



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Otimização do rendimento térmico de uma caldeira doméstica

Daniel Gil Gouveia

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Carlos Alberto Catorze Pereira
Professora Doutora Tânia Vanessa de Jesus Ferreira

Novembro de 2023



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Otimização do rendimento térmico de uma caldeira doméstica

Daniel Gil Gouveia

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professora Doutora Carlos Alberto Catorze Pereira
Professora Doutora Tânia Vanessa de Jesus Ferreira

Novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, um agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Carlos Pereira, pelos inestimáveis conhecimentos científicos que me transmitiu, pela sua disponibilidade e apoio prestado durante a realização desta dissertação e, principalmente, pela confiança que depositou em mim.

Agradeço igualmente à minha orientadora Professora Doutora Tânia Ferreira, pela constante motivação nos momentos difíceis, pelo incansável auxílio prestado, bem como pelas conversas enriquecedoras sobre os mais diversos temas e, especialmente, pela amizade e compreensão demonstrada.

Agradeço ao Engenheiro Tiago Costa por toda a colaboração ao longo do meu percurso académico, pelos valiosos conselhos e apoio, mas, acima de tudo, pela amizade que desenvolvemos.

Aos meus amigos, com os quais partilhei alguns dos melhores momentos da minha vida, agradeço pelo companheirismo.

Por último, quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais e irmã, a quem dedico esta dissertação, pelos sacrifícios que fizeram por mim, pelo apoio incondicional, pela paciência e encorajamento ao longo deste percurso. Sem vocês não teria sido possível!

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os equipamentos de combustão de biomassa são caracterizados por baixas eficiências e elevadas emissões de poluentes devido a problemas relacionados com o dimensionamento e condições de operação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a otimização do rendimento térmico de uma caldeira a péletes, mais concretamente, estudou-se como a potência de utilização e o excesso de ar influenciam o desempenho e as emissões da caldeira aquando da combustão.

Inicialmente, efetuou-se a caracterização física e química dos péletes, a fim de avaliar as suas propriedades. De modo a ser possível a realização dos ensaios de queima foi necessário proceder à modificação e calibração da instalação experimental. À instalação existente, foram adicionados uma válvula termostática, uma válvula reguladora de pressão, um controlador ESP32 e três termopares do tipo K, com a finalidade das condições de funcionamento da instalação laboratorial serem as mais idênticas possíveis com o funcionamento de uma instalação real.

Avaliou-se o desempenho da caldeira com diferentes excessos de ar, em duas potências de operação distintas: potência 3 e 5. O rendimento térmico da caldeira foi determinado pelo método direto e avaliado durante o regime permanente. Apenas se mediram as concentrações molares dos gases de exaustão (O_2 , CO , CO_2 e NO_x) no regime permanente.

O aumento do caudal mássico de péletes resultou num aumento do rendimento térmico da caldeira e na diminuição das emissões de CO . Contudo, a diminuição do excesso de ar, para a potência menor em estudo levou a um aumento do rendimento térmico e a uma diminuição significativa das emissões de monóxido de carbono. As emissões de NO_x foram constantes independentemente do caudal mássico de péletes e do excesso de ar utilizado, verificando-se que estas emissões são apenas dependentes do conteúdo de azoto do combustível.

Concluiu-se que, o excesso de ar pré-definido pelo fabricante não conduz a uma melhor eficiência térmica da caldeira, uma vez que, os ensaios de combustão demonstram que para se otimizar o rendimento térmico, a potência do exaustor deverá ser regulada para os 56 e 30 % para uma potência de operação 5 e 3, respetivamente.

Palavras-chave: Energia, Biomassa, Combustão, Péletes, Eficiência energética, Otimização da caldeira

ABSTRACT

The biomass combustion equipment is characterized by low efficiency and high pollutant emissions due to issues related to design and operating conditions. This study aimed to optimize the thermal efficiency of a pellet boiler, specifically investigating how power and excess air affect the performance and emissions during combustion.

Initially, the physical and chemical characterization of the pellets was conducted to assess their properties. To perform the combustion tests, it was necessary to assemble and calibrate the experimental installation. For the existing boiler installation, a thermostatic valve, a pressure regulating valve, an ESP32 controller and three type K thermocouples were added to ensure that the operating conditions of the laboratory installation were as identical as possible to the operation of an actual installation.

The boiler's performance was evaluated at different excess air, at two distinct power levels: 3 and 5. The boiler's thermal efficiency was determined using a direct method and assessed during steady-state operation. Concentrations of emission gases (O_2 , CO, CO_2 , and NO_x) were only measured during steady-state conditions.

Increasing the mass flow rate of pellets improved thermal efficiency and reduced CO emissions. However, reducing the excess air for the lower thermal load studied leads to increased thermal efficiency and a significant decrease in carbon monoxide emissions. NO_x emissions remained constant, regardless of pellet mass flow and excess air, indicating that these emissions are solely dependent on the nitrogen content of the fuel.

It was concluded that the excess air pre-defined by the manufacturer does not lead to better thermal efficiency of the boiler since combustion test demonstrated that, to optimize thermal efficiency, the excess air must be regulated for 56 and 30 % for an operating power of 5 and 3, respectively.

Keywords: *Energy, Biomass, Combustion, Pellets, Energy efficiency, Boiler Optimization*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
2 ENERGIA.....	5
2.1 Situação energética mundial	5
2.2 Situação energética em Portugal	8
3 A BIOMASSA ENQUANTO FONTE DE ENERGIA	11
3.1 Características da biomassa	12
3.2 Tecnologias de conversão da biomassa	14
3.3 Floresta como fonte de biomassa	17
3.4 Peletização	20
3.4.1 Pré-tratamento da matéria-prima.....	21
3.4.2 Peletização	22
3.4.3 Pós-tratamento da matéria-prima	22
3.4.4 Mercado dos péletes	23
3.4.5 Certificação dos péletes	25
4 COMBUSTÃO.....	29
4.1 Estágios da combustão.....	31
4.2 Poluentes resultantes da combustão	33
4.3 Equipamentos de combustão.....	34
5 MATERIAIS, INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
5.1 Caracterização física e química dos péletes.....	37
5.1.1 Teor de humidade	37
5.1.2 Dimensões e massa volúmica	38
5.1.3 Quantidade de finos.....	39

5.1.4	Durabilidade.....	39
5.1.5	Composição química	40
5.2	Instalação experimental	41
5.2.1	Descrição instalação experimental	41
5.2.2	Descrição da caldeira.....	42
5.2.3	Procedimento experimental	44
5.3	Procedimento dos ensaios.....	47
5.4	Metodologia de cálculo	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
6.1	Ensaio experimentais	49
6.1.1	Fase de arranque.....	51
6.1.2	Regime permanente.....	53
6.1.3	Influência do excesso de ar e do caudal de combustível no rendimento térmico	56
6.1.4	Concentração de oxigénio e excesso de ar	61
6.1.5	Influência do excesso de ar nas emissões.....	63
6.1.6	Influência da concentração de oxigénio nas emissões	67
7	CONCLUSÃO	69
7.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	71
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE CAUDAL TIPO TURBINA	89
	APÊNDICE B – TEMPERATURAS MEDIDAS NOS ENSAIOS	91
	APÊNDICE C – ANÁLISE DAS INCERTEZAS.....	103
	ANEXO A – ANÁLISE ELEMENTAR E IMEDIATA DOS PÉLETES	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 - Composição elementar e imediata dos péletes em estudo	40
Tabela 6.1 - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados para a potência 5.	50
Tabela 6.2 - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados para a potência 3.	50
Tabela 6.3 - Ensaios realizados na potência 5.....	53
Tabela 6.4 - Ensaios realizados na potência 3.....	54
Tabela 6.5 - Ensaios P5.....	58
Tabela 6.6 - Ensaios P3.....	58
Tabela C.1 - Resolução e exatidão dos equipamentos de medição	104
Tabela C.2 - Incertezas aleatórias associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.	105
Tabela C.3 - Incertezas sistemáticas associadas à medição da concentração dos gases de exaustão.	105
Tabela C.4 - Incertezas totais associadas à medição dos gases de exaustão.....	105
Tabela C.5 - Determinação das incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases de exaustão.	106
Tabela C.6 - Incerteza associada à medição da temperatura da água à entrada da caldeira. ..	107
Tabela C.7 - Incerteza associada à medição da temperatura da água à saída da caldeira.....	107
Tabela C.8 - Incerteza associada à medição do caudal mássico de água.....	107
Tabela C.9 - Incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes.	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Consumo de energia primária nos países pertencentes e não pertencentes à OCDE e respetiva evolução da população. Adaptado de: (EIA, 2021).	5
Figura 2.2 - Consumo mundial de energia primária, entre 2010 e 2050, por região. Adaptado: (EIA, 2021).	6
Figura 2.3 - Consumo mundial de energia primária por fonte de energia. Adaptado de: (EIA, 2021).	6
Figura 2.4 – Distribuição do consumo de energia no mundo por fonte, em 1973 e 2019. Adaptado de: (IEA, 2021).	7
Figura 2.5 - Evolução da dependência energética em Portugal. Fonte: (DGEG et al., 2022). ...	8
Figura 2.6 – Distribuição do consumo de energia primária por fonte de energia em Portugal, em 2020. Fonte: (DGEG et al., 2022).	9
Figura 3.1 - Distribuição dos usos do solo em Portugal continental em 2015. Fonte: (ICNF, 2019a).	18
Figura 3.2 - Distribuição da área total de floresta continental por espécies. Fonte: (ICNF, 2019a).	18
Figura 3.3 - Proveniência do pinheiro-bravo em Portugal continental. Fonte: (ICNF, 2019b).	19
Figura 3.4 - Peletizadora do tipo anel (esquerda) e do tipo plana (direita). Fonte: (Alakangas & Paju, 2002).	22
Figura 3.5 - Evolução da produção de péletes no mundo, em toneladas. Adaptado de: (Bioenergy Europe, 2022).	24
Figura 3.6 - Distribuição das unidades de produção de péletes em Portugal e respetiva capacidade de produção. Fonte: (ZERO, 2022).	25
Figura 3.7 - Unidades de produção de péletes certificados pela norma ENplus no mundo em 2021. Fonte: (Bioenergy Europe, 2022).	26
Figura 3.8 - Evolução da produção mundial de péletes certificados pela <i>ENplus</i> , em toneladas. Fonte: (Bioenergy Europe, 2022).	27
Figura 4.1 - Influência do excesso de ar na temperatura da câmara de combustão. Adaptado de: (McGowan et al., 2010).	30
Figura 4.2 - Evolução da massa de uma partícula de biomassa durante o processo de combustão. Fonte: (Ferreira, 2013).	31
Figura 4.3 - Caldeira a péletes. Adaptado de: (Jenkins, 2010).	35
Figura 5.1 – Balança digital (a) e estufa laboratorial (b).	38
Figura 5.2 - Instalação experimental	42
Figura 5.3 – Caldeira e zona da câmara de combustão.	43
Figura 5.4 - Medição da massa dos péletes com balança digital	45
Figura 5.5 - Analisador de gases.	46
Figura 6.1 - Temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque.	52
Figura 6.2 - Influência da potência do exaustor na temperatura média dos gases de exaustão para a potência 5.	55
Figura 6.3 - Influência da potência do exaustor na temperatura média dos gases de exaustão para a potência 3.	55
Figura 6.4 - Temperatura dos gases de exaustão nos ensaios P3E26 e P3E30.	56
Figura 6.5 - Rendimento térmico em função da potência do exaustor e da potência de operação.	57

Figura 6.6 - Rendimento térmico em função do excesso de ar e do caudal mássico de péletes.	57
Figura 6.7 - Relação entre a potência do exaustor e o excesso de ar real para a potência 5.....	60
Figura 6.8 - Relação entre a potência do exaustor e o excesso de ar real para a potência 3.....	60
Figura 6.9 - Concentração de oxigénio (a) e excesso de ar (b) em função do caudal mássico de combustível para a potência 5.....	61
Figura 6.10 - Concentração de oxigénio (a) e excesso de ar (b) em função do caudal mássico de combustível para a potência 3.	62
Figura 6.11 - Emissões de monóxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 5.....	64
Figura 6.12 - Emissões de monóxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 3.....	64
Figura 6.13 - Emissões de óxidos de azoto para os diversos excessos de ar regulados na caldeira na potência 5.	65
Figura 6.14 - Emissões de óxidos de azoto para os diversos excessos de ar regulados na caldeira na potência 3.	65
Figura 6.15 - Emissões de dióxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 5.....	66
Figura 6.16 - Emissões de dióxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 3.....	66
Figura 6.17 - Emissões de CO em função da concentração de oxigénio para a potência 5.....	67
Figura 6.18 - Emissões de CO em função da concentração de oxigénio para a potência 3.....	67
Figura A.1 – Curva de calibração do medidor de caudal tipo turbina para medição do caudal de mistura de água.	90
Figura A.2 - Curva de calibração do medidor de caudal tipo turbina para medição do caudal de água fria.	90
Figura B.1 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E40.	91
Figura B.2 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E48.	92
Figura B.3 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E52.	93
Figura B.4 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E56.	94
Figura B.5 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E60.	95
Figura B.6 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E64.	96
Figura B.7 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E26.	97
Figura B.8 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E30.	98
Figura B.9 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E34.	99
Figura B.10 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E38.	100
Figura B.11 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E46.	101
Figura B.12 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E54.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

Abreviatura	Designação
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EIA	Energy Information Administration
EJ	Exajoule
EPC	European Pellet Council
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
ICNF	Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas
IEA	International Energy Agency / Agência Internacional da Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
UE	União Europeia
ZERO	Associação Sistema Terrestre Sustentável

Lista de símbolos (ordenados por ordem alfabética)

Símbolo	Designação	Unidades
AC	Razão ar-combustível	-
CA	Razão combustível-ar	-
$c_{\text{água}}$	Calor específico mássico da água à temperatura média	kJ/(kg K)
e	Excesso de ar	%
H_{bh}	Teor de humidade na base húmida	%
$\dot{m}_{\text{água}}$	Caudal mássico de água	kg/s
$\dot{m}_{\text{péletes}}$	Caudal mássico médio de péletes consumido	kg/s
$m_{\text{água}}$	Massa de água que escoava para o recipiente	kg
m_{amostra}	Massa inicial da amostra	kg
m_{finos}	Massa finos da amostra peneirada	kg
m_{h}	Massa inicial da amostra antes do processo de secagem	kg
m_{inicial}	Massa inicial da amostra antes da peneiração	kg
$m_{\text{péletes final}}$	Massa final de péletes	kg
$m_{\text{péletes inicial}}$	Massa inicial de péletes	kg
m_{retida}	Massa retida no peneiro	kg

Símbolo	Designação	Unidades
m_s	Massa final da amostra após o processo de secagem	kg
O_2 medido	Concentração de oxigénio medido	%
O_2 ref	Fator de correção	%
P_{medido}	Concentração de um determinado componente	%
$PCI_{\text{péletes}}$	Poder calorífico inferior dos péletes na base seca	kJ/kg
$\dot{Q}_{\text{fornecida}}$	Potência térmica libertada na combustão dos péletes	kW
$\dot{Q}_{\text{transferido água}}$	Potência térmica transferida para a água	kW
r	Riqueza de mistura	
T_{amb}	Temperatura ambiente	° C
T_{entrada}	Temperatura média da água à entrada da caldeira	° C
T_{gases}	Temperatura dos gases de exaustão	° C
$T_{\text{saída}}$	Temperatura média da água à saída da caldeira	° C
Letras gregas	Designação	Unidades
Δt	Intervalo de tempo	s
$\eta_{\text{térmico}}$	Rendimento térmico	%

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O equilíbrio entre a procura e a oferta de energia permanece de fundamental importância para a sociedade, sendo uma constante que perdura e naturalmente continuará a ser crucial no futuro (Nieuwlaar, 2020).

Até meados do século XIX, o carvão mineral e a lenha foram as principais fontes primárias de energia utilizadas pela humanidade. Porém, a Revolução Industrial proporcionou um contexto tecnológico e económico favorável para o surgimento e crescimento da indústria petroquímica (Mesa et al., 2003).

Impulsionado pelo constante aumento da população e industrialização, o consumo mundial de energia tem vindo a aumentar a um ritmo elevado. Desde a segunda metade do século XX até aos dias atuais, o consumo aumentou 400 % (Smil, 2016; Ritchie et al., 2020). Os combustíveis fósseis emergiram como a principal fonte de energia, destacando-se pelo seu alto teor energético e preço reduzido (Ediger, 2019).

Atualmente, os países ao redor do mundo dependem fortemente de combustíveis fósseis, sendo estes a base dos respetivos sistemas de produção de energia. No entanto, a utilização excessiva desses combustíveis acarreta consequências graves e irreversíveis para o planeta, manifestando-se através da poluição atmosférica e aquecimento global (Martins et al., 2018). Estima-se que cerca de 75 % das emissões globais de gases de efeito de estufa advém da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia (Ritchie et al., 2020). Acrescido a isso, é consensual que as fontes de energia de origem fóssil são finitas e sujeitas a flutuações decorrentes da interação entre a oferta e demanda, eventos geopolíticos e políticas governamentais que influenciam diretamente a estabilidade do seu preço (Yoon, 2022).

Mediante as circunstâncias descritas anteriormente, os governos têm incentivado investigadores a explorar novas abordagens no aproveitamento de fontes de energia renováveis e na otimização da eficiência dos processos energéticos (Pucrs, 2010).

As energias renováveis (FER) são fontes de energia naturais capazes de se regenerar a uma taxa igual ou superior à sua taxa de consumo. Estas energias contribuem para a independência energética dos países, estimulando, assim, o desenvolvimento económico. Além disso, proporcionam a oportunidade de gerar energia localmente e de forma

descentralizada, no entanto, a maioria delas necessita de investimentos iniciais substanciais, grandes áreas e capacidade de gestão de produção (Nezhnikova et al., 2018; Maradin, 2021).

De modo a adotar práticas mais sustentáveis, torna-se imprescindível o aumento da utilização de energias renováveis. Nesse sentido, a biomassa surge como uma das fontes mais promissoras, destacando-se por ser a única dentro das fontes de energia renovável capaz de ser convertida em combustível sólido, líquido e gasoso e, posteriormente, em energia térmica e elétrica (Faaij, 2006). Para além disso, a biomassa possui uma vasta disponibilidade, tanto em zonas urbanas como rurais, e apresenta uma capacidade de armazenamento e subsequente utilização conforme as necessidades, uma característica que não é compartilhada pelas outras FER (Zafar, 2022).

Algumas das principais fontes de biomassa dizem respeito aos produtos florestais, derivados de agricultura e resíduos derivados de indústrias de transformação de madeira. A valorização energética destes materiais através da combustão pode ser feita de diferentes formas: por queima direta sem processamento da matéria-prima; através de sistemas de queima de estilha em que a matéria-prima é triturada previamente; pelo fabrico e queima de péletes (Saidur et al., 2011).

Os equipamentos de combustão de biomassa existentes, em particular os domésticos, são caracterizados por baixas eficiências e elevadas emissões de poluentes. Isto acontece devido à priorização do design em detrimento da performance, com construções que não integram os conhecimentos e tecnologias já existentes, demonstrando uma clara falta de investigação, monitorização e controlo por parte dos fabricantes. Além disso, a eficiência desses equipamentos pode ser afetada por problemas relacionados com a instalação, manutenção inadequada e condições operacionais adversas, resultando em um desempenho inferior ao previsto inicialmente (Greenpro, 2004).

Tendo em conta os factos mencionados anteriormente, salienta-se o particular interesse do estudo das condições de operação dos equipamentos de combustão.

1.2 Objetivos

Com base nas atividades de investigação realizadas anteriormente, no âmbito da combustão de péletes numa caldeira doméstica, e com o objetivo de aprofundar os estudos

e a caracterização da caldeira em questão, foram estabelecidas algumas premissas para a presente investigação.

O objetivo principal desta dissertação foi otimizar, experimentalmente, o rendimento térmico de uma caldeira doméstica alimentada a péletes. Mais especificamente, estudou-se a influência da potência de utilização e do excesso de ar no desempenho e nas emissões de poluentes da caldeira.

Com o intuito de atingir os objetivos descritos anteriormente, foi necessário melhorar a instalação experimental. Para tal, adicionaram-se diversos componentes de modo a aproximar as condições de operação em laboratório às condições de utilização doméstica. Adicionalmente, melhorou-se o sistema de aquisição de dados através da implementação de novos termopares e de um controlador para adquirir e registar os dados em suporte informático. Além disso, foi necessário realizar a caracterização dos péletes utilizados no estudo. Foram, também, efetuadas calibrações aos principais instrumentos de medição utilizados e realizadas limpezas regulares da caldeira.

Este trabalho desempenha um papel fundamental na promoção da eficiência energética, uma vez que os resultados obtidos, a partir das análises práticas realizadas, são essenciais para disponibilizar diretrizes claras aos utilizadores de caldeiras de combustão de péletes.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está organizada em um total de oito capítulos. No presente capítulo é apresentada uma breve introdução, destacando a relevância do estudo, os principais objetivos e, por fim, uma descrição da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, é feita uma apresentação da situação energética atual e algumas previsões para os próximos anos no mundo e em Portugal.

No Capítulo 3, é abordada a biomassa e a sua conversão energética, bem como a situação atual da floresta portuguesa. Ainda neste capítulo, é descrito o processo de peletização, analisado o mercado dos péletes no mundo e em Portugal e a sua certificação.

Os princípios do processo de combustão, os poluentes resultantes e os equipamentos de combustão existentes são abordados no Capítulo 4.

No Capítulo 5, é caracterizada a matéria-prima comercial, em relação ao teor de humidade, dimensões, massa volúmica, quantidade de finos, durabilidade e composição química. Adicionalmente, são apresentados detalhes sobre a instalação experimental, da caldeira em estudo e das técnicas de medida.

No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos no estudo de queima dos péletes, variando o excesso de ar e a potência da caldeira.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7.

Para finalizar, complementa-se o trabalho com os apêndices e anexos. No Apêndice A, descreve-se as calibrações das turbinas utilizadas nos ensaios de combustão de péletes. A evolução das temperaturas da entrada e saída da água na caldeira e dos gases de exaustão são apresentadas no Apêndice B. A análise das incertezas é descrita no Apêndice C. Os valores da análise elementar e imediata dos péletes de pinho são apresentados no Anexo A.

2 ENERGIA

A energia é fundamental para o nosso dia-a-dia, para o desenvolvimento da Humanidade e contínuo crescimento económico. Atualmente, perante as crescentes necessidades energéticas globais e desafios ambientais, é crucial procurar soluções inovadoras e sustentáveis (T. B. Johansson et al., 2012; Pasten & Santamarina, 2012).

O consumo de energia a nível mundial tem notado um crescimento constante ao longo dos anos, influenciado, principalmente, pelo aumento da população e industrialização. Contudo, o planeta apresenta recursos limitados (El-Mahallawy & Habik, 2002).

Nos dias que decorrem, a demanda energética é suprimida pela utilização significativa de combustíveis fósseis. Contudo, têm surgido cada vez mais preocupações ambientais devido às emissões de poluentes resultantes do uso desse tipo de combustíveis (Kanoglu et al., 2019).

2.1 Situação energética mundial

Segundo o relatório anual *International Energy Outlook*, prevê-se que o consumo global de energia cresça 50 % entre 2020 e 2050, impulsionado pelo crescimento económico e demográfico nos países não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), com particular ênfase na Ásia (EIA, 2021). Na Figura 2.1 é possível observar o consumo mundial de energia primária nos países pertencentes e não pertencentes à OCDE, bem como, a evolução da população mundial. Os dados abrangem o período de 2010 a 2020, juntamente com projeções futuras até 2050.

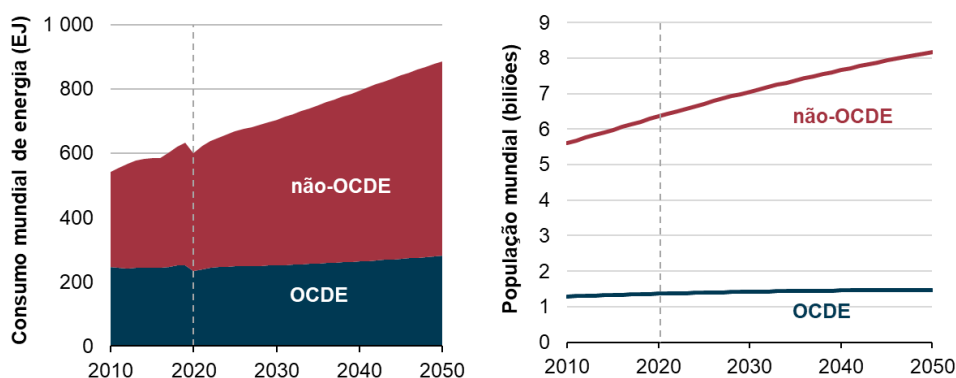


Figura 2.1 - Consumo de energia primária nos países pertencentes e não pertencentes à OCDE e respetiva evolução da população. Adaptado de: (EIA, 2021).

A Figura 2.2 apresenta os dados relativos à evolução do consumo mundial de energia primária por regiões, abrangendo o período de 2010 a 2020, bem como as projeções para o período de 2030 a 2050. Notavelmente, na OCDE, a região das Américas continuará como a principal responsável pelo maior consumo de energia primária. Por outro lado, nos países fora da OCDE, a Ásia liderará o consumo e o respetivo crescimento.

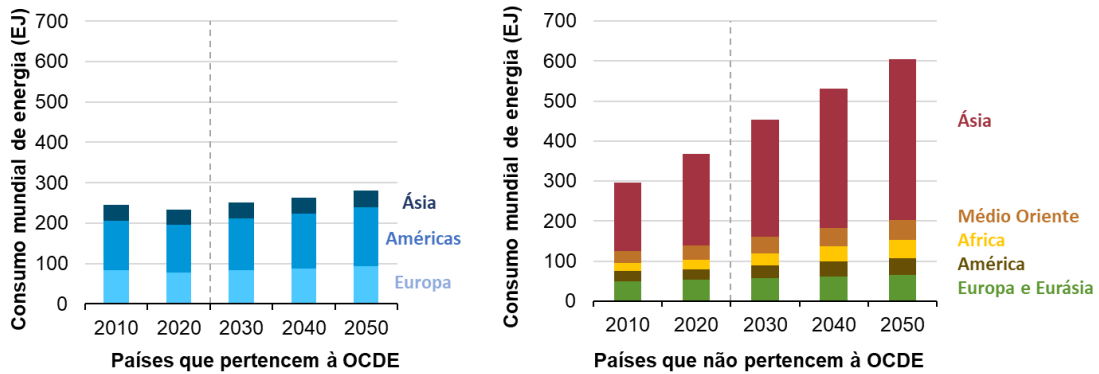


Figura 2.2 - Consumo mundial de energia primária, entre 2010 e 2050, por região. Adaptado: (EIA, 2021).

A nível mundial, a energia primária mais utilizada é a proveniente dos combustíveis fósseis, sendo o petróleo a principal fonte de energia. A Figura 2.3 representa o consumo mundial de energia primária e as respetivas projeções, caracterizadas por fonte de energia no período de 2010 a 2050.

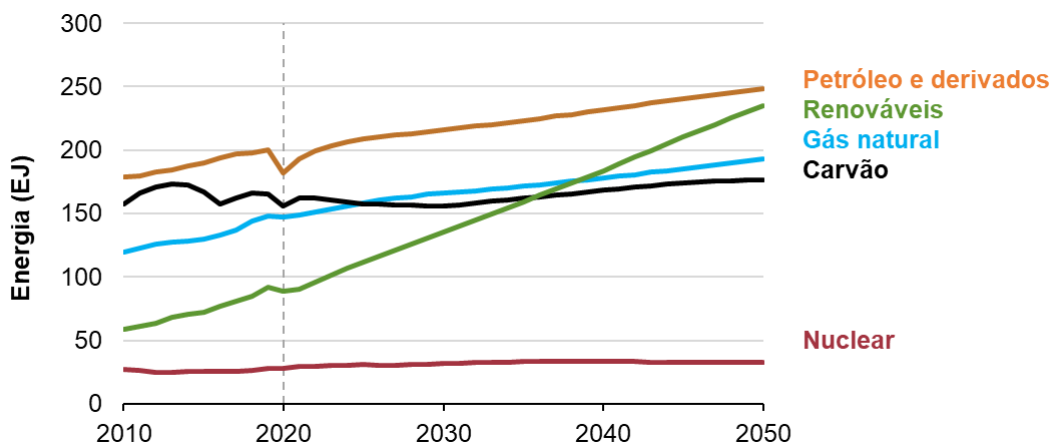


Figura 2.3 - Consumo mundial de energia primária por fonte de energia. Adaptado de: (EIA, 2021).

Espera-se que o consumo mundial do petróleo e derivados, das energias renováveis e do gás natural aumente nas próximas décadas. As energias renováveis são a forma de energia que apresentará um maior crescimento, com um contributo de 27 % em 2050, e um consumo de aproximadamente 250 EJ (EIA, 2021).

Contudo, as projeções futuras dos consumos energéticos, apresentadas anteriormente, podem ter uma grande incerteza associada provocada pela invasão da Rússia à Ucrânia. A guerra na Ucrânia teve um impacto significativo no consumo mundial de energia, desencadeando uma série de consequências no cenário energético global. O conflito provocou um aumento acentuado nos preços de energia. Além disso, destacou a vulnerabilidade de muitos países que dependem fortemente de fontes de energia altamente poluentes, tornando-os suscetíveis a interrupções no fornecimento e a flutuações nos preços dos recursos. Em resposta a essas perturbações, houve um aumento na pressão para acelerar a transição para fontes de energia de baixo carbono, como as renováveis e a energia nuclear, a fim de melhorar a segurança energética e reduzir a exposição a choques nos mercados globais de energia (EIA, 2023).

De seguida, representado na Figura 2.4, e conforme as estatísticas fornecidas pela Agência Internacional da Energia (IEA), são exibidos os dados relativos à distribuição do consumo de energia no mundo por fonte de energia nos anos de 1973 e 2019.

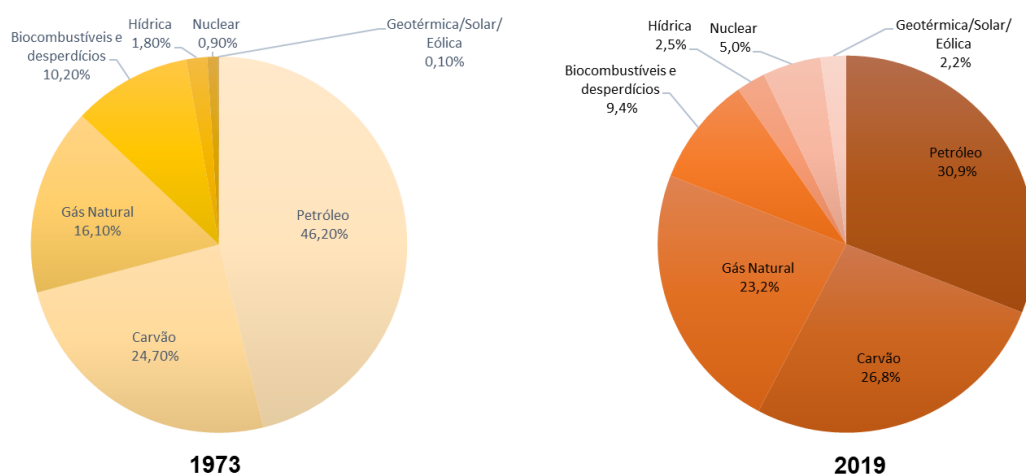


Figura 2.4 – Distribuição do consumo de energia no mundo por fonte, em 1973 e 2019. Adaptado de: (IEA, 2021).

Entre os anos de 1973 e 2019, registrou-se um acréscimo de 352 EJ no consumo total de energia, culminando em um consumo total de 606 EJ no ano de 2019. Esse incremento substancial encontra-se relacionado com o aumento da população mundial e com o desenvolvimento industrial dos países. Não obstante, é importante observar que o consumo dos combustíveis fósseis apenas reduziu 6 %, mantendo uma parcela significativa do consumo, representando 80,9 % do total, seguidos pelas energias renováveis, com uma participação de 14,1 % e, por fim, a energia nuclear, com uma contribuição de 5,0 % (IEA, 2021).

2.2 Situação energética em Portugal

Segundo dados divulgados pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Figura 2.5, a dependência energética de Portugal, no ano de 2020, era de 65,8 %, verificando-se uma diminuição de 8,4 % face ao ano de 2019. Esta redução foi motivada pelo impacto da pandemia COVID-19 na economia e nos comportamentos sociais e pelo aumento do contributo das energias renováveis na produção de energia elétrica, mais concretamente da energia hídrica e eólica (DGEG et al., 2022).

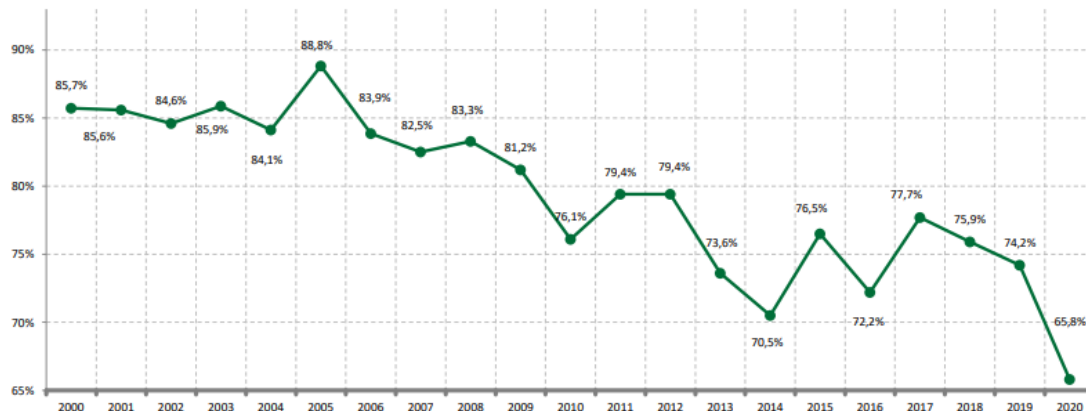


Figura 2.5 - Evolução da dependência energética em Portugal. Fonte: (DGEG et al., 2022).

