

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

Ana Beatriz Silva Tomás

Estudo da combustão de péletes de Mimosa numa caldeira doméstica de 20 kW

**Tese de Mestrado**

em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Professor Doutor João Luís Monney de Sá Paiva



Novembro de 2018



## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo da combustão de péletes da espécie invasora *Acacia dealbata* (Mimosa) e de péletes resultantes de três misturas diferentes de *Acacia dealbata* e de *Pinus Pinaster* (Pinho), para percentagens distintas de cada um dos elementos, numa caldeira a péletes doméstica.

As amostras da espécie *Acacia dealbata* foram recolhidas na região de Viseu e depois cortadas em dimensões menores, para que pudessem ser tratadas posteriormente. Uma estufa solar foi usada para secar a matéria-prima, até atingir um teor de humidade de, aproximadamente, 20%. Durante o processo de secagem, aquele valor foi monitorizado.

Após a secagem, as amostras de *Acacia* foram destroçadas num moinho de navalhas, *Retsch SM100*.

Foram produzidos péletes, de *Acacia dealbata* e das três misturas, com um diâmetro médio de 6,66 mm, com recurso a uma peletizadora existente no laboratório da ESTGV. O processo de peletização foi realizado com monitorização de temperatura e pressão.

O processo de combustão dos péletes foi efetuado para três cargas térmicas distintas, ‘carga 1’, ‘carga 3’ e ‘carga 5’, que corresponderam às designações do fabricante da caldeira para as potências reduzida, média e alta, respetivamente.

Os resultados obtidos, para os diferentes tipos de péletes produzidos, foram comparados com os resultados obtidos para péletes comerciais de Pinho, certificados através da norma ENplus.

Determinou-se a eficiência térmica da caldeira, foi avaliada a sua dependência com o excesso de ar e a emissão de gases de combustão ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ) resultantes da combustão para as diferentes cargas.

Com o aumento da potência térmica da caldeira, foi possível verificar um aumento do rendimento.

Relativamente às emissões de  $CO$  e de  $NO_x$ , a combustão dos péletes de *Acacia dealbata* foi a que apresentou valores mais elevados.



## ABSTRACT

The main purpose of this work was the study of combustion of invasive *Acacia dealbata* pellets, and the three mixtures of *Acacia dealbata* and *Pinus Pinaster* pellets, for different percentages of the two species, in a domestic pellets boiler.

The samples of *Acacia dealbata* species were collected in the region of Viseu, and later cut into smaller sizes, so that they could be manageable subsequently. A solar dryer was used to dry the raw material until it had a moisture content of, approximately, 20%. During the drying process, that value was monitored.

After drying, *Acacia* samples were milled in a *Retsch SM100*, knives type cutting mill.

Then, *Acacia dealbata* and the three mixtures pellets, were produced using a laboratory pelletizer, with an average diameter of 6,66 mm. The process was carried out with temperature and pressure monitoring.

The pellet combustion process was carried out for three different thermal loads, ‘load 1’, ‘load 3’ and ‘load 5’, which corresponded to the designations of the boiler manufacturer for the reduced, medium and high power, respectively.

The results obtained, for the different types of pellets produced, were compared with the results obtained for commercial *Pinus Pinaster* pellets, certified by ENplus standard.

The thermal efficiency of the boiler was determined, its dependence on excess air evaluated and the emission of combustion gases ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ) resulting from the combustion, under the referred different loads.

With the increase of the thermal power of the boiler, it was possible to verify an increase in thermal efficiency.

Concerning  $CO$  and  $NO_x$  emissions, the combustion of the pellets of *Acacia dealbata* represented the highest values.



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização desta dissertação. A todos expresso a minha profunda gratidão.

Primeiramente ao meu orientador, Professor Doutor João Luís Monney de Sá Paiva, pela ajuda, pelos conhecimentos transmitidos e por todos os conselhos e críticas construtivas dadas durante a realização deste trabalho.

Aos investigadores, Engenheira Tânia Ferreira e Engenheiro Tiago Costa, pela orientação, disponibilidade, ajuda e amizade durante este longo período de trabalho.

Ao Técnico Carlos Silva agradeço a disponibilidade e o auxílio prestado no corte da matéria-prima.

À minha família, namorado e amigos, agradeço todo o incentivo, compreensão e apoio dado em todos os momentos bons e menos bons deste período.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto SAICT-POL/23394/2016.



# Índice

Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Símbolos .....	xix
1. Introdução.....	1
1.1 Situação Energética Mundial.....	1
1.1.1 Situação Energética em Portugal.....	4
2. Biomassa.....	7
2.1 Tipos e fontes de biomassa.....	7
2.2 Características da biomassa.....	8
2.2.1 Teor de humidade .....	8
2.2.2 Poder Calorífico.....	9
2.2.3 Teor de cinzas .....	9
2.2.4 Teor de matéria volátil e carbono fixo.....	9
2.2.5 Teor de metais alcalinos .....	9
2.2.6 Razão celulose/lenhina .....	9
2.2.7 Densidade aparente.....	10
2.3 Floresta em Portugal.....	10
2.3.1 Espécies invasoras .....	10
2.3.1.1 <i>Acacia dealbata</i> .....	10
2.3.1.1.1 Breve análise histórica da introdução da <i>Acacia</i> em Portugal.....	11
2.4 Péletes.....	12
2.4.1 Processo de peletização .....	13
2.4.1.1 Secagem .....	13
2.4.1.2 Destroçamento.....	13
2.4.1.3 Acondicionamento .....	13
2.4.1.4 Peletização.....	14
2.4.1.5 Arrefecimento.....	15
2.4.1.6 Remoção dos finos .....	15
2.4.2 Mercado dos péletes .....	15
2.4.3 Caldeiras a péletes .....	16

3.	Combustão de biomassa.....	19
3.1	Ignição.....	19
3.2	Secagem .....	20
3.3	Pirólise .....	20
3.4	Combustão do resíduo carbonoso .....	20
3.5	Poluentes .....	20
4.	Instalação experimental.....	21
4.1	Descrição da instalação experimental .....	21
4.2	Caldeira .....	22
4.3	Procedimento experimental.....	24
4.3.1	Medição do consumo de péletes .....	24
4.3.2	Medição das temperaturas.....	24
4.3.3	Medição do caudal mássico de água .....	24
4.3.4	Medição da composição dos gases de combustão .....	24
5.	Pré-tratamento da espécie <i>Acacia dealbata</i> .....	27
5.1	Recolha da matéria-prima .....	27
5.2	Secagem .....	27
5.2.1	Primeiro ciclo de secagem .....	30
5.2.2	Segundo ciclo de secagem .....	33
5.3	Destroçamento .....	36
5.4	Caracterização da matéria-prima .....	36
5.4.1	Teor de humidade.....	36
5.4.2	Análise granulométrica .....	37
6.	Peletização .....	45
6.1	Testes de qualidade efetuados aos péletes .....	46
6.1.1	Teor de humidade.....	46
6.1.2	Dimensões.....	48
6.1.3	Massa volúmica.....	49
6.1.4	Teor de finos .....	50
6.1.5	Durabilidade mecânica.....	50
6.1.6	Massa volúmica aparente .....	52
7.	Resultados e discussão .....	53

7.1	Procedimento de cálculo.....	53
7.2	Ensaio Experimentais.....	55
7.2.1	Fase de arranque .....	56
7.2.2	Regime permanente .....	58
7.2.3	Influência da potência térmica nas emissões.....	60
7.2.4	Influência da concentração de oxigénio nas emissões.....	62
7.2.5	Influência do tipo de péletes e do caudal mássico.....	65
7.2.6	Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> nas variáveis estudadas.....	66
7.2.7	Perdas térmicas da caldeira .....	70
8.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	75
9.	Referências .....	79
	APÊNDICES .....	i
	Apêndice A – Distribuição de Partículas.....	i
	Apêndice B – Resultados obtidos para os ensaios realizados .....	vi



