores das frações molares dos óxidos de azoto foram considerados apenas para a análise da higiene da combustão, sendo a sua contribuição para o balanço mássico de gases de combustão desprezável (Silva, 2018).

Os coeficientes dos reagentes constituintes dos briquetes são já conhecidos visto que o valor dos mesmos é igual aos da equação estequiométrica já que são ambos calculados através da equação 8.7, ficando os restantes onze coeficientes como incógnitas. Utilizando as equações resultantes do balanço mássico, à semelhança da secção anterior, chega-se ao valor de todas as incógnitas, adicionando duas equações e resolvendo um sistema de onze equações a onze incógnitas. As duas equações adicionais utilizam a composição molar dos gases de combustão, na base seca, fornecida pelos analisadores, nomeadamente a fração molar do monóxido de carbono, $x_s(\mathrm{CO})$, e do dióxido de carbono

$x_s(\mathrm{CO_2})$. Assim sendo, as incógnitas da equação real da combustão são determinadas recorrendo ao sistema de equações (8.8 a 8.14) apresentado seguidamente:

$$n'_{R1} = n'_{P1} + n'_{P6} \tag{8.8}$$

$$n'_{R2} = n'_{P2} \tag{8.9}$$

$$n'_{R4} = n'_{P4} \tag{8.10}$$

$$2n'_{R3} + 2n_{R0} + 2en_{R0} = 2n'_{P1} + n'_{P2} + 2n'_{P4} + 2n'_{P5} + n'_{P6} \tag{8.11}$$

$$n'_{R5} + 3{,}76n_{R0}(1+e) = n'_{P3} \tag{8.12}$$

$$\frac{n'_{P1}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} = x_s(CO_2) \tag{8.13}$$

$$\frac{n'_{P6}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} = x_s(\mathrm{CO}) \tag{8.14}$$

De notar que com a resolução do sistema de equações acima apresentado, além de calculados os coeficientes da reação real de combustão, também é possível determinar o excesso de ar da reação real.

o caudal mássico dos gases de combustão recorrendo ao tubo de Pitot standard $\dot{m}_{gPitot}$, como apresentado na Secção 9. Analisando a equação 8.4, verifica-se que o caudal mássico dos gases de combustão calculado recorrendo ao tubo de Pitot depende da massa volúmica dos gases, sendo esta obtida através do conhecimento da composição molar dos gases de combustão, na base húmida, contrariamente à composição molar fornecida pelos analisadores (na base seca). A fração molar na base húmida de cada constituinte, $x_h(i)$, é calculada recorrendo aos coeficientes da equação real de combustão, segundo as equações 8.15 a 8.20.

$$x_h(\mathrm{CO_2}) = \frac{n'_{P1}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.1}$$

$$x_h(\mathrm{H_2O}) = \frac{n'_{P2}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.2}$$

$$x_h(\mathrm{N_2})_b = \frac{n'_{P3}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.3}$$

$$x_h(\mathrm{SO_2}) = \frac{n'_{P4}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.18}$$

$$x_h(\mathrm{O_2}) = \frac{n'_{P5}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.19}$$

$$x_h(\mathrm{CO}) = \frac{n'_{P6}}{n'_{P1} + n'_{P3} + n'_{P4} + n'_{P5} + n'_{P6}} \tag{8.20}$$

A massa molecular dos gases húmidos calcula-se então através da equação 8.21,

$$M_h = \sum M_i x_h(i) \tag{8.21}$$

onde $M_h$ é a massa molecular dos gases húmidos de combustão. De notar que neste cálculo faz-se a distinção entre o azoto proveniente dos briquetes com massa molecular $M_{\mathrm{N}_2,b}$ igual a 28,013 kg/kmol, e o azoto do ar atmosférico com massa molecular $M_{\mathrm{N}_2,ar}$ igual a 28,150 kg/kmol. Este último valor considera a contribuição dos elementos residuais do ar atmosférico, sendo, por este facto, diferente do valor da massa molecular do azoto puro. Finalmente calcula-se a massa volúmica dos gases húmidos de combustão, através da equação dos gases perfeitos,

$$\rho_g = \frac{P_{amb} + P_{cham}}{\frac{\bar{R}}{M_h} \cdot T_{amb}} \tag{8.22}$$

onde $\bar{R}$ é a constante universal dos gases perfeitos, igual a 8.314 J/(kmol·K).

A terminar calculam-se dois erros referentes ao caudal dos gases de combustão. O primeiro, designado $erro_{eq}$, é o erro relativo entre o valor do caudal mássico dos produtos de combustão, $\dot{m}_P$, e o valor do caudal mássico dos gases de combustão calculado recorrendo aos coeficientes da equação real de combustão, $\dot{m}_{geq}$. O segundo, chamado $erro_{Pitot}$, é o erro relativo entre o mesmo valor do caudal mássico dos produtos e o valor do caudal mássico dos gases de combustão recorrendo ao tubo de Pitot standard, $\dot{m}_{gPitot}$. Os dois erros supramencionados calculam-se segundo as equações 7.44 e 7.45, respetivamente.

$$erro_{eq} = \frac{\left|\dot{m}_P - \dot{m}_{geq}\right|}{\dot{m}_P} \tag{8.23}$$

$$erro_{Pitot} = \frac{\left|\dot{m}_P - \dot{m}_{gPitot}\right|}{\dot{m}_P} \tag{8.24}$$

## 8.6 Determinação do rendimento térmico da caldeira

Recorrendo ao método direto, o rendimento térmico da caldeira é calculado através da equação 8.46

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{útil}}{\dot{Q}_{forn}} \tag{8.4}$$

onde $\dot{Q}_{forn}$ é a potência térmica libertada na combustão dos briquetes e $\dot{Q}_{útil}$ é potência térmica útil transferida para a água do circuito da caldeira.

A potência térmica fornecida à caleira foi calculada de acordo com a equação 8.47:

$$\dot{Q}_{forn} = \dot{m}_{comb} PCI_{comb} \tag{8.5}$$

onde $PCI_{comb}$ é o poder calorífico inferior do combustível. Para os diversos tipos de combustíveis, foi sempre usado o poder calorífico inferior, na base seca, assegurando-se que a comparação entre os diferentes briquetes é realizada numa referência comum de teor de humidade.

A potência térmica transferida para a água foi calculada realizando-se um balanço de massa e de energia ao volume de controlo (permutador de calor da caldeira). Na resolução do balanço de massa, considerou-se:

- uma única entrada e uma única saída;
- a velocidade do escoamento uniforme através das secções de entrada e de saída;
- a massa volúmica da água uniforme através das secções de entrada e de saída.

Deste modo,

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{sai} \equiv \dot{m}_{ag} \tag{8.6}$$

Por sua vez, recorrendo ao princípio de conservação de energia, tendo em atenção as seguintes condições:

- variações de energia cinética e potencial desprezáveis, entre a única entrada e a única saída, dada a mesma dimensão da secção de entrada e saída e a pequena variação de cota entre as mesmas;
- inexistência de qualquer forma de trabalho exterior;
- entalpia da água como o produto entre o calor específico mássico e a temperatura, uma vez que a água se encontra no estado de líquido incompressível;

chegou-se a,

$$\dot{Q}_{útil} = \dot{m}_{ag}\tilde{c}_{ag}(T_{sai} - T_{ent}) \quad (8.7)$$

Na equação anterior, $\tilde{c}_{ag}$ é o calor específico mássico da água à temperatura média (entre $T_{sai}$ e $T_{ent}$), $T_{sai}$ é a temperatura da água à saída da caldeira e $T_{ent}$ é a temperatura da água à entrada da caldeira.