Relativamente aos consumos de energia primária, no ano de 2020, como se pode verificar pela Figura 2.6, o petróleo foi a energia mais utilizada em Portugal, com uma fração de 40,9 %, sendo seguida pelas energias renováveis, com um total de 29,9 %. De entre estas, a biomassa foi a fonte de energia que contribuiu com uma maior parcela no setor doméstico, cerca de 46,5 % (DGEG et al., 2022).

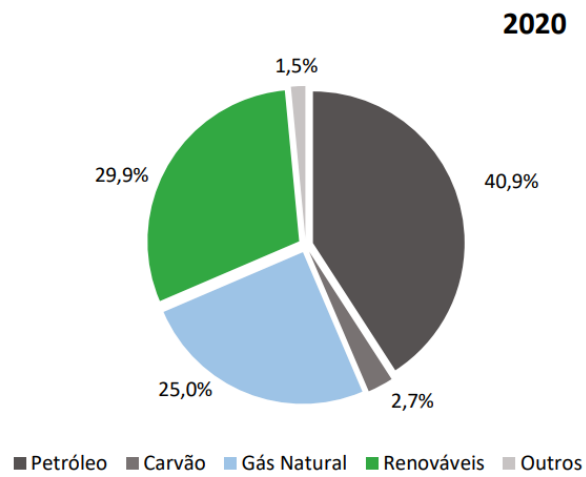


Figura 2.6 – Distribuição do consumo de energia primária por fonte de energia em Portugal, em 2020.

Fonte: (DGEG et al., 2022).

3 A BIOMASSA ENQUANTO FONTE DE ENERGIA

O uso da biomassa como fonte de energia não sofreu uma evolução linear aquando da industrialização devido à abundância e baixos preços dos combustíveis fósseis. Contudo, o interesse pela sua conversão em bioenergia tem verificado um aumento devido a fatores económicos, políticos e ambientais (Basu, 2013). A utilização da biomassa irá permitir a países sem reservas de combustíveis fósseis, incluindo Portugal, reduzir a dependência externa de energia fóssil, criar empregos e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (Van Loo & Koppejan, 2008).

Segundo a Diretiva EU 2018/2001, de 21 de dezembro de 2018, a biomassa é definida como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura, incluindo substâncias de origem vegetal e animal, da silvicultura e de indústrias afins, como a pesca e a aquicultura, bem como a fração biodegradável de resíduos, incluindo resíduos industriais e urbanos de origem biológica”.

A produção de biomassa é realizada pelo processo fotossintético. Durante a fotossíntese, a energia solar é armazenada na vegetação sob a forma de energia química através de reações entre a luz solar, água, dióxido de carbono e por intermédio da clorofila (Greenpro, 2004; El Bassam, 2010).

Contrariamente ao que acontece com as restantes energias renováveis, a biomassa pode ser convertida num combustível sólido, como é o caso dos péletes ou briquetes, líquido, por exemplo biodiesel, metanol e etanol, e gasoso, como é o caso do biogás (Vassilev et al., 2015). Estima-se que, na Suécia, a biomassa tem a capacidade de fornecer metade da procura de energia do país (Truong & Gustavsson, 2013), demonstrando ser uma concorrente direta das fontes de energia fóssil.

A combustão da biomassa é considerada neutra em emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, pois a quantidade libertada deste composto, durante o processo, é aproximadamente igual à absorvida durante a fotossíntese (Abbasi & Abbasi, 2010). Contudo, tanto na produção da biomassa quanto na sua conversão em combustível, estão envolvidos consumos energéticos que utilizam os combustíveis fósseis como fonte de energia. Assim, deve-se minimizar a utilização desses combustíveis em prol da sustentabilidade.

Atualmente, o consumo de energia primária com origem na biomassa é de, aproximadamente, 55,64 EJ, correspondendo, apenas, a 9,5 % das necessidades, um valor

menor comparativamente a 1990. No entanto, nos países industrializados, motivados pelas políticas ambientais, verifica-se uma tendência oposta, tendo o valor aumentado em cerca de 3 % desde 1990 (Gonçalves et al., 2021).

3.1 Características da biomassa

A biomassa é constituída por diversos componentes, tais como, celulose, hemicelulose, lenhina, proteínas, lípidos, açúcares, amido, água e hidrocarbonetos. Sendo que, a concentração de cada componente varia consoante a origem do material orgânico e as condições ambientais e de crescimento (McKendry, 2002a; Vassilev et al., 2011; Li et al., 2022).

As principais propriedades da biomassa que deverão ser consideradas durante a sua conversão térmica são: o poder calorífico, o teor de humidade, a massa volúmica aparente, a quantidade de matéria volátil e de carbono fixo, as cinzas, o teor de metais alcalinos e a razão celulose/lenhina (Vassilev et al., 2015).

Poder calorífico

O poder calorífico é a mais importante propriedade dos combustíveis, pois indica-nos a quantidade de energia, por unidade de massa ou volume, que um combustível contém (Erol et al., 2010).

Existem dois modos de classificar o poder calorífico, poder calorífico superior, PCS, e poder calorífico inferior, PCI. O poder calorífico superior é o calor de combustão determinado supondo que toda a água nos produtos foi condensada, isto é, toda a energia resultante da combustão é aproveitada. Por outro lado, no poder calorífico inferior toda a água dos produtos permanece no estado de vapor, não contribuindo com valor energético (Turns, 2013). Sendo uma propriedade de todos os combustíveis, a biomassa apresenta um poder calorífico menor quando comparado com os combustíveis fósseis. Geralmente, a biomassa florestal apresenta um PCI que varia entre 18 e 22 MJ/kg, na base seca (Van Loo & Koppejan, 2008).

Teor de humidade

O teor de humidade é a razão entre a quantidade de água que a biomassa apresenta e a sua massa total. Essa razão pode ser expressa na base seca, quando a água não é considerada na massa total, ou na base húmida, quando a água é incluída na massa total. A humidade pode ser considerada intrínseca, se estiver relacionada com as próprias características da biomassa, ou extrínseca, quando está relacionada com as condições externas, como por exemplo, as condições ambientais, que podem influenciar a percentagem de humidade (Basu, 2013). O teor de humidade, na base húmida, pode variar entre 10 e 70 %, consoante o tipo de biomassa (Khan et al., 2009).

O teor de humidade tem uma grande influência no poder calorífico de um combustível. Quanto maior for o teor de humidade, mais energia será necessária para a evaporação da água e, conseqüentemente, menor será o valor do poder calorífico. Por outro lado, na combustão, um elevado teor de humidade traduz-se num maior tempo de secagem e, por isso, num atraso da ignição (Quaak et al., 1999; Grammelis, 2011; Obernberger & Thek, 2010).

Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente é uma propriedade que depende do tamanho e forma das partículas de biomassa e do teor de humidade. É calculada pela razão entre a massa de uma amostra de biomassa e o seu volume total. A massa volúmica aparente trata-se de uma característica importante pois está relacionada com os custos logísticos, ou seja, os custos de transporte e armazenamento (Cai et al., 2017).

Quantidade de matéria volátil e carbono fixo

A matéria volátil é a parte orgânica da biomassa que é libertada na forma gasosa. Para a sua determinação, uma amostra é aquecida num ambiente sem contacto com o ar por um período de 7 minutos, a uma temperatura de 900 °C (NSAI, 2009). Geralmente, a biomassa apresenta um elevado teor de matéria volátil, na ordem dos 80 % (Obernberger & Thek, 2004).

O carbono fixo corresponde à massa remanescente, excluindo as cinzas, após a libertação de toda matéria volátil durante o aquecimento da biomassa (Cai et al., 2017).

Cinzas

As cinzas são a parte inorgânica da biomassa. A combustão da biomassa origina dois tipos de cinzas, as cinzas volantes e as cinzas de biomassa. Enquanto as cinzas volantes são emitidas com os restantes gases, as cinzas de biomassa ficam acumuladas nos equipamentos de combustão (Assad Munawar et al., 2021). O teor de cinzas varia consoante o tipo de biomassa, tendo um valor inferior a 1 % para compostos de madeira, tais como o pinho, o carvalho, eucalipto e outros.

Teor de metais alcalinos

Os metais alcalinos, tais como o sódio (Na), o potássio (K), o magnésio (Mg), o cálcio (Ca), e também o fósforo (P) presentes na biomassa, são um importante fator a ter em conta nos processos termoquímicos; a quantidade, principalmente a de cloro, pode influenciar negativamente a combustão, já que irá reagir com a sílica (presente nas cinzas) e produzir escória, podendo obstruir as entradas de ar na caldeira (McKendry, 2002a). O potássio e o fósforo desempenham um papel importante nos processos de combustão, sendo que o primeiro apresenta um efeito catalítico na combustão da biomassa (C. Pereira & Pinho, 2015).

Razão celulose/lenhina

A razão celulose/lenhina é importante nos processos de conversão bioquímicos. Na escolha do tipo de biomassa é necessário ter em conta esta propriedade já que a biodegradabilidade da celulose é superior à da lenhina e, conseqüentemente, apresenta uma maior conversão de carbono (McKendry, 2002a). Esse fenómeno ocorre devido às características da celulose, um polissacarídeo de estrutura simples composto por cadeias lineares de glicose, em contraste com a lenhina, um polímero com uma estrutura mais complexa formado por compostos fenólicos.

3.2 Tecnologias de conversão da biomassa

Ao longo dos anos desenvolveram-se diversas tecnologias para converter a biomassa numa fonte de energia renovável. Os processos de conversão podem ser classificados como termoquímicos ou bioquímicos, sendo necessária a escolha da melhor

tecnologia tendo em conta as características físicas e químicas da biomassa, a rentabilidade e a sua disponibilidade (Saidur et al., 2011; Kurchania, 2012).

Processos termoquímicos

As tecnologias que fazem parte da conversão termoquímica são a liquefação, a pirólise, a gaseificação e a combustão, esta última tecnologia será detalhada no Capítulo 4 desta dissertação, uma vez que apresenta uma maior relevância neste estudo. Estas tecnologias são realizadas através de processos térmicos nos quais a biomassa é aquecida a temperaturas que variaram entre 250 e 900 °C, e diferentes concentrações de oxigénio. Este processo converte a energia química da biomassa em diversas formas de energia, tais como, carvão, combustíveis líquidos, gasosos e de calor (Van Loo & Koppejan, 2008; Abbasi & Abbasi, 2010).

Liquefação

A liquefação permite a obtenção de um combustível líquido através da conversão da biomassa. Este processo é realizado a temperaturas baixas, 250 a 350 °C, e a elevadas pressões, 100 a 200 bar (Van Loo & Koppejan, 2008). O produto originado por este processo é um bio-óleo que pode ser utilizado em motores de combustão ou diretamente na produção de calor e eletricidade (Demirbas et al., 2009).

Pirólise

A pirólise é um processo termoquímico que envolve a decomposição da biomassa numa atmosfera inerte, sem a presença de oxigénio, tendo a capacidade de produzir compostos sólidos, líquidos e gasosos (Demirbas et al., 2009; Kurchania, 2012).

Os produtos obtidos com este processo variam consoante a temperatura de operação, o tempo de permanência, a taxa de aquecimento e a pressão da operação. Posto isto, pode dividir-se a pirólise em três tipos: pirólise lenta, pirólise rápida ou intermédia e pirólise *flash* (Elgarahy et al., 2021).

A pirólise lenta, ou carbonização, tem sido utilizada ao longo dos anos para a produção de carvão vegetal. Este processo tem um tempo de operação elevado, podendo

variar de algumas horas a dias e é efetuado a temperaturas que variam entre 300 a 700 °C (Jonsson, 2016).

A pirólise rápida tem um tempo de operação mais reduzido, 0,5 a 10 s, quando comparada com a pirólise lenta, e é efetuada a temperaturas de cerca de 500 °C. É utilizada na produção de biocombustíveis líquidos e tem como principal vantagem a elevada eficiência energética do processo aliada ao baixo custo (Chiaramonti et al., 2007; Venderbosch & Prins, 2010).

Por fim, a pirólise *flash* é a que apresenta uma taxa de aquecimento mais elevado e um menor tempo de residência, geralmente inferior a 0,5 s (Pérez et al., 2021).

Gaseificação

A gaseificação é um processo de decomposição da biomassa num combustível gasoso, através da oxidação parcial realizada a temperaturas na ordem dos 800 a 900 °C e com uma concentração de oxigénio reduzida (McKendry, 2002b). O produto obtido é um combustível gasoso constituído maioritariamente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O), hidrogénio (H₂), metano (CH₄) e outros hidrocarbonetos (Van Loo & Koppejan, 2008).

Este processo é considerado uma tecnologia de conversão parcial já que, o produto obtido é apenas utilizado na produção de compostos gasosos capazes de serem utilizados como combustível para motores e turbinas a gás (Capareda, 2020). A gaseificação pode ser aplicada a diversos tipos de biomassa, no entanto o seu teor de humidade deve ser inferior a 20 % (F. Pinto et al., 2011).

Processos bioquímicos

A conversão bioquímica é efetuada por agentes biológicos, como as enzimas e bactérias, que permitem a transformação da biomassa em biocombustíveis (Van Loo & Koppejan, 2008; Abbasi & Abbasi, 2010).

As tecnologias que fazem parte dos processos bioquímicos para a conversão da biomassa são a digestão anaeróbica, utilizada na produção do biogás, e a fermentação, para a produção de combustíveis líquidos, nomeadamente o bioetanol (Meena et al., 2021).

Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é a melhor tecnologia para a transformação de resíduos biológicos (Awasthi et al., 2021). Através de diversos microrganismos e enzimas, este processo degrada a matéria orgânica complexa na forma de proteínas, hidratos de carbono e lípidos originando um produto gasoso denominado biogás. O gás obtido é composto maioritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) e, também, por menores concentrações de água (H_2O), monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H_2) e sulfeto de hidrogénio (H_2S) (Horváth et al., 2016).

O biogás obtido pode ser diretamente utilizado em motores e turbinas a gás (McKendry, 2002b).

Fermentação

A fermentação é a tecnologia mais utilizada a nível mundial para a produção de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$). A atuação de microrganismos, fungos, bactérias ou leveduras leva à libertação do dióxido de carbono (CO_2) e posteriormente à fermentação de açúcares, amidos e biomassa celulósica (Marques et al., 2008).

3.3 Floresta como fonte de biomassa

As florestas são essenciais para a vida na Terra uma vez que albergam uma grande biodiversidade, influenciam o clima e são a principal fonte de biomassa (J. Pereira, 2016). A biomassa florestal é uma excelente alternativa aos combustíveis fósseis devido à sua disponibilidade mundial, no entanto, é necessário adotar precauções relacionadas com a preservação das áreas florestais (Gonçalves et al., 2021).

Em Portugal, a floresta é uma das principais fontes de biomassa. A Figura 3.1 representa a distribuição dos usos do solo em Portugal continental. Segundo o Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), em 2015, os espaços florestais, incluindo floresta, matos e terrenos improdutivos ocupavam 69,4 %, com cerca de 6,2 milhões de hectares, do território nacional continental. Apesar da tendência de diminuição da área florestal provocada na sua maioria pelos incêndios, registou-se um aumento de 1,9 % face a 2010, data do último inventário realizado (ICNF, 2019a).

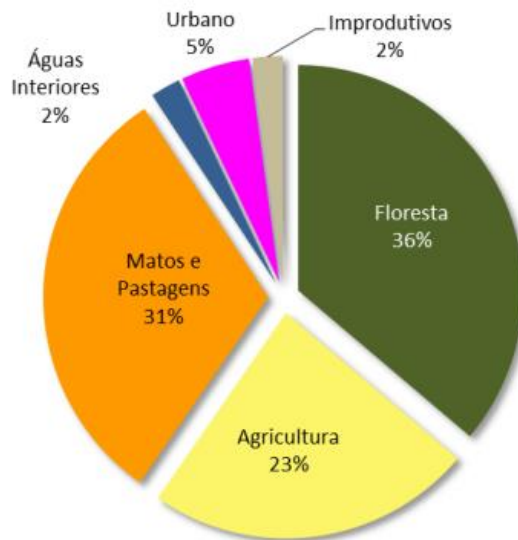


Figura 3.1 - Distribuição dos usos do solo em Portugal continental em 2015. Fonte: (ICNF, 2019a).

A floresta nacional é constituída na sua maioria por espécies autóctones, com um total de 72 % (ICNF, 2019a). Fazem parte dessas espécies o pinheiro-bravo, o pinheiro-manso, o sobreiro, a azinheira e os carvalhos. A Figura 3.2 representa a distribuição das principais espécies florestais em Portugal, referente ao ano de 2015.

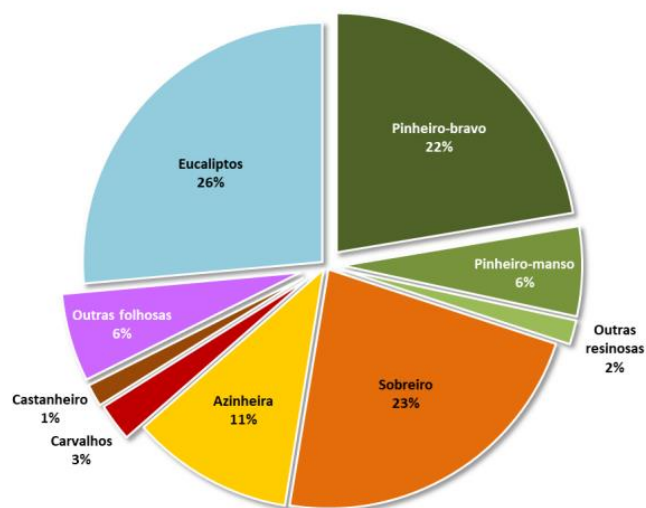


Figura 3.2 - Distribuição da área total de floresta continental por espécies. Fonte: (ICNF, 2019a).

Analisando a figura anterior, é possível observar que, em Portugal, a espécie dominante é o eucalipto (*Eucalyptus globulus*), com uma ocupação de 26 % da área total, com cerca de 845 000 ha. Seguidamente, o sobreiro (*Quercus suber*) e o pinheiro-bravo

(*Pinus pinaster*) com uma ocupação de 23 e 22 %, respetivamente. Em oposição, o castanheiro é a espécie menos abundante, com uma ocupação de apenas 1 %.

Devido aos incêndios florestais verificados ao longo dos últimos anos e às doenças e pragas, os pinhais são os ecossistemas florestais que registraram uma maior redução da área ocupada (ICNF, 2019a), sendo de extrema importância a adoção de atitudes de gestão ambiental e reflorestação.

Conhecida em Portugal por pinheiro-bravo, a espécie *Pinus pinaster* é de origem mediterrânica e pode ser encontrada no sul da Europa, norte de África e ao longo da costa atlântica de Portugal, Espanha e França (Gaspar et al., 2009; Ledo et al., 2014). Em Portugal, com uma ocupação de cerca de 713 000 hectares de área, esta espécie tem uma maior distribuição a norte do rio Tejo, tal como se pode verificar na seguinte figura (ICNF, 2019a).

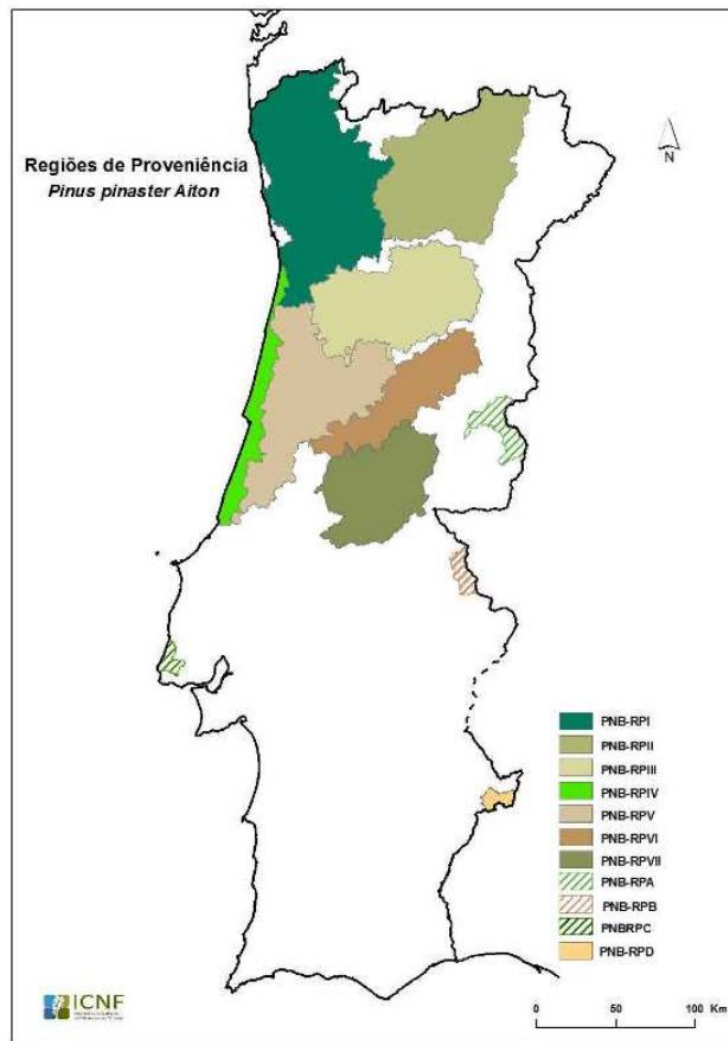


Figura 3.3 - Proveniência do pinheiro-bravo em Portugal continental. Fonte: (ICNF, 2019b).

O pinheiro-bravo é considerado a principal fonte de resina na Europa (Frankis, 2004). Já a sua madeira pode ser usada para cofragem para a construção civil, carpintaria e mobiliário, produção de pasta para papel e produção de contraplacados. Tornando-a assim uma matéria-prima com diversas finalidades (Baptista, 2006).

A espécie *Pinus pinaster* tem uma enorme flexibilidade relativamente às condições climáticas, adaptando-se ao frio e calor, contudo caso as temperaturas atinjam valores inferiores a -15 °C o pinheiro pode sofrer danos irreparáveis. Relativamente aos solos onde crescem, esta espécie tem preferência por solos permeáveis, no entanto são capazes de colonizar um solo nu ou incipiente devido a apresentar um sistema radicular desenvolvido (Silva, 2007).

3.4 Peletização

Os péletes são um combustível sólido proveniente da biomassa, altamente versátil e projetado para competir com os combustíveis fósseis (Jenkins, 2010; Obernberger & Thek, 2010). A sua qualidade varia de acordo com a matéria-prima utilizada, durabilidade e teor de água (Hansen et al., 2009). Dos combustíveis sólidos provenientes da biomassa, os péletes são os que apresentam uma combustão mais eficiente devido ao menor teor de humidade e elevada massa volúmica, levando a menores emissões de poluentes e menor formação de cinzas (Oliveira, 2016).

O uso da tecnologia dos péletes para a biomassa teve início na Suécia, no ano de 1980, e desde então, tem vindo a crescer ano após ano (Jenkins, 2010). Atualmente, os péletes, são usados maioritariamente no aquecimento doméstico, contudo, em alguns países, também são utilizados para fins industriais (Hansen et al., 2009).

De um modo geral, o processo de produção dos péletes pode ser dividido em três etapas, o pré-tratamento da matéria-prima, a peletização e o pós-tratamento. O pré-tratamento consiste, caso necessário, na limpeza da matéria-prima, seguido da secagem, destroçamento e acondicionamento. Já o pós-tratamento consiste no arrefecimento dos péletes e remoção de finos (Jenkins, 2010).

3.4.1 Pré-tratamento da matéria-prima

A etapa de pré-tratamento inicia-se, se necessário, pela limpeza da matéria-prima. Se a matéria-prima for proveniente de resíduos urbanos ou industriais pode haver a necessidade da remoção de materiais indesejados. Esses materiais são removidos com o auxílio de ímanes e peneiras (Hansen et al., 2009).

A fase seguinte envolve o processo de secagem. Para assegurar a máxima qualidade do produto final, a biomassa deve apresentar um teor de humidade, em base húmida, de cerca de 10 % antes do processo de peletização (Hansen et al., 2009). Como já referido anteriormente, a biomassa pode apresentar diferentes valores de teor de humidade, tornando a secagem um importante passo na peletização. A água pode funcionar como um agente de ligação e lubrificação, então, caso a matéria-prima se encontre excessivamente seca, a superfície das partículas pode carbonizar e queimar os ligantes durante o processo de densificação. Por outro lado, um excessivo teor de humidade poderá dificultar a evaporação da água, provocando um aumento de volume dos péletes (Van Loo & Koppejan, 2008; Kaliyan & Vance Morey, 2009). O processo da secagem pode ser realizado de forma natural ou forçada. A secagem natural é um processo menos dispendioso, em que se coloca a matéria-prima em montes soltos e se revira o material com regularidade induzindo a evaporação. Já a secagem forçada é realizada através de secadores tubulares ou tapetes (Obernberger & Thek, 2010).

Posteriormente, ocorre a etapa do destroçamento, na qual a biomassa sofre uma redução e homogeneização de modo a garantir uma maior massa volúmica (Van Loo & Koppejan, 2008). A obtenção de péletes de alta qualidade pode ser alcançada por meio da combinação de diferentes tamanhos de partículas, contudo, o seu diâmetro não deve exceder os 4 mm. A durabilidade dos péletes produzidos é influenciada pelo tamanho das partículas antes do processo da peletização (Kaliyan & Vance Morey, 2009).

Por fim, a fase do acondicionamento é realizada quando a matéria-prima não cumpre com a quantidade ideal de humidade, sendo necessário a introdução de vapor ou água, de modo a formar uma camada líquida na superfície das partículas e melhorando os mecanismos de adesão e ligação das partículas. Este processo pode ter a duração de 10 a 20 minutos e aumentar o teor de humidade em 2 %, sendo necessário tê-lo em atenção na etapa da secagem. Para além de vapor ou água, também poderão ser utilizados aditivos biológicos, garantindo uma maior ligação do material (Obernberger & Thek, 2010).

3.4.2 Peletização

A peletização é um processo de extrusão em que a matéria-prima é comprimida sobre uma matriz perfurada, com o auxílio de rolos. Este processo pode ser efetuado por uma máquina peletizadora do tipo anel ou do tipo plana (Hansen et al., 2009). A elevada pressão e a fricção verificadas na matriz levam a um aumento da temperatura da matéria-prima amolecendo a lenhina e permitindo que as partículas se unam (Jenkins, 2010).

Na peletizadora do tipo anel, os rolos são fixos e encontram-se no interior da matriz. Essa matriz possui a forma de anel com furos passantes, sendo esta a mais utilizada a nível industrial. Já na peletizadora do tipo plana, a matéria-prima, pela ação gravítica, cai sobre a matriz, sendo arrastada e forçada pelos rolos a passar nos furos passantes (Oberberger & Thek, 2010). Na Figura 3.4 é possível observar os dois tipos de peletizadora descritos anteriormente.

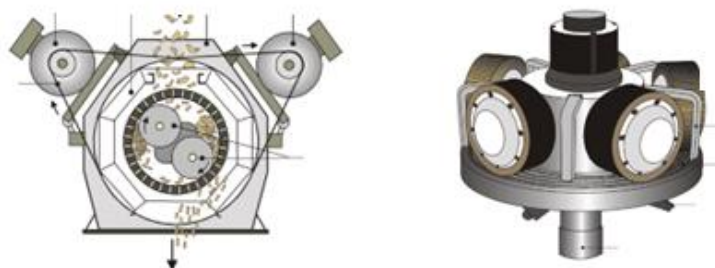


Figura 3.4 - Peletizadora do tipo anel (esquerda) e do tipo plana (direita). Fonte: (Alakangas & Paju, 2002).

A qualidade final do produto, o desgaste da peletizadora e o consumo de energia são influenciados, maioritariamente, pela distância entre a matriz e os rolos (Hansen et al., 2009).

3.4.3 Pós-tratamento da matéria-prima

O pós-tratamento da matéria-prima é dividido em duas fases, o arrefecimento e a remoção de finos. Os péletes apresentam uma temperatura de 70 a 90 °C após a peletização, tornando-se essencial o seu arrefecimento de modo a garantir a resistência e durabilidade do produto final. Com recurso a sistemas de arrefecimento, os péletes são arrefecidos até alcançarem uma temperatura próxima da temperatura ambiente, através

de correntes de ar, cuja temperatura varia de 0 a 25 °C (Carroll & Finnan, 2012; Whittaker & Shield, 2017).

Na fase da remoção de finos, os péletes são peneirados, com o auxílio de um crivo vibratório, para garantir a homogeneidade do produto, de modo a não causar problemas de transporte ou de combustão. Os finos poderão ser reintroduzidos no processo de peletização (Alakangas & Paju, 2002).

Posteriormente, os péletes serão transportados para depósitos ou embalados e distribuídos pelos consumidores.

3.4.4 Mercado dos péletes

O consumo de péletes tem aumentado ao longo dos últimos anos motivado pelo aumento do preço dos combustíveis fósseis. Em 2021, representado na Figura 3.5, registou-se um consumo mundial de péletes superior a 40 milhões de toneladas, sendo os países da União Europeia os maiores consumidores, com um total de 20,5 milhões de toneladas, correspondendo a um aumento de 18 % face ao ano transato. Do total do consumo europeu, 66,1 % corresponde aos setores residencial e comercial e o restante ao setor industrial (Bioenergy Europe, 2022).

Nos últimos anos, o continente Europeu, o Asiático, a Oceânia e a América do Sul têm apresentado um aumento contínuo na produção de péletes. A nível mundial, em 2021, verificou-se um incremento na produção de péletes de 6,8 % comparativamente ao ano anterior. Os países com maior taxa de crescimento foram a Polónia, Lituânia e Canadá, com um crescimento de 38, 32 e 15 %, respetivamente (Bioenergy Europe, 2022).

Atualmente, 7 dos 10 principais países produtores de péletes encontram-se na Europa. A lista é liderada pela Alemanha e Letónia, com uma produção anual de péletes de 3,36 e 2,11 milhões de toneladas, respetivamente (Bioenergy Europe, 2022).

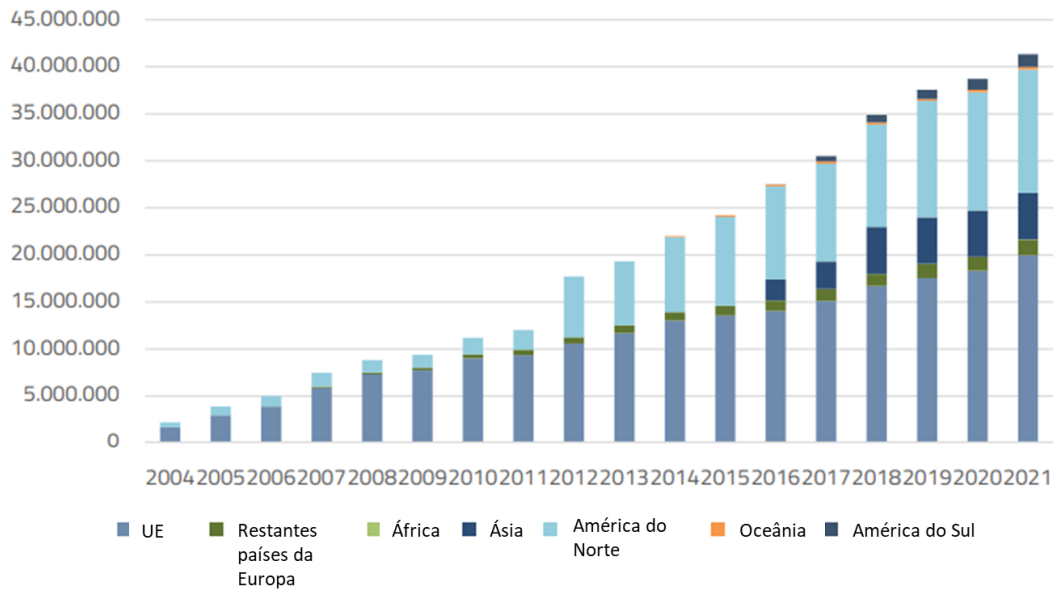


Figura 3.5 - Evolução da produção de péletes no mundo, em toneladas. Adaptado de: (Bioenergy Europe, 2022).

Segundo um relatório efetuado pela Associação Sistema Terrestre Sustentável (ZERO), em Portugal, no ano de 2021, foram produzidas 851 000 toneladas de péletes. Da produção total, apenas 37 % foram utilizados para consumo interno, tendo sido a maioria exportados para o Reino Unido, Espanha Dinamarca e Holanda (ZERO, 2022).

Em 2021, encontravam-se ativas 26 fábricas de péletes no país, com uma capacidade total instalada superior a 1,7 milhões de toneladas por ano. Do total de unidades de produção, 16 são consideradas de grande escala, com uma produção superior a 40 000 toneladas por ano (ZERO, 2022). Na Figura 3.6 é possível verificar a distribuição das unidades de produção de péletes em Portugal, bem como a sua capacidade de produção.

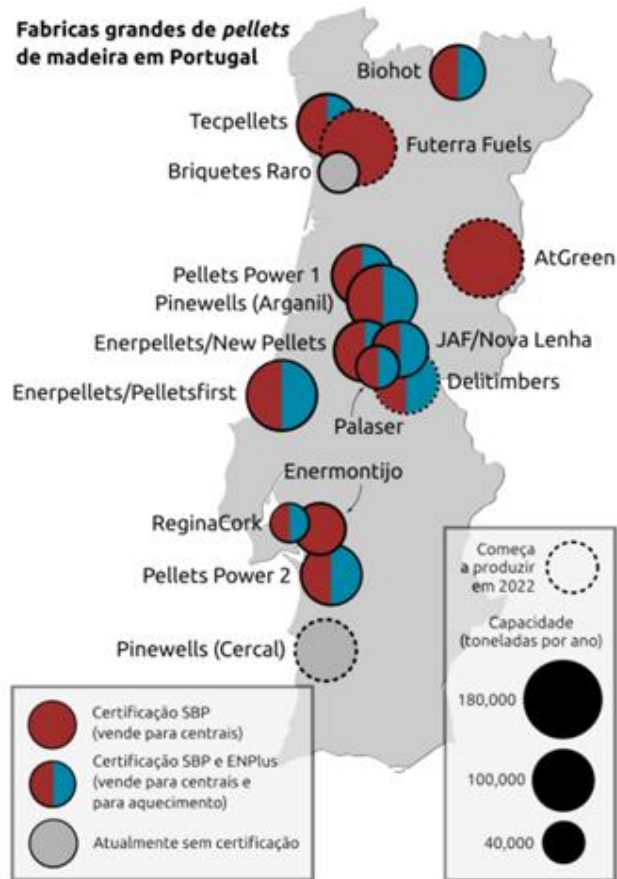


Figura 3.6 - Distribuição das unidades de produção de péletes em Portugal e respetiva capacidade de produção. Fonte: (ZERO, 2022).