## Lista de Figuras

Figura 1.1- Procura de energia por região – Adaptado de Thorium Energy World, 2016. ....	2
Figura 1.2- Consumo de energia mundial entre 1990 e 2040 – Adaptado de EIA, 2017. ....	2
Figura 1.3- Consumo de energia mundial dos diferentes combustíveis – Adaptado de EIA, 2007. .....	3
Figura 1.4- Procura de energia primária por combustível no cenário Novas Políticas - Adaptado de IEA, 2015. ....	4
Figura 1.5- Taxa de Dependência Energética (DGEG, 2016). ....	5
Figura 1.6- Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal entre 2012 e 2016 (DGEG, 2016). ....	5
Figura 1.7- Produção de energia em Portugal (IEA, 2016). ....	6
Figura 2.1- Representação do ciclo de biomassa – Adaptado de Gásmaia, 2008. ....	7
Figura 2.2- Composição da biomassa – Adaptado de Quaak, et al., 1999. ....	8
Figura 2.3- Características da <i>Acacia</i> que promovem o seu potencial invasor (Marchante, et al., 1999). ....	11
Figura 2.4- Distribuição de <i>Acacia dealbata</i> em Portugal (Invasoras, 2014). ....	12
Figura 2.5- Biocombustível – Péletes (energenium, 2005). ....	12
Figura 2.6- Matriz de peletizadora tipo "anel" (Pinto, 2015). ....	14
Figura 2.7- Matriz de peletizadora tipo "plana" – Adaptado de Gemco Energy, 2014. ....	15
Figura 2.8- Modo de funcionamento de uma caldeira a péletes - Adaptado de Energia Biomassa, 2009. ....	17
Figura 3.1- Processo de combustão da biomassa – Adaptado de Quaak, et al., 1999. ....	19
Figura 4.1- Instalação experimental - Adaptado de Ferreira, 2013. ....	21
Figura 4.2- Caldeira utilizada no trabalho experimental. ....	22
Figura 4.3- Princípio de funcionamento da caldeira doméstica – Adaptado de Gómez, et al., 2012. ....	23
Figura 5.1- Local de recolha da espécie <i>Acacia dealbata</i> . ....	27
Figura 5.2- Estufa solar da ESTGV. ....	28
Figura 5.3- a) Estufa laboratorial, b) balança digital e c) exsiccador. ....	29
Figura 5.4- Secagem da <i>Acacia dealbata</i> em estufa solar. ....	30
Figura 5.5- Temperaturas registadas durante o período de secagem (1º ciclo de secagem). ...	31
Figura 5.6- Humidades registadas durante o período de secagem (1º ciclo de secagem). ....	32
Figura 5.7- Irradiação registada durante o período de secagem (1º ciclo de secagem). ....	32
Figura 5.8- Sobreposição dos gráficos das temperaturas e da radiação (1º ciclo de secagem). ...	33
Figura 5.9- Temperaturas registadas durante o período de secagem (2º ciclo de secagem). ...	34
Figura 5.10- Humidades registadas durante o período de secagem (2º ciclo de secagem). ....	35
Figura 5.11- Irradiação registada durante o período de secagem (2º ciclo de secagem). ....	35
Figura 5.12- Moinho de navalhas laboratorial. ....	36
Figura 5.13 – Agitador de peneiros <i>Retsch</i> . ....	38
Figura 5.14- Distribuição granulométrica da amostra 1 de <i>Acacia dealbata</i> . ....	39

Figura 5.15- Distribuição granulométrica da amostra 1 de <i>Pinus Pinaster</i> .....	40
Figura 5.16- Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura ‘25% <i>Acacia dealbata</i> /75% <i>Pinus Pinaster</i> ’.....	41
Figura 5.17- Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura ‘50% <i>Acacia dealbata</i> /50% <i>Pinus Pinaster</i> ’.....	42
Figura 5.18- Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura ‘75% <i>Acacia dealbata</i> /25% <i>Pinus Pinaster</i> ’.....	43
Figura 6.1- Peletizadora utilizada no trabalho experimental. ....	45
Figura 6.2- Amostra de péletes produzidos. ....	46
Figura 6.3- Processo de secagem dos péletes em estufa laboratorial.....	47
Figura 6.4- Teor de humidade dos péletes estudados. ....	47
Figura 6.5- Diâmetro médio dos péletes e correspondente desvio padrão.....	48
Figura 6.6- Comprimento médio dos péletes e correspondente desvio padrão. ....	48
Figura 6.7- Massa volúmica média dos péletes e correspondente desvio padrão.....	49
Figura 6.8- Teor de finos dos péletes e correspondente desvio padrão. ....	50
Figura 6.9- Durabilidade mecânica dos péletes e correspondente desvio padrão.....	51
Figura 6.10- Massa volúmica aparente dos péletes e correspondente desvio padrão. ....	52
Figura 7.1- Temperaturas dos gases de combustão para as três cargas durante a fase de arranque da caldeira. ....	57
Figura 7.2- Emissões de NO <sub>x</sub> para os diferentes tipos de péletes. ....	60
Figura 7.3- Emissões de CO para os diferentes tipos de péletes.....	61
Figura 7.4- Emissões de CO <sub>2</sub> para os diferentes tipos de péletes. ....	62
Figura 7.5- Emissões de CO em função da concentração de O <sub>2</sub> .....	63
Figura 7.6- Emissões de NO <sub>x</sub> em função da concentração de O <sub>2</sub> .....	64
Figura 7.7- Emissões de CO <sub>2</sub> em função da concentração de O <sub>2</sub> . ....	65
Figura 7.8- Rendimento térmico em função do tipo de péletes e do seu caudal mássico.....	66
Figura 7.9- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> na potência térmica da caldeira..	67
Figura 7.10- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> na potência transferida para a água. ....	67
Figura 7.11- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> nas temperaturas dos gases de combustão. ....	68
Figura 7.12- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> no rendimento da caldeira. ....	68
Figura 7.13- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> nas emissões de CO. ....	69
Figura 7.14- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> nas emissões de NO <sub>x</sub> . ....	69
Figura 7.15- Influência da percentagem de <i>Acacia dealbata</i> nas emissões de CO <sub>2</sub> . ....	70
Figura A.1- Distribuição da matéria-prima da espécie <i>Acacia dealbata</i> .....	i
Figura A.2- Distribuição da matéria-prima da espécie <i>Pinus Pinaster</i> .....	ii
Figura A.3-Distribuição da matéria-prima da mistura ‘25% <i>Acacia dealbata</i> /75% <i>Pinus Pinaster</i> ’.....	iii
Figura A.4-Distribuição da matéria-prima da mistura ‘50% <i>Acacia dealbata</i> /50% <i>Pinus Pinaster</i> ’.....	iv

Figura A.5-Distribuição da matéria-prima da mistura ‘75% <i>Acacia dealbata</i> /25% <i>Pinus Pinaster</i> ’ .....	v
Figura B.1- Emissões de CO em função da concentração de O <sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.....	vi
Figura B.2- Emissões de NO <sub>x</sub> em função da concentração de O <sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.....	vii
Figura B.3- Emissões de CO <sub>2</sub> em função da concentração de O <sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.....	vii
Figura B.4- Rendimento térmico em função do tipo de péletes e do seu caudal mássico para todos os ensaios realizados.....	viii



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Valores de referência das propriedades dos péletes, de acordo com a norma ENplus (EPC, 2015). .....	16
Tabela 5.1- Teor de humidade inicial e final da <i>Acacia dealbata</i> durante o 1º ciclo de secagem. ....	31
Tabela 5.2- Teor de humidade inicial e final da <i>Acacia dealbata</i> durante o 2º ciclo de secagem. ....	34
Tabela 5.3- Teor de humidade da <i>Acacia dealbata</i> antes da peletização. ....	37
Tabela 5.4- Teor de humidade da matéria-prima antes da peletização. ....	37
Tabela 7.1- Ensaio realizados aos diferentes tipos de péletes em estudo. ....	55
Tabela 7.2- Resultados obtidos em regime permanente. ....	58
Tabela 7.3- Análise das perdas térmicas para as três cargas estudadas. ....	71
Tabela 7.4- Análise das perdas por humidade para as três cargas estudadas. ....	72