Todas as variáveis relevantes para o cálculo do rendimento térmico da caldeira, foram determinadas pelo método direto.

## 8.7 Determinação das perdas térmicas

As perdas térmicas provenientes da caldeira podem dividir-se em três grupos consoante a sua origem: perdas térmicas na corrente dos gases de exaustão, perdas térmicas por queima incompleta e perdas térmicas por radiação, convecção e condução.

As perdas térmicas na corrente dos gases de exaustão $\dot{Q}_g$ dividem-se ainda em perdas latentes e perdas sensíveis. O primeiro grupo diz respeito à potência térmica usada na mudança de fase da água. Uma vez que a água proveniente do ar ambiente entra na caldeira já em vapor de água, não é contabilizada neste grupo. Deste modo, as perdas térmicas latentes na corrente dos gases de exaustão $\dot{Q}_{gl}$ são referentes apenas à humidade presente no combustível, calculadas através de

$$\dot{Q}_{gl} = \alpha\dot{m}_{comb}h_{lv} \quad (8.5)$$

onde $\alpha$ representa a fração mássica de água no combustível e $h_{lv}$ corresponde à entalpia latente de vaporização da água a 25º C, igual a 2442 kJ/kg.

Já as perdas térmicas sensíveis na corrente dos gases de exaustão $\dot{Q}_{gs}$ são calculadas segundo a equação 8.6

$$\dot{Q}_{gs} = \tilde{c}_{P_g}\dot{m}_g(T_g - T_{amb}) \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \dot{Q}_{gs} = [(n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{H_2O}} + (n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{CO_2}} + (n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{O_2}} + (n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{CO}} + (n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{N_2}} + (n'_P M\tilde{c}_P)_{\mathrm{SO_2}}]\dot{m}_{comb}(T_g - T_{amb}) \quad (8.6)$$

onde $\tilde{c}_{P_g}$ é o calor específico mássico dos gases húmidos de exaustão a pressão constante à temperatura média (entre $T_g$ e $T_{amb}$), $n'_P(i)$ é a quantidade química de cada gás de exaustão por quilograma de combustível, $\tilde{c}_{P_{Pi}}$ é o calor específico mássico do produto $i$ a pressão constante à temperatura média (entre $T_g$ e $T_{amb}$), $T_g$ é a temperatura dos gases de exaustão e $T_{amb}$ é a temperatura do ar ambiente. Importa salientar que a água incluída nesta equação é relativa às três parcelas de água apresentadas na equação estequiométrica: água proveniente da humidade do ar, água proveniente da humidade do combustível e água formada durante a combustão.

As perdas térmicas por queima incompleta traduzem-se em componentes não queimados na corrente dos gases de exaustão, nomeadamente o monóxido de carbono, e em combustível não queimado presente nas cinzas e na escória. As perdas térmicas por não queimados, relativamente ao monóxido de carbono $\dot{Q}_{\mathrm{CO}}$ são calculas através da equação 8.7

$$\dot{Q}_{\mathrm{CO}} = \dot{m}_{\mathrm{CO}} PC_{\mathrm{CO}} = (n'_P M)_{\mathrm{CO}}\dot{m}_{comb} PC_{\mathrm{CO}} \quad (8.7)$$

onde $\dot{m}_{\mathrm{CO}}$ é o caudal mássico de monóxido de carbono nos produtos de combustão e $PC_{\mathrm{CO}}$ é o poder calorífico do monóxido de carbono, igual a 10.102 kJ/kg.

O cálculo das perdas por combustível não convertido presente nas cinzas deve ser realizado tendo em conta a separação de cinzas de fundo e cinzas voláteis. Contudo não se chegou a determinar o valor destas perdas térmicas devido à falta de conhecimento e de tempo de análise relativamente às frações mássicas das cinzas voláteis e de fundo, assim como a fração mássica de inertes no combustível na base húmida, não se sabendo assim o teor de carbono das cinzas, assim como a sua composição química.

O último grupo de perdas térmicas diz respeito a perdas via convecção, condução e radiação. O valor destas perdas térmicas não foi calculado devido à sua reduzida contribuição quando comparada com as perdas térmicas provenientes dos gases de exaustão. Assim sendo, fechou-se o balanço térmico. O somatório da potência transferida para a água e de todas as perdas térmicas terá de ser igual à potência total fornecida à caldeira, traduzido na equação 8.8.

$$\dot{Q}_{forn} = \dot{Q}_{útil} + \dot{Q}_{gs} + \dot{Q}_{gl} + \dot{Q}_{CO} + \dot{Q}_{outras} \quad (8.8)$$

onde $\dot{Q}_{outras}$ corresponde à perda térmica das fontes não contabilizadas, como por exemplo as perdas térmicas por combustível não convertido e por convecção, condução e radiação.

O cálculo das perdas sensíveis dos gases de exaustão depende do valor médio dos calores específicos mássicos dos gases de exaustão a pressão constante obtidos à temperatura média entre a temperatura dos gases e a temperatura ambiente, como se pode observar na equação 8.8.

## 8.8 Determinação do teor de cinzas do combustível

Como já foi referido, a análise de cinzas não foi analisada de um modo profundo por escassez de recursos. Contudo, no final de cada ensaio, foi realizada uma avaliação simplista do teor de cinzas de cada combustível, recorrendo à balança 2, a partir da qual foram registados os valores da massa antes e depois de se retirarem as cinzas da caldeira de ambas as câmaras (superior e inferior). Para os ensaios realizados, o teor de cinzas de cada combustível foi calculado de acordo com a equação 8.9.

$$t_{cinzas} = \frac{m_{ac} - m_{dc}}{m_{comb,i}} \quad (8.9)$$

onde $t_{cinzas,i}$ é o teor de cinzas do combustível $i$, $m_{ac}$ é a massa registada pela balança 2 antes de se retirar as cinzas das câmaras da caldeira, $m_{dc}$ é a massa registada pela mesma balança depois de retirarem as cinzas e $m_{comb,i}$ é a massa do combustível $i$. O valor médio do teor de cinzas de tipo de briquetes foi calculado pela média aritmética dos

valores dos teores de cinza de todos os ensaios referente a cada espécie e temperatura de entrada da água utilizada.

# 9. Resultados e discussão

## 9.1 Introdução

No presente capítulo, apresentam-se e analisam-se os resultados experimentais obtidos relativamente aos seis tipos de briquetes estudados nos ensaios realizados, com o objetivo de determinar o rendimento térmico da caldeira. O cerne da presente dissertação é a avaliação do desempenho térmico e as emissões poluentes em regime permanente, portanto o foco será na fase em que as condições estão próximas do mesmo. Todos os ensaios decorreram em condições de utilização semelhantes, quer no caudal mássico de água, quer na quantidade de carga de briquetes para a alimentação da caldeira mas os intervalos de tempo forram ligeiramente diferentes devido o tempo de queima para cada tipo de briquete mas em média o tempo de alimentação variou de 20 a 30 minutos dependentemente do tipo de briquete. As espécies analisadas serão designadas pela letra inicial da biomassa e do aditivo, como por exemplo, TA representa o primeiro ensaio utilizando briquetes provenientes de tojo e amido. Os briquetes de tojo serão então abreviados por T e os briquetes de aparas de poda de videira por V.

Na Tabela 9.1 apresentam-se as condições de operação da caldeira para todos os ensaios realizados como o caudal mássico médio de água no circuito interior da caldeira $\dot{m}_{ag}$, as temperaturas de entrada e saída médias da água $T_{ent}$ e $T_{sai}$, bem como a diferença entre elas. Apresenta-se também, o caudal mássico médio de combustível durante cada ensaio $\dot{m}_{comb}$, bem como o teor de cinzas $t_{cinzas}$.