Existe um grande potencial de expansão da produção sustentável de péletes, tanto globalmente como na Europa. No entanto, para alcançar esse crescimento, é necessário superar alguns obstáculos relacionados com investimentos e logística (Bioenergy Europe, 2022).

3.4.5 Certificação dos péletes

Poucos países europeus dispunham de normas específicas para a produção de combustíveis sólidos com origem na biomassa. Apenas os países pioneiros, como a Áustria, a Suécia e a Alemanha possuíam normas internas. Contudo, existia um constrangimento relativamente ao comércio internacional, pois as características dos péletes variavam de país para país. Surgiu, por isso, a necessidade da criação de diversas normas internacionais (Maraver et al., 2011; Oliveira, 2016).

Em 2010, foi criada a primeira norma europeia de certificação de combustíveis sólidos, a EN 14961:2010, com uma parte dedicada apenas aos pletes e que detalha especificações e classes de qualidade de pletes de material lenhoso para utilização não industrial. Também nesse ano, formou-se o *European Pellet Council*, com o intuito de promover a utilização de pletes e implementar a certificação *ENplus* (Oliveira, 2016). Na Figura 3.7 verifica-se que a maioria das unidades de produção de pletes certificados pela norma *Enplus* se encontra na Europa.



Figura 3.7 - Unidades de produção de pletes certificados pela norma ENplus no mundo em 2021. Fonte: (Bioenergy Europe, 2022).

A certificação *ENplus* está dividida em três classes de qualidade de pletes, a ENplus-A1, ENplus-A2 e a EN-B, diferindo entre si pelo tipo de matéria-prima utilizada e pelas características dos pletes produzidos. A matéria-prima utilizada para produzir as categorias A1 e A2 pode consistir em madeira não processada ou resíduos de madeira sem tratamentos químicos. Os pletes de classe A1 são os que cumprem os mais elevados requisitos de qualidade, produzindo menos cinzas. A classe B, por sua vez, também pode incorporar materiais lenhosos com tratamento químico ou em fim de vida. (Oliveira, 2016).

Como se pode verificar na Figura 3.8, desde a sua implementação, a produção de pletes certificados pela *ENplus* tem vindo a aumentar ao longo dos anos, tendo já

alcançado 46 países com uma produção total de 14 milhões de toneladas de péletes em 2021. A queda verificada no ano de 2022 deve-se à situação geopolítica atual com a interrupção da exportação de péletes das empresas russas e bielorrussas (Bioenergy Europe, 2022).

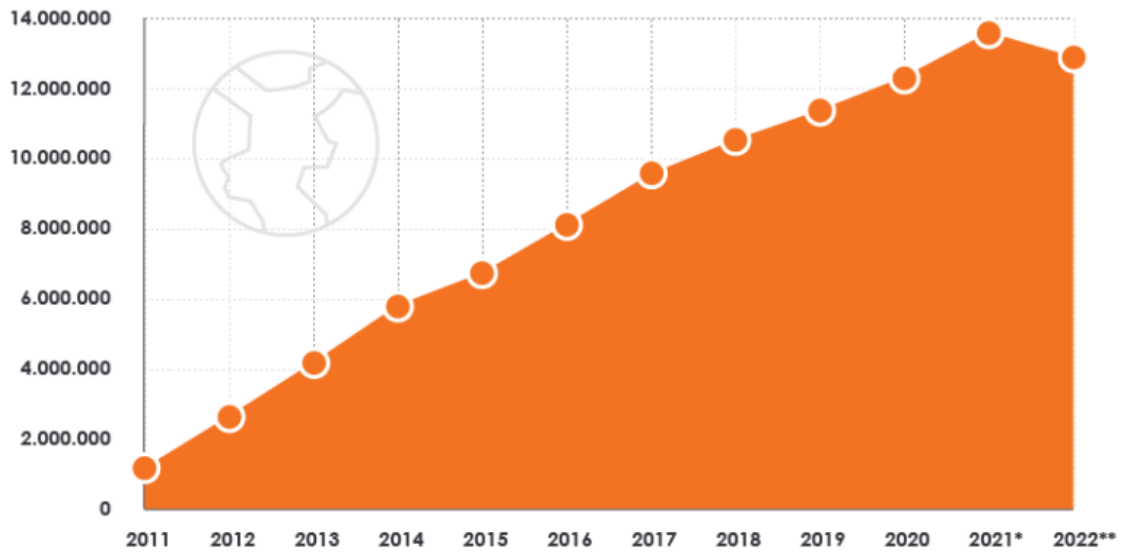


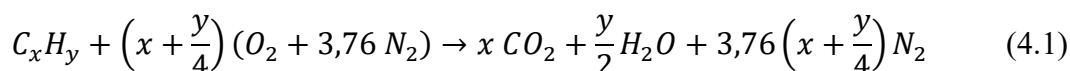
Figura 3.8 - Evolução da produção mundial de péletes certificados pela *ENplus*, em toneladas. Fonte: (Bioenergy Europe, 2022).

4 COMBUSTÃO

A combustão é um processo de conversão termoquímico no qual um combustível reage rapidamente com o oxigênio, originando calor (Turns, 2013). Este processo foi a tecnologia de conversão energética de biomassa mais utilizada pela humanidade. Cerca de 90 % da energia consumida no mundo é proveniente da queima de combustíveis fósseis e biomassa (Warnatz et al., 2006).

Para que se obtenha uma combustão completa, ou seja, para todo o combustível ser queimado durante o processo, existem diversos fatores a cumprir, tais como, o fornecimento adequado de ar para a oxidação completa, temperaturas elevadas, tempo de residência elevado e turbulência na combustão. A turbulência promove uma boa mistura entre o combustível e o comburente levando a uma queima mais eficiente (Boman, 2005; Karchniwy et al., 2021).

Tendo em conta que a maioria dos combustíveis são hidrocarbonetos simples ou de mistura e o comburente é o ar atmosférico, a combustão oxidante completa pode ser expressa pela seguinte equação (Pinho, 2011):



onde C_xH_y representa o combustível, o O_2 o oxigênio, o N_2 o azoto, o CO_2 o dióxido de carbono e o H_2O a água.

Contudo, é praticamente impossível obter uma combustão completa devido às características da fornalha e do escoamento, podendo ser desencadeados por uma distribuição inadequada de ar na câmara de combustão e vazamentos que alterem a quantidade de ar ideal. Devido a essas características, a quantidade de ar é inferior à quantidade de ar teoricamente necessário, impedindo uma mistura ar-combustível perfeitamente homogênea. Consequentemente, nos produtos de combustão, irão aparecer moléculas de combustível, traduzindo-se numa combustão incompleta (Pinho, 2011).

A quantidade de ar realmente fornecida ao processo é quantificada em termos de percentagem de ar teórico. Para esta finalidade, foram estabelecidos parâmetros que são comumente utilizados na análise de processos de combustão, sendo eles, a razão AC , razão entre a massa de ar e a massa de combustível, a razão CA , o inverso do parâmetro anterior, a riqueza de mistura, r , definida pela razão entre AC estequiométrica e AC real,

podendo ser descrita em base mássica ou em base molar e o excesso de ar, e , durante a combustão pode ser determinado a partir da riqueza da mistura, r , através da seguinte equação (Pinho, 2011).

$$e = \frac{1 - r}{r} \quad (4.2)$$

Se $r = 1$, a combustão é neutra, traduzindo-se numa mistura estequiométrica. Se $r < 1$, a combustão é oxidante, tratando-se numa mistura ar/combustível pobre, existindo excesso de ar. Caso $r > 1$, a combustão é redutora, tratando-se de uma mistura rica, com excesso de combustível ou defeito de ar.

O excesso de ar utilizado durante a combustão tem uma enorme influência na temperatura da câmara de combustão e, conseqüentemente, na eficiência do equipamento. À medida que se aumenta a quantidade de ar durante o processo de combustão, verifica-se uma redução simultânea no comprimento de chama e na temperatura dos gases de combustão, resultando numa diminuição da energia térmica produzida. Deste modo, existe uma gama de valores ideais de excesso de ar para o processo de combustão (Quaak et al., 1999). Na Figura 4.1 é apresentada a influência do ar de combustão na temperatura da câmara de combustão.

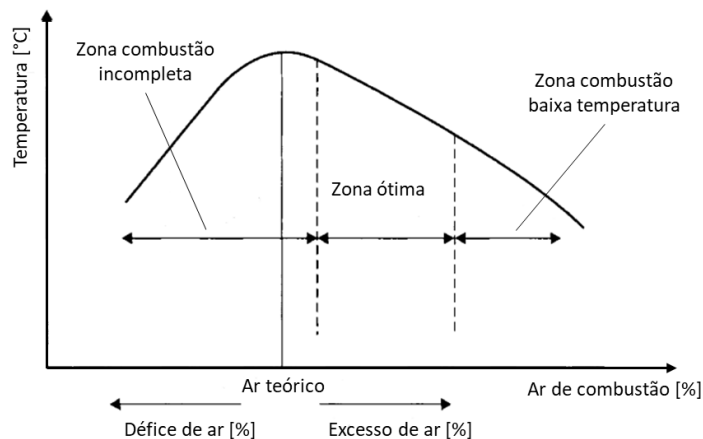
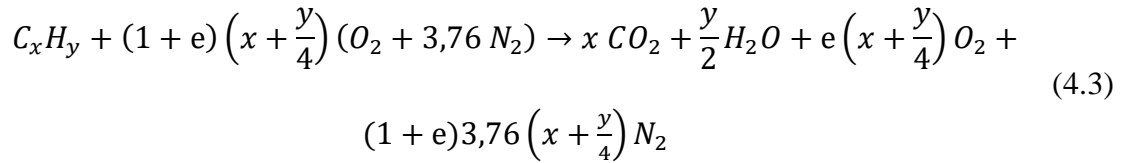


Figura 4.1 - Influência do excesso de ar na temperatura da câmara de combustão. Adaptado de: (McGowan et al., 2010).

Geralmente, nos equipamentos de combustão, como turbinas a gás, fornos industriais e caldeiras, é comum observar-se a presença de misturas de ar/combustível com elevado excesso de ar (Pinho, 2011). Portanto, é de extrema importância conduzir

investigações a fim de determinar a quantidade de ar necessária para otimizar esses processos.

Sendo a combustão uma reação química, a equação da reação de combustão oxidante completa de um hidrocarboneto simples é dada pela Equação 4.3.



onde C_xH_y representa o combustível, o O_2 o oxigênio, o N_2 o azoto, o CO_2 o dióxido de carbono, o H_2O a água e o e o excesso de ar.

4.1 Estágios da combustão

O processo da combustão da biomassa apresenta diversos estágios, sendo que, através da Figura 4.2 é possível observar a influência que cada um desses estágios tem na massa de uma partícula de biomassa. O processo inicia-se quando ocorre a ignição, seguindo-se a secagem da biomassa, sendo o tempo desta etapa dependente do seu teor de humidade. Conforme o material começa a perder humidade a temperatura aumenta e ocorre o processo de pirólise. Durante a pirólise a matéria volátil e a água são libertadas levando a uma perda de massa do material (Khan et al., 2009).

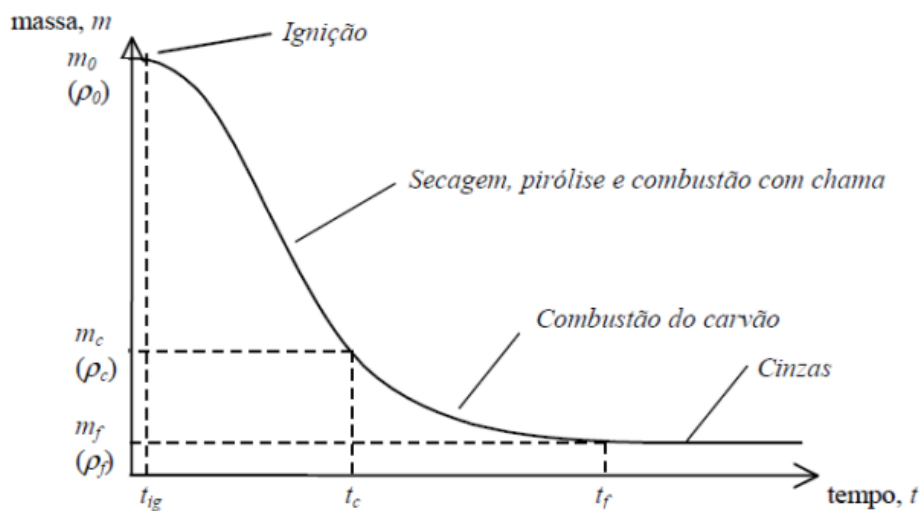


Figura 4.2 - Evolução da massa de uma partícula de biomassa durante o processo de combustão. Fonte: (Ferreira, 2013).

Ignição

A ignição de uma mistura combustível/comburente pode ocorrer de forma espontânea ou forçada. A ocorrência de ignição espontânea é um processo pouco frequente que se manifesta somente sob circunstâncias específicas relacionadas com a pressão, temperatura e composição do combustível. Tendo em conta a raridade deste processo, para que ocorra a ignição da biomassa é necessário um fluxo de energia incidente, oriundo de uma fonte de energia externa, podendo ser através de uma chama piloto ou por ar aquecido através uma resistência elétrica. Assim, uma pequena parte da mistura entra em combustão e a reação propaga-se por todo o volume de mistura (Pinho, 2011).

Secagem

Após a ignição inicia-se a fase de aquecimento da biomassa. A humidade da matéria-prima é evaporada como consequência do aumento da sua temperatura. A secagem e o aquecimento da biomassa são processos caracterizados como endotérmicos, uma vez que consomem a energia libertada pelas partículas adjacentes em forma de calor que se encontram num estado mais avançado do processo de combustão, resultando assim na diminuição da temperatura dentro da câmara de combustão. No entanto, a quantidade de energia necessária para o aquecimento e secagem da biomassa depende das suas dimensões e geometria, da quantidade de humidade inicial e respetivas propriedades (Quaak et al., 1999; Coelho & Costa, 2007; Van Loo & Koppejan, 2008).

Pirólise

No processo de pirólise, também designado por volatilização, a matéria volátil presente na biomassa é libertada através do aquecimento. Esta etapa, dependendo do tipo de biomassa, ocorre entre os 200 e os 260 °C e é caracterizada pela ausência de oxidante, já que a libertação dos voláteis não permite que o oxigénio penetre a partícula (Coelho & Costa, 2007; Ragland & Bryden, 2011).

Dependendo do tipo de combustível, taxa de aquecimento e tempo de reação, durante este processo, podem formar-se diversos produtos com diferentes quantidades, sendo os principais o H₂O, CO₂, CO, H₂ e hidrocarbonetos leves (Coelho & Costa, 2007; Van Loo & Koppejan, 2008).

Combustão do resíduo carbonoso

Na combustão, após a libertação da matéria volátil da biomassa, desencadeia-se a combustão do resíduo carbonoso. Esse resíduo, frequentemente esférico e caracterizado por fissuras ou cavidades devido à libertação de gases durante o processo de volatilização, é predominantemente composto por carbono e cinzas, podendo ainda conter pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre (Coelho & Costa, 2007; Paunu, 2012).

O processo de combustão é concluído com a oxidação do resíduo carbonoso e retenção das cinzas (Quaak et al., 1999).

4.2 Poluentes resultantes da combustão

Embora a biomassa seja classificada como uma fonte de energia renovável, a sua combustão emite poluentes para a atmosfera, contribuindo para a deterioração do meio ambiente. O tipo de equipamento de queima, a composição química do combustível e as condições de combustão, nomeadamente o excesso de ar e a temperatura de queima, são os principais parâmetros influenciadores das emissões resultantes (Evtyugina et al., 2014; Kirchsteiger et al., 2021).

Os poluentes mais comuns, no processo de combustão da biomassa, são os hidrocarbonetos não queimados (HC), os óxidos de azoto (NO, NO₂ e N₂O), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃), o dióxido de carbono (CO₂) e as partículas nas mais variadas formas (Turns, 2013).

Dos poluentes referidos anteriormente, o monóxido de carbono, o dióxido de carbono, os hidrocarbonetos e as partículas são emitidos em maior quantidade. Embora todos os poluentes sejam essenciais para compreender a influência que as emissões têm no meio ambiente e na saúde, as partículas e o monóxido de carbono são os que causam um maior impacto na saúde humana. Em particular, o monóxido de carbono ao reagir com o sangue forma carboxihemoglobina e impede que o sangue transporte oxigénio, podendo, no limite, conduzir à morte (Coelho & Costa, 2007; Borrego et al., 2010). Estima-se que, anualmente, morrem cerca de 6,7 milhões de pessoas como resultado da poluição atmosférica (World Health Organization, 2022).

4.3 Equipamentos de combustão

Existe uma ampla variedade de equipamentos de combustão para a obtenção de energia térmica. Esses sistemas são distintos na sua forma, eficiência e emissões de poluentes.

Segundo Turns (2013), para se aumentar a eficiência de combustão é necessário investir em melhores combustíveis, melhores processos de queima e em melhor tecnologia. Os equipamentos mais antigos, como as lareiras abertas, são caracterizados por baixas eficiências e altas emissões de poluentes, enquanto que, os equipamentos mais recentes apresentam uma redução na quantidade de emissões e um aumento da eficiência de combustão (Kubica et al., 2007; Foster & Garman, 2011; Castro et al., 2018).

Lareira aberta

As lareiras são um tipo de equipamento de combustão doméstico utilizado maioritariamente nas estações mais frias.

A lareira aberta é a forma mais antiga de obter energia térmica a partir de biomassa no sector residencial. É constituída por uma câmara de combustão, geralmente em tijolo refratário, ligada diretamente à chaminé. É o sistema de queima mais ineficiente, com um rendimento de cerca de 10 %, aquecendo apenas a divisão onde se encontra instalada através da radiação (Kubica et al., 2007; Foster & Garman, 2011). Este tipo de equipamento emite grandes quantidades de poluentes, principalmente na fase de ignição e primeiro reabastecimento, devido à combustão incompleta do combustível (Castro et al., 2018).

Recuperador de calor

Um recuperador de calor é um equipamento que se pode instalar numa lareira aberta; são fabricados em chapa de aço ou ferro fundido e apresentam uma porta de vidro cerâmico (Clearfire, 2022). Estas características de produção estruturais levam a um aumento do rendimento térmico do equipamento e a uma diminuição das emissões de poluentes (Sousa & Nunes, 2005).

A entrada de ar para a combustão situa-se na zona inferior e é controlada pelo utilizador, tendo este controlo sobre a taxa de queima e, conseqüentemente, sobre o calor

gerado (Red Pod, 2021). Já o calor emitido pela chama é transferido por radiação através da porta de vidro. Em geral, estes equipamentos apresentam um rendimento na ordem dos 70 % (Red Pod, 2021).

Salamandras e caldeiras a péletes

Nos diversos sistemas de combustão descritos anteriormente, a alimentação é efetuada de forma manual e por cargas. Porém, os equipamentos de combustão de péletes possuem um mecanismo de alimentação autónomo, proporcionando uma melhor experiência ao utilizador.

A combustão dos péletes pode ser realizada por salamandras ou por caldeiras. Enquanto as salamandras são utilizadas maioritariamente para o aquecimento do espaço onde se encontram instaladas, através da transferência de calor por radiação e convecção, as caldeiras permitem aquecer água que pode ser usada para o aquecimento central, através de distribuição de energia térmica (Fiedler, 2004).

De seguida, na Figura 4.3, apresenta-se um esquema com os principais componentes de uma caldeira a péletes.

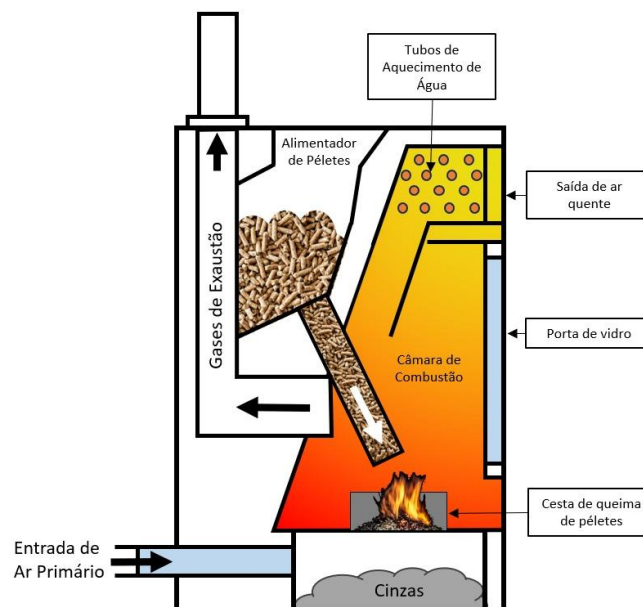


Figura 4.3 - Caldeira a péletes. Adaptado de: (Jenkins, 2010).

Estes equipamentos de combustão necessitam de energia elétrica para que o alimentador e os ventiladores funcionem. Possuem um reservatório de péletes, que deve

ser abastecido pelo utilizador, e o seu transporte até à câmara de combustão é efetuado pelo alimentador, geralmente um parafuso sem-fim. A alimentação da câmara de combustão pode ser efetuada de três maneiras distintas: alimentação inferior, alimentação superior e alimentação horizontal (Oberberger & Thek, 2010).

A câmara de combustão apresenta uma cesta de queima, para suporte e posterior queima dos péletes, uma resistência elétrica, utilizada como fonte de ignição e uma gaveta de acumulação de cinzas. A eficiência de combustão é controlada através da quantidade de ar fornecido à câmara de combustão, podendo este ser ajustado no painel de controlo da caldeira. A água que circula na caldeira é aquecida através da transferência de calor resultante da queima dos péletes (Oberberger & Thek, 2010).

A eficiência destes equipamentos pode variar entre os 75 e os 90 %, devido à combustão quase completa da biomassa, tornando-os altamente competitivos com os sistemas de queima de combustíveis fósseis (Foster & Garman, 2011).

5 MATERIAIS, INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ao longo deste capítulo vão ser apresentados os materiais, os equipamentos e os procedimentos utilizados na realização dos ensaios experimentais, nomeadamente a caracterização física e química dos péletes em estudo. Posteriormente, será detalhada a configuração da instalação e os equipamentos que compõem a caldeira de combustão, descrevendo também o seu funcionamento. Será ainda discriminada a instrumentação utilizada para mensurar as grandezas necessárias à caracterização da combustão. Não menos importante, as técnicas e os procedimentos usados para a obtenção dos resultados, serão também descritas.

5.1 Caracterização física e química dos péletes

Antes da realização dos testes de combustão foi necessário proceder à caracterização do combustível utilizado, avaliando-se as suas propriedades físicas e químicas. A composição físico-química é um importante fator para se analisar a qualidade dos péletes, determinar a sua eficiência térmica e o seu comportamento durante o processo de combustão (Forbes et al., 2014). Os ensaios efetuados ao combustível seguem a norma ISO 17225-2, que estabelece especificações para péletes de madeira e serve como base para as classes de qualidade *ENplus*, as quais apresentam critérios mais rigorosos.

5.1.1 Teor de humidade

O teor de humidade dos péletes foi determinado através do princípio de perda de massa, de acordo com a norma EN 14774-2:2010. Deste modo, foram colocadas numa estufa laboratorial *Venticell*, Figura 5.1, modelo *LSIS-B2V*, a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, três amostras com diferentes quantidades de péletes e, de forma periódica, foram realizadas medições da sua massa. Verificou-se que, após 96 horas, a massa se manteve constante, indicando que toda a água presente no combustível tinha evaporado. Posteriormente, as amostras foram colocadas num exsiccador com sais de sílica, de modo a não absorverem a humidade presente no ar ambiente e estabilizarem a sua temperatura.

As pesagens, Figura 5.1, foram realizadas numa balança digital da marca *Sartorius*, modelo *BP 310P*. A balança apresenta uma resolução de 0,005 g para a sua capacidade máxima de 310 g.

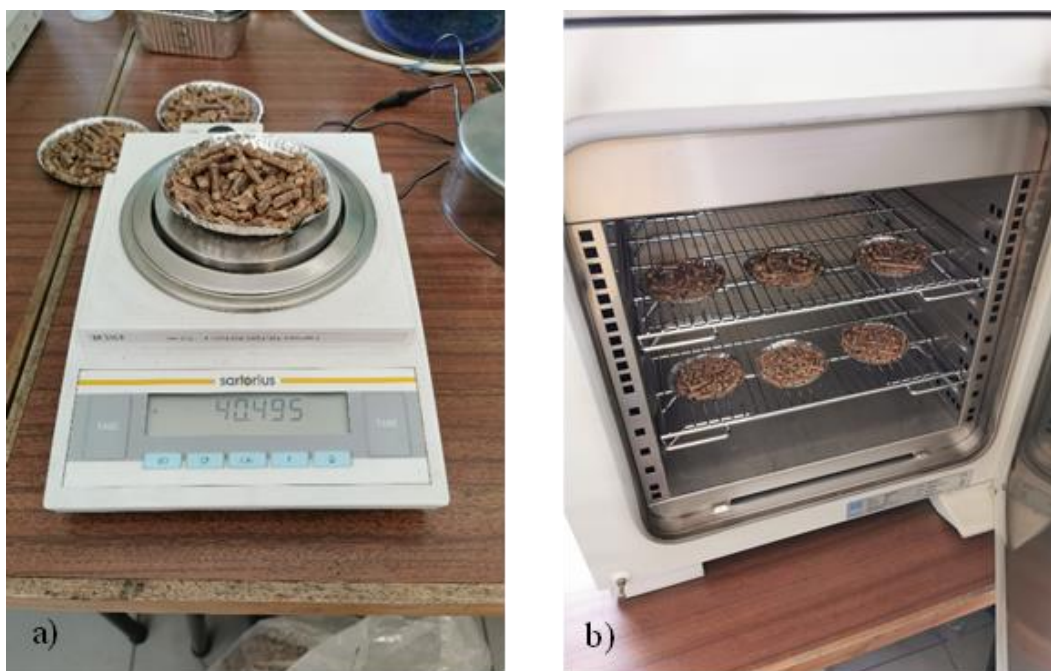


Figura 5.1 – Balança digital (a) e estufa laboratorial (b).

O teor de humidade médio, na base húmida (H_{bh}), das amostras foi de 4,92 %, calculado através da seguinte equação:

$$H_{bh} = \frac{m_h - m_s}{m_h} \quad (5.1)$$

onde m_h é a massa inicial da amostra, antes de ser colocada na estufa, e m_s é a massa final, após o processo de secagem.

5.1.2 Dimensões e massa volúmica

Para a determinação das dimensões do combustível utilizado foram criados três grupos de amostras e, para cada um, selecionaram-se aleatoriamente 20 péletes. Com o auxílio de um paquímetro digital, com uma resolução de 0,1 mm, foram medidos o comprimento e o diâmetro médio de cada um dos péletes selecionados. Com base nos cálculos da média aritmética, aplicado às amostras, foi possível determinar que o comprimento e o diâmetro médio dos péletes foi de 18,80 e 6,09 mm, respetivamente.

Posteriormente, com a finalidade de se determinar a massa volúmica do combustível, as amostras referidas anteriormente foram pesadas na balança digital referida na secção anterior. Segundo o método das dimensões proposto por Rabier et al. (2006), é possível determinar a massa volúmica de um pélete dividindo a sua massa pelo respetivo volume, uma vez que é possível equiparar um pélete a um cilindro. Assim, obteve-se uma massa volúmica média de 1101 kg/m³.

5.1.3 Quantidade de finos

A quantidade de finos foi determinada de acordo com a norma EN 15210-1. Três amostras de péletes foram selecionados, aleatoriamente, e pesadas. Posteriormente, foram peneiradas manualmente num peneiro de 3,35 mm. Apesar da norma ISO 3310-1:2000 fazer referência à utilização de um peneiro de 3,15 mm, este não se encontrava disponível no laboratório. Contudo, o uso de um peneiro com uma abertura de malha maior tem uma desvantagem associada, pois pode resultar numa sobrestimação dos resultados. Isso ocorre porque irão ser contabilizadas partículas com um diâmetro entre os 3,15 mm e os 3,35 mm, aumentando a quantidade de finos a ser considerada. A quantidade de finos foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\%Finos = \frac{m_{finos}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (5.2)$$

onde m_{finos} é a massa de finos que passaram pelo peneiro e $m_{inicial}$ é a massa inicial da amostra, antes da peneiração.

Os péletes em estudo apresentaram uma quantidade de finos de 0,02 %, o que se encontra em conformidade com a norma ISO 17225-2. De acordo com esta norma, a quantidade de finos não deve exceder 1 %.

5.1.4 Durabilidade

A durabilidade é uma importante característica física dos péletes e representa a sua resistência mecânica quando estes são sujeitos a choques e transportes (ISO DIS 17831-1, 2013; Tumuluru, 2014).

Através do cumprimento da norma EN 15210-1, que requer a utilização de um recipiente metálico de dimensões 300x300x125 mm e um defletor com 230x50 mm, que

roda a uma velocidade constante de 50 rpm, foi possível avaliar a durabilidade dos péletes (Temmerman et al., 2006). Cada amostra de péletes de 500 g era introduzida no recipiente que efetuava 500 rotações num período de 10 minutos.

Antes e após cada ensaio, a amostra era peneirada manualmente através de um peneiro de 3,35 mm, sendo depois pesada a massa retida. No total, foram realizados três ensaios de durabilidade. A durabilidade foi calculada de acordo com a Equação 5.3.

$$\% \text{ Durabilidade} = \frac{m_{retida}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (5.3)$$

onde m_{retida} representa a massa retida no peneiro após o ensaio e $m_{inicial}$ a massa inicial da amostra. Os péletes apresentaram um valor de durabilidade de 99,40 %, estando esse valor de acordo com a norma ISO 17225-2.

5.1.5 Composição química

A análise elementar e imediata dos péletes de pinho foi realizada pelo LE.CBE - Laboratório de Ensaio do Centro da Biomassa para a Energia, Anexo A. Na Tabela 5.1 é possível verificar a composição química dos péletes em estudo e o seu poder calorífico.

Tabela 5.1 - Composição elementar e imediata dos péletes em estudo

Péletes de Pinho	
Teor de cinzas % (m/m)	0,5
Carbono total % (m/m)	50,5
Hidrogénio total % (m/m)	6,2
Azoto total % (m/m)	0,12
Oxigénio total % (m/m)	42,6
Enxofre total % (m/m)	0,013
Poder calorífico inferior (base seca) (MJ/kg)	18,94

5.2 Instalação experimental

De seguida, será efetuada uma breve descrição da instalação experimental inicial e das alterações subsequentes considerando os objetivos estabelecidos. Serão, também, detalhadas as técnicas e a instrumentação utilizadas para a obtenção dos resultados.

5.2.1 Descrição instalação experimental

Os ensaios de combustão foram realizados utilizando uma caldeira existente no Laboratório de Termodinâmica e Transferência de Calor, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, do Instituto Politécnico de Viseu.

Inicialmente, a instalação experimental era constituída pela caldeira e por um medidor de caudal mássico do tipo turbina para a medição do caudal mássico de água que entrava na caldeira. A medição das temperaturas dos gases de exaustão e da água, à entrada e saída, da caldeira era realizada por termopares do tipo K. Já o caudal de água no circuito era regulado por uma válvula. A configuração existente formava um circuito aberto, ou seja, a água aquecida pela caldeira ia diretamente para o esgoto, não sendo aproveitada. Os três termopares encontravam-se conectados a um *datalogger PICO TC08*, o qual estava, por sua vez, vinculado a um computador fixo que fazia o armazenamento dos dados das temperaturas através do programa *PicoLog*. Já o caudalímetro era alimentado através de uma fonte externa de 5 V e encontrava-se ligada a uma placa de aquisição *NI USB-6008 DAC*. Por intermédio do programa *LabView* os dados eram monitorizados e registados a cada segundo.

Numa instalação real, a água entra na caldeira, e, de seguida, percorre o permutador de calor localizado acima da câmara de combustão. Durante esse percurso, a água absorve o calor gerado pela combustão dos péletes, elevando a sua temperatura. Posteriormente, é direcionada para um circuito fechado, distribuindo o calor e retornando à caldeira a uma temperatura mais baixa. Para simular a temperatura de retorno à caldeira optou-se por misturar a água quente que saía da caldeira com água fria da rede, através da instalação de uma válvula termostática, com o intuito de aproximar as condições de operação em laboratório às condições de utilização real. Porém, a pressão dentro da tubagem era reduzida, prejudicando o fluxo de água. Para corrigir este problema, foram incorporadas uma válvula reguladora de pressão e uma bomba de circulação. O medidor de caudal mássico do tipo turbina presente na instalação inicial era revestida por uma estrutura de plástico e encontrava-se com deformações, acabando por ser substituída por uma com estrutura metálica.

Adicionalmente, foi instalada um novo caudalímetro com o objetivo de analisar a quantidade de água da rede que entrava na válvula termostática.

Por fim, foram realizadas melhorias no sistema de aquisição de dados através da implementação de um controlador, com a capacidade de adquirir tanto os dados das temperaturas como dos caudais mássicos de água. Para a monitorização e registo das temperaturas de entrada de água na caldeira, T1, saída de água na caldeira, T2, e gases de exaustão, T3, utilizaram-se termopares tipo K e um controlador ESP32 para adquirir e enviar os dados via WiFi para uma base de dados, SQL. A base de dados era apresentada em formato de tabela e gráficos, via PHP e HTML, o que permitiu uma visualização direta e em tempo real dos dados obtidos. A solução desenvolvida permitiu suprimir a utilização de um dos computadores, tornando toda a instalação mais ergonómica tanto a nível de material como de programas e sistemas de recolha de dados, unificando todos num.