## Lista de Símbolos

$\bar{c}_p$	Calor específico do produto à temperatura média, kJ/(kg-K)
$\bar{c}_{H_2O}$	Calor específico da água à temperatura média, kJ/(kg-K)
$D$	Diâmetro de um pélete, m
$d_p$	Diâmetro de uma partícula, m
$d_{pi}$	Média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros consecutivos, m
$h$	Comprimento de um pélete, m
$h_{lv}$	Entalpia latente de vaporização da água, kJ/kg
$H_{bh}$	Teor de humidade na base húmida, %
$H_{bs}$	Teor de humidade na base seca, %
$m_{inicial}$	Massa inicial da amostra, kg
$m_{final}$	Massa final da amostra, kg
$m_{finos}$	Massa de finos, kg
$m_{pélete}$	Massa de um pélete, kg
$m_{péletes\ inicial}$	Massa de péletes inicial, kg
$m_{péletes\ final}$	Massa de péletes final, kg
$\dot{m}_{água}$	Caudal mássico de água, kg/s
$\dot{m}_{CO}$	Caudal mássico de CO, kg/s
$\dot{m}_{péletes}$	Caudal mássico de péletes, kg/s
$M$	Massa molecular, kg/kmol
$n$	Número de kmol do produto por kg de combustível, kmol/kg
$O_{2\ medido}$	Concentração de oxigénio medido, %
$O_{2\ ref}$	Fator de correção, %
$PCI_{CO}$	Poder calorífico inferior do monóxido de carbono, kJ/kg
$PCI_{péletes}$	Poder calorífico inferior dos péletes, kJ/kg
$[P]_{corrigido}$	Concentração de um poluente corrigido a um fator de correção, ppm ou %
$[P]_{medido}$	Concentração de um poluente medido, ppm ou %
$\dot{Q}_{chaminé}$	Perdas por chaminé, kW
$\dot{Q}_{CO}$	Perdas térmicas associadas aos gases não-queimados, kW
$\dot{Q}_{conv+rad}$	Perdas por convecção e radiação, kW
$\dot{Q}_{fornecida}$	Potência térmica libertada durante a combustão dos péletes, kW
$\dot{Q}_{gases}$	Perdas associadas à corrente dos gases de combustão, kW
$\dot{Q}_{humidade}$	Perdas associadas à humidade dos péletes, kW
$\dot{Q}_{transf.\ água}$	Potência térmica transferida para a água durante o ensaio, kW
$T_{água\ entrada}$	Temperatura da água à entrada da caldeira, ° C
$T_{água\ saída}$	Temperatura da água à saída da caldeira, ° C

$T_{amb}$	Temperatura do ar ambiente, ° C
$T_{gases}$	Temperatura dos gases de combustão, ° C
$V_{pélete}$	Volume de um pélete, m <sup>3</sup>
$x_i$	Fração mássica das partículas do material retido no intervalo de tempo i, -

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Volume na base seca de CO <sub>2</sub> , %
$\Omega$	Volume na base seca de O <sub>2</sub> , %
$\Delta m_{péletes}$	Variação de massa de péletes, kg
$\Delta t$	Intervalo de tempo, s
$\eta_{térmico}$	Rendimento térmico, %
$\rho_{pélete}$	Massa volúmica de um pélete, kg/m <sup>3</sup>

### Abreviaturas

BD	Bulk density
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EPC	European Pellet Council
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
GFW	Global Forest Watch
IEA	International Energy Agency
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PCI	Poder calorífico inferior

## 1. Introdução

Desde sempre, o homem utilizou as diferentes fontes de energia de acordo com as suas necessidades (Cerqueira, et al., 2010).

Antes da revolução industrial, a densidade populacional era reduzida, sendo que para a produção de energia era necessário recorrer ao poder humano ou animal. Após a revolução, e com o aparecimento dos motores térmicos, a produção de energia tornou-se mais fácil (Fakhri, et al., 2015). Com o incremento da população, com a melhoria da qualidade de vida e com a industrialização, o crescimento da procura e do consumo de energia foi bastante significativo (Lee, et al., 2007).

As fontes de energia podem ser divididas em renováveis e não renováveis. As fontes de energia predominantes são as de origem fóssil, que representam cerca de 83% do consumo total de energia do homem (Fakhri, et al., 2015). Estas fontes possuem elevadas emissões de poluentes, sendo que a prioridade da população na atualidade passa por procurar diminuir as emissões de carbono em cerca de 80%, substituindo a sua utilização por fontes de energia renovável (Saidur, et al., 2011).

As fontes de energia renovável são consideradas energias “limpas”, sendo que se renovam constantemente; entre estas fontes é de salientar a importância da biomassa, um recurso neutro em carbono. A limpeza das florestas e a utilização da biomassa existente em excesso nestas para produção de energia, permite uma redução da probabilidade de ocorrência de incêndios (Magalhães, 2006).

A obtenção de péletes, um combustível sólido e biológico, é possível através da compactação da biomassa (Dias, et al., 2012).

Este trabalho encontra-se dividido em oito capítulos. Teve como objetivo o estudo da influência da utilização de péletes de uma espécie invasora, *Acacia dealbata*, e de péletes resultantes das misturas de *Acacia dealbata* e *Pinus Pinaster*, no rendimento térmico de uma caldeira doméstica.

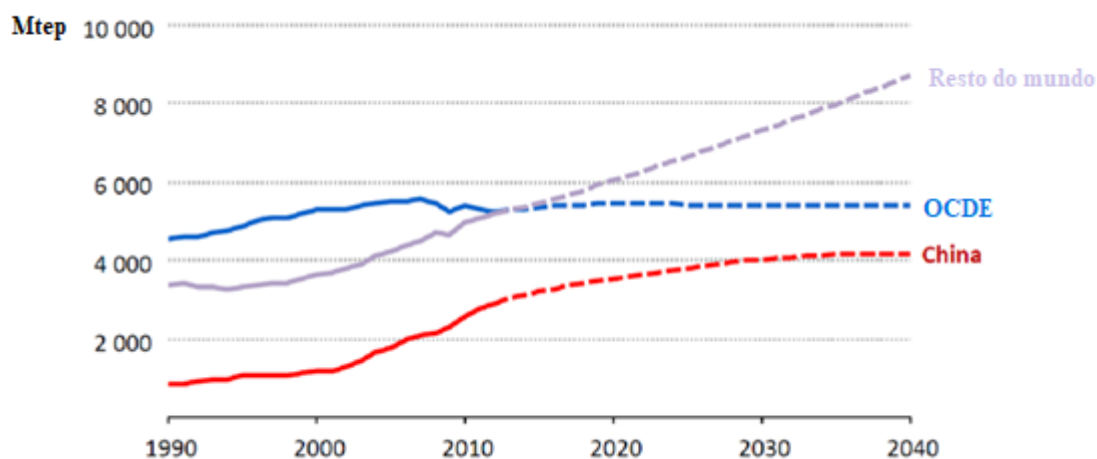
### 1.1 Situação Energética Mundial

No século passado, com o aumento da população mundial, o consumo de energia sofreu um aumento constante (Cheng, 2010).

O objetivo dos países em desenvolvimento passa por melhorar a qualidade de vida da sua população, sendo para isso necessário proporcionar um crescimento económico e

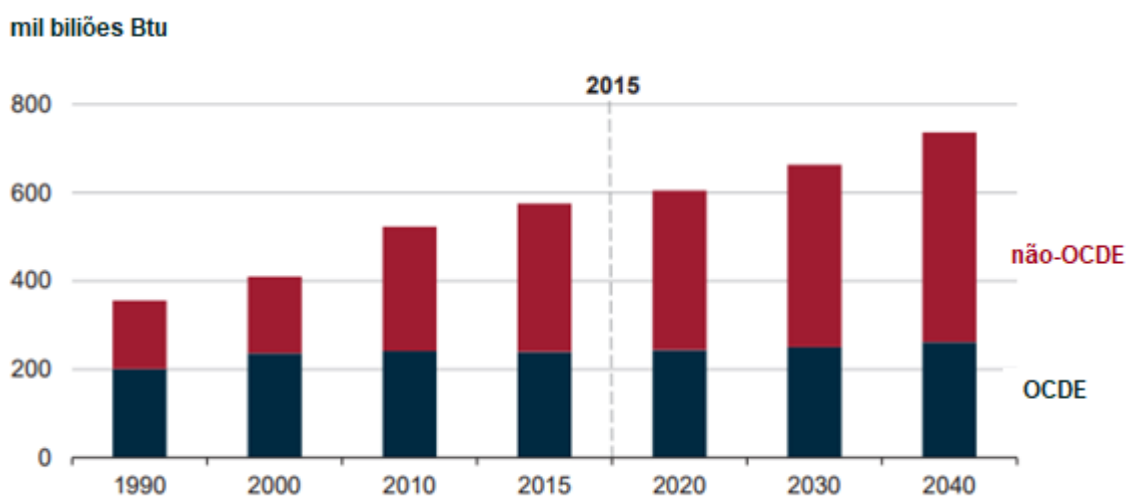
## 1. Introdução

consequentemente um consumo de recursos superior. Para os países desenvolvidos, um decréscimo no consumo de energia, reflete-se num crescimento da procura de energia por parte dos países em desenvolvimento. Como é possível observar através da Figura 1.1, espera-se um aumento da procura de energia mundial, com exceção dos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) onde a procura de energia irá tender para um valor aproximadamente constante (Thorium Energy World, 2016).