Tabela 9.1-Condiçoes de operação da caldeira nos ensaios realizados

| Ensaio | $\dot{m}_{comb}$ [kg/h] | $\dot{m}_{ag}$ [kg/h] | $T_{ent}$ [ºC] | $T_{sai}$ [ºC] | $\Delta T$ [ºC] | $t_{cinzas}$ **[%]** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TA | 6,27 | 6,66 | 47,49 | 79,45 | 31,96 | 17,03 |
| TC | 6,03 | 6,81 | 45,28 | 75,03 | 29,75 | 17,16 |
| TG | 6,32 | 7,32 | 37,40 | 74,58 | 37,18 | 7,30 |
| VA | 7,58 | 6,56 | 45,10 | 69,89 | 24,80 | 16,60 |
| VC | 6,03 | 6,81 | 45,27 | 75,02 | 29,7 | 15,25 |
| VG | 8,30 | 9,31 | 13,17 | 43,33 | 30,16 | 7,13 |

É de notar que o valor do teor de cinzas para os briquetes aditivados com caulino, com 17,16 % para o tojo e 15,25 % para a videira são valores ligeiramente elevados comparados com os restantes briquetes feitos com amido (17,03 % com tojo e 16,60 % com videira) e bastante superior aos briquetes aditivados com glicerol. Isto deve-se ás características físico-químicas do caulino que se traduz na maior quantidade de cinza depois da queima.

Na Tabela 9.2, apresentam-se os valores dos caudais mássicos de combustível $\dot{m}_{comb}$, do ar húmido comburente, $\dot{m}_{ar,h}$, e dos reagentes, $\dot{m}_R$, sendo este igual à soma dos dois primeiros. Apresentam-se ainda os valores dos caudais mássicos dos gases húmidos de exaustão, recorrendo ao balanço mássico da equação real de combustão, $\dot{m}_{g,bal}$

Tabela 9.2-Caudais mássicos de combustíveis, de ar e dos gases de combustão

| Ensaio | $\dot{m}_{comb}$ [kg/h] | $\dot{m}_{ar,h}$ [kg/h] | $\dot{m}_R$ [kg/h] | $\dot{m}_{g,bal}$ [kg/h] | $\dot{m}_{gPitot}$ [kg/h] | $erro_{pitot}$ **[%]** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TA | 6,27 | 159,30 | 165,57 | 166,87 | 95,84 | 42,11 |
| TC | 6,03 | 152,64 | 158,67 | 159,61 | 89,14 | 43,82 |
| TG | 6,32 | 159,93 | 166,25 | 166,98 | 88,21 | 46,94 |
| VA | 7,58 | 193,41 | 200,99 | 202,75 | 79,64 | 60,38 |
| VC | 6,03 | 151,78 | 157,78 | 158,71 | 89,17 | 43,48 |
| VG | 8,30 | 207,21 | 215,51 | 217,19 | 57,92 | 73,13 |

Analisando a tabela anterior, é possível concluir que o caudal mássico recorrendo ao balanço mássico da equação real de combustão é concordante com o caudal mássico dos reagentes, ao que se optou por não se apresentar o respetivo erro de cálculo, uma vez que os valores deste erro eram muitíssimo reduzidos. Por outro lado, o erro relativo recorrendo ao tubo de Pitot é muito mais significativo, atingindo valores de erro até cerca dos 73,13 %, como tal, não foram utilizados em qualquer análise de desempenho da caldeira, devido à sua irregularidade. Esta diferença é explicada devido ao entupimento do tubo, graças ao caudal de gases e partículas a que o mesmo está exposto durante os ensaios, afetando assim o processo de medição. Para uma medição mais assertiva esta deveria ser tal que o perfil de velocidade neste local tivesse um desenvolvimento regular e sem turbulência excessiva, nem rotação. Para isto, a secção de medição deveria

apresentar uma distância livre de obstáculos a montante e a jusante de 20 e 5 diâmetros, respetivamente (Coelho, 2014). Na prática não foi possível de satisfazer esta condição, devido ao comprimento insuficiente da conduta de exaustão, pelo que não se garantiu um escoamento desenvolvido.

## 9.2 Análise do rendimento térmico

Na presente secção, serão apresentados os valores obtidos para o rendimento térmico da caldeira para cinco dos seis ensaios, isto porque do tojo e glicerol apresentou resultados muito baixo do esperado. Vamos também apresentar os valores das várias perdas térmicas analisadas. A Figura 9.1 representa a evolução do rendimento térmico de cada ensaio para uma base temporal de 60 minutos.

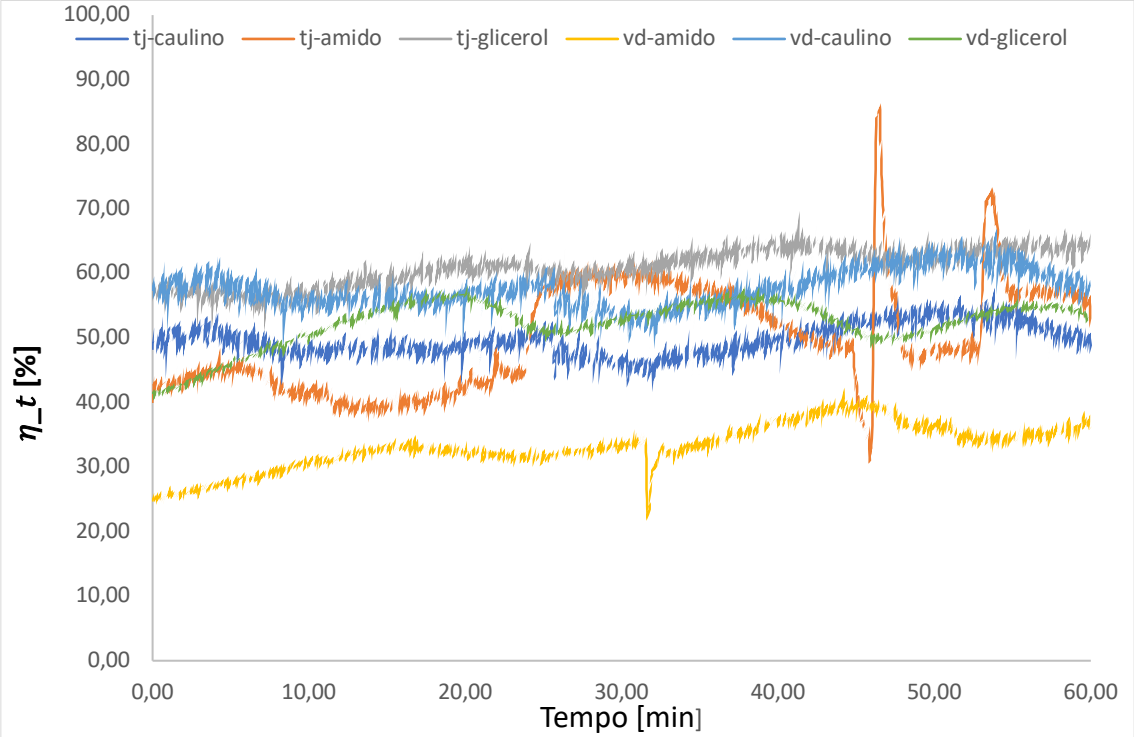



Figura 9.1 - Rendimento térmico dos cinco dos ensaios realizados.