A instalação experimental utilizada encontra-se esquematicamente representada na Figura 5.2.

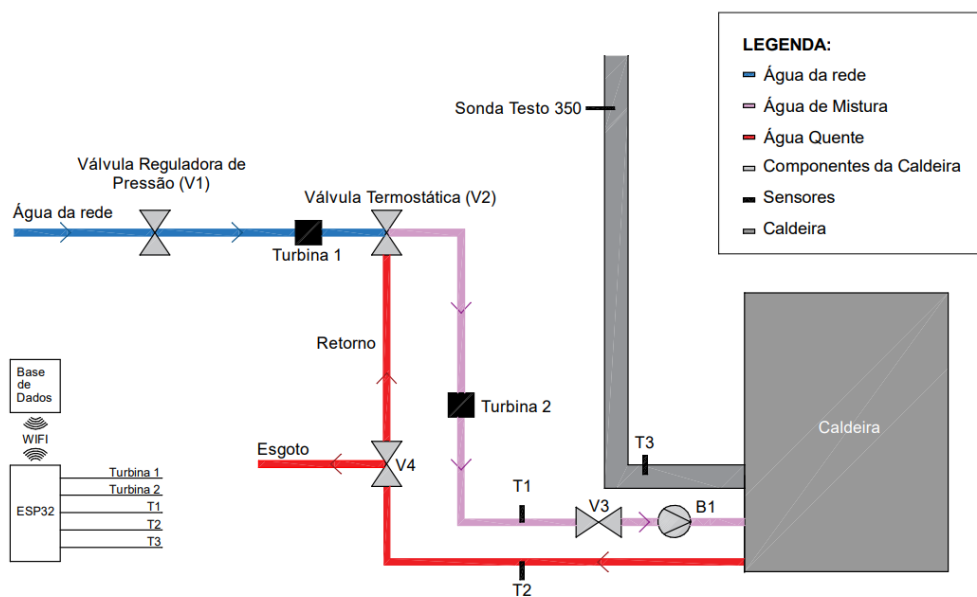


Figura 5.2 - Instalação experimental

5.2.2 Descrição da caldeira

A caldeira doméstica, Figura 5.3, utilizada para a realização do estudo tem uma potência térmica de 20 kW e é o modelo *Aqualuxo*, da empresa *Metlor*.

Os péletes são inseridos de forma manual no depósito, que tem uma capacidade máxima de 35 kg e, posteriormente, um parafuso sem-fim efetua a alimentação ao queimador pelo topo.

Na câmara de combustão, a caldeira apresenta uma resistência elétrica, que permite a ignição dos péletes, uma cesta de queima, uma gaveta de acumulação de cinzas e um permutador de calor. A cesta de queima, de medidas aproximadas de 168x150x130 mm, dispõe de um orifício para a resistência elétrica e 94 orifícios menores que permitem a alimentação de ar primário e ar secundário durante a queima.



Figura 5.3 – Caldeira e zona da câmara de combustão.

De forma a aquecer o ar ambiente, a caldeira apresenta um ventilador auxiliar que faz circular o ar ambiente em torno da câmara de combustão, saindo pelos orifícios localizados no painel frontal da caldeira. Como o objetivo era analisar o funcionamento como caldeira para aquecimento de água, este ventilador manteve-se desligado durante todos os ensaios para minimizar as perdas térmicas.

De acordo com o fabricante, a pressão máxima da água dentro da caldeira não deve exceder os 3 bar e por isso, a pressão de água durante os ensaios experimentais foi de 1,2 bar.

No painel de comando é possível monitorizar, em tempo real, a temperatura dos gases de combustão, a temperatura de saída da água da caldeira e a pressão interna da água, através de um sensor de temperatura do tipo PTC100 e de um termopar tipo K, respetivamente.

Também neste painel é possível alterar, dentro de uma gama de valores, os parâmetros operacionais dos principais componentes da caldeira, sendo eles, o parafuso sem-fim, o ventilador auxiliar e o exaustor.

A caldeira dispõe de 5 potências de funcionamento. Ao regular-se a potência altera-se o período em que o sem-fim se encontra parado. Assim, para uma potência maior, o intervalo de tempo em que o sem-fim não trabalha é menor. Já a velocidade de rotação do parafuso sem-fim é constante para qualquer potência de utilização. Consequentemente, quanto maior for a potência utilizada maior o consumo de péletes.

O componente responsável pelo controlo do excesso de ar, durante a queima de péletes, é o exaustor. Cada potência de funcionamento da caldeira foi parametrizada com diferentes excessos de ar pelo fabricante, ou seja, diferentes percentagens de potência do exaustor, sendo que, para a potência 3 e para a potência 5 a parametrização é de 38 e 48 %, respetivamente.

Como modo de segurança a caldeira dispõe de diferentes alarmes, sendo os mais comuns a temperatura excessiva de queima, temperatura excessiva no depósito de combustível, falta de combustível no depósito, excesso de pressão e de temperatura na caldeira.

5.2.3 Procedimento experimental

Caudal mássico de péletes

O caudal mássico de péletes queimados é obtido pela razão entre a diferença de péletes consumidos e o intervalo de tempo em que ocorreu o ensaio experimental (Equação 5.4).

$$\dot{m}_{péletes} = \frac{m_{péletes\ inicial} - m_{péletes\ final}}{\Delta t} \quad (5.4)$$

onde $\dot{m}_{péletes}$ (kg/s) representa o caudal mássico médio de péletes consumido, $m_{péletes\ inicial}$ (kg) a massa inicial de péletes, $m_{péletes\ final}$ (kg) a massa final de péletes e Δt (s) o intervalo de tempo ocorrido durante o ensaio.

Posto isto, com o auxílio de uma balança digital representada na Figura 5.4, da marca *Precisa*, modelo *6200 D*, foi medida a massa de péletes colocada no depósito de alimentação da caldeira e, no final do ensaio, a massa de péletes não queimados restantes no depósito.

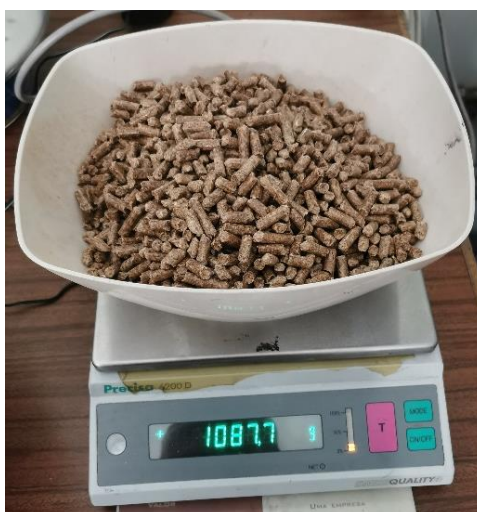


Figura 5.4 - Medição da massa dos péletes com balança digital

Caudal mássico de água

A medição do caudal mássico de água foi efetuada por dois medidores tipo turbina da marca *Seed*, modelo *YF-B1*. As turbinas eram alimentadas a 5 V, capazes de operar até uma temperatura de 80 °C e uma pressão de água de 1,75 MPa (Seed, 2021). A colocação dos medidores permitiu a medição do caudal mássico de água fria, que entrava na válvula termostática, e a de medição do caudal mássico de mistura, turbina 2, tal como se pode verificar na Figura 5.2. Os medidores de caudal tipo turbina foram calibradas pelo método das pesagens, descrito no Apêndice A. Os valores foram registados a cada segundo.

Foi utilizada uma bomba de circulação de água de forma a garantir o correto fluxo dentro da tubagem da caldeira e o caudal mássico de água ao longo do ensaio. A bomba de circulação, da marca *Grundfoss*, modelo *UPS0 25*, admite 3 velocidades de circulação, sendo que, nos ensaios realizados foi utilizada a velocidade máxima.

Temperaturas

As temperaturas de entrada e saída de água e dos gases de exaustão foram medidas com termopares do tipo K de 4,5 mm de diâmetro. A gama de leitura varia dos 0 aos 1024 °C (Maxim Integrated, 2021). Ao contrário do ocorrido em estudos anteriores (Ferreira, 2013; A. I. M. Pinto, 2015; Tomás, 2019), onde os termopares eram colocados em contacto com o metal das tubagens da caldeira, provocando uma leitura indireta afetada pelas resistências

térmicas de convecção e de condução no tubo, neste trabalho os termopares foram introduzidos no centro do fluxo de água, permitindo uma leitura direta da temperatura. Já a temperatura ambiente foi medida recorrendo ao *datalogger PICO TC08*, utilizando o programa *PicoLog* da *Pico Technology Ltd*. O *datalogger* era colocado na lateral da caldeira a 1 metro do chão evitando-se a transferência de calor direta proveniente da câmara de combustão (NP EN 16510-1, 2020). As temperaturas foram registadas a cada segundo.

Composição dos gases de exaustão

De modo a determinar a composição dos gases de exaustão, colocou-se uma sonda na chaminé para medição das concentrações molares de oxigénio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxidos de azoto (NO_x). A sonda estava conectada a um analisador de gases, Figura 5.5, da marca *Testo*, modelo 350, que adquiria dados a cada 3 segundos. O acompanhamento dessa recolha, ao longo dos ensaios, foi feito com o programa *EasyEmission*. Após a aquisição de dados foi necessário proceder à correção dos valores das concentrações dos compostos para 13 % de O_2 , na base seca, recorrendo à Equação 5.5 (Coelho & Costa, 2007).

$$[P]_{corrigido} = [P]_{medido} \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2medido}} \quad (5.5)$$

onde $[P]_{medido}$ corresponde ao valor da concentração de um determinado composto, O_{2ref} representa o fator de correção (%) e o $O_{2medido}$ o valor da concentração de oxigénio medido (%).



Figura 5.5 - Analisador de gases.

5.3 Procedimento dos ensaios

Os vários ensaios conduzidos seguiram um procedimento que se pode dividir em preparação da caldeira, preparação do circuito de água, arranque e aquecimento da caldeira e, por fim, o ensaio propriamente dito.

A preparação da caldeira iniciava-se com a extração das cinzas acumuladas na gaveta seguindo-se a pesagem dos péletes que eram inseridos no depósito da caldeira. A fim de alcançar os objetivos delineados, a caldeira era programada para o ensaio específico, alterando-se os parâmetros da potência e potência do exaustor.

Para a preparação do circuito de água, o sistema de aquisição de dados era ligado de modo a ajustar o caudal mássico de água. A válvula termostática era colocada sempre na mesma posição e, de seguida, abria-se a válvula da água da rede, ligava-se a bomba de circulação e fechava-se a válvula de saída da instalação experimental, garantindo assim o fecho do circuito. O ar existente nas tubagens era purgado.

Quando todos os pressupostos necessários se encontravam verificados, tais como a pressão interna da água e o caudal mássico de água, fazia-se o arranque da caldeira, acompanhava-se a evolução das temperaturas e verificava-se a estabilidade do caudal mássico de água até se verificar que a temperatura dos gases de exaustão estabilizava em torno de um valor médio. Geralmente esta fase demorava cerca de 30 minutos.

Tendo-se verificado que a caldeira se encontrava em regime permanente, dava-se início ao ensaio que consistia na medição e registo da composição dos gases de exaustão através do analisador de gases e das temperaturas da água à entrada e saída da caldeira e dos gases de exaustão.

Quando o ensaio acabava, a caldeira era desligada, todas as válvulas eram abertas para um arrefecimento mais rápido e os péletes sobrantes no depósito eram novamente pesados.

No final, todo este procedimento era repetido para se iniciar um novo ensaio.

5.4 Metodologia de cálculo

O rendimento térmico da caldeira, $\eta_{térmico}$, foi determinado, recorrendo ao método direto, durante as condições de regime permanente, Equação 5.6.

$$\eta_{térmico} = \frac{\dot{Q}_{transferido\ água}}{\dot{Q}_{fornecida}} \quad (5.6)$$

onde $\dot{Q}_{transferido\ água}$ representa a potência térmica transferida para a água do circuito da caldeira (kW) e $\dot{Q}_{fornecida}$ a potência térmica libertada na combustão dos péletes (kW).

O regime permanente foi identificado como sendo o período no qual a temperatura de saída da água da caldeira se mantinha aproximadamente constante. Para os ensaios efetuados, este regime permanente, foi alcançado, em média, 30 minutos após o arranque da caldeira.

A potência térmica libertada na combustão dos péletes, $\dot{Q}_{fornecida}$ (kW), foi calculada recorrendo à Equação 5.7.

$$\dot{Q}_{fornecida} = \dot{m}_{péletes} \cdot PCI_{péletes} \quad (5.7)$$

onde $\dot{m}_{péletes}$ representa o caudal mássico de péletes (kg/s) e $PCI_{péletes}$ o poder calorífico inferior dos péletes (kJ/kg). Para efeitos de cálculo, foi utilizado na base seca.

Quanto à potência térmica transferida para a água, $\dot{Q}_{transferido\ água}$, esta foi calculada através da Equação 5.8.

$$\dot{Q}_{transferido\ água} = \dot{m}_{água} \cdot \bar{c}_{água} \cdot (T_{saída} - T_{entrada}) \quad (5.8)$$

onde $\dot{m}_{água}$ é o caudal mássico médio de água do circuito da caldeira (kg/s), $\bar{c}_{água}$ o calor específico da água à temperatura média (kJ/kg.K) enquanto $T_{saída}$ e $T_{entrada}$ representam, respetivamente, a temperatura média da água à saída e à entrada da caldeira (°C). É relevante mencionar que a equação é uma simplificação de um balanço de massa e de energia aplicado ao volume de controlo em análise.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos na queima de péletes comerciais de pinho. Como já foi referido previamente, o objetivo principal do presente trabalho foi avaliar a influência do excesso de ar e do caudal mássico de péletes na eficiência térmica da caldeira, bem como nas emissões de poluentes resultantes do processo de combustão.

6.1 Ensaio experimentais

Como referido anteriormente, na secção 5.2.2, a caldeira apresenta cinco potências de utilização pré-definidas pelo fabricante. Tendo como referência os estudos realizados por Ferreira (2013), Pinto (2015) e Tomás (2019) decidiu-se não ser necessária a realização de ensaios em todas as potências, e, portanto, optou-se por estudar apenas as potências 3 e 5.

Todos os ensaios foram realizados em condições de utilização semelhantes, relativamente ao caudal mássico médio de água, pressão interna da água na caldeira e posição da válvula termostática.

De modo a simplificar a leitura, os ensaios foram designados pela potência de utilização, seguido da potência do exaustor, à qual foi realizado o ensaio, juntamente com um índice numérico, que representa o número do ensaio nas condições referidas. Por exemplo, P5E40₁, representa o primeiro ensaio realizado com a caldeira na potência 5 e com 40 % da potência do exaustor.

A caldeira utilizada nos ensaios apresentava valores pré-definidos para a potência do exaustor estabelecidos pelo fabricante, sendo de 38 % para a potência 3 e 48 % para a potência 5. Estes valores serviram como base de comparação para os demais ensaios realizados.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 são apresentadas as condições de operação da caldeira para os ensaios realizados com as potências 5 e 3, respetivamente. É apresentado o caudal mássico de péletes, bem como a potência térmica libertada na combustão dos péletes, o caudal volúmico médio da água do circuito da caldeira, as temperaturas médias de entrada e saída da água e, por fim, a potência térmica transferida para a água.

Para ambas as potências são apresentados 3 ensaios para cada um dos excessos de ar analisados. Os valores apresentados nos gráficos correspondem à média desses 3 ensaios.

Tabela 6.1 - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados para a potência 5.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	$\dot{Q}_{fornecida}$ (kW)	Caudal volúmico de água (l/min)	Temperatura de entrada da água (°C)	Temperatura de saída da água (°C)	$\dot{Q}_{transferido}$ água (kW)
P5E40 ₁	3,71	19,50	9,22	61,07	82,58	13,84
P5E40 ₂	3,57	18,80	9,32	57,45	78,62	13,78
P5E40 ₃	3,61	19,01	9,26	59,78	81,28	13,90
P5E48 ₁	3,92	20,60	9,18	61,15	85,42	15,55
P5E48 ₂	3,66	19,24	9,40	58,46	80,18	14,24
P5E48 ₃	3,68	19,34	9,11	60,42	83,18	14,46
P5E52 ₁	3,59	18,88	9,40	61,28	82,84	14,15
P5E52 ₂	3,41	17,93	9,49	60,40	81,02	13,65
P5E52 ₃	3,43	18,03	9,17	59,40	80,64	13,59
P5E56 ₁	3,65	19,18	9,29	60,53	82,94	14,53
P5E56 ₂	3,65	19,19	9,26	57,34	80,41	14,90
P5E56 ₃	3,65	19,21	9,02	58,93	82,26	14,69
P5E60 ₁	3,35	17,62	9,26	60,03	79,81	12,79
P5E60 ₂	3,38	17,77	9,26	60,32	80,66	13,14
P5E60 ₃	3,24	17,06	9,28	60,31	79,42	12,37
P5E64 ₁	3,62	19,05	9,27	61,45	83,01	13,95
P5E64 ₂	3,62	19,06	9,20	60,50	81,67	13,60
P5E64 ₃	3,79	19,94	9,47	54,62	76,15	14,22

Tabela 6.2 - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados para a potência 3.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	$\dot{Q}_{fornecida}$ (kW)	Caudal volúmico de água (l/min)	Temperatura de entrada da água (°C)	Temperatura de saída da água (°C)	$\dot{Q}_{transferido}$ água (kW)
P3E26 ₁	1,45	7,62	9,25	50,48	59,49	5,81
P3E26 ₂	1,46	7,69	9,25	49,96	58,96	5,80
P3E26 ₃	1,65	8,66	9,24	49,68	59,94	6,60
P3E30 ₁	1,73	9,11	9,19	53,99	64,81	6,93
P3E30 ₂	1,55	8,18	9,51	50,36	59,64	6,15
P3E30 ₃	1,65	8,66	9,24	47,73	58,19	6,73
P3E34 ₁	1,56	8,18	9,20	48,72	58,25	6,11
P3E34 ₂	1,58	8,31	9,22	48,87	58,22	6,01
P3E34 ₃	1,50	7,89	9,20	48,95	58,09	5,86

Tabela 6.2 (cont.) - Condições de operação da caldeira nos ensaios realizados para a potência 3.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	$\dot{Q}_{fornecida}$ (kW)	Caudal volúmico de água (l/min)	Temperatura de entrada da água (°C)	Temperatura de saída da água (°C)	$\dot{Q}_{transferido}$ água (kW)
P3E38 ₁	1,81	9,54	9,29	54,30	62,66	5,41
P3E38 ₂	1,70	8,94	9,21	52,29	60,39	5,20
P3E38 ₃	1,67	8,76	9,27	51,05	58,63	4,90
P3E46 ₁	1,46	7,70	9,35	50,27	56,28	3,91
P3E46 ₂	1,49	7,86	9,26	48,31	54,90	4,25
P3E46 ₃	1,52	8,02	9,25	49,82	56,46	4,27
P3E54 ₁	1,56	8,23	9,19	48,25	55,14	4,41
P3E54 ₂	1,59	8,35	9,23	48,55	55,84	4,69
P3E54 ₃	1,58	8,31	9,22	48,16	55,00	4,40

Como seria espectável, o caudal de alimentação de combustível foi superior nos ensaios realizados na potência 5, resultando, conseqüentemente, numa potência térmica libertada na combustão dos péletes mais elevada, quando comparada com os ensaios realizados na potência 3. É pertinente referir que o caudal de água no circuito da caldeira permaneceu aproximadamente constante em todos os ensaios, com um valor médio de 9,25 l/min. Além disso, a variação da temperatura da água, entre a entrada e a saída da caldeira, foi notavelmente superior nos ensaios com maior potência térmica libertada na combustão dos péletes, o que, por sua vez, resultou em uma maior potência transferida para a água.

Segundo a norma europeia EN 16510-1:2020, para os ensaios de certificação dos equipamentos de aquecimento domésticos que utilizam combustíveis sólidos, o valor médio da temperatura da água à saída da caldeira, para a potência nominal, deve estar compreendido entre os 70 e os 90 °C e, a diferença média de temperatura entre a entrada e saída da água deve estar compreendida entre 10 e 25 K. Observando as tabelas anteriores, pode constatar-se que os testes realizados na potência 5 cumprem com os requisitos estabelecidos pela norma.

6.1.1 Fase de arranque

Durante a fase de arranque da caldeira foram atingidas elevadas temperaturas nos gases de exaustão, bem como elevadas emissões de CO. De forma a preservar o analisar de gases, optou-se por realizar as medições da concentração dos gases de exaustão apenas

quando era atingido o regime permanente. Posto isto, durante esta fase, foram monitorizadas as temperaturas dos gases de combustão e as temperaturas de entrada e saída da água na caldeira.

Visto que, sob as mesmas condições de operação, os resultados dos ensaios foram semelhantes, optou-se por apresentar a evolução da temperatura apenas de um dos ensaios. Deste modo, a Figura 6.1 representa a temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque nas duas potências para os diversos excessos de ar em estudo.

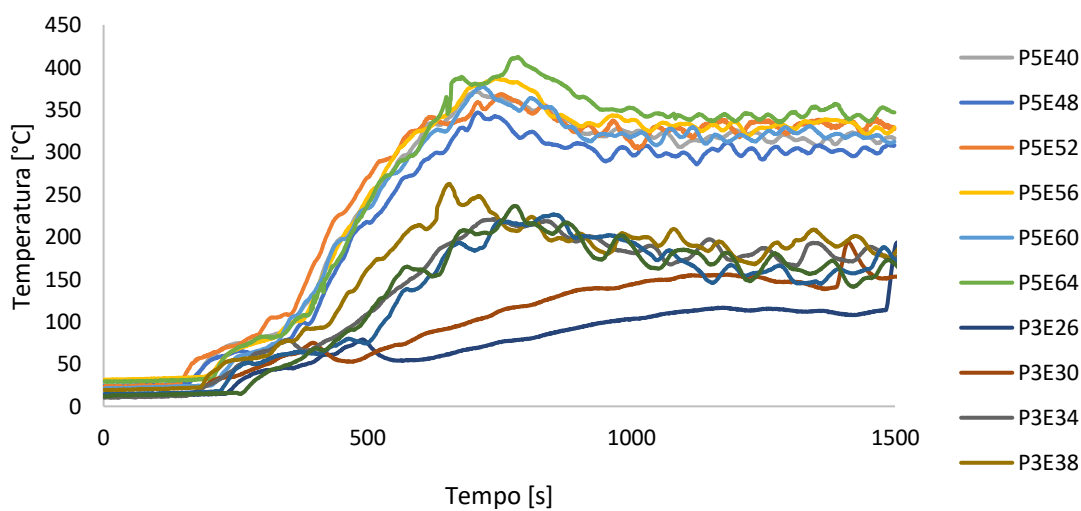


Figura 6.1 - Temperatura dos gases de exaustão durante a fase de arranque.

No início de cada ensaio, durante o aquecimento da resistência elétrica e a pré-carga dos péletes na cesta de queima, a temperatura dos gases de exaustão mantinha-se constante. Seguidamente, observava-se um ligeiro aumento, até cerca dos 80 °C, devido à ignição dos péletes e, posteriormente, verificava-se um rápido aumento da temperatura dos gases provocado pela propagação de chama, com exceção dos ensaios P3E26 e P3E30 em que o aumento da temperatura foi mais gradual. Quando os gases de exaustão atingiam a temperatura mais elevada, esta começava a diminuir e, em seguida, estabilizava, sugerindo que o ensaio tinha alcançado o regime permanente.

Visualmente verificou-se que a intensidade da chama variava consoante o excesso de ar em estudo, quanto maior mais intensa era. Contudo, para a potência 3, foi impossível realizar ensaios para uma potência de exaustor inferior a 26 %, provocado pelo défice de ar após a ignição dos péletes.

É possível verificar que a temperatura máxima atingida pelos gases de exaustão é influenciada pela potência e pelo excesso de ar utilizado, sendo maior na potência mais elevada. Para a potência de utilização 5, o valor mais elevado de temperatura na fase de arranque foi de 412,25 °C, para a potência de exaustor de 64 %. Já para a potência de utilização 3, registou-se uma temperatura máxima de 262,5 °C para a potência de exaustor de 38 %, a pré-definida pelo fabricante.

A oscilação da temperatura ao longo do tempo, mesmo após ser atingido o regime permanente, está associada à alimentação intermitente dos péletes.

6.1.2 Regime permanente

Cerca de 30 minutos após o arranque da caldeira as temperaturas dos gases de exaustão mantinham-se aproximadamente constantes, sugerindo que se tinha atingido o regime permanente. Como referido anteriormente, o analisador de gases apenas foi utilizado nesta fase, de modo a medir a composição dos gases de exaustão sem comprometer a sua integridade.

As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam a média das temperaturas dos gases de exaustão e das emissões médias resultantes da combustão dos péletes de pinho, para cada uma das potências em estudo. As emissões apresentadas foram corrigidas para 13 % (v/v) de O₂, tal como foi descrito anteriormente.

Tabela 6.3 - Ensaio realizados na potência 5.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	CO (ppm volume seco)	NO _x (ppm volume seco)
P5E40 ₁	3,71	329,64	13,03	290,64	72,48
P5E40 ₂	3,57	332,41	12,51	296,01	69,88
P5E40 ₃	3,61	333,04	12,52	215,27	71,70
P5E48 ₁	3,92	337,57	12,54	293,58	73,61
P5E48 ₂	3,66	333,05	12,39	394,28	67,67
P5E48 ₃	3,68	347,37	12,63	286,64	67,72
P5E52 ₁	3,59	349,66	13,43	243,80	75,65
P5E52 ₂	3,41	337,82	13,76	182,23	76,15
P5E52 ₃	3,43	342,44	13,38	179,26	76,40

Tabela 6.3 (cont.) - Ensaios realizados na potência 5.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	CO (ppm volume seco)	NO _x (ppm volume seco)
P5E56 ₁	3,65	343,07	12,27	226,61	70,05
P5E56 ₂	3,65	343,03	13,02	260,58	70,67
P5E56 ₃	3,65	347,94	13,21	222,66	68,90
P5E60 ₁	3,35	329,24	13,91	189,77	77,27
P5E60 ₂	3,38	332,67	13,86	101,33	82,13
P5E60 ₃	3,24	331,32	13,73	113,54	81,51
P5E64 ₁	3,62	343,10	13,44	295,51	68,51
P5E64 ₂	3,62	345,75	12,97	305,52	71,05
P5E64 ₃	3,79	336,62	13,31	227,80	70,93

Tabela 6.4 - Ensaios realizados na potência 3.

Ensaio	Caudal mássico de péletes (kg/h)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	CO (ppm volume seco)	NO _x (ppm volume seco)
P3E26 ₁	1,45	125,36	14,37	309,97	60,24
P3E26 ₂	1,46	125,54	13,11	395,30	61,31
P3E26 ₃	1,65	122,02	12,08	587,69	48,74
P3E30 ₁	1,73	159,60	13,95	208,42	67,98
P3E30 ₂	1,55	156,74	13,94	256,00	65,60
P3E30 ₃	1,65	153,17	14,74	178,41	62,19
P3E34 ₁	1,56	174,98	17,02	603,72	70,66
P3E34 ₂	1,58	179,92	17,20	670,79	70,82
P3E34 ₃	1,50	176,98	17,09	763,19	70,61
P3E38 ₁	1,81	190,23	17,72	1450,35	74,71
P3E38 ₂	1,70	179,27	18,20	1580,29	69,42
P3E38 ₃	1,67	178,93	18,21	1462,56	74,24
P3E46 ₁	1,46	158,43	18,93	2510,92	81,27
P3E46 ₂	1,49	154,78	18,94	3068,38	73,61
P3E46 ₃	1,52	153,96	19,07	3194,45	73,60
P3E54 ₁	1,56	154,40	18,93	3032,88	62,16
P3E54 ₂	1,59	162,04	18,79	2645,67	63,28
P3E54 ₃	1,58	155,56	18,91	2894,38	58,81

Assim como na fase de arranque, também em regime permanente a temperatura dos gases de exaustão está diretamente relacionada com o caudal mássico de alimentação dos péletes, o que significa que um aumento do caudal resulta num aumento da temperatura dos gases de exaustão. No entanto, tal como se pode confirmar nas Figuras

6.2 e 6.3, essa relação não se verifica quando se consideram variações no excesso de ar. Para a potência 5, observa-se que as variações no excesso de ar têm um impacto mínimo nas temperaturas dos gases de exaustão. Contudo, na potência 3, verifica-se que a temperatura dos gases de exaustão aumenta, atingindo o máximo para a potência de exaustor de 38 %, seguido de uma diminuição.

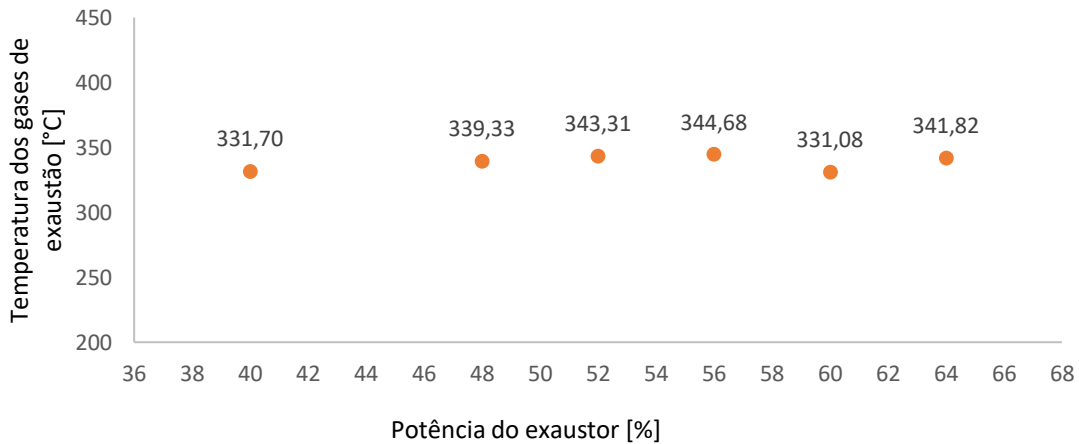


Figura 6.2 - Influência da potência do exaustor na temperatura média dos gases de exaustão para a potência 5.

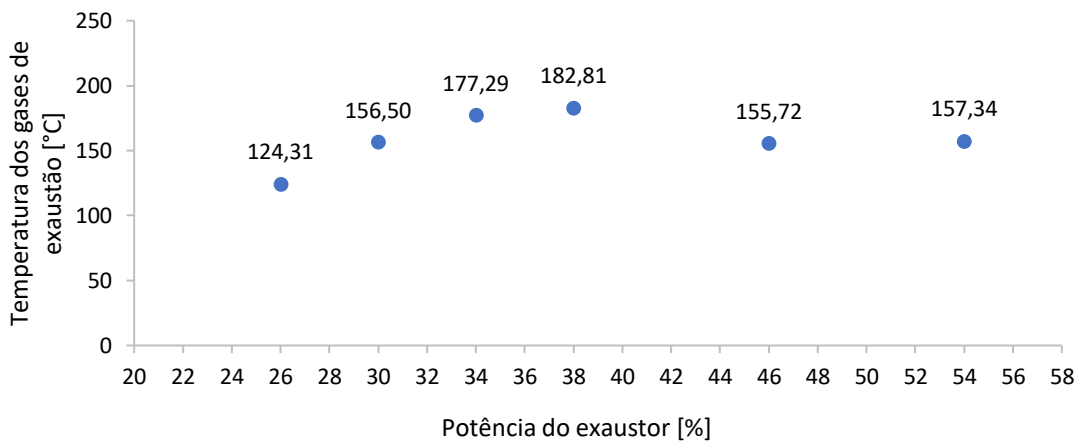


Figura 6.3 - Influência da potência do exaustor na temperatura média dos gases de exaustão para a potência 3.

Na figura seguinte é possível observar que os ensaios P3E26 e P3E30 apresentaram um aumento da temperatura dos gases de exaustão durante a fase de regime permanente. Isto ocorre devido à capacidade da caldeira regular automaticamente o processo de combustão, aumentando, momentaneamente, a potência de exaustão para limpar a câmara

de combustão, ativando um procedimento de autolimpeza. Esse procedimento tem como objetivo eliminar as cinzas e desobstruir possíveis acúmulos ou bloqueios no sistema de exaustão e grelha, visando assegurar uma maior eficiência de queima.

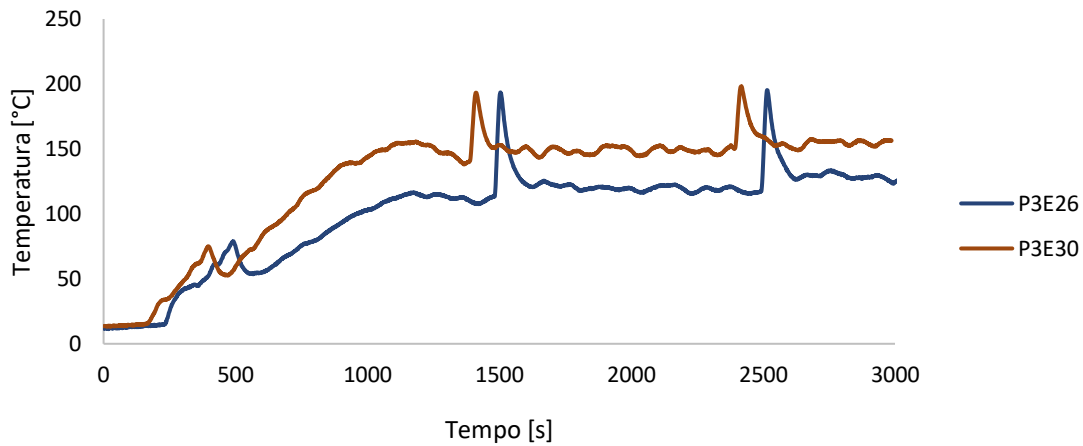


Figura 6.4 - Temperatura dos gases de exaustão nos ensaios P3E26 e P3E30.

6.1.3 Influência do excesso de ar e do caudal de combustível no rendimento térmico

A Figura 6.5 representa a influência que o excesso de ar exerce sobre o rendimento térmico da caldeira para as potências 5 e 3. Os valores apresentados representam a média dos ensaios realizados para cada um dos excessos de ar em estudo.