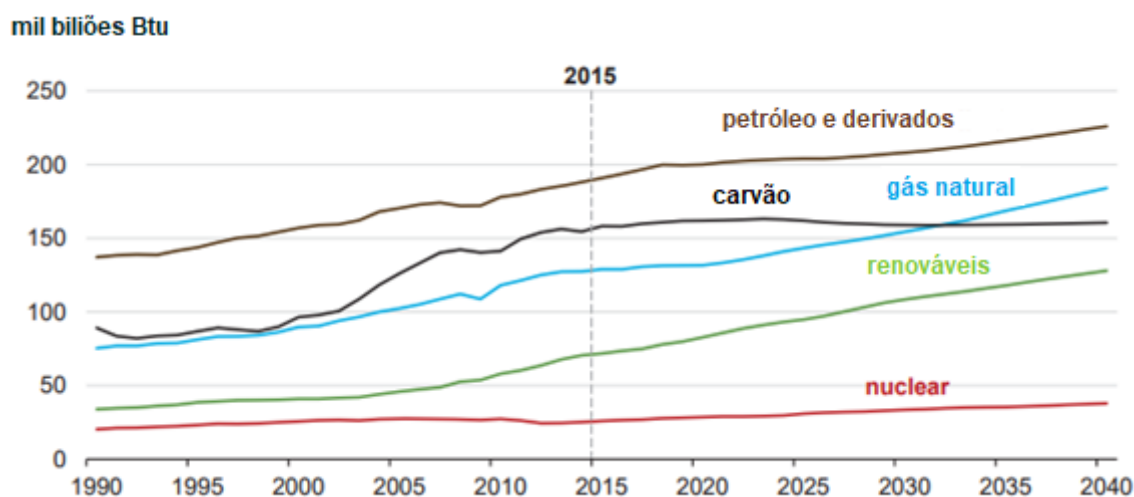
**Figura 1.1-** Procura de energia por região – Adaptado de Thorium Energy World, 2016.

Segundo o relatório anual da Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se que o consumo de energia mundial cresça 28% entre 2015 e 2040 (EIA, 2017).



**Figura 1.2-** Consumo de energia mundial entre 1990 e 2040 – Adaptado de EIA, 2017.

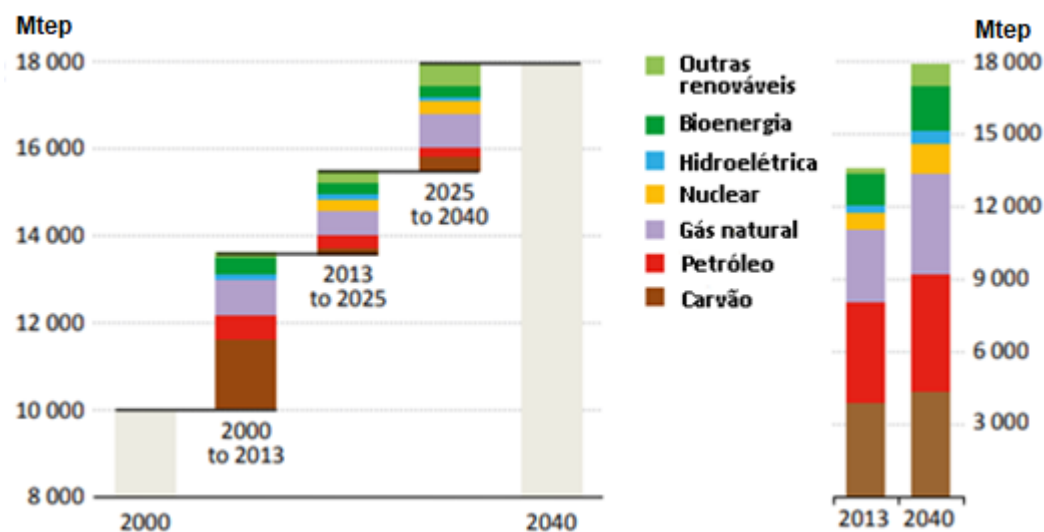
A partir da Figura 1.2, podemos verificar o consumo de energia mundial entre 1990 e 2015 e ainda as previsões de consumo entre 2015 e 2040, para países pertencentes e não pertencentes à OCDE. É possível concluir através da observação do gráfico, que a previsão da maior procura de energia no período representado corresponde aos países não pertencentes à OCDE; tal deve-se ao rápido crescimento populacional e ao forte desenvolvimento económico dos mesmos (EIA, 2017).



**Figura 1.3-** Consumo de energia mundial dos diferentes combustíveis – Adaptado de EIA, 2007.

Pela Figura 1.3 é possível observar que os recursos energéticos com maior incremento ao longo dos anos são as fontes de energia renováveis; de notar que o consumo dos restantes combustíveis também aumenta, à exceção do carvão que tem vindo a estabilizar (EIA, 2017).

## 1. Introdução



**Figura 1.4-** Procura de energia primária por combustível no cenário Novas Políticas - Adaptado de IEA, 2015.

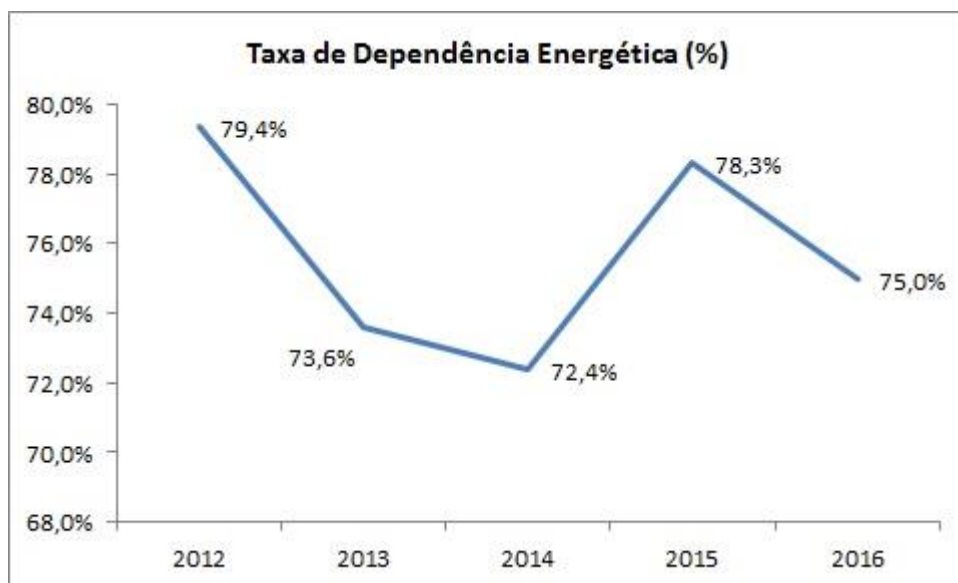
Como é possível observar através da Figura 1.4, até 2040 irá existir um crescimento da procura de energia primária para todos os combustíveis. Para as energias renováveis, considerando o período de 2000 a 2040, estas irão sofrer um aumento de 34%. É importante notar o rápido crescimento que o gás natural e as energias renováveis não-hídricas sofrerão após 2025 (IEA, 2015).

### 1.1.1 Situação Energética em Portugal

Segundo a IEA, apesar de Portugal se encontrar num período difícil a nível económico, conseguiu adaptar-se de forma a prosseguir com o desenvolvimento da suas políticas energéticas (IEA, 2016).