Como se pode verificar pela observação na Figura 9.1, o rendimento térmico durante cada ensaio apresenta diversas flutuações, apresentando um comportamento quase constante, exceto para os briquetes de tojo aditivados com amido que apresenta um comportamento menos constante devido a falhas técnicas na alimentação da

caldeira. No decorrer de cada ensaio, alimentou-se a caldeira, manualmente, em intervalos diferentes consoante o tipo de aditivo (cada aditivo queima mais rápido ou mais lento para a mesma biomassa. Ex: os briquetes feitos com caulino demora mais tempo a queimar, 25-30 minutos em relação aos briquetes feitos com glicerol, 20 minutos), pelo que as flutuações mais acentuadas são explicadas pela abertura e fecho da porta da caldeira, o que afeta as condições de queima, impedindo a manutenção do regime permanente, e as flutuações mais ligeiras tem a ver com a mistura entre a biomassa e o aditivo, isto porque a mistura não foi consideravelmente homogénea pelo facto de misturamos a biomassa e o aditivo num balde, facto este que durante a queima justifica as ligeiras flutuações da temperatura da chama e consequentemente do rendimento.

Na Tabela 9.3, apresenta-se o caudal mássico médio de combustível $\dot{m}_{comb}$, a potência média fornecida à caldeira $\dot{Q}_{forn}$, a potência média útil transferida para a água $\dot{Q}_{util}$, e o rendimento térmico médio da caldeira $\bar{\eta}_t$ .

Tabela 9.3-Rendimento térmico médio da caldeira nos ensaios realizados

| Ensaio | $\dot{m}_{comb}$ [kg/h] | $\dot{Q}_{útil}$ [kW] | $\dot{Q}_{forn}$ [kW ] | $T_{ent_ag}$ [ºC] | $\bar{\eta}_t$ [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| TA | 6,27 | 14,82 | 29,78 | 47,49 | 49,76 |
| TC | 6,03 | 14,12 | 28,44 | 45,28 | 49,66 |
| TG | 6,32 | 18,97 | 31,13 | 37,40 | 60,95 |
| VA | 7,58 | 11,33 | 34,09 | 45,10 | 33,24 |
| VC | 6,03 | 14,12 | 24,50 | 45,27 | 57,64 |
| VG | 8,30 | 19,56 | 37,42 | 13,17 | 52,26 |

Como se pode verificar da análise da tabela anterior, os rendimentos médios encontram-se entre 33,24 e 60,95 %, sendo tal o reflexo de um baixo desempenho térmico da caldeira. O rendimento obtido para os briquetes do tipo TG (tojo-glicerol) 60,95 %, corresponde ao maior rendimento entre todos os ensaios, seguindo-se o rendimento dos briquetes do tipo VC (videira-caulino), igual a 57,64%. Uma vez que a diferença entre os dois maiores rendimentos é ligeira, os resultados obtidos pelo laboratório do INEGI

podem, de facto, corresponder à realidade. O menor rendimento foi 33,24 % obtido no ensaio usando briquetes videira e amido.

Tabela 9.4-Análise das perdas térmicas dos ensaios realizados

| Ensaio | $\dot{Q}_{forn}$ [kW] | $\dot{Q}_g$ [ kW ] | $\dot{Q}_g$ [ %] | $\dot{Q}_{co}$ [kW] | $\dot{Q}_{co}$ [%] | $\dot{Q}_{outras}$ [kW] | $\dot{Q}_{outras}$ [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TA | 29,78 | 9,29 | 2,27 | 0,26 | 0,89 | 19,6 | 65,8 |
| TC | 28,44 | 9,77 | 2,43 | 0,32 | 0,93 | 17,74 | 62,4 |
| TG | 31,74 | 8,89 | 2,56 | 0,26 | 0,83 | 22,02 | 69,4 |
| VA | 34,74 | 8,12 | 3,15 | 0,38 | 0,77 | 25,85 | 70,4 |
| VC | 24,50 | 11,29 | 2,77 | 0,08 | 1,53 | 11,68 | 47,7 |
| VG | 37,42 | 8,88 | 3,45 | 0,70 | 1,38 | 27,16 | 72,6 |

Segundo a Tabela 9.4 é fácil observar que quanto maior for a potência fornecida maior são as perdas térmicas relativa aos gases de exaustão.

As perdas térmicas nos gases de exaustão apresentam valores na gama entre os 2,7 e 7,39 % da potência térmica fornecida, representando uma gama bastante estreita. Não se verifica nenhuma relação específica entre as perdas térmicas dos gases e o caudal mássico do combustível (potência fornecida à caldeira), uma vez que o valor das perdas é aproximadamente constante, independentemente do caudal mássico de alimentação.

Relativamente às perdas de não queimados, pela existência de monóxido de carbono nos gases de exaustão, este valor é máximo e igual a 1,38 % da potência térmica fornecida para briquetes de videira e amido. Nos restantes ensaios, estas perdas são ligeiramente reduzidas, situando-se entre 0 e 1,32% da potência térmica fornecida.

## 9.3 Análise da emissão de poluentes

Nesta secção apresentam-se os resultados referentes à higiene da combustão, analisando-se a influência do aditivo, do tipo de combustível e do caudal mássico de combustível na emissão de poluentes.

Foi necessário um tratamento em folha de cálculo dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, de modo a excluírem-se os valores anormais verificados nas alturas de alimentação manual da caldeira.

**Análise dos gases poluentes nomeadamente o oxigénio para os briquetes aditivados com amido.**

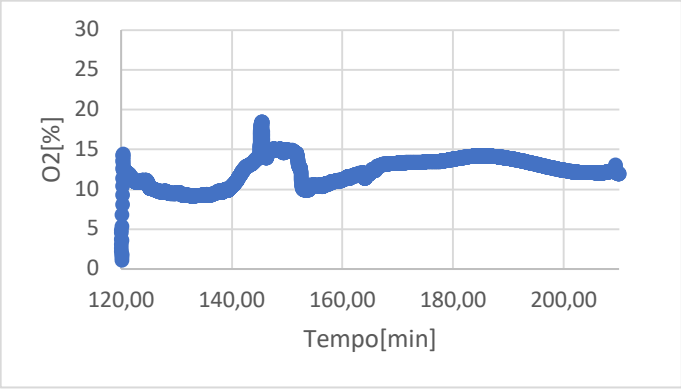



Figura 9.2 - Comportamento do oxigénio para briquetes TA.

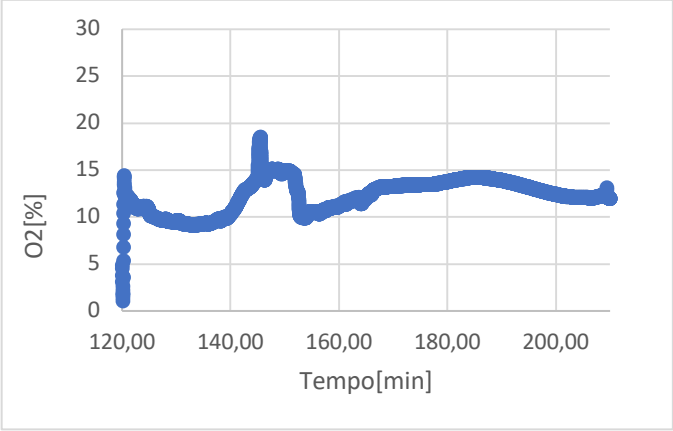



Figura 9.3 - Comportamento do oxigénio para briquetes VA.

onde TA correspondem aos briquetes feitos de tojo como biomassa e amido como aditivo, e VA correspondem aos briquetes feitos de videira como biomassa e amido como aditivo.

Analisando as Figuras 9.2 e 9.3 verifica-se que ocorria alimentação da caldeira de 20 em 20 minutos tanto no ensaio de tojo como de videira, ao longo da alimentação da caldeira, com a abertura da câmara superior a concentração de oxigénio aumentava para os briquetes TA e VA. Salienta-se que o aumento da concentração de oxigénio é independente do tipo de biomassa para este caso.