Como é possível verificar, para a potência 3, a diminuição do excesso de ar, levou a aumentos significativos do rendimento térmico da caldeira. Já para a potência 5, a variação do excesso de ar não apresentou um grande impacto no rendimento da caldeira.

Na potência 5, o rendimento térmico máximo, 76,64 %, foi alcançado quando a potência do exaustor foi ajustada para 56 %. Enquanto na potência 3, o rendimento mais elevado, 76,35 %, foi obtido para a potência de exaustor de 30 %.

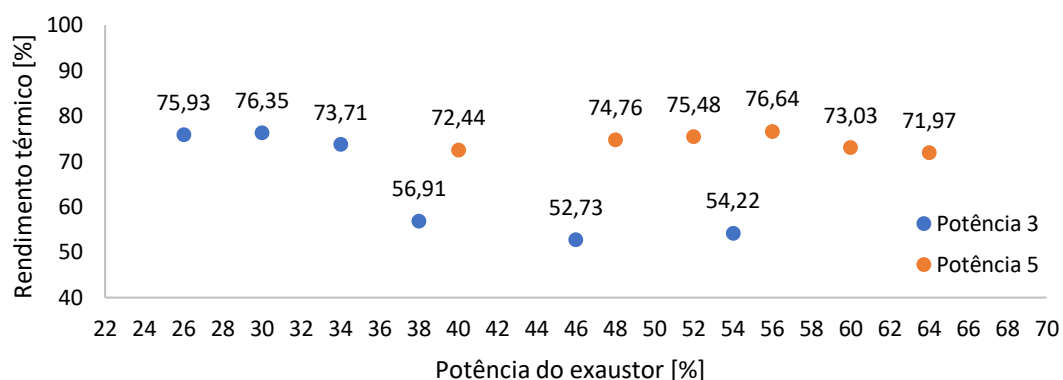


Figura 6.5 - Rendimento térmico em função da potência do exaustor e da potência de operação.

A Figura 6.6 representa a influência do excesso de ar e do caudal mássico de péletes no rendimento térmico da caldeira. Conforme foi observado em trabalhos anteriores (Ferreira, 2013; Pinto, 2015; Tomás, 2019), o aumento do caudal mássico de péletes levou a um aumento do rendimento térmico da caldeira. No entanto, no presente estudo, verificou-se que ao regular-se adequadamente o excesso de ar, os rendimentos térmicos alcançados tendem a ser muito semelhantes, independentemente do caudal de combustível utilizado.

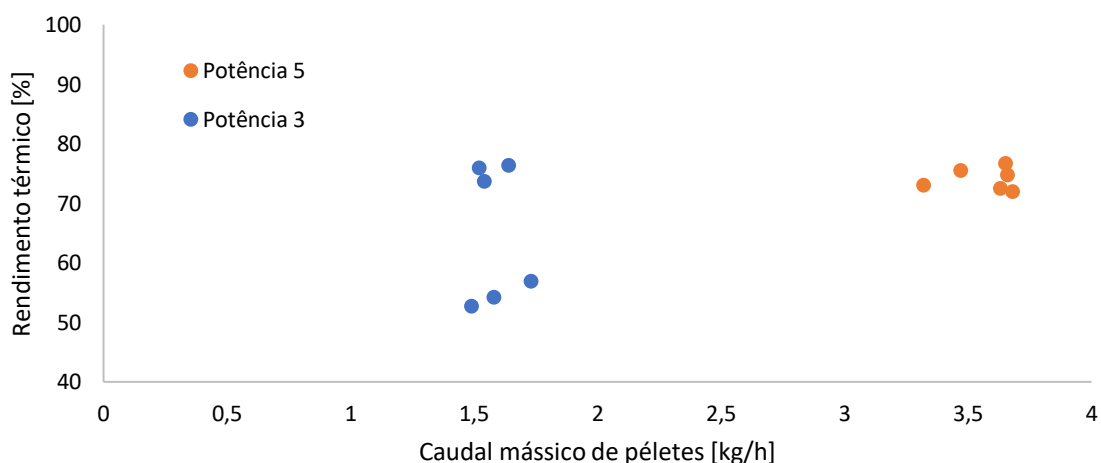


Figura 6.6 - Rendimento térmico em função do excesso de ar e do caudal mássico de péletes.

A norma Europeia EN 14785 estabelece requisitos mínimos de rendimento térmico para caldeiras domésticas alimentadas a péletes. Esses limites de rendimentos são definidos para as potências mínima e máxima, sendo de 70 e 75 %, respetivamente. Da

análise das figuras anteriores, pode constatar-se que os ensaios P5E52, P5E56, P3E26 e P3E30 estão em conformidade com os padrões estabelecidos pela norma mencionada.

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam o rendimento térmico dos ensaios realizados, assim como a temperatura média dos gases de exaustão, as emissões de oxigénio, o excesso de ar real e a respetiva riqueza da mistura.

Tabela 6.5 - Ensaio P5.

Ensaio	Rendimento térmico (%)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	Excesso de ar real (%)	Riqueza da mistura
P5E40 ₁	70,95	329,64	13,03	161,40	0,38
P5E40 ₂	73,26	332,41	12,51	145,40	0,41
P5E40 ₃	73,11	333,04	12,52	145,60	0,41
P5E48 ₁	75,49	337,57	12,54	146,10	0,41
P5E48 ₂	74,00	333,05	12,39	141,70	0,41
P5E48 ₃	74,78	347,37	12,63	148,80	0,40
P5E52 ₁	74,96	349,66	13,43	174,90	0,36
P5E52 ₂	76,13	337,82	13,76	187,70	0,35
P5E52 ₃	75,37	342,44	13,38	173,20	0,37
P5E56 ₁	75,78	343,07	12,27	138,60	0,42
P5E56 ₂	77,65	343,03	13,02	160,90	0,38
P5E56 ₃	76,48	347,94	13,21	167,40	0,37
P5E60 ₁	72,56	329,24	13,91	193,70	0,34
P5E60 ₂	73,98	332,67	13,86	191,90	0,34
P5E60 ₃	72,54	331,32	13,73	186,70	0,35
P5E64 ₁	73,24	343,10	13,44	175,30	0,36
P5E64 ₂	71,35	345,75	12,97	159,30	0,39
P5E64 ₃	71,31	336,62	13,31	170,80	0,37

Tabela 6.6 - Ensaio P3.

Ensaio	Rendimento térmico (%)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	Excesso de ar real (%)	Riqueza da mistura
P3E26 ₁	76,25	125,36	14,37	213,90	0,32
P3E26 ₂	75,34	125,54	13,11	163,60	0,38
P3E26 ₃	76,19	122,02	12,08	133,20	0,43

Tabela 6.6 (cont.) - Ensaio P3.

Ensaio	Rendimento térmico (%)	Temperatura dos gases de exaustão (°C)	O ₂ (% volume seco)	Excesso de ar real (%)	Riqueza da mistura
P3E30 ₁	76,05	159,60	13,95	195,20	0,34
P3E30 ₂	75,23	156,74	13,94	194,70	0,34
P3E30 ₃	77,78	153,17	14,74	232,30	0,30
P3E34 ₁	74,62	174,98	17,02	420,80	0,19
P3E34 ₂	72,28	179,92	17,20	445,70	0,18
P3E34 ₃	74,25	176,98	17,09	430,20	0,19
P3E38 ₁	56,72	190,23	17,72	529,00	0,16
P3E38 ₂	58,11	179,27	18,20	634,50	0,14
P3E38 ₃	55,88	178,93	18,21	638,60	0,14
P3E46 ₁	50,86	158,43	18,93	886,70	0,10
P3E46 ₂	54,01	154,78	18,94	890,60	0,10
P3E46 ₃	53,31	153,96	19,07	957,50	0,09
P3E54 ₁	53,64	154,40	18,93	886,50	0,10
P3E54 ₂	56,12	162,04	18,79	826,80	0,11
P3E54 ₃	52,90	155,56	18,91	878,50	0,10

Analisando as tabelas anteriores, torna-se evidente que todos os ensaios, em ambas as potências, demonstram um elevado excesso de ar, indicando uma mistura ar/combustível pobre. Esta condição é mais evidenciada na potência 3. Comparando os ensaios P3E26, P3E30 e P3E34 com os ensaios das condições pré-definidas pelo fabricante, P3E38, observa-se que a diminuição do excesso de ar traduziu-se num aumento da riqueza da mistura e, conseqüentemente, no aumento do rendimento térmico da caldeira.

Nas seguintes figuras é possível observar a relação existente entre a potência do exaustor e o excesso de ar real. Na Figura 6.8 observa-se que a diminuição da potência do exaustor levou a uma diminuição do excesso de ar real.

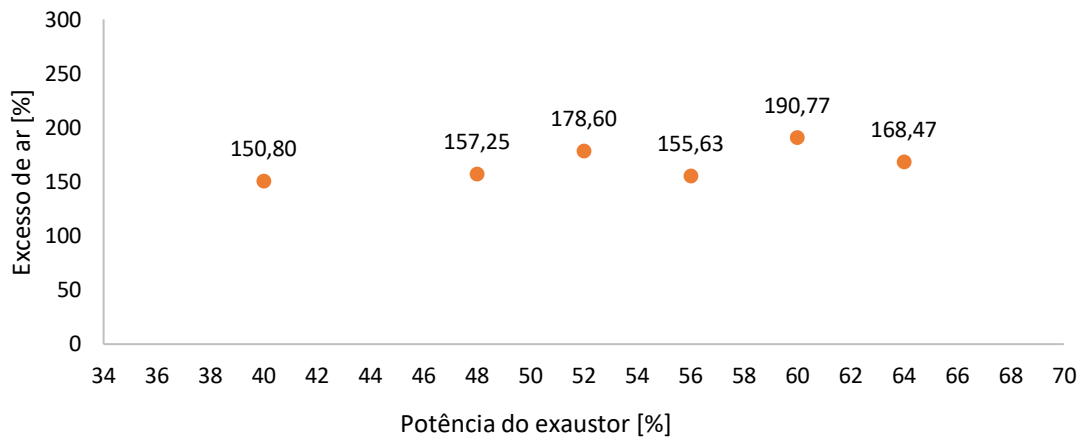


Figura 6.7 - Relação entre a potência do exaustor e o excesso de ar real para a potência 5.

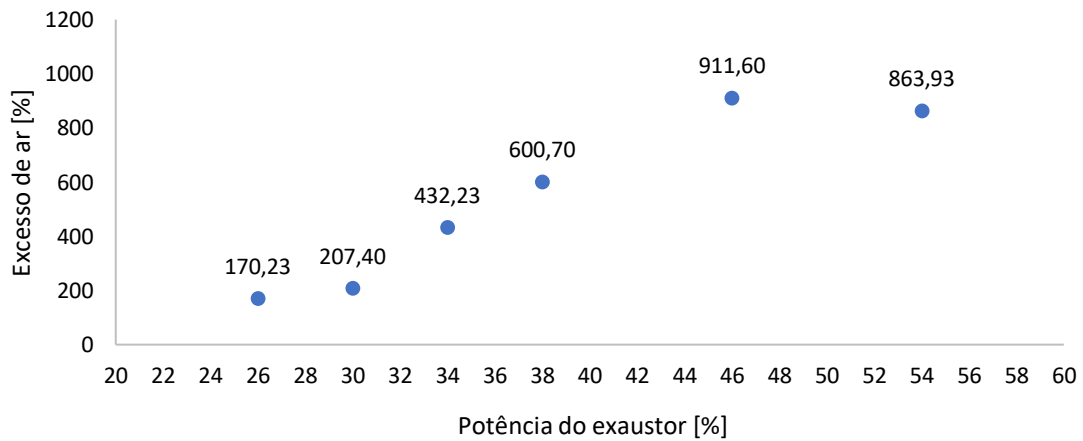


Figura 6.8 - Relação entre a potência do exaustor e o excesso de ar real para a potência 3.

6.1.4 Concentração de oxigênio e excesso de ar

As Figuras 6.9 e 6.10 representam a concentração de oxigênio e de excesso de ar nos gases de exaustão em função do caudal mássico de alimentação.

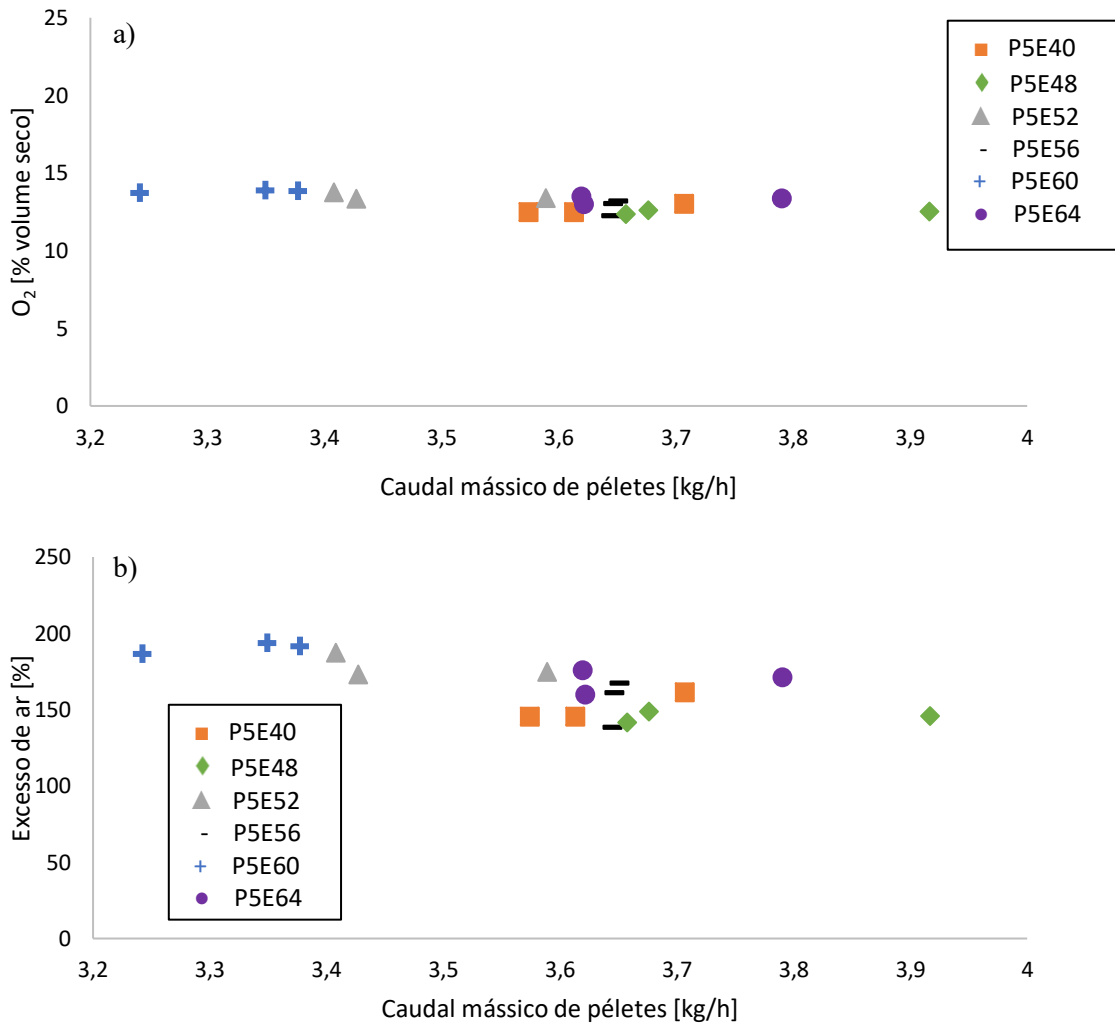


Figura 6.9 - Concentração de oxigênio (a) e excesso de ar (b) em função do caudal mássico de combustível para a potência 5.

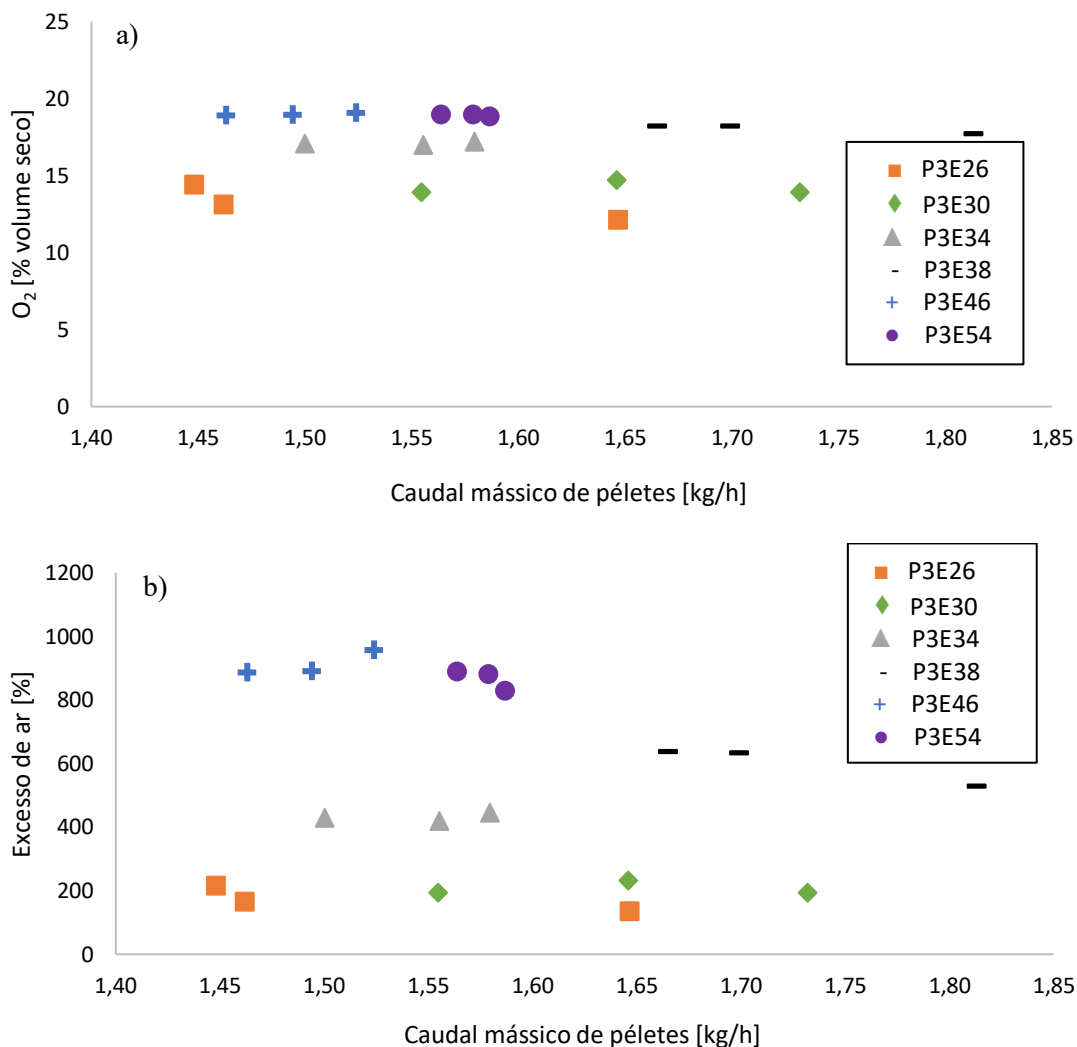


Figura 6.10 - Concentração de oxigénio (a) e excesso de ar (b) em função do caudal mássico de combustível para a potência 3.

No seu estudo, Ferreira (2013) conclui que o ventilador principal da caldeira não fazia um ajustamento automático do caudal de ar em função do caudal de combustível. Assim, o aumento do caudal de combustível levava a uma diminuição da concentração volumétrica de oxigénio nos gases de exaustão.

Analisando as figuras anteriores, o excesso de ar diminui com o aumento do caudal mássico de péletes, o que provoca, também, uma diminuição da concentração de oxigénio. Como era espectável, a concentração de oxigénio presente nos gases de exaustão depende do excesso de ar.

6.1.5 Influência do excesso de ar nas emissões

Conforme mencionado no Capítulo 4, e como seria expectável, o excesso de ar e a temperatura de queima influenciam as emissões de poluentes. Nesse contexto, o monóxido de carbono e os óxidos de azoto são dois dos poluentes mais comuns associados à queima de combustíveis sólidos. De acordo com Loo e Koppejan (2008), uma concentração elevada de CO nos produtos da combustão geralmente indica que uma combustão incompleta. O principal fator que influencia a formação de CO é o excesso de ar presente na combustão. No entanto, outros fatores poderão estar relacionados, tais como, reduzido tempo de residência na câmara de combustão, baixa temperatura ou fraca turbulência no processo. Contudo, um elevado excesso de ar provoca uma diminuição na temperatura da combustão causando, conseqüentemente, formação de monóxido de carbono (L. S. Johansson et al., 2004).

As Figuras 6.11 e 6.12 representam as emissões médias de monóxido de carbono para as diversas potências de exaustor em cada potência de operação.

Comparando as figuras, é evidente que a potência de operação da caldeira tem uma grande influência nas emissões de monóxido de carbono. Quanto maior for o caudal mássico de péletes, menor são as emissões de CO. Contudo, é de notar que a variação do excesso de ar, na potência 5, não resultou numa variação significativa das emissões de CO, tal facto pode estar relacionado com a temperatura na câmara de combustão, uma vez que o excesso de ar não exerce uma grande influência sobre a temperatura dos gases de exaustão. Os ensaios P5E48 apresentam maiores emissões de CO, enquanto os ensaios P5E60 apresentam menores emissões, com um valor médio de 287,16 e 134,88 ppm, respetivamente.

Por outro lado, na potência 3, pode observar-se de forma mais clara o impacto do excesso de ar nas emissões de monóxido de carbono. A redução do excesso de ar resultou em uma diminuição das emissões de CO. Os ensaios P3E30 foram os que apresentaram um menor valor, 214,28 ppm.

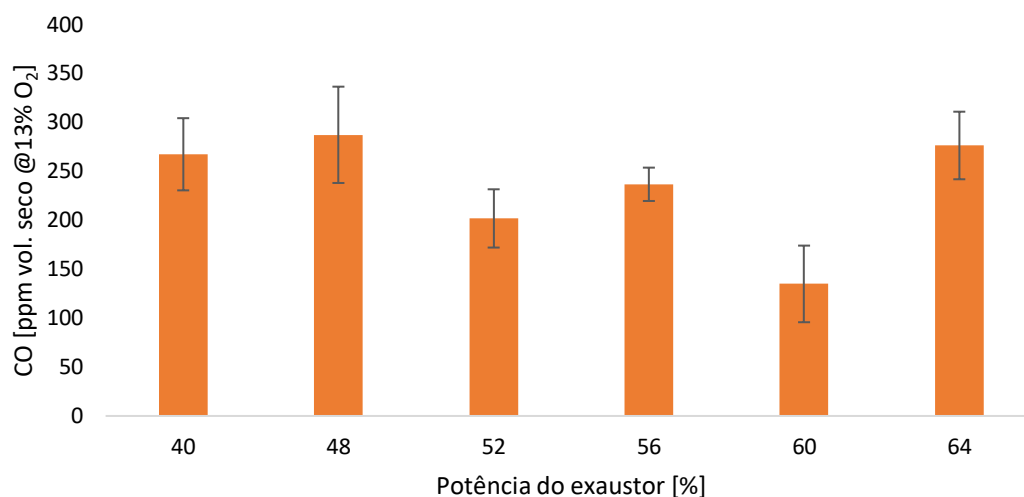


Figura 6.11 - Emissões de monóxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 5.

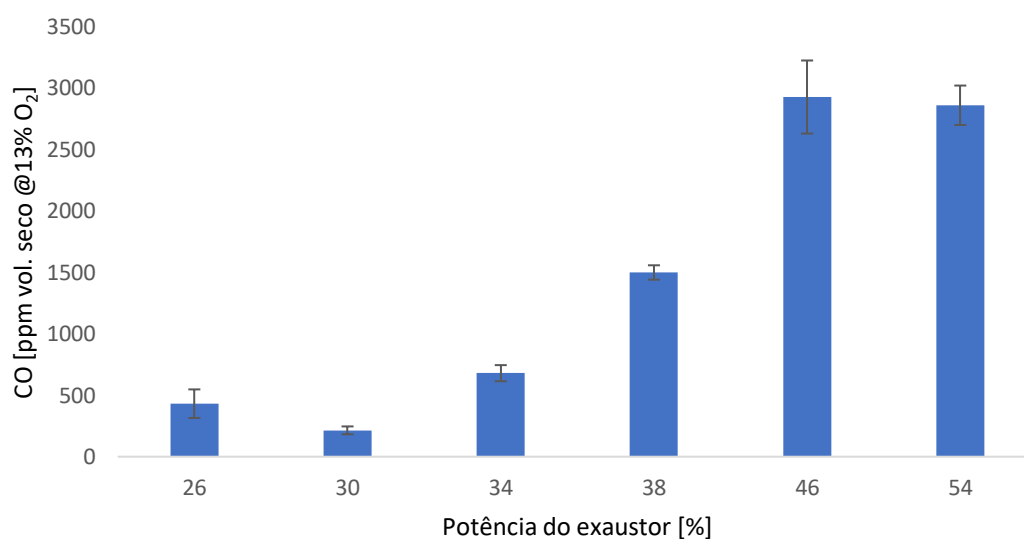


Figura 6.12 - Emissões de monóxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 3.

A norma EN 14785 define limites para as emissões de monóxido de carbono nas potências de utilização mínima e máxima, estipulando valores de 600 ppm a 13 % de O₂ e 400 ppm a 13 % O₂, respetivamente. Todos os ensaios realizados à potência 5 estão em conformidade com a norma. Supondo que as emissões, à potência 3, estivessem compreendidas entre os limites expostos anteriormente, por interpolação o valor permitido seria de 500 ppm a 13 % de O₂. Posto isto, somente os ensaios P3E26 e P3E30 cumpririam com os requisitos da norma.

As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam as emissões médias de óxidos de azoto para os diversos excessos de ar em cada potência de operação.

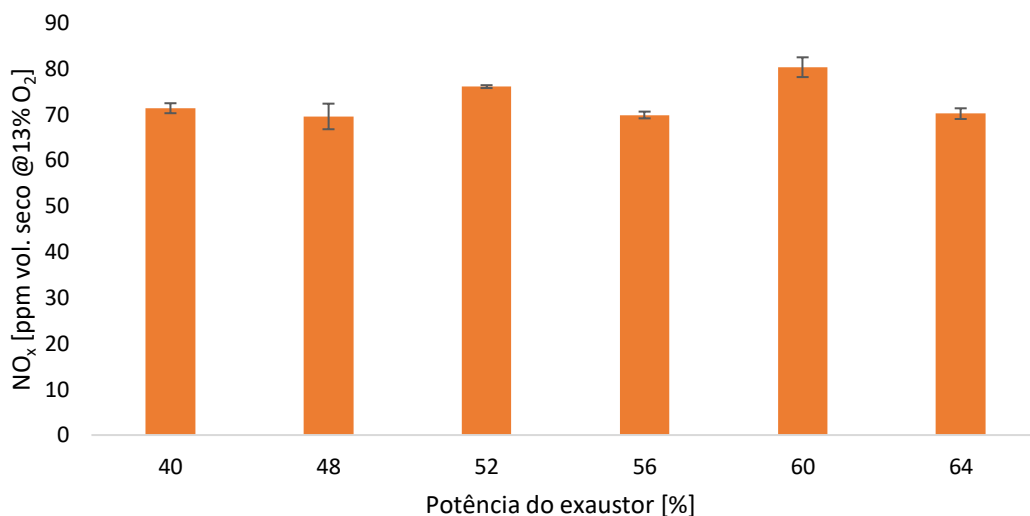


Figura 6.13 - Emissões de óxidos de azoto para os diversos excessos de ar regulados na caldeira na potência 5.

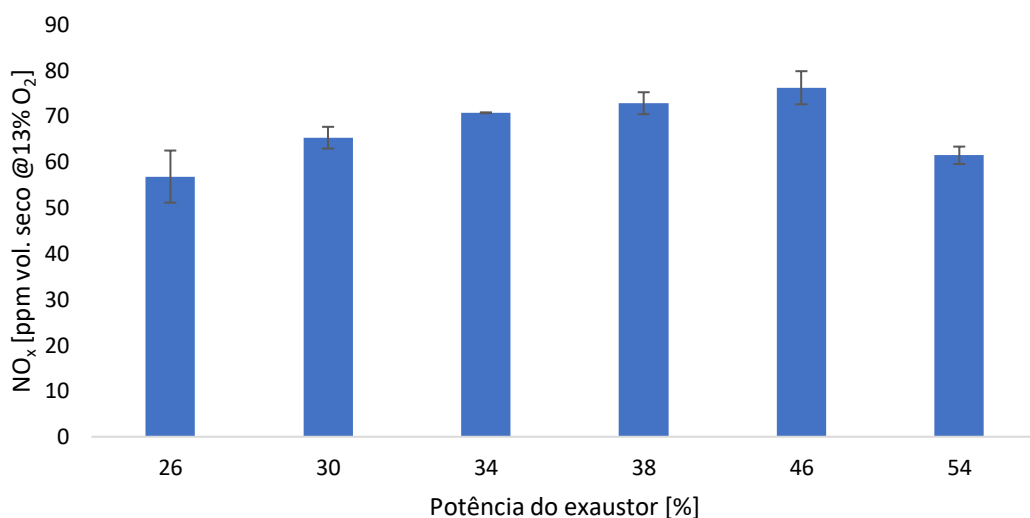


Figura 6.14 - Emissões de óxidos de azoto para os diversos excessos de ar regulados na caldeira na potência 3.

Relativamente às emissões de NO_x, constatou-se que, para ambas as cargas térmicas, a variação do excesso de ar não exerce uma influência significativa nas emissões. As emissões de NO_x mais baixas foram registadas nos ensaios P3E26, com um valor de 56,76 ppm. A semelhança destes resultados justifica-se pelo facto de que no processo de combustão, a formação de NO por meio do mecanismo térmico requer

temperaturas de combustão na faixa dos 1300 °C (Verma et al., 2012; Meiller et al., 2013; Rabaçal et al., 2013) . Caso as temperaturas não atinjam esse valor, a formação ocorrerá devido ao mecanismo do combustível. Na presente dissertação, o combustível utilizado apresenta um baixo teor de azoto de 0,12 % (m/m), pelo que a formação de NO por este mecanismo é insignificante.

Por fim, as Figuras 6.15 e 6.16 ilustram a média das emissões de dióxido de carbono para as diversas potências de exaustor em cada potência de operação.

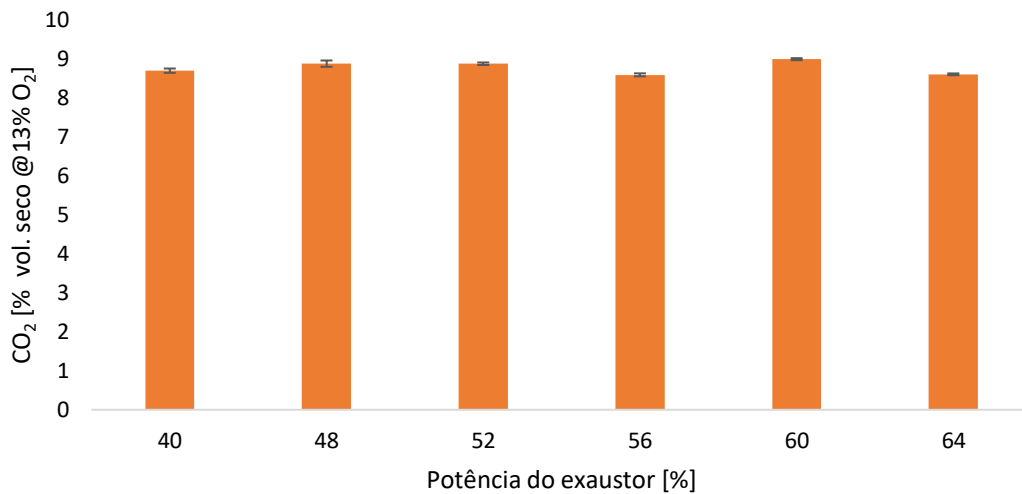


Figura 6.15 - Emissões de dióxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 5.

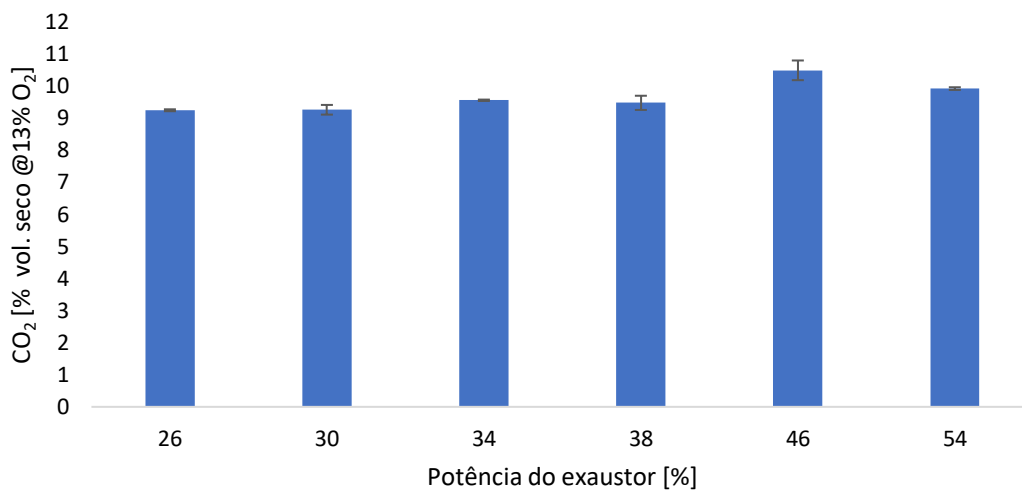


Figura 6.16 - Emissões de dióxido de carbono para as diversas potências do exaustor na potência 3.

A quantidade de dióxido de carbono emitido manteve-se praticamente constante, independentemente das variações no excesso de ar. No entanto, foram superiores durante os ensaios com menor potência térmica.

6.1.6 Influência da concentração de oxigénio nas emissões

As Figuras 6.17 e 6.18 e representam, respetivamente, como a concentração de oxigénio nos gases de exaustão afeta as emissões de monóxido de carbono na potência 5 e 3.