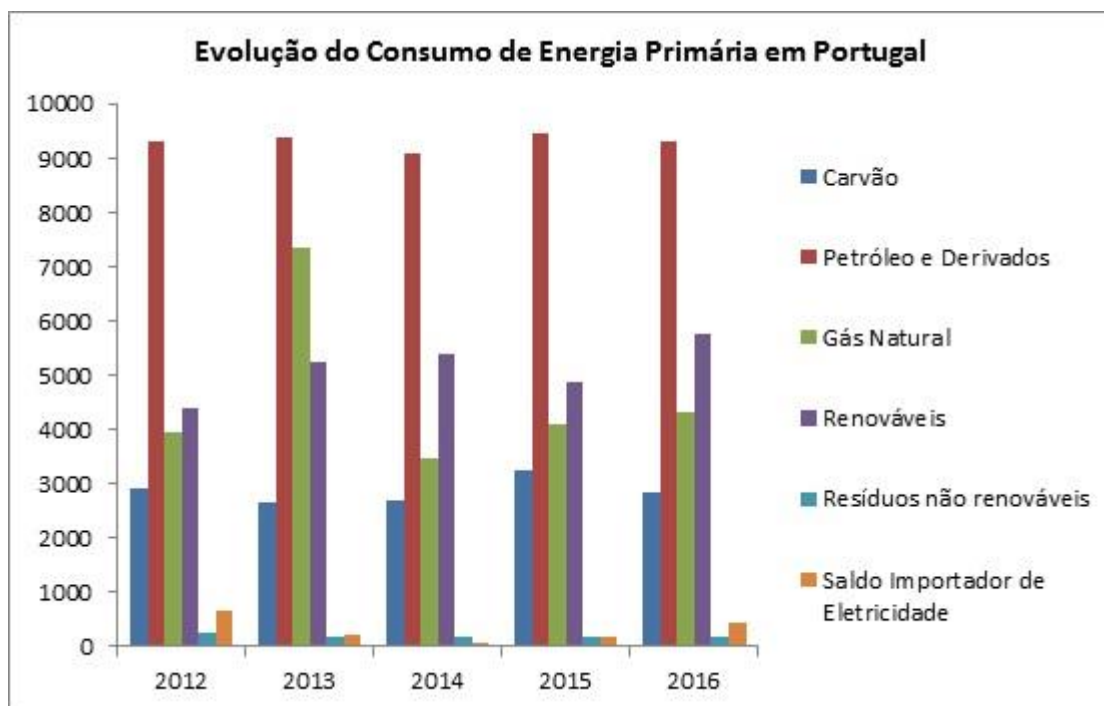
De acordo com a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Portugal é um país com grande dependência energética do estrangeiro, valor que segundo a fonte era de 75,0% para 2016; tal é justificado através dos poucos recursos energéticos de origem fóssil que possui. Desta forma, é relevante a colaboração das energias renováveis.

Como é possível observar através da Figura 1.5, desde 2012 que se verificou uma diminuição da taxa de dependência energética, sendo que, entre 2014 e 2015, se observou um aumento desta; este aumento é justificado por um incremento das importações de energias fósseis realizadas pelo país, no período descrito (DGEG, 2016).



**Figura 1.5-** Taxa de Dependência Energética (DGEG, 2016).

A Figura 1.6 representa a evolução do consumo de Energia Primária em Portugal, para o mesmo período referido anteriormente, de 2012 a 2016.



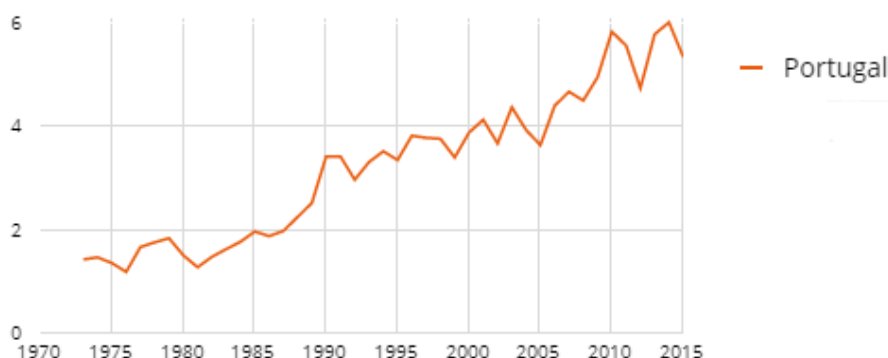
**Figura 1.6-** Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal entre 2012 e 2016 (DGEG, 2016).

Através da observação da figura anterior, em 2016 o petróleo foi a fonte de energia que apresentou maior consumo, sendo este valor igual ao obtido para o ano anterior, 42,8% do

## 1. Introdução

consumo total de energia primária. Devido às elevadas emissões de CO<sub>2</sub> do carvão, prevê-se uma redução do recurso a esta fonte; para 2016 esta representava cerca de 13% do consumo total de energia primária. Para o gás natural e para as energias renováveis verificou-se um aumento do consumo de energia, de 18,6% em 2015, para 19,8% em 2016 e de 23,2% em 2015, para 26,3% em 2016, respetivamente (DGEG, 2016).

De acordo com a IEA, em 2015 Portugal produziu cerca de 6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) de Energia (IEA, 2016).



**Figura 1.7-** Produção de energia em Portugal (IEA, 2016).

A Figura 1.7 representa a produção de energia em Portugal. Como se pode verificar, esta tem vindo a aumentar significativamente ao longo dos anos; este aumento é justificado pelos investimentos realizados na última década, no que diz respeito à produção de energia renovável, nomeadamente as grandes hídricas, parques eólicos, exploração de biomassa e energia solar (Pires, 2012).

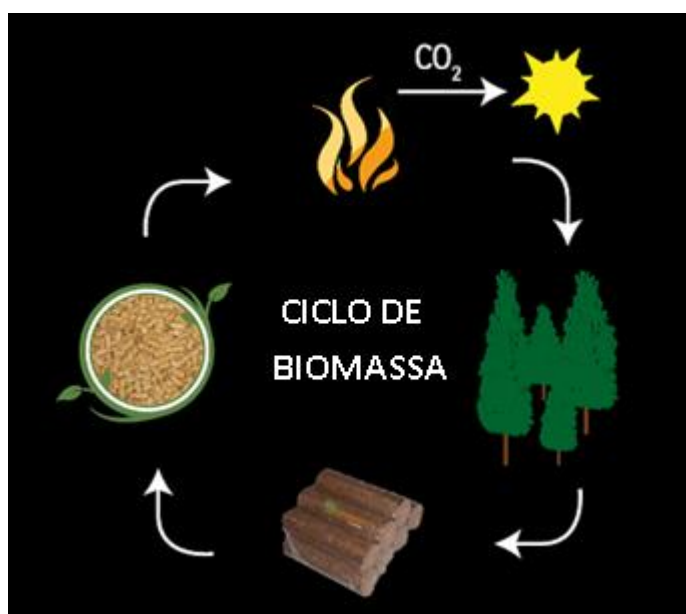
## 2. Biomassa

Os benefícios políticos relativamente à independência energética, nomeadamente a independência dos combustíveis fósseis e a necessidade de enfrentar os impactos ambientais do aquecimento global, leva à existência de um interesse no uso de biocombustíveis; desta forma tem sido uma prioridade a identificação de espécies alternativas de biomassa.

Por definição, a bioenergia é a energia obtida através da biomassa (materiais que derivam das reações de fotossíntese); esta é considerada uma fonte de energia renovável, visto que consiste numa produção sustentável de energia (McKendry, 2002; Van Loo, et al., 2008).

### 2.1 Tipos e fontes de biomassa

A madeira é a fonte de energia mais antiga de que há conhecimento, estando este combustível associado à biomassa. Esta por vezes é demasiado valiosa para queimar, pelo que as indústrias de carpintaria consideram que nestes casos é mais económico usar como combustível os resíduos da madeira, como é o caso da serradura, cascas e pedaços de madeira (Quaak, et al., 1999; BUN-CA, 2002).



**Figura 2.1-** Representação do ciclo de biomassa – Adaptado de Gásmaia, 2008.

Através da Figura 2.1 é possível observar a representação do ciclo de biomassa. As plantas que possuem clorofila, captam a energia solar desenvolvendo o processo de fotossíntese; neste processo as plantas reagem quimicamente com o dióxido de carbono ( $CO_2$ )

## 2. Biomassa

existente no ar, libertando oxigénio (O<sub>2</sub>) para a atmosfera. A biomassa associada a estas plantas pode dar origem a diversos tipos de combustíveis, como é o caso dos péletes, que durante a sua combustão libertam novamente o CO<sub>2</sub>, iniciando de novo o ciclo (Gásmaia, 2008).

### 2.2 Características da biomassa

Durante o processamento da biomassa, o teor de humidade, o poder calorífico, o teor de cinzas, o teor de matéria volátil e carbono fixo, o teor de metais alcalinos, a razão celulose/lenhina e a densidade aparente, são propriedades de grande interesse (McKendry, 2002).