**Análise dos gases poluentes nomeadamente o dióxido de carbono para os briquetes aditivados com amido.**

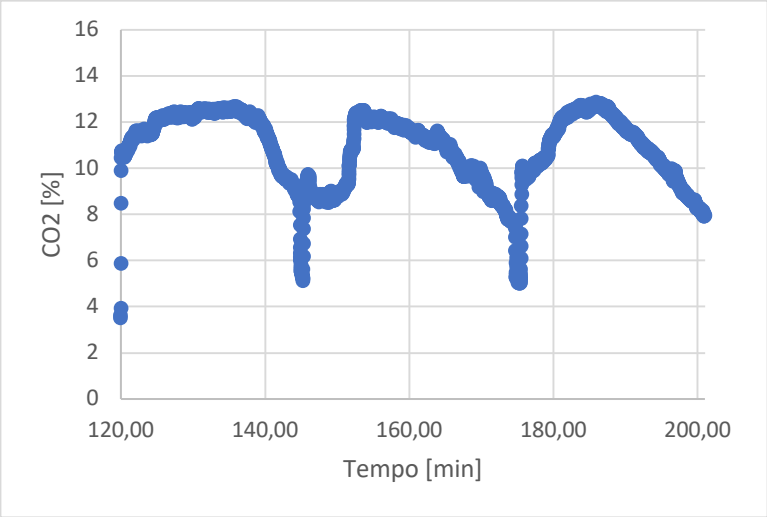



Figura 9.4 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes TA.

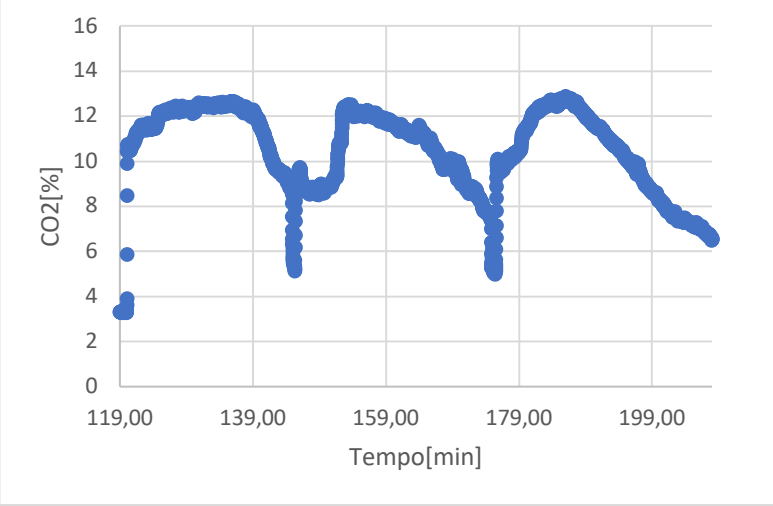



Figura 9.5 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes VA.

Analisando as Figuras 9.4 e 9.5 verifica-se que ocorria alimentação da caldeira de 20 em 20 minutos tanto no ensaio de tojo como de videira, ao longo da alimentação da caldeira, com a abertura da câmara superior a concentração de dióxido de carbono diminuía para os briquetes TA e VA. Salienta-se que a redução da concentração de dióxido de carbono é independente do tipo de biomassa para este caso.

**Análise dos gases poluentes nomeadamente o oxigénio para os briquetes aditivados com caulino.**

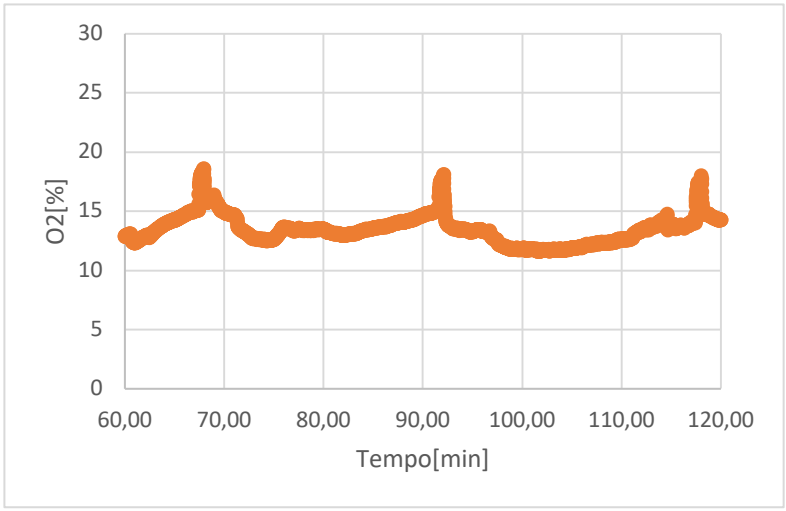



Figura 9.6 - Comportamento do oxigénio para briquetes TC.

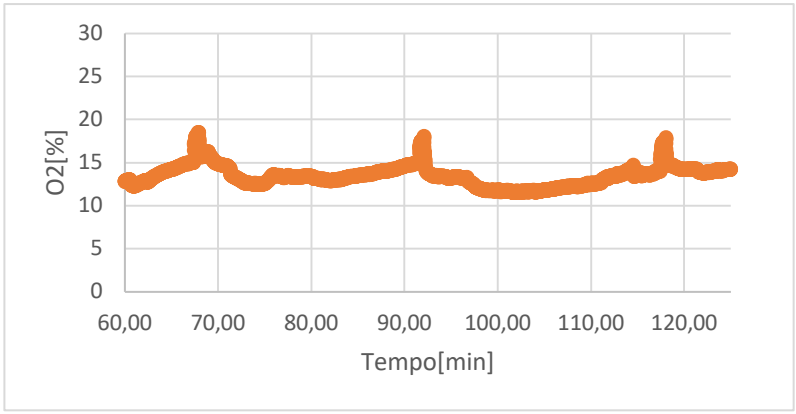



Figura 9.7 - Comportamento do oxigénio para briquetes VC.

Analisando as Figuras 9.6 e 9.7 verifica-se que ocorria a alimentação da caldeira de 20 em 20 minutos tanto no ensaio de tojo como de videira. Ao longo da alimentação da caldeira, com a abertura da câmara superior a concentração de oxigénio aumentava para os briquetes TA e VA. Salienta-se que o aumento da concentração de oxigénio é independente do tipo de biomassa para este caso.

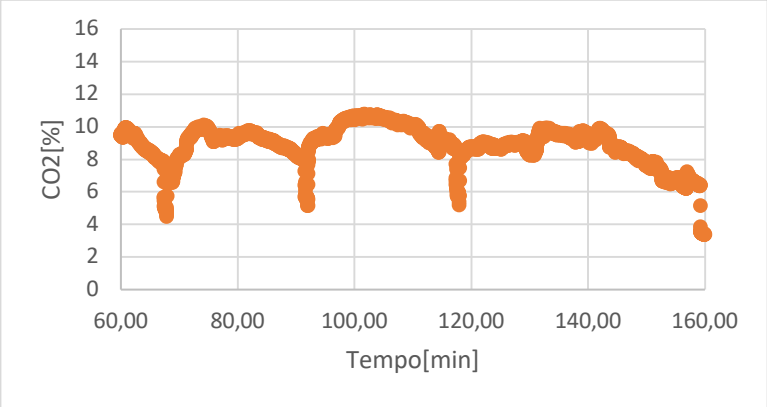



Figura 9.8 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes VC.