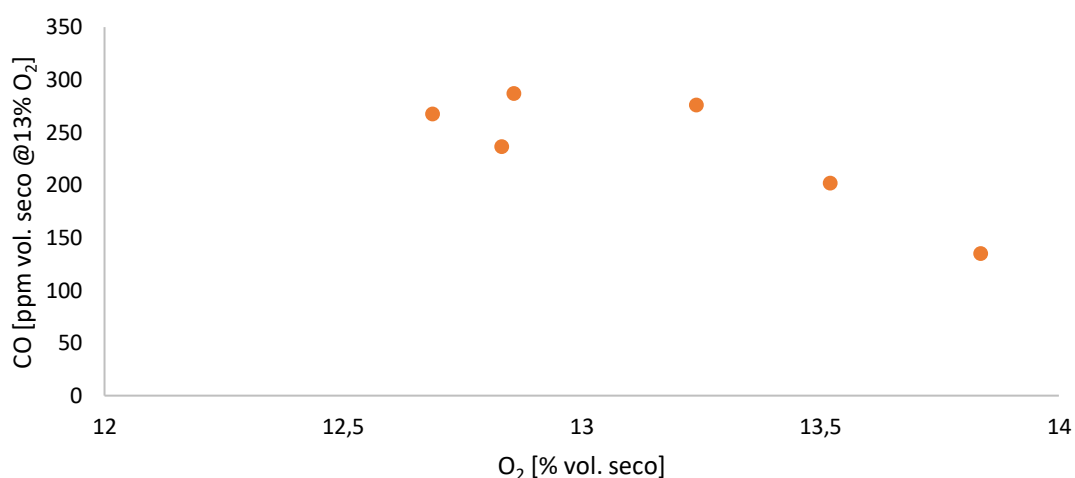


Figura 6.17 - Emissões de CO em função da concentração de oxigénio para a potência 5.

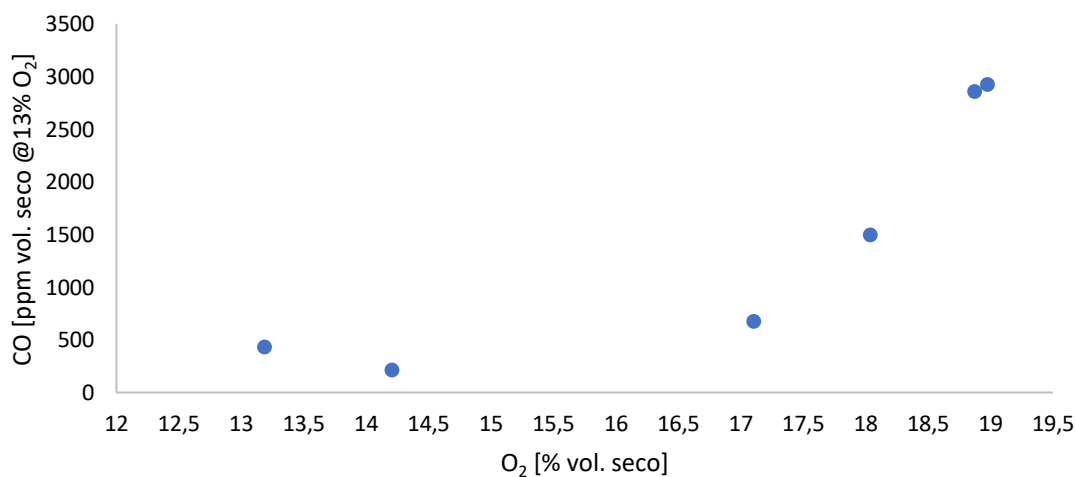


Figura 6.18 - Emissões de CO em função da concentração de oxigénio para a potência 3.

Nota-se que, para a potência 5, o aumento da concentração de oxigénio levou a uma ligeira redução das emissões de CO. No entanto, na potência 3, as variações do

excesso de ar têm maior influência nas emissões de monóxido de carbono. Nesse caso, como era esperado, observa-se um aumento das emissões de CO em função do aumento da concentração de oxigênio nos gases de exaustão.

Na combustão, o ar primário desempenha um papel significativo na formação do monóxido de carbono, enquanto o ar secundário é responsável por oxidar o CO em CO₂ na parte superior da câmara de combustão. Contudo, para a potência 3, tendo em conta o substancial aumento da concentração de CO com o aumento do excesso de ar, pode-se concluir que a mistura entre as moléculas de O₂ e de CO não ocorre num local que apresente temperatura suficiente para que a reação ocorra. É possível que tal aconteça devido à influência da velocidade do ar no transporte dos gases queimados para uma região mais elevada da câmara de combustão, onde a temperatura é naturalmente mais baixa. Outra hipótese para justificar essa evolução da concentração de CO é o ar em excesso, que não contribui para a combustão, absorve parte da energia da combustão e, conseqüentemente, reduz a temperatura da câmara de combustão.

Seria de esperar que a temperatura dos gases de exaustão representasse a temperatura da câmara de combustão, no entanto, nota-se, ao analisar a Figura 6.3, que a temperatura dos gases de combustão vai aumentando com o aumento da potência do exaustor. Tal não é coerente com o aumento da concentração de CO, pois isso representa uma diminuição da energia da combustão. Uma possível explicação para este aumento da temperatura dos gases está na sua perda de energia desde a saída da câmara de combustão até ao termopar, que se encontra a cerca de 1 m de distância. Essa perda de energia que ocorre, quer no permutador para a água, quer ao longo da tubagem para o meio envolvente, pode representar uma maior diminuição da temperatura dos gases quando o seu caudal é menor e o inverso quando o seu caudal é maior. Isso pode justificar terem-se registado temperaturas dos gases de exaustão maiores quando se supõe que a câmara de combustão se encontra mais “fria”. Concluiu-se, assim, que a temperatura dos gases de exaustão está, naturalmente, relacionada com a da câmara de combustão, mas não a representa diretamente.

7 CONCLUSÃO

Na presente dissertação, foi analisada a influência do excesso de ar no desempenho térmico de uma caldeira doméstica alimentada a péletes. Além disso, procurou-se também avaliar as emissões resultantes da combustão dos péletes. Os ensaios foram realizados para duas potências distintas.

De modo a atingir os objetivos definidos foi necessário avaliar as propriedades físicas e químicas do combustível e proceder a alterações na instalação experimental. Verificou-se que, a matéria-prima comercial atende às especificações exigidas, apresentando um teor de humidade, na base húmida, de 4,92 %, uma durabilidade mecânica de 99,40 % e um diâmetro médio de 6,09 mm. As alterações efetuadas à instalação experimental permitiram o fecho do circuito, levando ao aumento da temperatura da água que entrava na caldeira através da válvula termostática, permitindo um estudo em condições mais próximas de uma instalação doméstica real. A modificação no sistema de aquisição de dados demonstrou ser benéfica devido à simplificação do sistema através da redução de cabos e consolidação dos programas de recolha de dados em um único computador.

A influência do excesso de ar no rendimento térmico da caldeira foi avaliada em condições de regime permanente. De forma a não danificar o analisador de gases, na fase de arranque não foi possível monitorizar as concentrações dos gases, uma vez que as concentrações de monóxido de carbono eram demasiado elevadas. No entanto, durante esta fase, foi notado um aumento exponencial na temperatura dos gases à medida que a chama se propaga. Além disso, constatou-se que quanto maior a potência térmica da caldeira maior é a temperatura atingida pelos gases de exaustão. Constatou-se que, para a potência de utilização 3 não é viável a redução da potência do exaustor a baixo dos 26 %, uma vez que isso resultou em uma combustão extremamente rica levando à extinção da chama.

Da análise aos ensaios realizados conclui-se que os ensaios realizados à potência térmica 5 cumpriam com os requisitos estabelecidos pela norma EN 16510-1:2020, sendo a temperatura da água de saída da caldeira superior a 70 °C. Foi constatado que, dentro da mesma potência de operação, as variações do excesso de ar têm um impacto pouco significativo nas temperaturas dos gases de exaustão.

O aumento da potência resulta num aumento do rendimento térmico da caldeira. No entanto, ao ajustar-se adequadamente o excesso de ar, observa-se que o rendimento térmico tende a ser muito semelhante independentemente do caudal mássico de combustível utilizado, sugerindo que a caldeira não estava otimizada de origem. Conclui-se que os ensaios P5E52, P5E56, P3E26 e P3E30 estão em conformidade com a norma EN 14785 apresentando um rendimento térmico de pelo menos 75 %.

Foi notado um impacto substancial do caudal mássico de péletes na concentração de oxigénio nos gases de exaustão. Um aumento do caudal mássico de péletes traduziu-se numa diminuição da concentração de oxigénio nos gases de exaustão. Isto acontece porque a caldeira não faz um ajustamento automático do caudal de ar em função do caudal de combustível que está a ser queimado. Como seria expectável, o excesso de ar está diretamente relacionado com a concentração de oxigénio nos gases de exaustão.

Relativamente às emissões de poluentes, para a potência 3, observou-se que a potência térmica libertada e o excesso de ar utilizado têm um efeito significativo nas emissões de monóxido de carbono. O aumento do caudal mássico de combustível resultou em uma diminuição das emissões de monóxido de carbono. As emissões de CO foram muito elevadas nos ensaios P3E38, P3E46 e P3E54, indicando uma combustão pobre, provocada, possivelmente, por uma temperatura insuficiente na reação do CO com o ar, podendo ser motivada pela temperatura da câmara de combustão e pela dinâmica do escoamento. Contudo, esta análise é meramente especulativa, necessitando de mais informação. A diminuição do excesso de ar, para a potência menor, permitiu uma melhoria das condições de combustão, conduzindo a uma diminuição significativa das emissões de monóxido de carbono. Uma vez mais, todos os ensaios realizados na potência térmica mais elevada cumpriram a norma EN 14785 no que diz respeito às emissões de CO.

Observou-se que a potência e o excesso de ar não influenciavam as emissões de NO_x. Concluiu-se, portanto, que a formação de NO na combustão de péletes numa caldeira doméstica depende essencialmente do mecanismo do combustível.

Em suma, para otimizar a eficiência de combustão da caldeira em estudo, a potência do exaustor deverá ser regulada para 56 e 30 % para a potência de operação de 5 e 3, respetivamente. Esse ajuste não só maximizará a eficiência da caldeira, mas também resultará numa redução de emissões de poluentes, equilibrando assim a eficiência energética e a minimização do impacto ambiental.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

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

Atualmente, a alimentação à câmara de combustão é realizada de forma intermitente causando instabilidade na combustão, desta forma, sugere-se a modificação do sistema de alimentação de forma a atenuar este problema. Recomenda-se a integração de uma balança digital para aprimorar a precisão na medição do caudal mássico de péletes.

A implementação da válvula termostática trouxe benefícios significativos no controlo das temperaturas de entrada e saída da água. No entanto, seria vantajoso realizar ensaios experimentais, variando a posição da válvula, de modo a compreender a influência da temperatura de entrada da água no rendimento térmico e nas emissões resultantes da combustão.

Dado que as emissões de partículas resultantes dos processos de combustão da biomassa representam uma preocupação ambiental e uma ameaça à saúde humana, é essencial realizar um estudo dos processos de formação e emissão de partículas resultantes da queima de péletes. Deste modo, sugere-se o dimensionamento de dispositivos, tais como filtros de partículas, de forma a reduzir as emissões provocadas pela queima.

De modo a compreender melhor a influência do excesso de ar na emissão de poluentes sugere-se a medição da temperatura na câmara de combustão e a determinação da quantidade de ar real que entra na caldeira, tendo em conta que as variações de ar realizadas neste estudo se limitavam a alterar a potência do exaustor. Uma solução viável seria a instalação de um caudalímetro de ar na zona de entrada do ar principal na caldeira.

Com a finalidade de melhorar a eficiência de combustão, sugere-se o estudo de diferentes configurações da cesta de queima e diferentes modos de escoamento aerodinâmico do comburente na câmara de combustão.

Sugere-se ainda, a colocação de um isolamento na caldeira, de modo a minimizar as perdas térmicas para o meio envolvente e a realização de todos os ensaios com condições ambientais semelhantes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass Energy and The Environmental Impacts Associated With Its Production and Utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 919–937. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.006>
- Alakangas, E., & Paju, P. (2002). *Wood Pellets in Finland—Technology, Economy and Market*. VTT Processes.
- Assad Munawar, M., Hussain Khoja, A., Hassan, M., Liaquat, R., Raza Naqvi, S., Taqi Mehran, M., Abdullah, A., & Saleem, F. (2021). Biomass ash characterization, fusion analysis and its application in catalytic decomposition of methane. *Fuel*, 285, 119107. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119107>
- Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Wainaina, S., Rajendran, K., Awasthi, S. K., Liu, T., Duan, Y., Jain, A., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Zhang, Z., & Taherzadeh, M. J. (2021). Techno-economics and Life-Cycle Assessment of Biological and Thermochemical Treatment of Bio-waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110837. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110837>
- Baptista, C. (2006). *Influência das Condições de Cozimento Sobre a Estrutura da Lenhina e a Branqueabilidade da Pasta Kraft de Pinus pinaster* [Universidade da Beira Interior]. <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/1146/1/tese%20CMCB.pdf>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory* (Second edition). Academic Press is and imprint of Elsevier.
- Bioenergy Europe. (2022). *Pellets Statistical Report 2022*.

- Boman, C. (2005). *Particulate and Gaseous Emissions From Residential Biomass Combustion*. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:143635/FULLTEXT01.pdf>
- Borrego, C., Valente, J., Carvalho, A., Sá, E., Lopes, M., & Miranda, A. I. (2010). Contribution of Residential Wood Combustion to PM10 Levels in Portugal. *Atmospheric Environment*, *44*(5), 642–651. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.020>
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., & Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>
- Capareda, S. (2020). Bioenergy Conversion Systems. Em N. M. Holden, M. L. Wolfe, J. A. Ogejo, & E. J. Cummins, *Introduction to Biosystems Engineering*. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) in association with Virginia Tech Publishing, Virginia Tech Libraries. https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering/Bioenergy_Systems
- Carroll, J. P., & Finnan, J. (2012). Physical and Chemical Properties of Pellets From Energy Crops and Cereal Straws. *Biosystems Engineering*, *112*(2), 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.03.012>
- Castro, A., Calvo, A. I., Blanco-Alegre, C., Oduber, F., Alves, C., Coz, E., Amato, F., Querol, X., & Fraile, R. (2018). Impact of the Wood Combustion in an Open Fireplace on the Air Quality of a Living Room: Estimation of the Respirable Fraction. *Science of The Total Environment*, *628–629*, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.001>

- Chiaromonti, D., Oasmaa, A., & Solantausta, Y. (2007). Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(6), 1056–1086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.008>
- Clearfire. (2022). Recuperador de Calor. *Clearfire*. <https://clearfire.pt/categoria-produto/lareiras-a-lenha/recuperador-de-calor/>
- Coelho, P., & Costa, M. (2007). *Combustão*. Orion.
<https://pt.scribd.com/document/373866535/COMBUSTAO-Coelho-e-Costa-V2>
- Coleman, H. W., & Steele, W. G. (2009). *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers* (2nd ed). John Wiley & Sons.
- Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, *50*(7), 1746–1760. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.013>
- DGEG, ADENE, & Observatório da Energia. (2022). *Energia em Números—Edição 2022*. ADENE – Agência para a Energia.
<https://www.dgeg.gov.pt/media/zuffmfm4/dgeg-aen-2022e.pdf>
- DS. (2010). *EN 15210-1 Solid biofuels—Determination of Mechanical Durability of Pellets and Briquettes*.
- Ediger, V. Ş. (2019). An integrated Review and Analysis of Multi-energy Transition From Fossil Fuels to Renewables. *Energy Procedia*, *156*, 2–6.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.073>
- EIA. (2021). *International Energy Outlook 2021 Narrative*.
https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_Narrative.pdf
- EIA. (2023). *Russia's War on Ukraine*. IEA. <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine>

- El Bassam, N. (2010). *Handbook of Bioenergy Crops* (0 ed.). Earthscan.
<https://doi.org/10.4324/9781849774789>
- Elgarahy, A. M., Hammad, A., El-Sherif, D. M., Abouzid, M., Gaballah, M. S., & Elwakeel, K. Z. (2021). Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis: A conceptual review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(6), 106503.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106503>
- El-Mahallawy, F., & Habik, S. E.-D. (2002). *Fundamentals and Technology of Combustion*. Elsevier.
- Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Küçükbayrak, S. (2010). Calorific Value Estimation of Biomass From Their Proximate Analyses Data. *Renewable Energy*, *35*(1), 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>
- Evtuyugina, M., Alves, C., Calvo, A., Nunes, T., Tarelho, L., Duarte, M., Prozil, S. O., Evtugin, D. V., & Pio, C. (2014). VOC emissions from residential combustion of Southern and mid-European woods. *Atmospheric Environment*, *83*, 90–98.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.050>
- Faaij, A. (2006). Modern Biomass Conversion Technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *11*(2), 343–375. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9004-7>
- Ferreira, T. V. de J. (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* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu].
<https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/1938>

- Fiedler, F. (2004). The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), 201–221.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.11.002>
- Forbes, E. G. A., Easson, D. L., Lyons, G. A., & McRoberts, W. C. (2014). Physico-chemical Characteristics of Eight Different Biomass Fuels and Comparison of Combustion and Emission Results in a Small Scale Multi-fuel Boiler. *Energy Conversion and Management*, 87, 1162–1169.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.063>
- Foster, P., & Garman, G. (2011). *Heating With Wood: Using Wood to Heat your Northern Minnesota Home*. Dovetail Partners.
- Frankis, M. (2004). *Pinus pinaster Aiton 1789*.
https://www.conifers.org/pi/Pinus_pinaster.php
- Gaspar, M. J., Lousada, J. L., Rodrigues, J. C., Aguiar, A., & Almeida, M. H. (2009). Does selecting for improved growth affect wood quality of *Pinus pinaster* in Portugal? *Forest Ecology and Management*, 258(2), 115–121.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.046>
- Gonçalves, A. C., Sousa, A., & Malico, I. (Eds.). (2021). *Forest Biomass—From Trees to Energy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90324>
- Grammelis, P. (Ed.). (2011). *Solid Biofuels for Energy*. Springer London.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>
- Greenpro. (2004). *Bioenergia—Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalações*. Altener.
http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/eletrificacao_rural/livro_bioenergia_manual_sobre%20tecnologias_projetos_e_instalacoes_2004.pdf

- Hansen, M. T., Jain, A. R., Hayes, S., & Bateman, P. (2009). *English Handbook For Wood Pellet Combustion*. National Energy Foundation.
- Horváth, I. S., Tabatabaei, M., Karimi, K., & Kumar, R. (2016). Recent Updates on Biogas Production—A Review. *Biofuel Research Journal*, 3(2), 394–402.
<https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.2.4>
- ICNF. (2019a). *6º Inventário Florestal Nacional 2015—Relatório Final*. ICNF.
<https://www.icnf.pt/api/file/doc/c8cc40b3b7ec8541>
- ICNF. (2019b). *ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas*.
<https://www.icnf.pt/api/file/doc/70112f706c29e256>
- IEA, D. F. (2021). *Key World Energy Statistics 2021*.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>
- ISO 3310-1:2000—*Test Sieves—Technical Requirements and Testing Part 1: Test Sieves of Metal Wire Cloth*. (2000).
- ISO 17225-2:2021—*Solid Biofuels—Fuel specifications and classes—Part 2: Graded Wood Pellets*. (sem data).
- ISO DIS 17831-1. (2013). *Solid biofuels—Determination of Mechanical Durability of Pellets and Briquettes—Part 1: Pellets*.
- Jenkins, D. (2010). *Wood Pellet Heating Systems*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781849774963>
- Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., & Potter, A. (2004). Emission Characteristics of Modern and Old-Type Residential Boilers Fired With Wood Logs and Wood Pellets. *Atmospheric Environment*, 38(25), 4183–4195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>

- Johansson, T. B., Patwardhan, A., Nakićenović, N., & Gomez-Echeverri, L. (Eds.). (2012). *Global Energy Assessment (GEA)*. Cambridge University Press ; International Institute for Applied Systems Analysis.
- Jonsson, E. (2016). *Slow Pyrolysis in Brista: An Evaluation of Heat and Biochar Production in Sweden*. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:937279/FULLTEXT01.pdf>
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors Affecting Strength and Durability of Densified Biomass Products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kanoglu, M., Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2019). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw Hill.
- Karchniwy, E., Haugen, N. E. L., Klimanek, A., Langørgen, Ø., & Sładek, S. (2021). The effect of turbulence on mass transfer in solid fuel combustion: RANS model. *Combustion and Flame*, 227, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.12.040>
- Khan, A. A., De Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers: Potential Problems and Remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21–50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Kirchsteiger, B., Kubik, F., Sturmlechner, R., Stressler, H., Schwabl, M., Kistler, M., & Kasper-Giebl, A. (2021). Real-life Emissions from Residential Wood Combustion in Austria: From TSP Emissions to PAH Emission Profiles, Diagnostic Ratios and Toxic Risk Assessment. *Atmospheric Pollution Research*, 12(8), 101127. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101127>

- Kubica, K., Paradiz, B., & Dilara, P. (2007). *Small Combustion Installations: Techniques, Emissions and Measures for Emission Reduction*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/63329>
- Kurchania, A. K. (2012). Biomass Conversion. Em C. Baskar, S. Baskar, & R. S. Dhillon (Eds.), *Biomass Conversion* (pp. 91–122). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2_2
- Ledo, A., Cañellas, I., Barbeito, I., Gordo, F. J., Calama, R. A., & Gea-Izquierdo, G. (2014). Species Coexistence in a Mixed Mediterranean Pine Forest: Spatio-temporal Variability in Trade-offs Between Facilitation and Competition. *Forest Ecology and Management*, 322, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.038>
- Li, Q., Yuan, X., Hu, X., Meers, E., Ong, H. C., Chen, W.-H., Duan, P., Zhang, S., Lee, K. B., & Ok, Y. S. (2022). Co-liquefaction of Mixed Biomass Feedstocks for Bio-oil Production: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111814>
- Maradin, D. (2021). Advantages and Disadvantages of Renewable Energy Sources Utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11027>
- Maraver, A. G., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A Review of European Standards for Pellet Quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>
- Marques, S., Alves, L., Roseiro, J. C., & Gírio, F. M. (2008). Conversion of Recycled Paper Sludge to Ethanol by SHF and SSF Using *Pichia Stipitis*. *Biomass and Bioenergy*, 32(5), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.011>

- Martins, F., Felgueiras, C., & Smitková, M. (2018). Fossil fuel energy consumption in European countries. *Energy Procedia*, 153, 107–111.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.050>
- Maxim Integrated. (2021). *MAX6675 Thermocouple*.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf>
- McGowan, T. F., Brown, M. L., Bulpitt, W. S., & Walsh Jr, J. L. (2010). *Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide*. Wiley.
<https://avidreaders.ru/read-book/biomass-and-alternate-fuel-systems-an.html>
- McKendry, P. (2002a). Energy Production from Biomass (part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- McKendry, P. (2002b). Energy Production from Biomass (part 2): Conversion Technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- Meena, M., Shubham, S., Paritosh, K., Pareek, N., & Vivekanand, V. (2021). Production of biofuels from biomass: Predicting the energy employing artificial intelligence modelling. *Bioresource Technology*, 340, 125642.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125642>
- Meiller, M., Jakuttis, M., Binder, S., & Hornung, A. (2013). Fuel Staging in Biomass Heating Systems—A Primary Measure to Reduce NOx Emissions. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 21st EUBCE-Copenhagen 2013*, 550–554. <https://doi.org/10.5071/21stEUBCE2013-2CO.4.1>

- Mesa, J., Rocha, J., Olivares, E., Barboza, L., Brossard, L., & Brossard Junior, L. (2003). Pirólise Rápida em Leito Fluidizado: Uma Opção Para Transformar Biomassa em Energia Limpa. *Revista Analytica*, 32–36.
- Nezhnikova, E. V., Okhremenko, I. V., & Papelniuk, O. V. (2018). *Investigation of the Features of Investment in the Development of Renewable Energy Sources: Main Consumers, Legal Regulation, Equipment, Rates and Delivery*. 8(4).
<https://ideas.repec.org/a/econ/journ2/2018-04-23.html>
- Nieuwlaar, K. B., Evert. (2020). *Introduction to Energy Analysis* (3.^a ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781003003571>
- NP EN 16510-1. (2020). *Aparelhos de Aquecimento Domésticos que Utilizam Combustíveis Sólidos—Parte 1: Requisitos Gerais e Métodos de Ensaio*.
- NSAI. (2009). *EN 15148:2009—Solid Biofuels: Determination of the Content of Volatile Matter*. <https://infostore.saiglobal.com/preview/is/en/2009/i.s.en15148-2009.pdf?sku=1382260>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical Characterisation and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels With Regard to Their Combustion Behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook*. Earthscan.
<https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- Oliveira, C. M. (2016). *Biomassa Bioenergia Briquete Woodpellets*.
http://media.wix.com/ugd/09c803_9f2c2ffe0c054544b13edfa876ce0728.pdf
- Pasten, C., & Santamarina, J. C. (2012). Energy and Quality of Life. *Energy Policy*, 49, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.051>

- Paunu, V.-V. (2012). *Emissions of Residential Wood Combustion in Urban and Rural Areas of Finland*. <https://core.ac.uk/download/pdf/80704184.pdf>
- Pereira, C., & Pinho, C. (2015). Analysis of the Fluidized Bed Combustion Behavior of Quercus Ilex Char. *Applied Thermal Engineering*, 81, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.055>
- Pereira, J. (2016). *O Futuro da Floresta em Portugal*. FFMS. https://www.google.pt/books/edition/O_Futuro_da_Floresta_em_Portugal/XtgkDAAAQBAJ?hl=pt-PT&gbpv=1
- Pérez, A., Ruiz, B., Fuente, E., Calvo, L. F., & Paniagua, S. (2021). Pyrolysis technology for Cortaderia selloana invasive species. Prospects in the biomass energy sector. *Renewable Energy*, 169, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.015>
- Pinho, C. (2011). *Sebenta de Combustão*. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinto, A. I. M. (2015). *Avaliação da Biomassa de Paulownia Enquanto Combustível na Forma Peletizada* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu]. <https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/3014>
- Pinto, F., André, R., Costa, P., Carolino, C., Lopes, H., & Gulyurtlu, I. (2011). Gasification Technology and Its Contribution to Deal with Global Warming. Em P. Grammelis (Ed.), *Solid Biofuels for Energy: A Lower Greenhouse Gas Alternative* (pp. 151–175). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0_7
- Pucrs. (2010). *Uso Sustentável da Energia: Manual de Economia de Energia*. ASPLAM.

https://storage.topten.eco.br/source/1/4VbQAW6muHyG547YcXABpK1Edfo2o_a9.pdf

Quaak, P., Knoef, H., & Stassen, H. (1999). *Energy From Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies*. The World Bank, USA.

Rabaçal, M., Fernandes, U., & Costa, M. (2013). Combustion and Emission Characteristics of a Domestic Boiler Fired with Pellets of Pine, Industrial Wood Wastes and Peach Stones. *Renewable Energy*, 51, 220–226.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.020>

Rabier, F., Temmerman, M., Bohm, T., Hartmann, H., Daugbjergjensen, P., Rathbauer, J., Carrasco, J., & Fernandez, M. (2006). Particle Density Determination of Pellets and Briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 954–963.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.006>

Ragland, K. W., & Bryden, K. M. (2011). *Combustion Engineering* (2nd edition). CRC Press.

Red Pod. (2021). *Manual de Instruções—Recuperadores a Lenha*.

<https://media.adeo.com/marketplace/LMPT/84988231/3164695.pdf>

Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2020). Energy Mix. *Our World in Data*.

<https://ourworldindata.org/energy-mix>

Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A Review on Biomass as a Fuel for Boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>

Seed. (2021). *Water Flow Sensor YF-B1*.

https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seed%20Technology/11499117_1_Web.pdf

Silva, J. (2007). *Pinhais e Eucalptais—A floresta cultivada*.

- SIST. (2006). *EN 14785:2006—Residential Space Heating Appliances Fired by Wood Pellets—Requirements and Test Methods.*
- SIST. (2010). *EN 14774-2:2010—Solid biofuels—Determination of Moisture Content—Oven Dry Method—Part 2.*
- SIST. (2011). *EN 14961-2:2011—Solid Biofuels—Fuel Specifications and Classes—Part 2: Wood Pellets for Non-industrial Use.*
- Smil, V. (2016). *Energy Transitions: Global and National Perspectives.* Bloomsbury Publishing USA.
- Sousa, N., & Nunes, M. C. (2005). *Caracterização Energética e Segurança na Utilização de Recuperadores de Calor para Lareiras.*
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P., Hartmann, H., & Bohm, T. (2006). Comparative Study of Durability Test Methods for Pellets and Briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964–972. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.008>
- Tomás, A. B. S. (2019). *Estudo da Combustão de Peletes de Mimosa numa Caldeira Doméstica de 20 KW* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu].
<https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/5445>
- Truong, N. L., & Gustavsson, L. (2013). Integrated Biomass-based Production of District Heat, Electricity, Motor Fuels and Pellets of Different Scales. *Applied Energy*, 104, 623–632. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.041>
- Tumuluru, J. S. (2014). Effect of Process Variables on the Density and Durability of the Pellets Made From High Moisture Corn Stover. *Biosystems Engineering*, 119, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012>
- Turns, S. R. (2013). *Introdução à Combustão* (AMGH Editora Ltda.).

- Van Loo, S., & Koppejan, J. (Eds.). (2008). *The HandBook of Biomass Combustion and Co-Firing*. Earthscan.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2011). An Overview of the Organic and Inorganic Phase Composition of Biomass. *Fuel*, *94*, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and Disadvantages of Composition and Properties of Biomass in Comparison With Coal: An Overview. *Fuel*, *158*, 330–350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>
- Venderbosch, R., & Prins, W. (2010). Fast pyrolysis technology development. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *4*(2), 178–208. <https://doi.org/10.1002/bbb.205>
- Verma, V. K., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I., Hubin, A., & De Ruyck, J. (2012). Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, *90*(1), 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.079>
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. (2006). *Combustion*. Springer.
- Whittaker, C., & Shield, I. (2017). Factors Affecting Wood, Energy Grass and Straw Pellet Durability – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *71*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>
- World Health Organization. (2022). *Household Air Pollution*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Yoon, S.-M. (2022). On the Interdependence Between Biofuel, Fossil Fuel and Agricultural Food Prices: Evidence From Quantile Tests. *Renewable Energy*, *199*, 536–545. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.136>

Zafar, S. (2022). *The Importance of Biomass Energy in Energy Mix*.

<https://www.bioenergyconsult.com/a-glance-at-biomass-energy/>

ZERO. (2022). *Barómetro Anual sobre a Indústria dos Pellets*. [https://zero.org/wp-](https://zero.org/wp-content/uploads/2023/02/barometro-2022-pt-.pdf)

[content/uploads/2023/02/barometro-2022-pt-.pdf](https://zero.org/wp-content/uploads/2023/02/barometro-2022-pt-.pdf)

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS MEDIDORES DE CAUDAL TIPO TURBINA

Para cada um dos medidores de caudal tipo turbina utilizados nos ensaios realizou-se a respetiva calibração. Os medidores foram calibrados, recorrendo ao método das pesagens, através da relação entre o caudal mássico de água que fluía pelo medidor de caudal e do seu sinal de frequência. Para tal, conectava-se o medidor de caudal tipo turbina à água da rede a 2 bar de pressão. Ao abrir a válvula e quando o caudal de água da rede fosse constante, enchia-se um recipiente, previamente pesado e iniciava-se a contagem do tempo. Encerrava-se o ensaio com a transferência da água para um recipiente secundário e a subsequente interrupção da contagem do tempo. Posteriormente, a massa da água era pesada numa balança digital da marca *Precisa*, modelo 6200.

Durante os ensaios de calibração, o sinal de saída do medidor era transmitido para o computador através do controlador ESP32.

De forma a obter uma curva de calibração mais ampla, a válvula da água da rede foi gradualmente aberta durante os diversos ensaios realizados.

O caudal mássico de água que escoava pelo medidor de caudal tipo turbina foi calculado recorrendo à seguinte equação:

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

onde $m_{\text{água}}$ é a massa de água que escoava para o recipiente e Δt o intervalo de tempo que decorreu o ensaio.

As Figuras A.1 e A.2 representam as curvas de calibração obtidas.

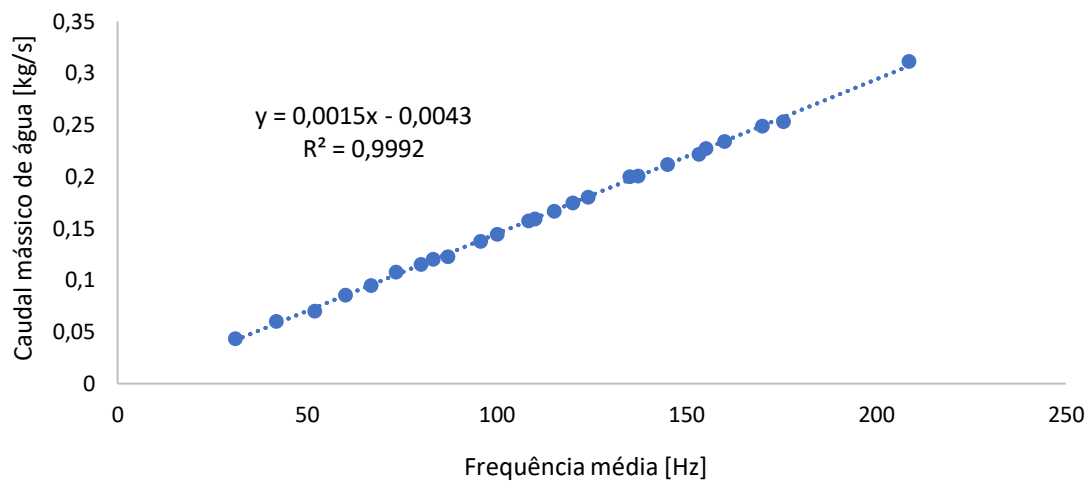


Figura A.1 – Curva de calibração do medidor de caudal tipo turbina para medição do caudal de mistura de água.