A biomassa é composta por água, cinzas e matéria seca e sem cinzas, como é possível observar através da Figura 2.2, sendo que a fração correspondente a cada camada irá influenciar a biomassa enquanto combustível (Quaak, et al., 1999).



**Figura 2.2-** Composição da biomassa – Adaptado de Quaak, et al., 1999.

#### 2.2.1 Teor de humidade

O teor de humidade pode definir-se como a percentagem de água presente na biomassa; é importante que este valor seja inferior a 30%. Uma vez que esta propriedade da biomassa determina a energia não útil da combustão, é considerado um fator crítico para o combustível (BUN-CA, 2002).

### **2.2.2 Poder Calorífico**

O poder calorífico de um combustível representa a quantidade máxima de calor gerado em condições padrão (McAllister, et al., 2011). Esta propriedade pode ser dividida em poder calorífico superior e poder calorífico inferior.

O poder calorífico inferior, também designado por PCI, representa o calor útil libertado durante a combustão. O poder calorífico superior, PCS, representa a soma do poder calorífico inferior com o calor latente de vaporização, isto é, o calor total envolvido durante o processo de combustão (McKendry, 2002).

### **2.2.3 Teor de cinzas**

O teor de cinzas de um determinado combustível representa a sua parte inorgânica (Karampinis, et al., 2012). A composição da cinza tem influência no comportamento e no processo de gaseificação da biomassa (Quaak, et al., 1999).

### **2.2.4 Teor de matéria volátil e carbono fixo**

Quando a biomassa é aquecida a 900 °C há uma perda de massa, sendo esse valor correspondente ao teor da matéria volátil (Celignis Analytical, 2015). Em geral, o teor de matéria volátil possui um valor elevado, podendo ir até 80% (Quaak, et al., 1999).

### **2.2.5 Teor de metais alcalinos**

Para todos os processos termoquímicos o teor de metais alcalinos, isto é, de Na, Mg, K, P e Ca, representa uma característica relevante. Durante o processo de combustão, os metais alcalinos libertados podem reagir com a sílica que se encontra na cinza, formando escória, o que pode causar problemas significativos na caldeira e conseqüentemente levar à inatividade da mesma (McKendry, 2002; Dayton, et al., 2008).

### **2.2.6 Razão celulose/lenhina**

A formação de carbono depende da razão celulose/lenhina, assim, quanto maior a biodegradabilidade da celulose, maior será a formação de carbono. Esta razão é importante para os processos de conversão bioquímicos, uma vez que determina a quantidade de carbono formada (McKendry, 2002).

## 2. Biomassa

### 2.2.7 Densidade aparente

A densidade aparente pode ser definida como o peso da matéria-prima por unidade de volume. Este valor é superior para a madeira maciça, encontrando-se entre 600 e 900 kg/m<sup>3</sup>, sendo que a maioria dos resíduos agrícolas apresentam baixas densidades aparentes (Quaak, et al., 1999; Clarke, et al., 2011).

## 2.3 Floresta em Portugal

A área florestal Portuguesa ocupa cerca de um terço do seu território, o que corresponde a aproximadamente 3,2 milhões de hectares; este valor sofreu um decréscimo de 57 mil hectares entre 2005 e 2010 (PEFC, 2006; FAPAS, 2017).

Diversos são os fatores que ameaçam as florestas nos dias de hoje, sendo que um dos principais é a desflorestação. Segundo os dados fornecidos pela Global Forest Watch (GFW), Portugal é um dos países com maior taxa de desflorestação; tal deve-se essencialmente aos incêndios florestais, às indústrias de madeira e de papel, à construção de novas infraestruturas e à expansão urbanística (Quercus, 2016; FAPAS, 2017).

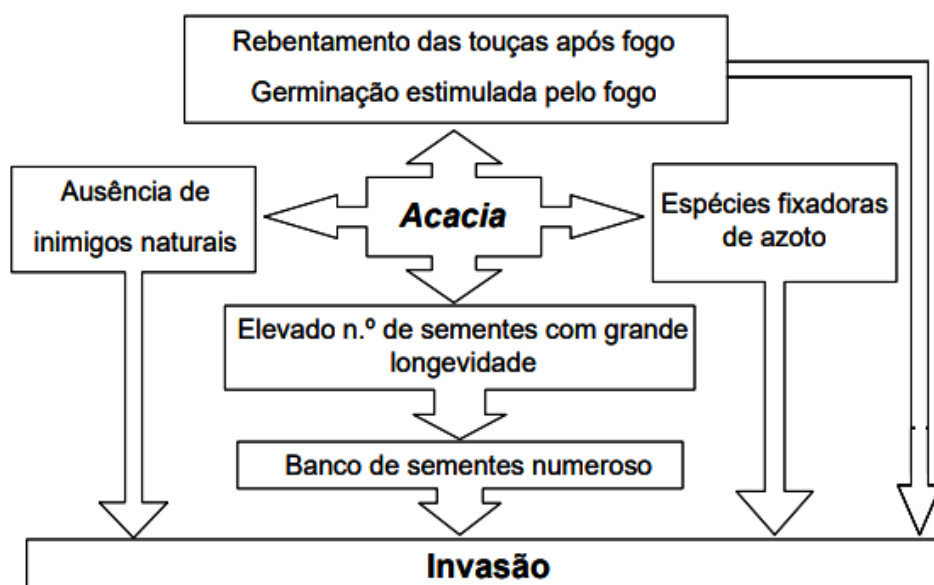
### 2.3.1 Espécies invasoras

Em todo o mundo, os ecossistemas possuem um elevado número de espécies invasoras que comprometem o seu equilíbrio (Richardson, et al., 2004).

Uma espécie invasora pode ser definida como uma espécie que constitui uma ameaça para as espécies autóctones, uma vez que possui a capacidade de se reproduzir rapidamente; estas espécies possuem ainda a característica de germinar facilmente nos terrenos ardidos, potenciando a ocorrência dos fogos florestais (Oeco, 2014; FAPAS, 2017).

#### 2.3.1.1 *Acacia dealbata*

A *Acacia dealbata* é a espécie invasora com maior área dominada; pertence à família *Leguminosae* e à sub-família *Mimosoidea*. Esta espécie desenvolve-se em ambientes pobres em nutrientes, isto porque, a *Acacia* é capaz de absorver azoto, o que provoca um rápido desenvolvimento da clorofila, sendo esta importante para o processo de fotossíntese e consequentemente para um rápido crescimento e propagação da mesma (Cronk, et al., 1995; FAO, 2017).



**Figura 2.3-** Características da *Acacia* que promovem o seu potencial invasor (Marchante, et al., 1999).

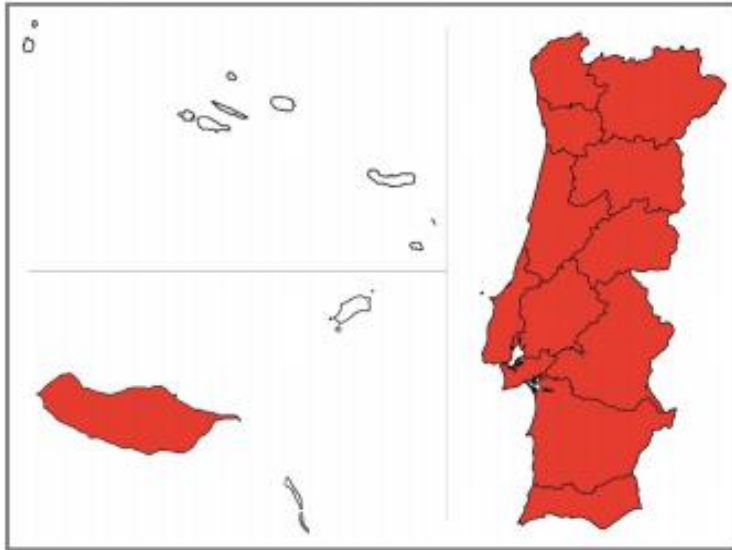
Na Figura 2.3 é possível observar esquematicamente as características que elevam o potencial invasor da espécie *Acacia dealbata*.

#### 2.3.1.1.1 Breve análise histórica da introdução da *Acacia* em Portugal

A introdução da *Acacia dealbata* em Portugal, mais concretamente no Parque Nacional Peneda-Gerês, ocorreu em meados de 1902 e prolongou-se até 1905.