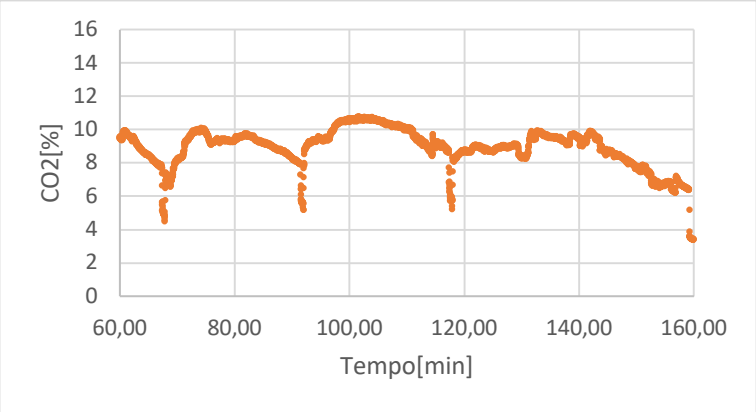



Figura 9.9 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes TC.

**Análise dos gases poluentes nomeadamente o oxigénio para os briquetes aditivados com glicerol.**

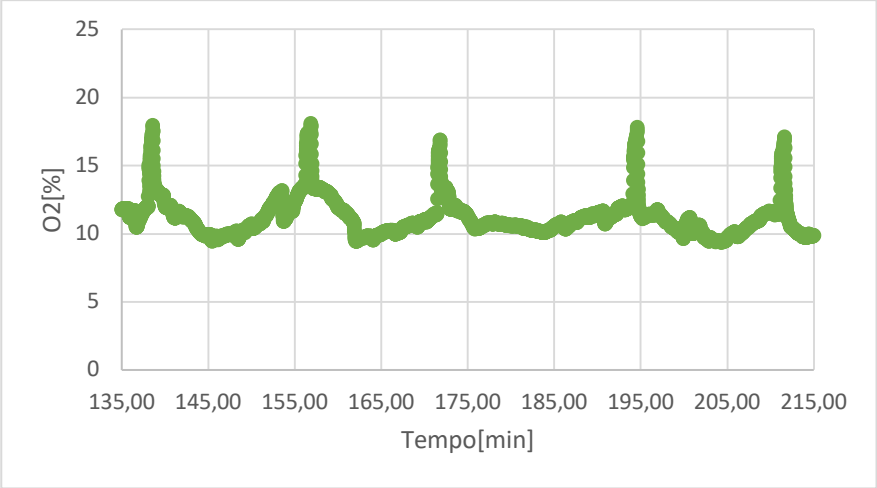



Figura 9.10 - Comportamento do oxigénio para briquetes VG.

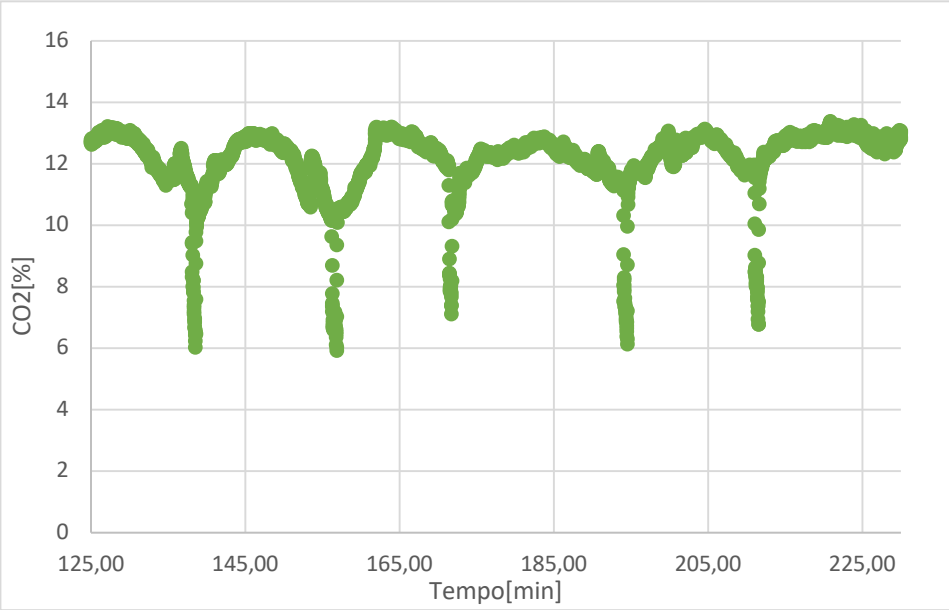



Figura 9.11 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes VG.

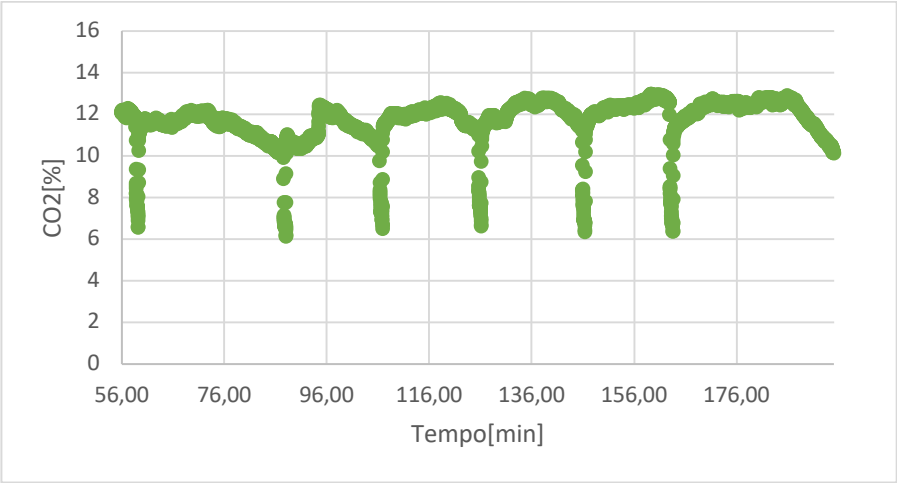



Figura 9.12 - Comportamento do dióxido de carbono para briquetes TG.

Na Tabela 9.5 apresenta-se a composição média dos gases de exaustão, na base seca $x_s(i)$, proveniente dos analisadores e ainda o valor médio da temperatura dos gases de exaustão, $\bar{T}_g$, para cada ensaio. Os valores registados já são alvo das correções através da calibração dos analisadores, assim como só são contabilizados os valores adquiridos pelo programa de aquisição de dados quando a porta da caldeira está fechada. Contudo, em vários ensaios, o analisador de oxigénio demonstrou problemas técnicos, ficando mesmo sem funcionar nos dois últimos ensaios pelo que o seu valor foi calculado a partir da fração molar de dióxido de carbono, através da equação 9.1, o qual estará a azul na

$$e = \frac{x_s(O_2)}{0{,}21 - x_s(O_2)} \tag{9.1}$$

Relativamente às emissões de monóxido de carbono, a Norma Europeia EN 14785:2008, referente a aparelhos domésticos para aquecimento ambiente que utilizam granulados de madeira, estabelece limites das emissões de monóxido de carbono, impondo o limite de 600 ppm. Este valor está descrito numa base de referência de 13% de oxigénio.