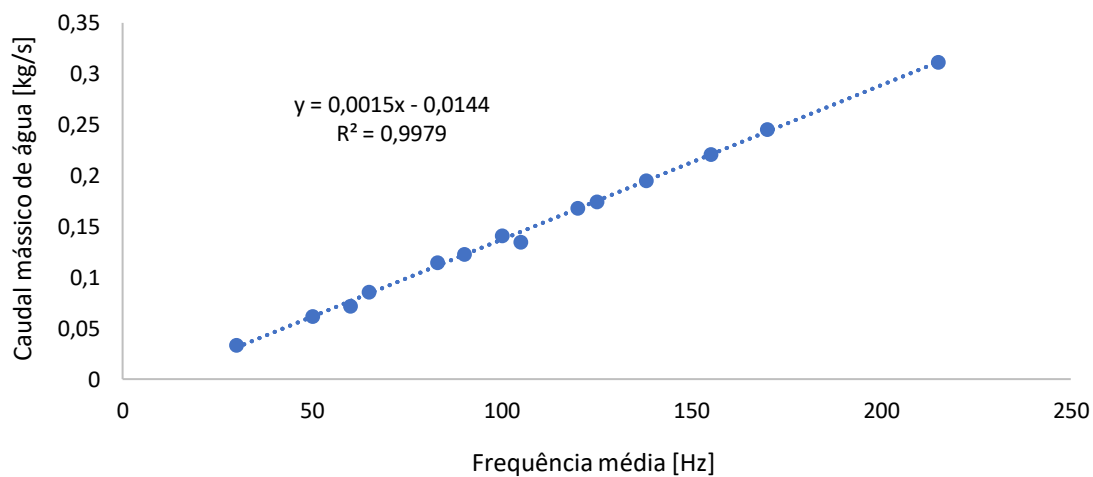


Figura A.2 - Curva de calibração do medidor de caudal tipo turbina para medição do caudal de água fria.

APÊNDICE B – TEMPERATURAS MEDIDAS NOS ENSAIOS

De modo a demonstrar a semelhança entre cada um dos ensaios para as mesmas condições de operação apresentam-se, nesta secção, as temperaturas dos gases de exaustão e da entrada e saída da água na caldeira de cada um dos ensaios realizados para a potência 3 e 5. Os resultados encontram-se ilustrados nas seguintes figuras.

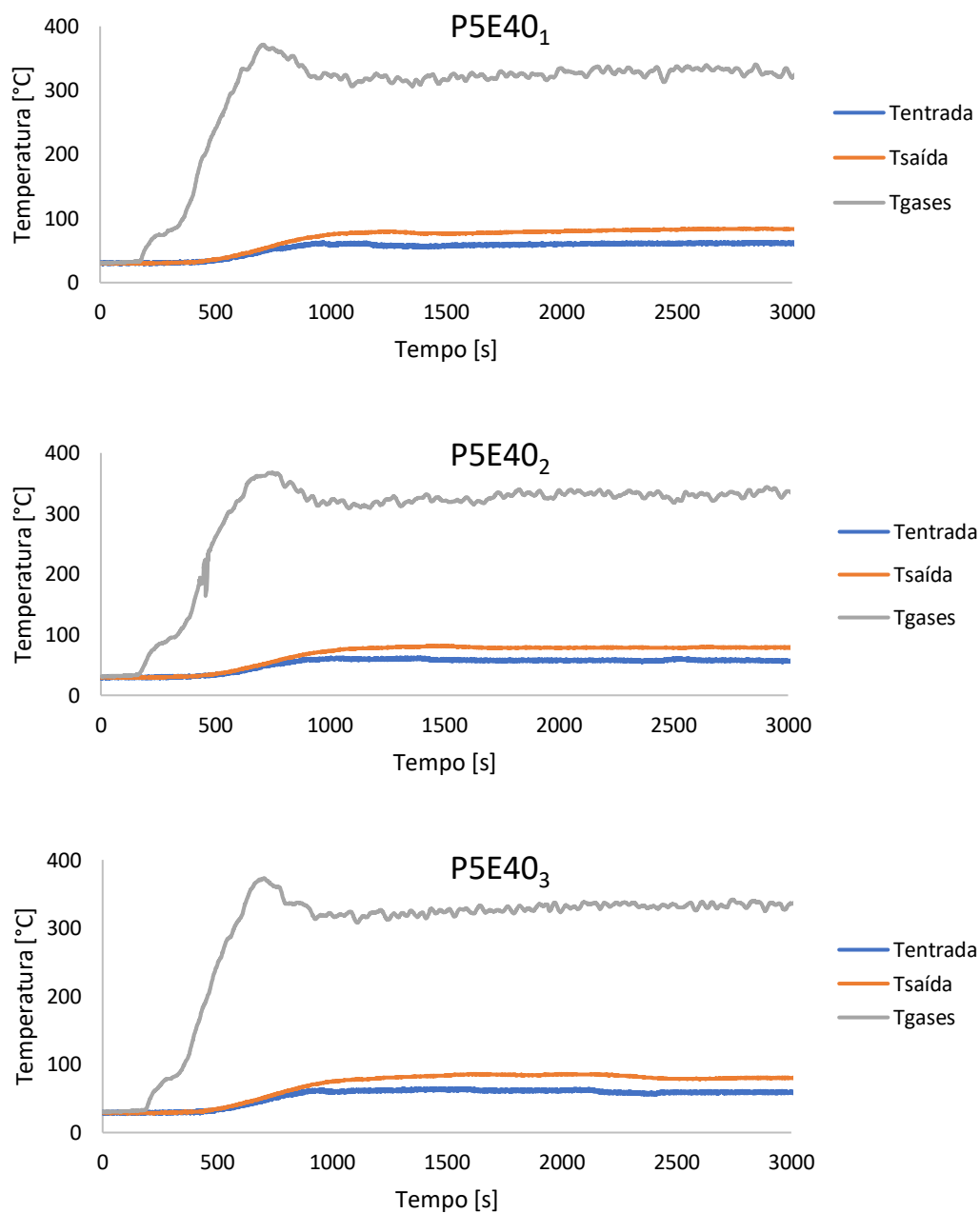


Figura B.1 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E40.

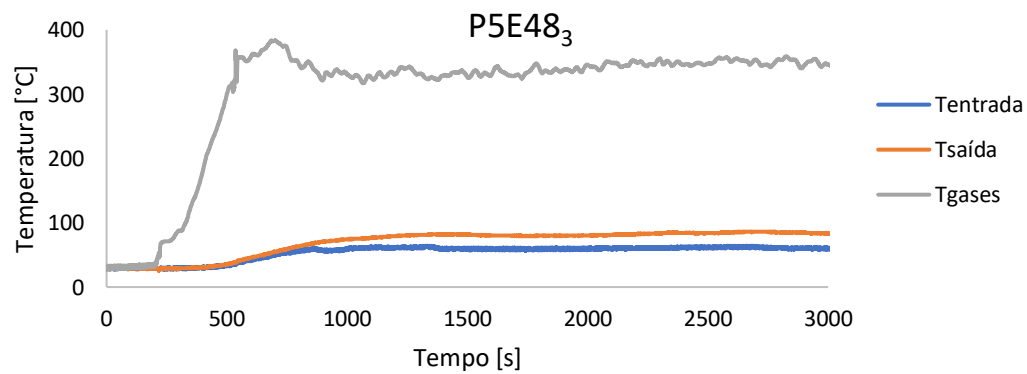
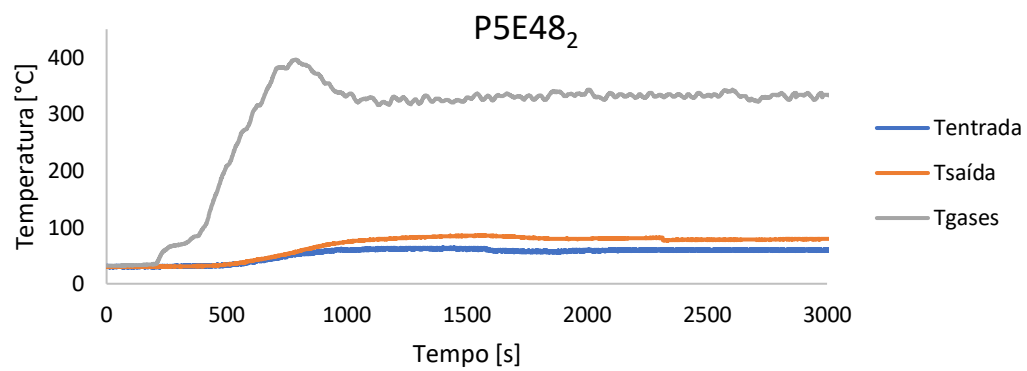
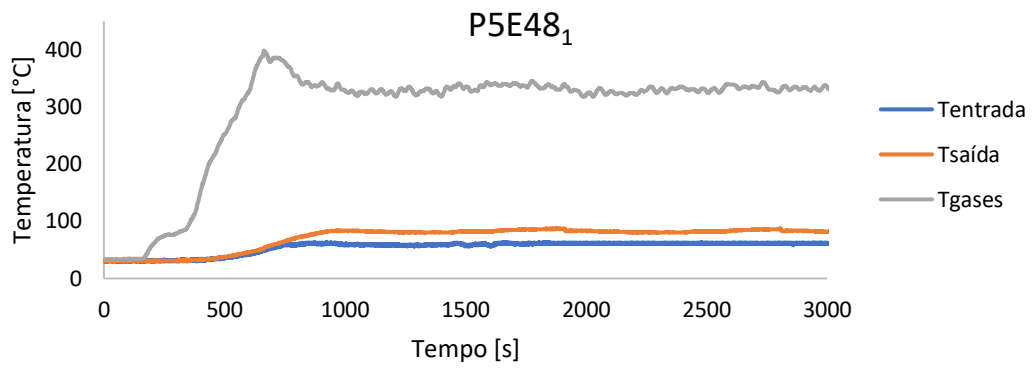


Figura B.2 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E48.

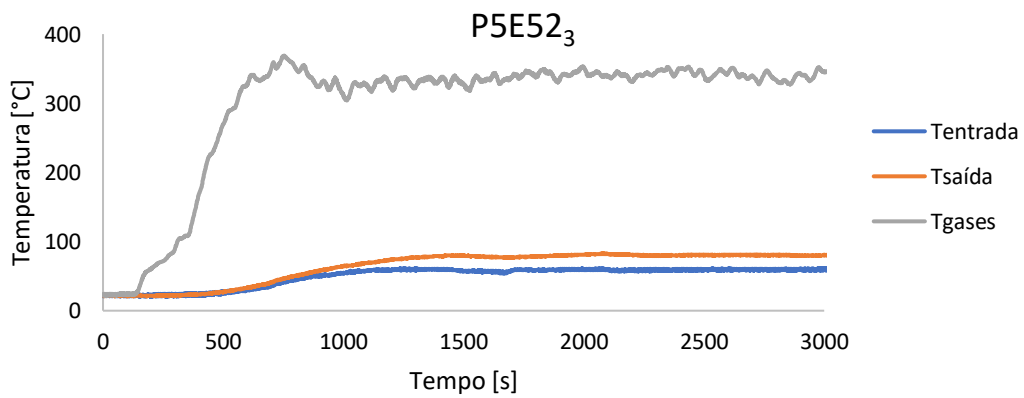
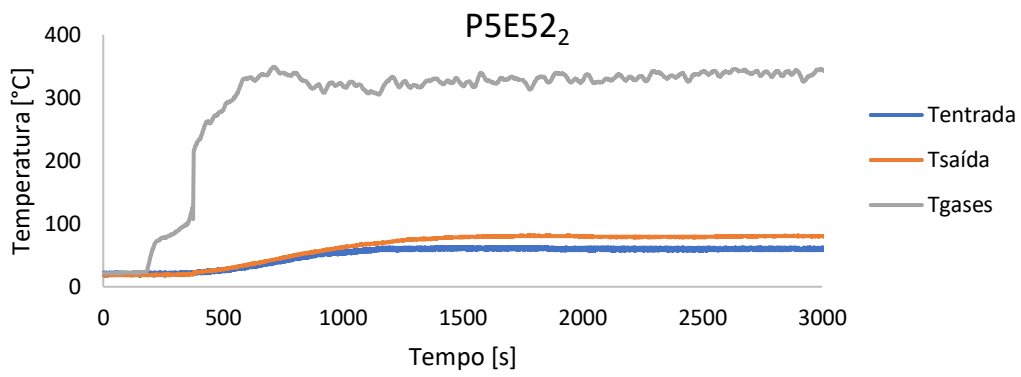
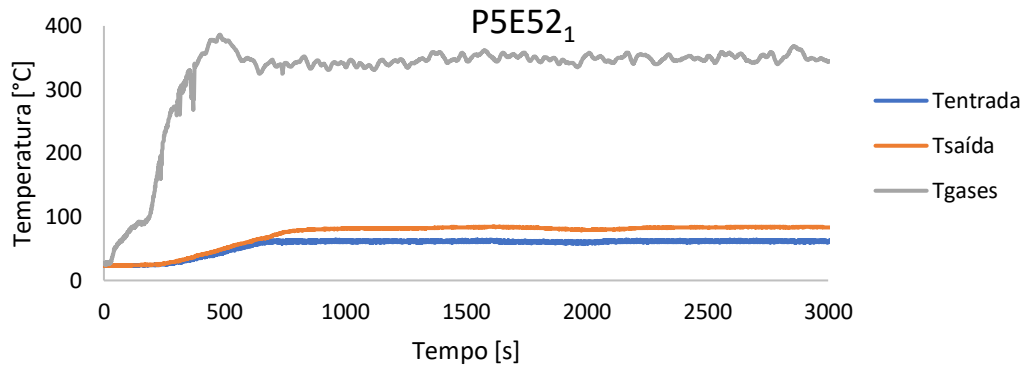


Figura B.3 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E52.

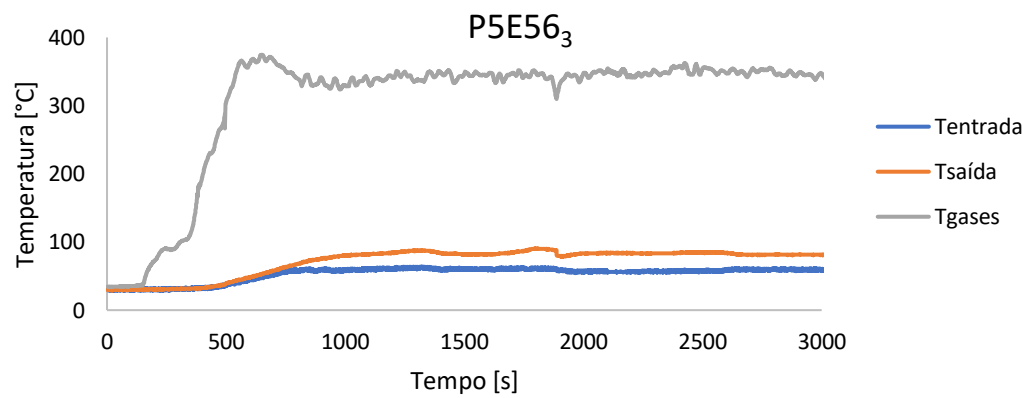
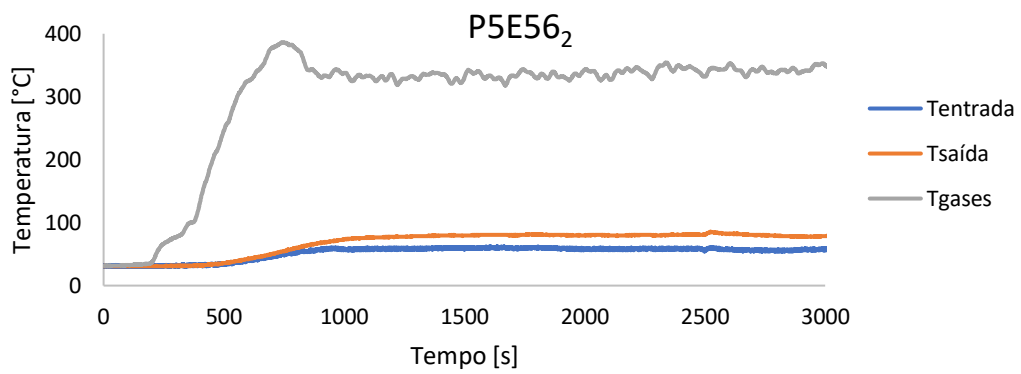
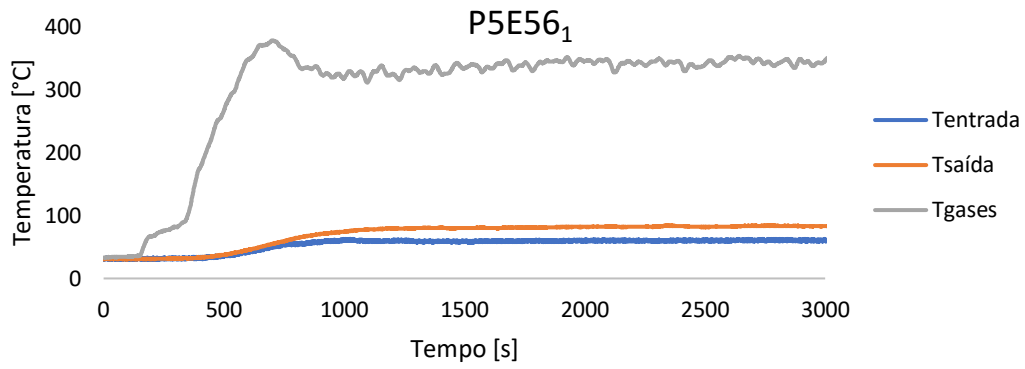


Figura B.4 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E56.

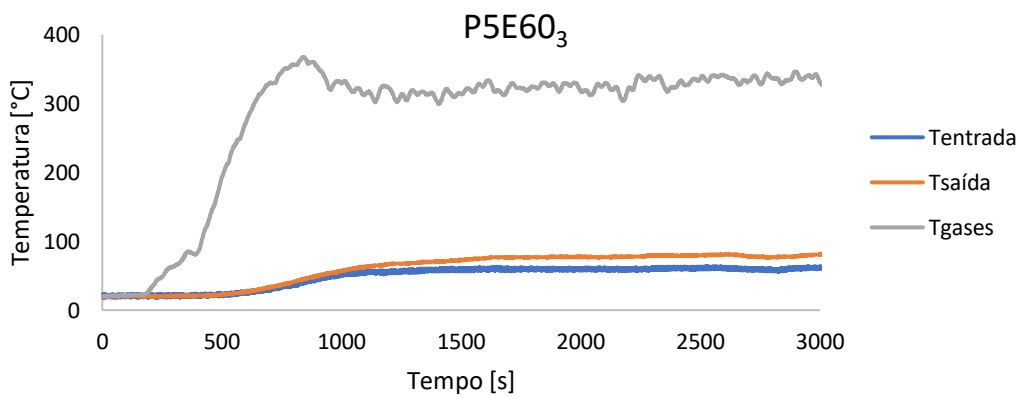
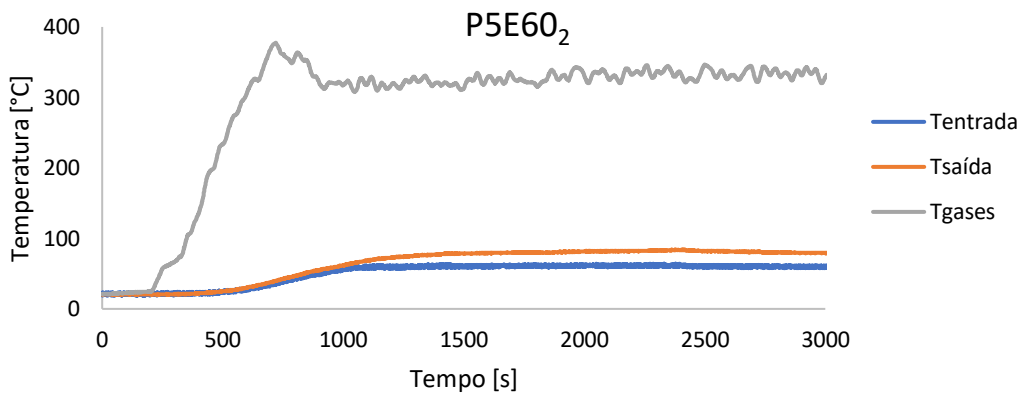
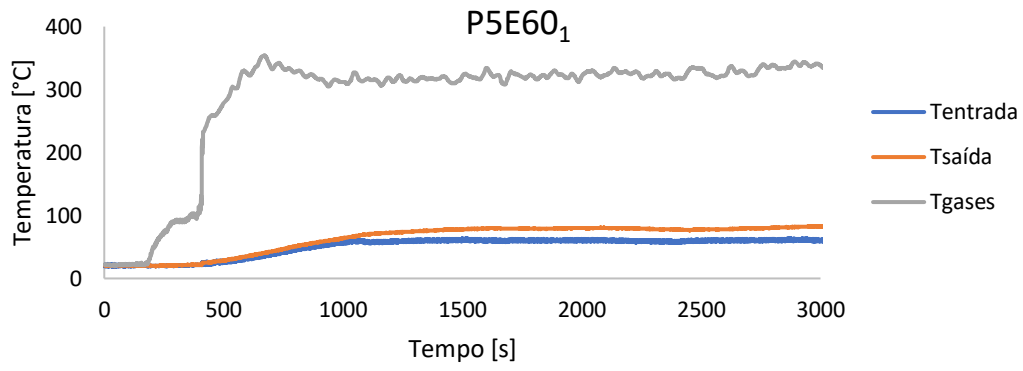


Figura B.5 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E60.

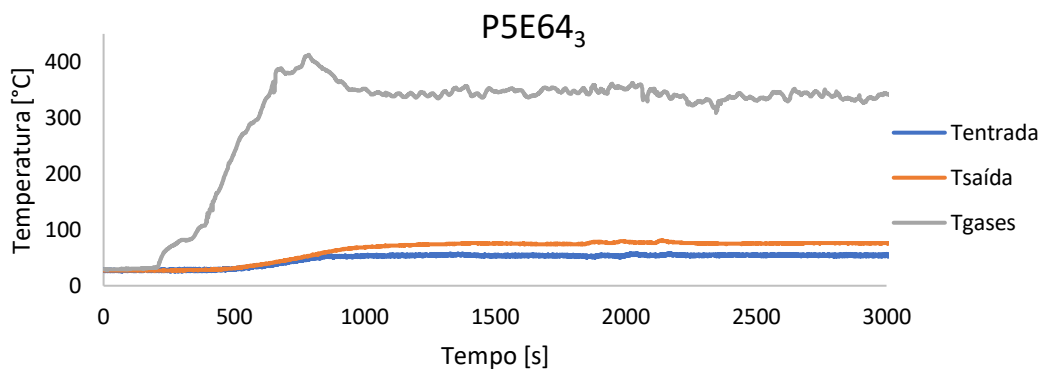
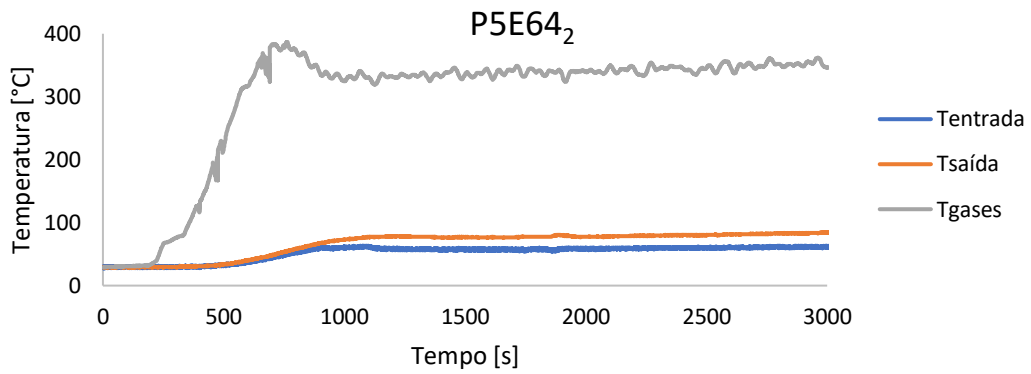
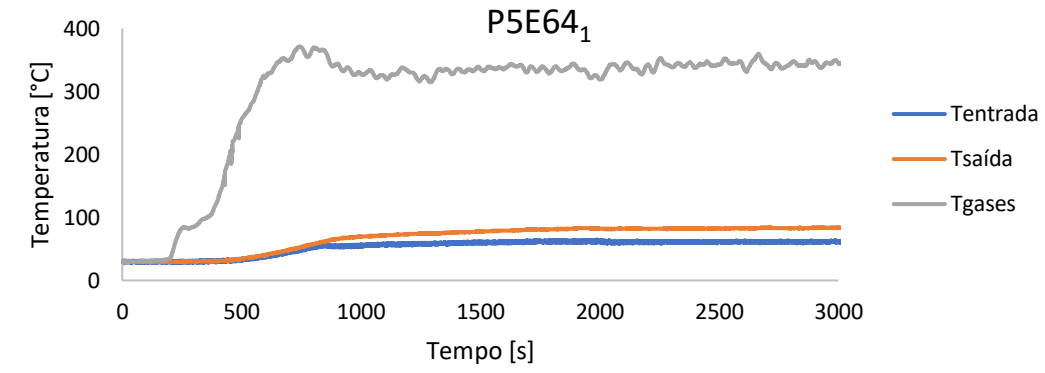


Figura B.6 - Evolução das temperaturas nos ensaios P5E64.

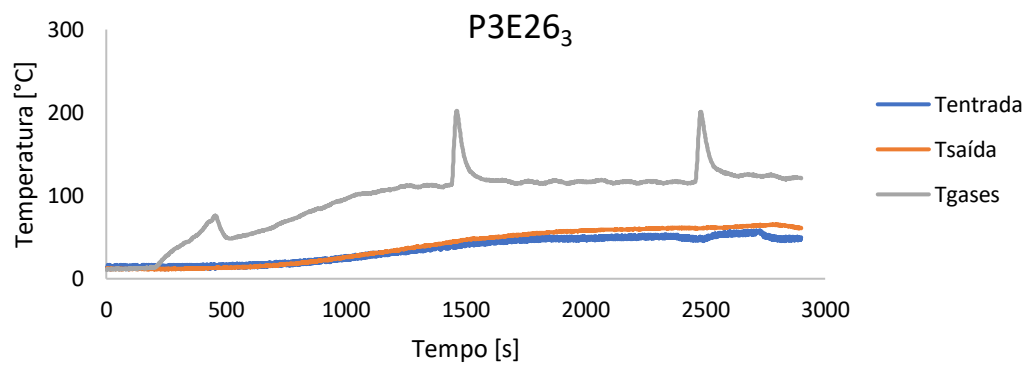
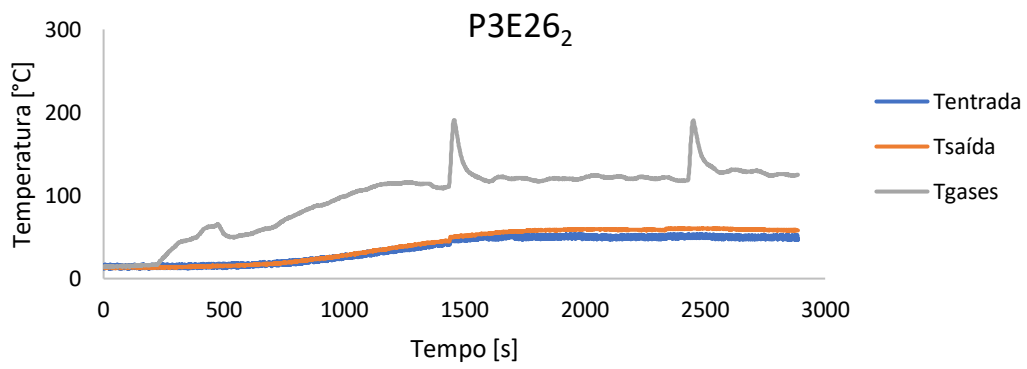
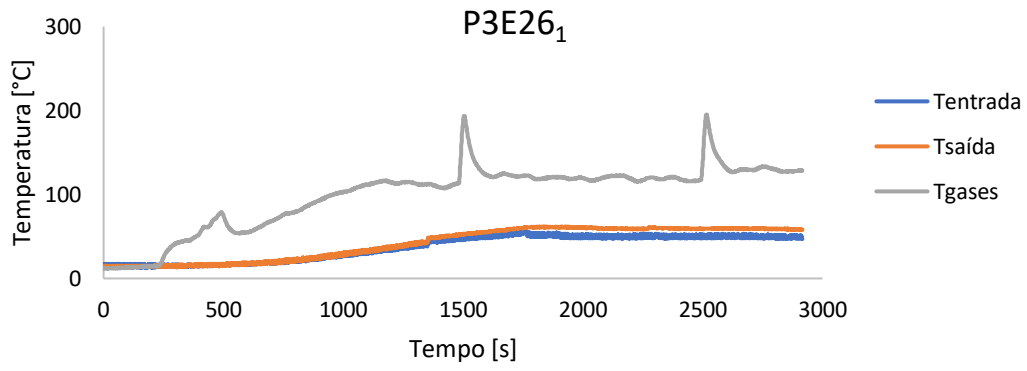


Figura B.7 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E26.

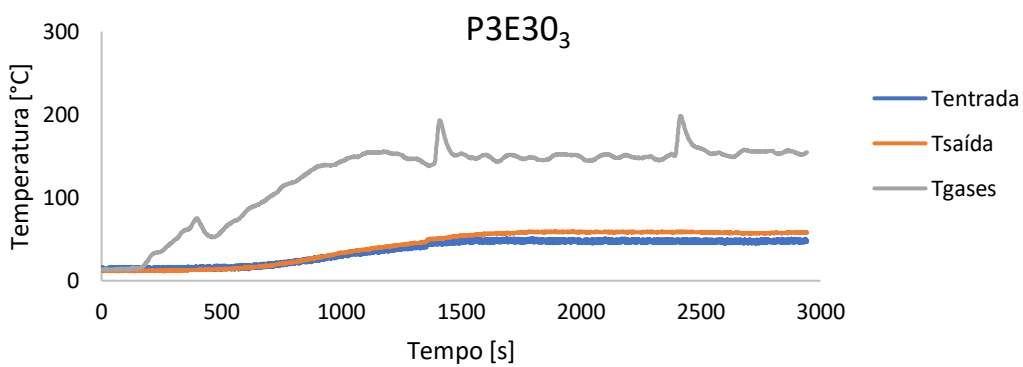
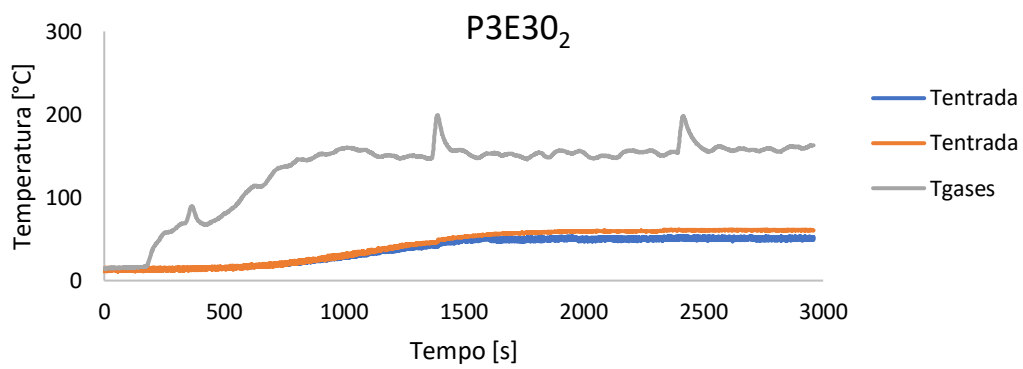
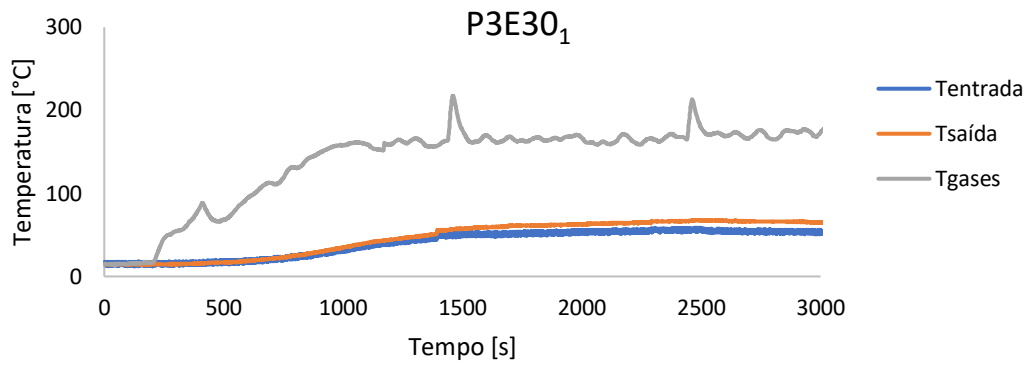


Figura B.8 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E30.