A *Acacia* desenvolveu-se rapidamente desde a sua introdução, sendo que hodiernamente toma dimensões florestais preocupantes (Liberal, et al., 1999). Esta espécie representa uma ameaça às espécies nativas, uma vez que desenvolve povoamentos bastante densos, impossibilitando o crescimento destas. A principal razão da sua introdução como espécie florestal era para fixação de solos (Invasoras, 2014).

## 2. Biomassa



**Figura 2.4-** Distribuição de *Acacia dealbata* em Portugal (Invasoras, 2014).

Pela Figura 2.4, é possível observar a distribuição da *Acacia dealbata* em Portugal. Esta espécie encontra-se por todo Portugal continental e arquipélago da Madeira (Invasoras, 2014).

### 2.4 Péletes

Da biomassa é possível a obtenção dos péletes, Figura 2.5, um biocombustível sólido que possui uma elevada densidade e tamanho e forma homogêneos (Oberberger, et al., 2010).



**Figura 2.5-** Biocombustível – Péletes (energenium, 2005).

Os péletes são considerados uma forma de energia renovável, uma vez que podem ser produzidos através de resíduos de biomassa (Hansen, et al., 2009).

A utilização de p letes como combust vel possui diversas vantagens, entre as quais temos (Barbosa, 2008):

- A baixa emiss o de poluentes
- A redu o da depend ncia dos combust veis f sseis
- Uma combust o mais eficiente
- Uma redu o dos riscos de inc ndios florestais, resultante da limpeza dos terrenos.

### **2.4.1 Processo de peletiza o**

O processo de peletiza o divide-se em diferentes fases: secagem, destroamento, acondicionamento, peletiza o, arrefecimento e remo o de finos.

#### **2.4.1.1 Secagem**

De modo a facilitar o processo de peletiza o, o teor de humidade da m teria-prima deve ser de aproximadamente 10%. Se este valor for superior a 15%, a m teria-prima necessita de ser seca (Hansen, et al., 2009).

Este processo pode ser efetuado de forma natural ou for ada. O processo natural consiste em secar o material numa pilha ao ar livre ao longo de um dado per odo; o maior problema associado a este processo   a imprevisibilidade das condi es meteorol gicas (Van Loo, et al., 2008). A secagem for ada baseia-se na utiliza o de secadores industriais (Oberberger, et al., 2010) ou no recurso a estufas solares.

#### **2.4.1.2 Destroamento**

O destroamento consiste na redu o do tamanho da m teria-prima com recurso a um moinho de navalhas; este processo   importante, uma vez que a m teria-prima geralmente possui um tamanho muito heterog neo (Van Loo, et al., 2008; Hansen, et al., 2009).

#### **2.4.1.3 Acondicionamento**

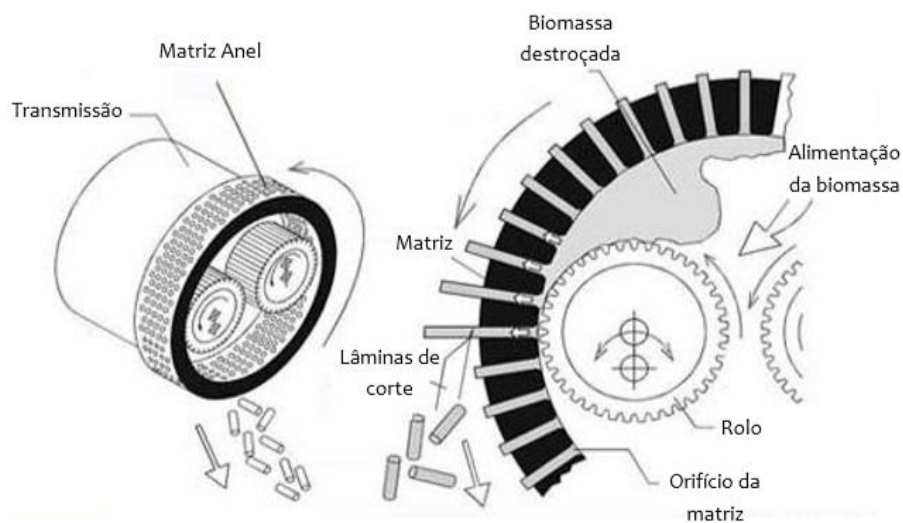
O acondicionamento baseia-se no acr scimo de vapor   m teria-prima, de forma a melhorar a sua ades o para o processo de peletiza o (Van Loo, et al., 2008). Neste processo pode haver um aumento no teor de humidade de at  4,5 % (Raizer, 2014).

## 2. Biomassa

### 2.4.1.4 Peletização

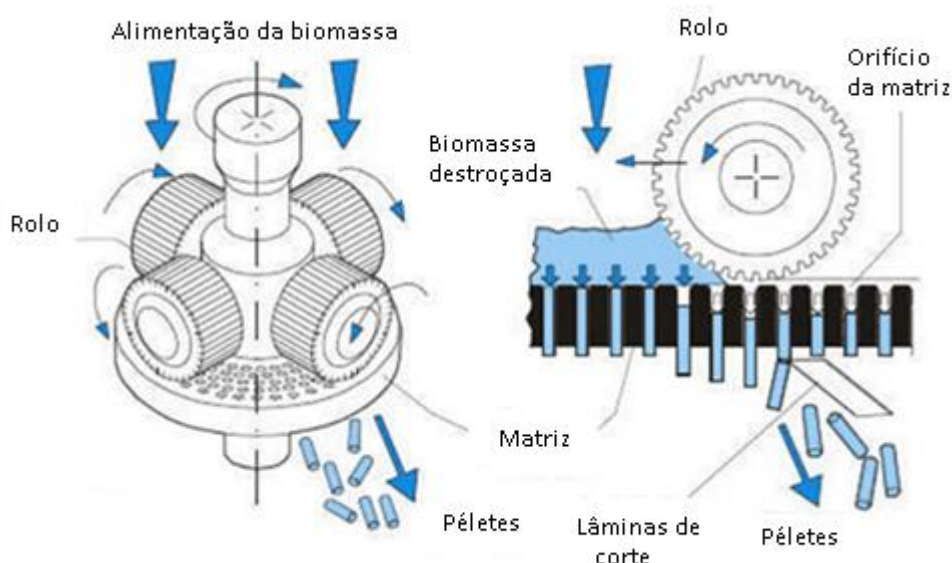
Para o processo de peletização é utilizada uma máquina peletizadora, sendo que esta pode ser do tipo “plana” ou “anel” (Van Loo, et al., 2008).

A peletizadora mais utilizada é do tipo “anel”, Figura 2.6, onde é possível observar-se a existência de dois rolos que extrudem a matéria-prima através dos orifícios existentes numa matriz vertical (Oberberger, et al., 2010).



**Figura 2.6-** Matriz de peletizadora tipo "anel" (Pinto, 2015).

Na peletizadora do tipo “plana”, como é possível verificar através da Figura 2.7, a matéria-prima é pressionada e extrudada através dos orifícios presentes numa matriz horizontal (Oberberger, et al., 2010).



**Figura 2.7-** Matriz de peletizadora tipo "plana" – Adaptado de Gemco Energy, 2014.

#### 2.4.1.5 Arrefecimento

Durante o processo de peletização há um aumento significativo da temperatura dos pellets produzidos, sendo que é essencial o seu arrefecimento cauteloso, de modo a garantir a sua estabilidade e durabilidade (Van Loo, et al., 2008).

#### 2.4.1.6 Remoção dos finos

Após se efetuar todas as fases que constituem o processo de peletização descritas acima, é importante proceder à remoção dos finos, uma vez que estes podem afetar o processo de combustão dos pellets (Oberberger, et al., 2010). Os pellets produzidos são peneirados com recurso a um crivo (Ferreira, 2013).

### 2.4.2 Mercado dos pellets

Em agosto de 2015 o European Pellet Council (EPC), colocou em vigor a norma ENplus, versão 3.0, que foi criada devido ao desenvolvimento da indústria e à introdução do padrão ISO 17225-2, que veio substituir o padrão EN 14961-2 (EPC, 2015).

Para esta nova versão, os valores de referência das propriedades dos pellets sofreram algumas alterações.