Tabela 9.5-Composição dos gases de combustão dos ensaios realizados.

| Ensaio | $\bar{T}_g$ | $x_s(CO_2)$ | $x_s(CO)$ | $x_s(O_2)$ | $x_s$(NO) | $x_s(NO_2)$ | $e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [ºC] | [%] | [ppm] | [%] | [ppm] | [ppm] | [%] |
| TC | 100,72 | 7,24 | 2705,07 | 6,85 | 4,43 | 1,27 | 387,76 |
| TA | 110,81 | 8,04 | 2447,85 | 14,39 | 18,49 | 5,38 | 379,99 |
| TG | 152,97 | 10,52 | 25896,92 | 14,26 | 0,95 | 10,47 | 388,35 |
| VA | 107,59 | 3,06 | 1412,44 | 12,57 | 7,89 | 1,36 | 371,14 |
| VC | 100,75 | 7,23 | 705.44 | 14,39 | 4,42 | 1,27 | 399,21 |
| VG | 131,62 | 9,24 | 18952,98 | 15,69 | 1,83 | 0,49 | 414,56 |

Os valores obtidos pelo analisador de óxidos de azoto e oxigénio que apresentam resultados muito pouco credíveis. Segundo Silva (2018) e Morgado (2019), estes valores deveriam seguir uma tendência mais constante e não uma discrepância de valores como a apresentada na Tabela 9.5. Esta discrepância pode ser explicada por falha do analisador ou entupimento nos tubos de sucção da bomba. Contudo, a presente irregularidade, pode advir por alterações na composição dos briquetes, devido à composição heterogénea dos resíduos de biomassa, pelo que a questão das emissões dos óxidos de azoto merece um estudo mais cuidadoso.

A partir da tabela também foi possível observar uma relação direta entre o excesso de ar na combustão e o oxigénio presente nos gases de exaustão. Verifica-se que quanto maior o teor de oxigénio nos gases de exaustão, menor é o excesso de ar da combustão.

# 10. Conclusões

Na presente dissertação, analisou-se o desempenho térmico da caldeira, tendo sempre em conta que as condições eram próximas do regime permanente. Contudo, este conceito foi de extrema dificuldade de alcançar como já foi mencionado, tendo por isso uma aplicação muito lata. Nos ensaios experimentais realizados, foi possível observar várias oscilações nomeadamente na evolução da temperatura e composição dos gases de exaustão. Um dos motivos foi a periódica alimentação manual da caldeira, o que obrigava a abrir a porta superior da mesma, diluindo o ar da combustão com o ar atmosférico e também a heterogeneidade da composição dos briquetes isto porque a mistura entre a biomassa e o aditivo não foi homogénea (a mistura foi feita num balde quase cheio de biomassa e colocava se o aditivo presume-se que a mistura entre a biomassa e o aditivo não era total) suficiente e a quando da queima do briquete a temperatura da chama variava devido a parte que estava a queimar no momento. Deste modo, ao longo dos ensaios foi impossível a manutenção de condições estritas de regime permanente, empregando-se este conceito em termos globais e calculando-se os valores médios das grandezas medidas excluindo-se as zonas de abertura e fecho da porta da caldeira. Por outro lado, o armazenamento um pouco descuidado dos briquetes expostos as condições atmosféricas interferiu com a composição dos mesmos, levando a um aumento da humidade neles contida, o que impossibilitou um desenvolvimento mais coerente dos ensaios quando utilizados briquetes da mesma espécie.

As seis espécies de combustíveis sólidos estudadas apresentaram comportamentos bastante distintos no decorrer dos ensaios realizados, avaliando-se o rendimento térmico da caldeira. Apesar de a análise dos ensaios se focar na fase de regime permanente, é de notar que a fase de arranque foi influenciada pela espécie de briquete utilizado, sendo os briquetes aditivados com caulino os mais problemáticos porque a fase de arranque leva mais tempo e também o tempo de alimentação era o maior (30 min) porque os briquetes demoravam mais tempo a serem consumidos pela chama. Estes proporcionavam uma fase de arranque mais demorada e consequente gasto acrescido de matéria-prima, não se justificando face aos valores de rendimento térmico apresentados quando utilizado este biocombustível. Os briquetes aditivados com glicerol são os que tinham uma fase de arranque mais curta e que os briquetes eram mais rapidamente consumidos pela chama.

O cálculo do caudal mássico, recorrendo ao tubo de Pitot Standard, revelou-se um procedimento pouco fidedigno já que apresenta resultados bastante díspares nos vários ensaios, não sendo assim tomados em conta. A explicação para a apresentação de valores tão excêntricos assenta na exposição do tubo de Pitot às condições extremas da temperatura dos gases de combustão e partículas de dimensão variável expelidas através da conduta de exaustão, podendo levar à sua danificação e obstrução, levando a leituras defeituosas da variação da pressão na chaminé.

Relativamente ao rendimento térmico da caldeira, os melhores resultados foram obtidos para os ensaios em que se utilizaram briquetes aditivados com caulino, quer a entrada da água na caldeira fosse à temperatura ambiente, a 35 ou a 45 °C. O rendimento mais elevado obtido foi de 60,95 % utilizando briquetes de tojo aditivados com glicerol com a temperatura de entrada da água a 37,40 °C e o mais baixo foi o ensaio utilizando briquetes de videira aditivado com amido com a temperatura de entrada da água, a 45,10 °C com um rendimento médio de 33,32 %. Não se verificou uma relação direta entre o rendimento da caldeira e a temperatura de entrada da água na caldeira, sendo o rendimento influenciado maioritariamente pelo tipo de combustível utilizado e o aditivo.

As perdas térmicas pelos gases de exaustão representam 9 a 11 % da potência térmica fornecida. Não se verificou nenhuma relação específica entre as perdas térmicas dos gases e o caudal mássico do combustível, uma vez que o valor das perdas é aproximadamente constante. Por outro lado, as perdas de não queimados, devido à existência de CO nos gases de exaustão assumem valores bastante reduzidos, quando comparadas as restantes, situando-se entre 0,77 e 1,53 % da potência térmica fornecida. Já as perdas por radiação, convecção, condução e todas as outras não contabilizadas acima, representam, na maioria dos ensaios, uma parcela bastante significativa. Contudo, o valor destas perdas não é constante, variando numa ampla gama de valores entre 11 e 25 %.

No que diz respeito às emissões de poluentes, constatou-se que o tipo de combustível tem um efeito bastante significativo nas emissões de monóxido de carbono, sendo que, quando utilizados briquetes de videira as emissões eram, em média, mais elevadas e utilizando briquetes de tojo eram, também média, mais reduzidas. Contudo, apenas dois dos doze ensaios realizados estão de acordo com a Norma Europeia EN 14785:2008 referente a aparelhos domésticos para aquecimento ambiente que utilizam

granulados de madeira, que estabelece limites das emissões de monóxido de carbono em 600 ppm.

# 11. Sugestões de trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e nas dificuldades encontradas ao longo do presente projeto, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros, dando continuidade à linha de investigação do trabalho desenvolvido.

Como foi mencionado, atingir as condições de regime permanente nos ensaios realizados foi de extrema dificuldade. Um dos motivos para não ser possível trabalhar a condições mais próximas de regime permanente é a alimentação manual da caldeira de forma intermitente, causando instabilidade na combustão. Assim sendo, sugere-se a realização do estudo em questão para uma caldeira de alimentação automática. Outro motivo a mistura entre a biomassa e o aditivo que foi feita num balde resultando numa mistura não muito homogénea. Sugere-se que automatize este processo com uma máquina misturadora como as que se usam em padarias para amassar o pão.

A nível de equipamento, sugere-se que haja uma preparação mais cuidada, incluindo limpeza e verificação periódica do mesmo, já que o trabalho em questão é desenvolvido a temperaturas elevadas, com emissões de poluentes e partículas agressivas para o equipamento. Os ensaios foram realizados utilizando um caudal mássico de briquetes de combustível constante. Por outro lado, a gama de temperaturas de entrada de água deveria ser ampliada de modo a ser possível verificar se existe, ou não, disparidade nos resultados aquando a alteração desta condição inicial e também deveria haver uma válvula com maior sensibilidade para o ajuste do caudal.