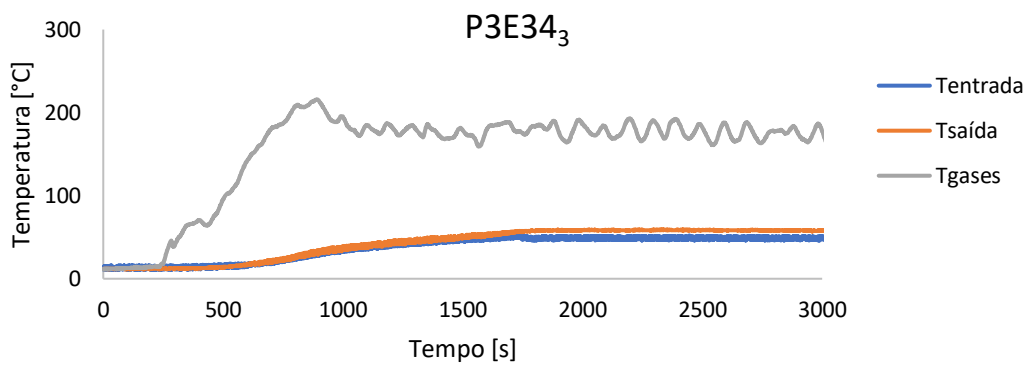
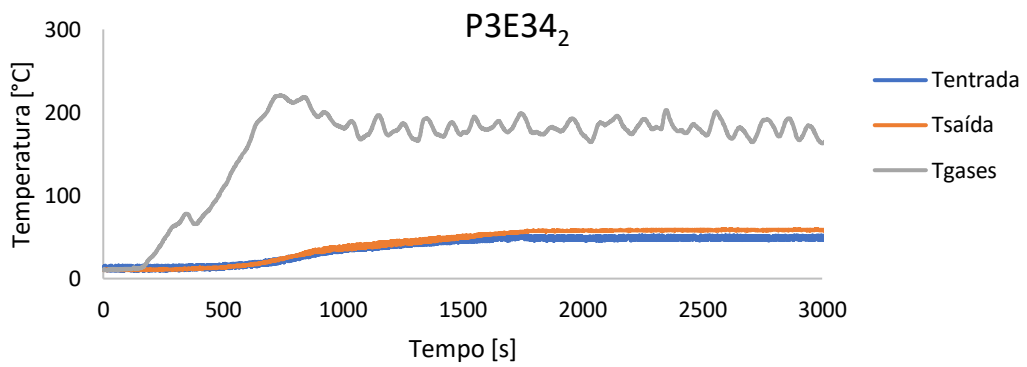
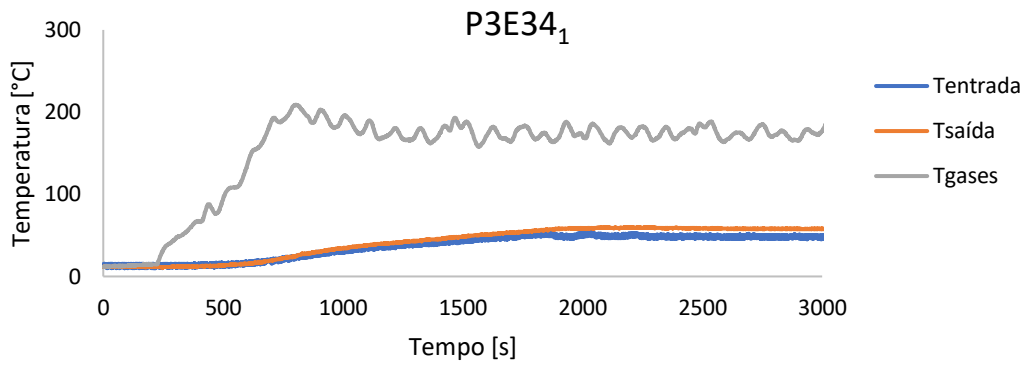


Figura B.9 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E34.

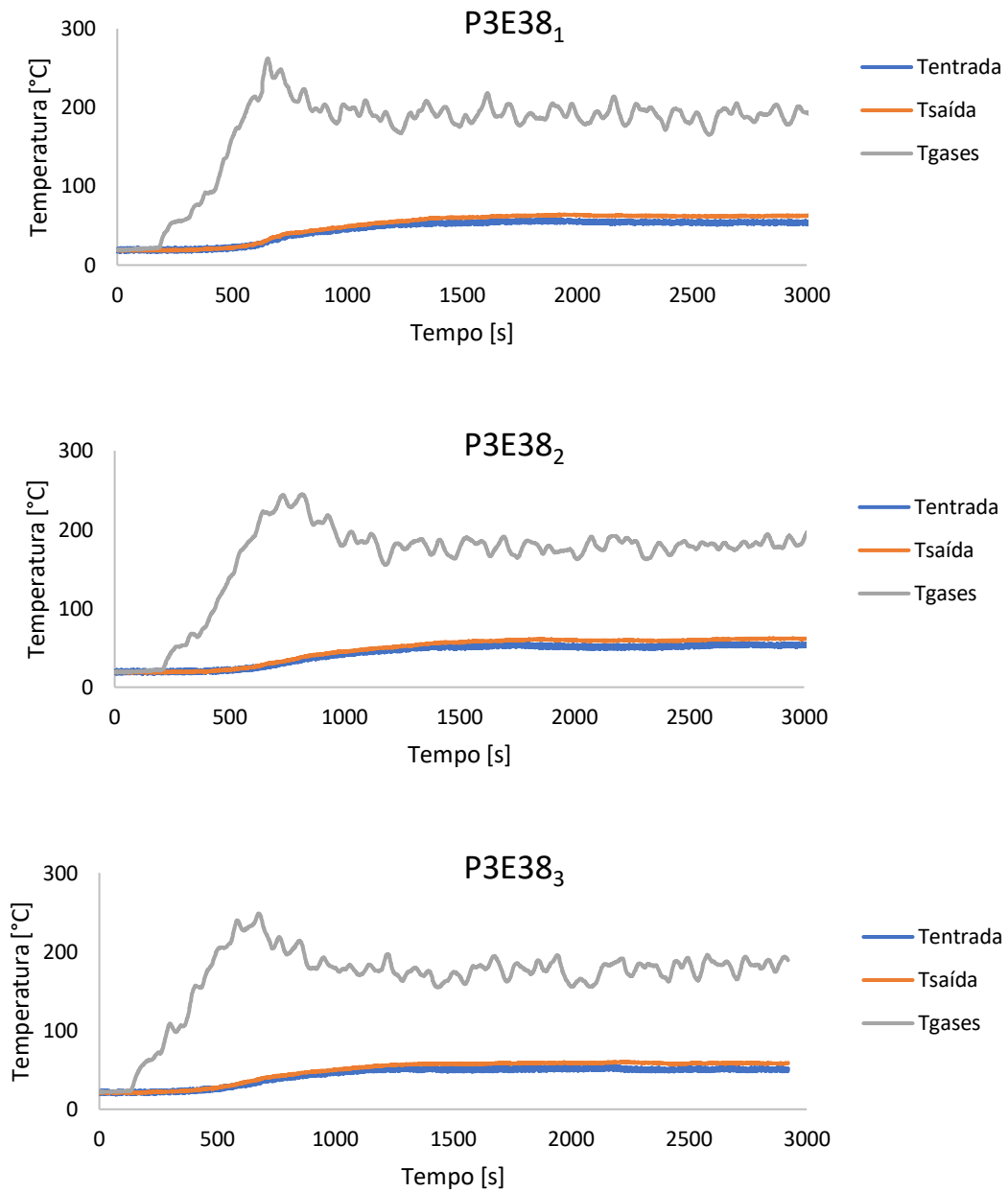


Figura B.10 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E38.

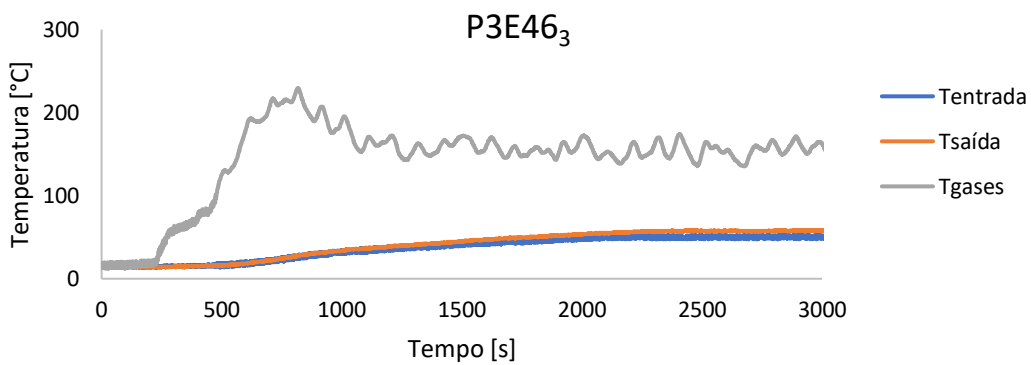
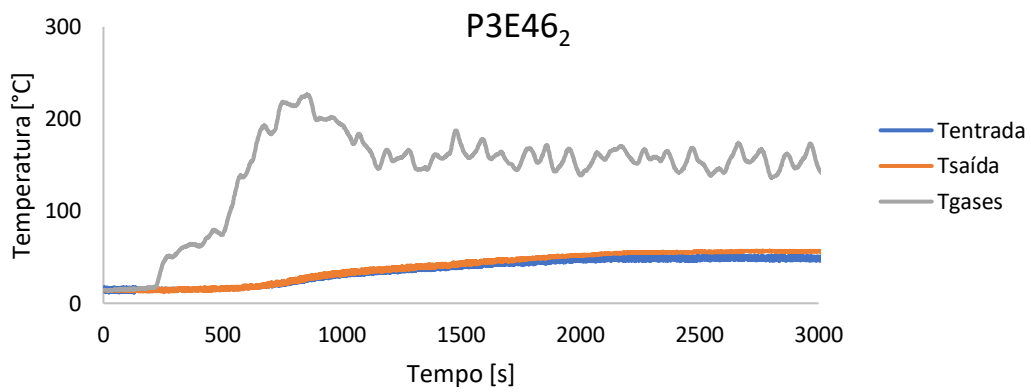
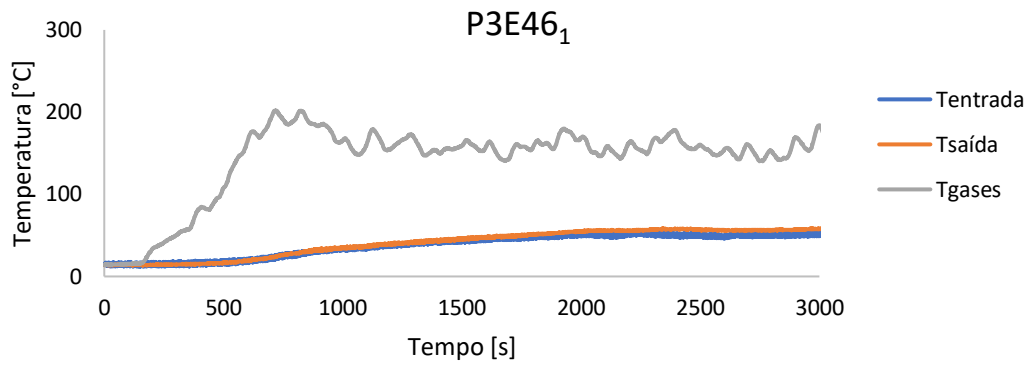


Figura B.11 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E46.

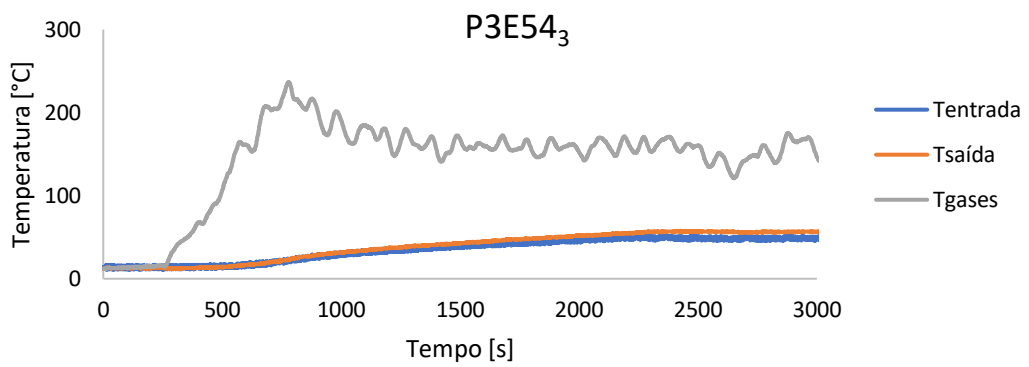
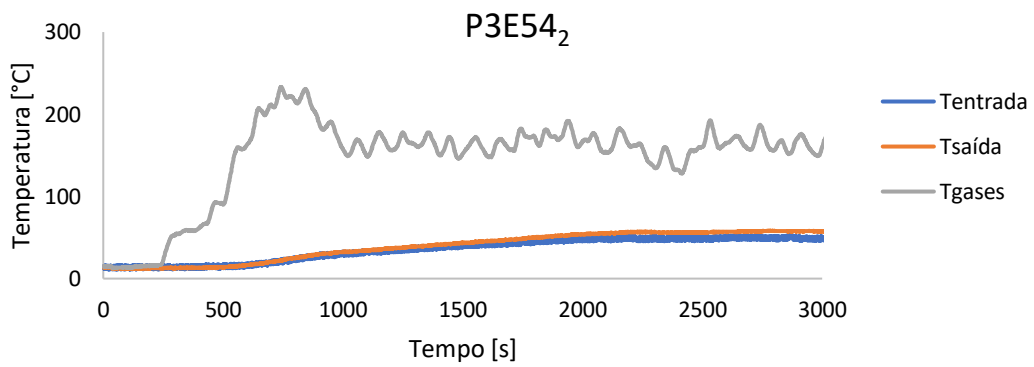
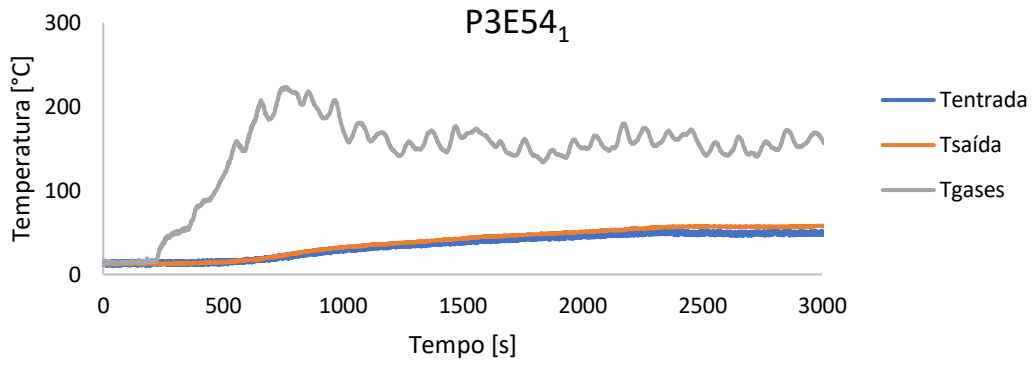


Figura B.12 - Evolução das temperaturas nos ensaios P3E54.

APÊNDICE C – ANÁLISE DAS INCERTEZAS

No presente apêndice são apresentadas as incertezas associadas às medições efetuadas, mais especificamente a concentração molar e a temperatura dos gases de exaustão, a temperatura de entrada e saída da água na caldeira, o caudal mássico de água e o caudal mássico de péletes.

A medição de variáveis tem associada uma incerteza experimental, que pode surgir tanto de fontes sistemáticas quanto aleatórias. O processo de análise de incertezas compreende diversas etapas, que incluem a identificação das fontes de incerteza e a determinação da sua contribuição por meio da estimativa das incertezas sistemáticas e aleatórias associadas a cada medida. Trata-se de um processo fundamental pois permite uma melhor interpretação dos resultados experimentais (Coleman & Steele, 2009).

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

$$U_r = \sqrt{B_r^2 + P_r^2} \quad (\text{C.1})$$

onde U_r representa a incerteza total associada à medição da variável r e B_r e P_r a incerteza sistemática e aleatória, respetivamente, relativa à variável r .

Usualmente, não é viável determinar o valor de uma grandeza exclusivamente por meio de medições diretas, mas sim através da medição de diferentes variáveis relacionadas pela equação de redução.

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

Assim, utiliza-se a equação de propagação de incertezas. A Equação C.3 diz respeito à incerteza sistemática e a Equação C.4 à incerteza aleatória.

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

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

onde B_i e P_i dizem respeito às incertezas sistemáticas e aleatórias da variável X_i , B_{ik} representa o estimador de covariância e $\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i}$.

Tabela C.1 - Resolução e exatidão dos equipamentos de medição

Gás	Resolução	Exatidão
Oxigénio (O ₂)	0,01 % (vol.)	± 0,2 % (vol.)
Monóxido de carbono (CO)	1 ppm	± 10 ppm (0 ... 99 ppm) ± 5 % da leitura (100 ... 1999 ppm) ± 10 % da leitura (no resto da gama)
Óxido de azoto (NO)	1 ppm	± 5 ppm (0 ... 99 ppm) ± 5 % da leitura (100 ... 1999 ppm) ± 10 % da leitura (no resto da gama)
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,01 % (vol.)	± 0,3 % (vol.) ± 1 % da leitura (0 ... 25 % (vol.)) ± 0,5 % (vol.) ± 1,5 % da leitura (no resto da gama)
Termopar K	0,1 °C	0,75 % da leitura
Sistema de aquisição de dados	0,1 °C	± 0,12 % da leitura ± 0,25 °C
Turbina	± 1 %	± 3 %
Balança	0,05 g	0,1 g

Incerteza associada à medição da concentração molar dos gases de exaustão

Para a determinação da incerteza associada à medição da concentração molar dos gases de exaustão foram consideradas as incertezas relativas à exatidão e resolução do analisador. Na Tabela C.1 e de acordo com o fabricante, estão representadas a resolução e a exatidão referentes à medição da concentração de cada gás em estudo.

A incerteza na medição da concentração dos gases de exaustão foi calculada para as duas potências estudadas, uma vez que estas apresentavam valores distintos de concentração. Para cada um dos gases, considerou-se que a incerteza aleatória associada à medição era igual a metade da resolução do analisador. Posto isto, na Tabela C.2 encontram-se os valores da incerteza aleatória calculados e, na Tabela C.3 encontram-se representadas as incertezas sistemáticas calculadas de acordo com a exatidão do analisador.

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

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

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

Potência	B_{O_2} (% vol.)	B_{CO} (% vol.)	B_{NO} (% vol.)	B_{CO_2} (% vol.)
3	0,2	0,00717	0,0005	0,389
5	0,2	0,00120	0,0005	0,362

Por fim, a incerteza total associada à medição da concentração de cada gás de exaustão foi calculada recorrendo à seguinte equação, sendo que, os resultados se encontram representados na Tabela C.4.

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

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

Potência	U_{O_2} (% vol.)	U_{CO} (% vol.)	U_{NO} (% vol.)	U_{CO_2} (% vol.)
3	0,2	0,00717	0,0005	0,3890
5	0,2	0,00120	0,0005	0,3620

Incerteza associada à medição das temperaturas

As temperaturas dos gases de exaustão e da temperatura de entrada e saída da água na caldeira foram medidas recorrendo a termopares do tipo K que se encontravam ligados a um sistema de aquisição de dados, ESP32. Deste modo, foi necessário considerar a incerteza relativa à medição do termopar e do sistema de aquisição de dados. Tal como exposto anteriormente, segundo o fabricante, o termopar tem uma exatidão de 0,75 % da gama de temperaturas medidas. Já o sistema de aquisição apresenta uma exatidão de $\pm 0,12\%$ da leitura $\pm 0,25\text{ }^\circ\text{C}$.

Uma vez mais, considerou-se que a incerteza aleatória, P_T , era igual a metade da resolução da leitura utilizada. As incertezas sistemáticas associadas ao termopar, B_K , e ao sistema de aquisição de dados, $B_{Sist.}$, foram calculadas de acordo com a exatidão fornecida pelo fabricante.

As Equações C.6 e C.7 representam o cálculo da incerteza sistemática total e da incerteza total associada à medição das temperaturas, respetivamente.

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

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

A Tabela C.5 representa as incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases de exaustão para as duas potências analisadas.

Tabela C.5 - Determinação das incertezas associadas à medição das temperaturas dos gases de exaustão.

Potência	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	B_K ($^\circ\text{C}$)	$B_{Sist.}$ ($^\circ\text{C}$)	P_T ($^\circ\text{C}$)	B_T ($^\circ\text{C}$)	U_T ($^\circ\text{C}$)	U_T/T (%)
3	159	1,19	0,44	0,05	1,27	1,27	0,80
5	339	2,54	0,67	0,05	2,63	2,63	0,78

As Tabelas C.6 e C.7 apresentam as incertezas na medição da temperatura da água à entrada e saída da caldeira, respetivamente.

Tabela C.6 - Incerteza associada à medição da temperatura da água à entrada da caldeira.

Potência	Temperatura (°C)	B_K (°C)	$B_{Sist.}$ (°C)	P_T (°C)	B_T (°C)	U_T (°C)	U_T/T (%)
3	50	0,38	0,31	0,05	0,49	0,49	0,98
5	60	0,45	0,32	0,05	0,55	0,55	0,92

Tabela C.7 - Incerteza associada à medição da temperatura da água à saída da caldeira.

Potência	Temperatura (°C)	B_K (°C)	$B_{Sist.}$ (°C)	P_T (°C)	B_T (°C)	U_T (°C)	U_T/T (%)
3	58	0,44	0,32	0,05	0,54	0,54	0,93
5	81	0,61	0,35	0,05	0,70	0,70	0,86

Incerteza associada à medição do caudal mássico de água

A incerteza associada à medição do caudal mássico de água foi calculada de acordo com a Equação C.8. Na Tabela C.8 são apresentadas as incertezas na medição do caudal mássico de água.

$$U_{Turbina} = \sqrt{B_{Turbina}^2 + P_{Turbina}^2} \quad (C.8)$$

Tabela C.8 - Incerteza associada à medição do caudal mássico de água.

$\dot{m}_{\text{água}}$ (l/min)	$B_{Turbina}$ (l/min)	$P_{Turbina}$ (l/min)	$U_{Turbina}$ (l/min)	$U_{Turbina}/\dot{m}_{\text{água}}$ (%)
9,25	0,2775	0,0925	0,2925	0,0316

Incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes

Para a determinação do caudal mássico de péletes foi necessário a medição da massa inicial de péletes antes de serem colocados no depósito e, após o ensaio, eram retirados do mesmo e sujeitos a nova medição da massa. Tal como referido na secção 5.2.3, o caudal mássico de péletes queimados é obtido pela razão entre a diferença de péletes consumidos e o intervalo de tempo em que ocorreu o ensaio experimental, Equação C.9.

$$\dot{m}_{péletes} = \frac{m_{péletes\ inicial} - m_{péletes\ final}}{\Delta t} \quad (C.9)$$

Segundo o fabricante, a balança utilizada na medição da massa de péletes tem uma exatidão de 0,1 g e uma reprodutividade de 0,05 g. Assim, considerou-se que a incerteza sistemática na medição da massa de péletes, B_{massa} , foi de 0,1 g. Já a incerteza aleatória na medição da massa de péletes, P_{massa} , foi de 0,05 g. Considerou-se que a exatidão na medição do tempo foi de 0,1 s em 1 hora, traduzindo-se numa incerteza sistemática associada ao tempo de 0,12 s, uma vez que a duração de cada ensaio era de 70 min.

A incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes foi calculado através da equação de propagação de incertezas:

$$B_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{massa\ inicial}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} B_{massa\ final}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} B_{tempo}\right)^2} \quad (C.10)$$

Ao substituir as derivadas e dividir ambos os lados pelo caudal mássico de água, \dot{m} , vem:

$$\frac{B_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{B_{massa\ inicial}}{m_i}\right)^2 + \left(\frac{B_{massa\ final}}{m_f}\right)^2 + \left(\frac{B_{tempo}}{t}\right)^2} \quad (C.11)$$

A incerteza aleatória associada à medição do caudal mássico de péletes foi calculado através da Equação C.12:

$$P_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} P_{massa\ inicial}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} P_{massa\ final}\right)^2} \quad (C.12)$$

Uma vez mais, ao substituir as derivadas e dividir ambos os membros pelo caudal mássico de água, \dot{m} , vem:

$$\frac{P_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{P_{massa\ inicial}}{m_i}\right)^2 + \left(\frac{P_{massa\ final}}{m_f}\right)^2} \quad (C.13)$$

Deste modo, a incerteza total associada à medição do caudal mássico de péletes foi determinada através da seguinte equação:

$$\frac{U_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{B_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2} \quad (C.14)$$

Tabela C.9 - Incerteza associada à medição do caudal mássico de péletes.

Potência	t (s)	m_i (g)	m_f (g)	$B_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%)	$P_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%)	$U_{\dot{m}}/\dot{m}$ (%)
3	4200	4000	1885	0,00652	0,00293	0,00715
5	4200	5000	880	0,01187	0,00577	0,01320

ANEXO A – ANÁLISE ELEMENTAR E IMEDIATA DOS PÉLETES

Como referido anteriormente, a análise elementar e imediata dos péletes de pinho foi realizada pelo LE.CBE – Laboratório de Ensaios do CBE. De seguida, é possível consultar a composição química dos péletes.



LE.CBE - Laboratório de Ensaios do CBE

BOLETIM DE ENSAIOS Nº 66 /23



AMOSTRA LE-CBE Nº 66 /23

Identificação do tipo de amostra:	Biocombustíveis sólidos - Peletes
Informação cedida pelo cliente:	Amostra de Peletes
Análise pedida por:	ESTGV
Endereço:	Campus Politécnico, 3504-510 Viseu
Local de amostragem:	da responsabilidade do cliente
Responsável pela recolha da amostra:	cliente
Data de recepção da amostra:	24-02-2023
Datas de início e de conclusão dos ensaios:	01-03-2023 a 07-03-2023
Data de emissão do boletim de ensaios:	09-03-2023

Reprodução parcial proibida

PARÁMETRO	RESULTADO	INCERT. (4)	UNID.	MÉTODO	OBSERVAÇÕES
Teor de humidade total t_{11} / Total moisture content $_{ar}$	7,4	±0,3	% (m/m)	ISO18134-1:2015	Gravimetria
Teor de humidade numa amostra para análise t_{11} / Moisture general analysis sample $_{ar}$	--	--	% (m/m)	ISO18134-3:2015	Gravimetria
Teor de Cinzas $_{b5}$ / Ash content $_d$	0,5	±0,1	% (m/m)	ISO18122:2015	Gravimetria
Teor de Cinzas $_{b5}$ / Ash content $_{ar}$ (1)	--	--	% (m/m)	ISO16993:2016	Cálculo
Teor de carbono total $_{b5}$ / Total carbon content $_d$	50,5	±2,4	% (m/m)	ISO16948:2015	AE de CHN
Teor de hidrogénio total $_{b5}$ / Total hydrogen content $_d$	6,2	±0,5	% (m/m)	ISO16948:2015	AE de CHN
Teor de azoto total $_{b5}$ / Total nitrogen content $_d$	0,12	±0,01	% (m/m)	ISO16948:2015	AE de CHN
Teor de oxigénio total $_{b5}$ / Total oxygen content $_d$	42,6	±2,5	% (m/m)	ISO16993:2016	Cálculo
Teor de enxofre total $_{b5}$ / Total sulphur content $_d$	0,013	±0,004	% (m/m)	ISO16994:2016 Method A	Cromat. Iónica
Teor de cloro total $_{b5}$ / Total chlorine content $_d$	0,007	±0,002	% (m/m)	ISO16994:2016 Method A	Cromat. Iónica
Poder calorífico superior, volume constante $_{b5}$ / Gross calorific value, constant volume $_d$	20,30	±0,27	MJ/kg	ISO18125:2017	calorimetria
Poder calorífico inferior :					
Poder calorífico inferior, pressão constante $_{b5}$ / Net calorific value, constant pressure $_d$	18,94	±0,30	MJ/kg	ISO18125:2017	Cálculo
Poder calorífico inferior, pressão constante $_{ar}$ / Net calorific value, constant pressure $_{ar}$	17,35	±0,28	MJ/kg		
Densidade aparente t_{11} / Bulk density $_{ar}$	--	--	kg/m ³	ISO17828:2015	Volumetria/gravimetria
Durabilidade mecânica de peletes t_{11} / Mechanical durability of pellets $_{ar}$	--	--	% (m/m)	ISO17831-1:2015	Gravimetria
Teor de finos de peletes t_{11} / Fines content of pellets $_{ar}$	--	--	% (m/m)		
Porção teste t_{11} / Test portion $_{ar}$	--	--	kg	ISO18846:2016	Gravimetria
Comprimento e diâmetro de peletes / Length and diameter of pellets :					
Classe dos peletes / Pellets Class	--	--	mm		
% de peletes na classe / Class % share	--	--	% (m/m)		
% de peletes > 40 mm / w% of pellets longer than 40 mm	--	--	% (m/m)		
Quantidade dos peletes > 40 mm / Number of pellets longer than 40 mm	--	--	unid.	ISO17829:2015	Análise dimensional
Comprimento médio dos peletes / Mean value of the pellet length	--	--	mm		
Desvio padrão do comprimento / Standard deviation of the length	--	--	mm		
Diâmetro médio dos peletes / Average diameter	--	--	mm		
Desvio padrão do diâmetro / Standard deviation of the diameter	--	--	mm		
Teor de Arsénio $_{b5}$ / Arsenic content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Chumbo $_{b5}$ / Lead content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Cádmio $_{b5}$ / Cadmium content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Crómio $_{b5}$ / Chromium content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Cobre $_{b5}$ / Copper content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Níquel $_{b5}$ / Nickel content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA câmara de grafite
Teor de Zinco $_{b5}$ / Zinc content $_d$ (1)	--	--	mg/kg	ISO16968:2015	EAA de chama

Centro da Biomassa para a Energia - Zona Industrial - 3220-119 Miranda do Corvo - tel. 239532436 - geral@centrodabiomassa.pt - neuza.alves@centrodabiomassa.pt - www.centrodabiomassa.pt

Código: Imp.7.8.01(10)

Entidade Emissora: RL/RQ

Página 1 de 2

Reprodução parcial proibida

(continuação)

PARÂMETRO	RESULTADO	UNID.	MÉTODO	OBSERVAÇÕES
Matéria volátil _{bs} / Volatile matter _d (1)		% (m/m)	ISO18123:2015	Gravimetria
Carbono fixo _{bs} / Fixed Carbon _d (1)		% (m/m)	LEBS MI 01: 15/10/2015	Cálculo
Densidade da partícula _{bs} / Particle density _d (1)		g/cm ³	ISO18847:2016	Análise dimensional
Comprimento e diâmetro de briquetes / Length and diameter of briquettes (1)		mm	LEBS MI02: 18/04/2017	Análise dimensional
Finos de briquetes / Amount of fines for briquettes (1)		% (m/m)	LEBS MI03: 18/04/2017	Gravimetria
Avaliação sensorial / Sensory evaluation (1)			LEBS MI04: 18/04/2017	
Conteúdo nominal / Nominal content (1)		unid.	LEBS MI05: 18/04/2017	
GRANULOMETRIAS / PARTICLE SIZE DISTRIBUTION				
	RESULTADO	UNID.	RESULTADO	UNID.
Granulometria peletes desintegrados / Particle size dist. disintegrated pellets (ISO 17830:2016) (1)				
Diferença entre massa da amostra e massa total das frações / / Difference mass of test portion and mass of all fractions	% (m/m)		P > 3,15 mm	% (m/m)
Humidade da amostra peneirada / Moisture content of the sieved sample	% (m/m)		3,15 mm > P > 2,8 mm	% (m/m)
			2,8 mm > P > 2,0 mm	% (m/m)
			2,0 mm > P > 1,4 mm	% (m/m)
			1,4 mm > P > 1,0 mm	% (m/m)
			1,0 mm > P > 0,5 mm	% (m/m)
			0,5 mm > P > 0,25 mm	% (m/m)
			P < 0,25 mm	% (m/m)
Granulometria / Particle size distribution (ISO 17827-1:2016) (1)				
Partículas sobredimensionadas / Hand Sorting > 100 mm				% (m/m)
Massa total analisada / total mass of test portion	g		P > 63 mm	% (m/m)
Nº de partículas sobredimensionadas / number of overlong	unid.		63 mm > P > 45 mm	% (m/m)
Comprimento da partícula maior / length of longest particle overall	mm		45 mm > P > 31,5 mm	% (m/m)
Diferença entre massa da amostra e massa total das frações / / Difference mass of test portion and mass of all fractions	% (m/m)		31,5 mm > P > 16 mm	% (m/m)
Humidade da amostra peneirada / Moisture content of the sieved sample	% (m/m)		16 mm > P > 8 mm	% (m/m)
			8 mm > P > 3,15 mm	% (m/m)
			3,15 mm > P > 1 mm	% (m/m)
			P < 1 mm	% (m/m)
Granulometria / Particle size distribution (ISO 17827-2:2016) (1)				
Massa total analisada / total mass of test portion	g		P > 3,15 mm	% (m/m)
Diferença entre massa da amostra e massa total das frações / / Difference mass of test portion and mass of all fractions	% (m/m)		3,15 mm > P > 2,8 mm	% (m/m)
Humidade da amostra peneirada / Moisture content of the sieved sample	% (m/m)		2,8 mm > P > 2,0 mm	% (m/m)
			2,0 mm > P > 1,4 mm	% (m/m)
			1,4 mm > P > 1,0 mm	% (m/m)
			1,0 mm > P > 0,5 mm	% (m/m)
			0,5 mm > P > 0,25 mm	% (m/m)
			P < 0,25 mm	% (m/m)

Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à amostra ensaiada conforme rececionada.

Os Ensaios são realizados nas instalações do LE.CBE com exceção dos assinalados com a nota (2)

tq - tal qual recebida / ar - as received; bs - base seca / d - dry basis

LQ - Limite de quantificação

(1) Ensaio não incluído no âmbito de acreditação

(2) Ensaio contratado a fornecedor externo acreditado ou não e, não está incluído no âmbito da acreditação

(3) Os resultados podem vir afetados pelas condições inadequadas em que a amostra foi rececionada

(4) Incerteza expandida (U) expressa pela incerteza-padrão da medição multiplicada pelo fator de expansão k=2 que para uma

distribuição normal corresponde a uma probabilidade de cobertura de aproximadamente 95% e não contempla a incerteza de amostragem (LE.CBE_PGQ.7.6.01)

Centro da Biomassa para a Energia - Zona Industrial - 3220-119 Miranda do Corvo - tel. 239532436 - geral@centrodabiomassa.pt - neuza.alves@centrodabiomassa.pt - www.centrodabiomassa.pt

Código: Imp.7.8.01(10)

Entidade Emissora: RL/RQ

Página 2 de 2

X Elsa Cancela
 Elsa Cancela
 Responsável Técnica

X Neuza Alves
 Neuza Alves
 Responsável do Laboratório