Sugere-se ainda, uma análise mais cuidada relativamente aos óxidos de azoto, devido à discrepância de valores medidos, seja por deficiência dos analisadores ou pela heterogeneidade dos resíduos da biomassa comos aditivos.

A nível de perdas térmicas, seria interessante aprofundar a análise das mesmas relativamente às perdas através da radiação, de convecção e de condução através das respetivas correlações matemáticas de transferência de calor e influência das mesmas no desempenho térmico, assim como o teor e composição de cinzas, tornando possível contabilizar as perdas de carbono não queimado presente nas cinzas de fundo e nas cinzas voláteis.

Sugere-se também que se aumente a percentagem dos aditivos na mistura com a biomassa para podermos notar de grosso modo a real influência dos aditivos na queima dos briquetes.

Estas são apenas algumas sugestões que poderão contribuir para o desenvolvimento do estudo em questão, minimizando as dúvidas e incertezas que cruzaram o projeto, dando origem a soluções mais favoráveis que possam potenciar a utilização de caldeiras domésticas com funcionamento a partir da biomassa, contribuindo para a utilização de uma energia mais limpa e ecológica.

# Referências

Abbasi, T. e Abbasi, S.A., 2010. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), pp.919–937.

Almeida, D., Pereira, C., Paiva, J.M. e Pinho, C., 2014. Cistus ladanifer solar drying, milling and pelletizing. Em: *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Belém.

APA, 2018. *Protocolo de Quioto*. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=119&sub3ref=500> [Acedido 16 Fev. 2018].

Braga, Bárbara 2019, Estudo do comportamento térmico de uma caldeira doméstica a briquetes a funcionar com resíduos vegetais, FEUP. Porto, Portugal Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

BP, 2017. *BP Energy Outlook. 2017 Edition*.

Bryden, K.M. e Ragland, K.W., 1996. Numerical Modeling of a Deep, Fixed Bed Combustor. *Energy & Fuels*, 10(2), pp.269–275.

Coelho, P., 2014. *Medições de velocidade*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Coelho, P., 2017a. *Experimentação e Análise de Incertezas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Coelho, P., 2017b. *Tabelas de Termodinâmica*. 4.ª ed. Lidel. Porto, Portugal.

Coleman, H.W. e Steele, W.G., 2009. *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. 3.ª ed. NJ: John Wiley and Sons.

DGEG, 2018. *Direção Geral de Energia e Geologia*. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/> [Acedido 16 Fev. 2018].

Di Blasi, C., 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(1), pp.47–90.

*Diretiva 2009/28/CE*. Jornal Oficial da União Europeia.

EEA, 2017. *Total greenhouse gas emission trends and projections*. Copenhaga,

Dinamarca.

EN 12809:2015. *Caldeiras domésticas independentes que utilizam combustíveis sólidos com potência térmica nominal inferior ou igual a 50 kW: Requisitos e métodos de ensaio*. Bruxelas.

EN 14785:2008. *Aparelhos domésticos para aquecimento ambiente, que utilizam granulados de madeira: Requisitos e métodos de ensaio*. Bruxelas.

EnergyLab, 2018. *Proyecto Biomasa-AP*. Disponível em: <http://biomasa-ap.com/pt-pt/> [Acedido 4 Mai. 2018].

Enersilva, 2007. *Promoçção do uso da Biomassa Florestal para fins energéticos no sudoeste da Europa*. Lisboa, Portugal.

EUBIA, 2017. *Biomass characteristics*. Disponível em: <http://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-characteristics/> [Acedido 14 Abr. 2018].

Eurostat, 2017. *Energy, transport and environment indicators*. Bruxelas.

Ferreira, T., 2013. *Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de peletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Viseu, Portugal.

Ferreira, T., Paiva, J.M. e Pinho, C., 2013a. Performance assessment of Acacia dealbata as a fuel for a domestic pellets boiler. Em: *8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems*. pp.1–10.

Ferreira, T., Paiva, J.M. e Pinho, C., 2014. Performance Assessment of Invasive Acacia dealbata as a Fuel for a Domestic Pellet Boiler. *The Italian Association of Chemical Engineering*, 42, pp.73–78.

GRAM, 2018. *Platform scales - gram*. Disponível em: <http://gram-group.com/products/industrial-weighing/platform-scales/> [Acedido 4 Jun. 2018].

Granada, E., López González, L.M., Míguez, J.L. e Moran, J., 2002. Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy*, 27(4), pp.561–573.

Ho, W.W.S., Ng, H.K. e Gan, S., 2016. Advances in ultrasound-assisted transesterification for biodiesel production. *Applied Thermal Engineering*, 100, pp.553–563.

ICNF, 2013. *IFN6 – Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental em 1995, 2005 e 2010*. Lisboa, Portugal.

IEA, 2017a. *International Energy Outlook 2017*. Paris, França.

IEA, 2017b. *Key World Energy Statistics*. Paris, França.

INEGI, 2011. *A Instituição*. Disponível em: <http://www.inegi.up.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN> [Acedido 30 Abr. 2018].

Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. e Potter, A., 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*, 38(25), pp.4183–4195.

Khan, A.A., de Jong, W., Jansens, P.J. e Spliethoff, H., 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), pp.21–50.

Liu, H., Chaney, J., Li, J. e Sun, C., 2013. Control of NOx emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, 103, pp.792–798.

Mata, T., 2017. *Seminário de Biocombustíveis*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

McGowan, T.F., Brown, M.L., Bulpitt, W.S. e Walsh, J.L., 2010. *Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide*. Wiley. New Jersey, Estados Unidos.

McKendry, P., 2002a. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol*, 83(1), pp.37–46.

McKendry, P., 2002b. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), pp.47–54.

Morgado, G., 2019. Estudo da queima de briquetes de biomassa numa caldeira . Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Química. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal

Muazu, R.I., Borrion, A.L. e Stegemann, J.A., 2017. Life cycle assessment of biomass densification systems. *Biomass and Bioenergy*, 107, pp.384–397.

Nogueira, M.L.R., Rocha, C.R. e Nogueira, F.J.H., 2005. *Eficiência energética no uso de vapor*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

Núez Regueira, L., Rodríguez Aon, J.A., Proupín Castieiras, J., Vilanova Diz, Nussbaumer, T., 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy and Fuels*, 17(6), pp.1510–1521.

Pinho, C., 2011. *Sebenta de Combustão*. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Pinho, C., 2017. *Sebenta de Gestão de Energia Térmica*. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Pinho, C., 2018. *Comunicação pessoal*. Porto, Portugal.

Quaak, P., Knoef, H. e Stassen, H., 1999. *Energy from Biomass: A review of combustion and gasification technologies*. The World Bank. Washington D.C., Estados Unidos.

Silva, M., 2018. *Estudo da queima de briquetes de biomassa numa salamandra*. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Solzaima, 2015. *Caldeiras de Lenha SZM IW 24, 34 e 44 kW: Manual de Instruções*.

Solzaima, 2017. *Soluções de Aquecimento a Biomassa: Catálogo*.

Srivastava, A. e Prasad, R., 2000. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable & sustainable energy reviews*, 4(2), pp.111–133.

Toklu, E., 2017. Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, pp.235–244.

Van Loo, S. e Koppejan, J., 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan. London, UK.

Verma, V.K., Bram, S., Gauthier, G. e De Ruyck, J., 2011. Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp.272–279.

Zhang, L., Xu, C. (Charles) e Champagne, P., 2010. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), pp.969–982.

Zhao, C., Jiang, E. e Chen, A., 2017. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of the Energy Institute*, 90(6), pp.902–913.