## 2. Biomassa

**Tabela 2.1-** Valores de referência das propriedades dos péletes, de acordo com a norma ENplus (EPC, 2015).

Propriedade	Unidade	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B	Norma de ensaio <sup>11)</sup>
Diâmetro	mm	6 ± 1 ou 8 ± 1			ISO 17829
Comprimento	mm	3,15 < L ≤ 40 <sup>4)</sup>			ISO 17829
Humidade	w-% <sup>2)</sup>	≤ 10			ISO 18134
Cinza	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilidade Mecânica	w-% <sup>2)</sup>	≥ 98,0 <sup>5)</sup>	≥ 97,5 <sup>5)</sup>		ISO 17831-1
Finos (< 3,15 mm)	w-% <sup>2)</sup>	≤ 1,0 <sup>6)</sup> (≤ 0,5 <sup>7)</sup> )			ISO 18846
Temperatura dos pellets	°C	≤ 40 <sup>8)</sup>			
PCI	kWh/kg <sup>2)</sup>	≥ 4,6 <sup>9)</sup>			ISO 18125
Densidade Aparente	kg/m <sup>3</sup> <sup>2)</sup>	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Aditivos	w-% <sup>2)</sup>	≤ 2 <sup>10)</sup>			-
Azoto	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Enxofre	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Cloro	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,02		≤ 0,03	ISO 16994
Temperatura de Deformação da cinza <sup>1)</sup>	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsénio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 1			ISO 16968
Cadmio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 0,5			ISO 16968
Crómio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 10			ISO 16968
Cobre	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 10			ISO 16968
Chumbo	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 10			ISO 16968
Mercúrio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 0,1			ISO 16968
Níquel	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 10			ISO 16968
Zinco	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 100			ISO 16968

<sup>1)</sup> cinza produzida a 815 °C

<sup>2)</sup> tal e qual

<sup>3)</sup> base seca

<sup>4)</sup> Um máximo de 1% dos pellets poderá ultrapassar os 40mm. Não são permitidos pellets com mais que 45mm

<sup>5)</sup> No ponto de carregamento do veículo de transporte (camião, navio) no local da produção

<sup>6)</sup> À porta da fábrica ou aquando do carregamento de um camião para entrega a clientes finais (*Entrega de carga total ou parcial*)

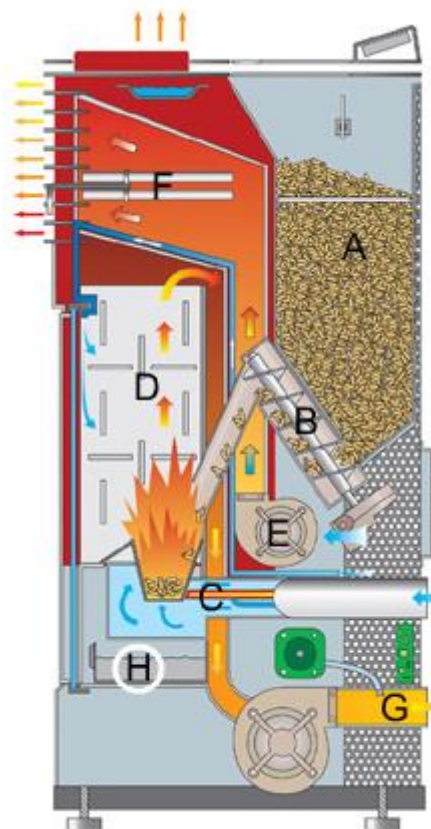
Segundo a Tabela 2.1, para os péletes estarem de acordo com a norma ENplus, as suas propriedades devem estar conforme os valores acima apresentados.

### 2.4.3 Caldeiras a péletes

Apenas recentemente se começou a usar péletes de madeira para aquecimento doméstico, uma vez que somente na década de 1990 foram desenvolvidos os queimadores (Perez-Jimenez, 2015).

Entre os equipamentos de combustão que utilizam biomassa como combustível, as caldeiras/salamandras a péletes são as que conferem maior fiabilidade, permitindo um maior controlo do processo de combustão e uma maior segurança na sua utilização (macolis, 2017).

Na Figura 2.8, podemos observar a representação de uma caldeira doméstica a péletes.



**Figura 2.8-** Modo de funcionamento de uma caldeira a péletes - Adaptado de Energia Biomassa, 2009.

**Legenda da figura:**

- A. Depósito de péletes
- B. Alimentação de péletes
- C. Resistência elétrica
- D. Permutador de calor
- E. Ventilador
- F. Saída do ar quente
- G. Extração de Gases
- H. Gaveta de Cinzas.

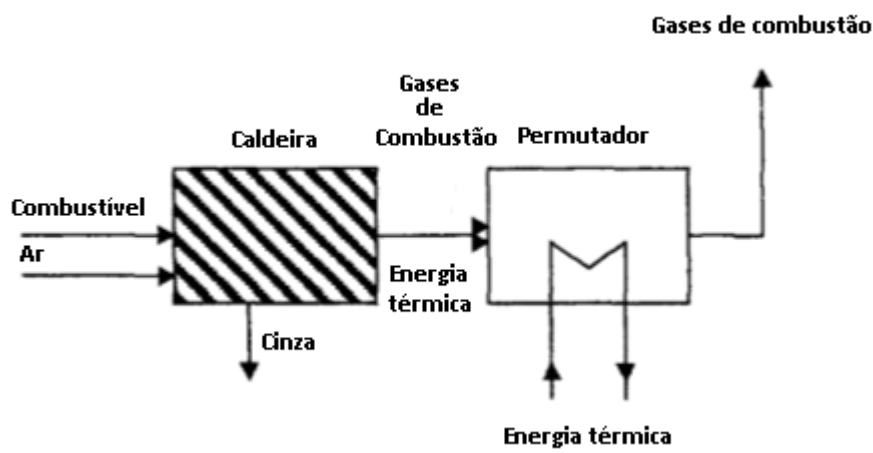
## 2. Biomassa

O funcionamento da caldeira consiste numa alimentação automática do combustível do depósito (A) para a câmara de combustão, através de um parafuso sem-fim (B); os péletes caem por gravidade na câmara de combustão, que possui uma resistência elétrica (C) utilizada como fonte de ignição. Durante o processo de combustão, a energia contida nos gases de combustão é transferida para um permutador de calor (D) que normalmente se encontra ligado a um sistema de aquecimento central. A entrada de ar é efetuada através do ventilador (E); o ar aquece devido à sua passagem pela área adjacente à câmara de combustão saindo em (F), com uma temperatura mais elevada, aquecendo assim o espaço envolvente. Os gases resultantes da combustão são extraídos em (G) com o auxílio de um exaustor. Em (H) encontra-se representada a gaveta de cinzas, onde caem as cinzas resultantes da combustão.

### 3. Combustão de biomassa

O processo de combustão da biomassa consiste em obter energia útil através da sua queima; a sua natureza encontra-se dependente das características do combustível (Quaak, et al., 1999; Van Loo, et al., 2008).

O processo de combustão pode ser dividido em várias etapas: a ignição, a secagem, a pirólise e a combustão do resíduo carbonoso.



**Figura 3.1-** Processo de combustão da biomassa – Adaptado de Quaak, et al., 1999.

Através da Figura 3.1 é possível observar uma esquematização das diferentes etapas que constituem o processo de combustão da biomassa.

#### 3.1 Ignição

A ignição pode dar-se de duas formas diferenciadas, forçada ou espontânea. A ignição forçada é a mais comum, sendo iniciada recorrendo a uma fonte de calor externa (Pinho, 2005).

Para que ocorra a ignição da biomassa são necessárias condições específicas; a temperatura não deve ser inferior a 550 °C e deverá haver fornecimento de ar suficiente para que o processo de combustão se desenrole (Quaak, et al., 1999).

### 3. Combustão de Biomassa

#### 3.2 Secagem

O processo de secagem consiste na evaporação da água contida no combustível durante o processo de combustão (Quaak, et al., 1999). Quanto maior for o teor de humidade que o combustível possui, maior será a energia necessária requerida para este processo (Van Loo, et al., 2008).

#### 3.3 Pirólise

Esta etapa pode ser referida como volatilização ou degradação térmica. Os produtos libertados encontram-se dependentes da temperatura de combustão, do tipo de combustível, da taxa de aquecimento, da pressão e do tempo de reação. Da pirólise podem resultar alcatrões e gases com baixo peso molecular (Van Loo, et al., 2008).

#### 3.4 Combustão do resíduo carbonoso

Após o processo de pirólise, libertação dos voláteis, o que sobra deste é um resíduo carbonoso; este é composto na sua maioria por cinzas e carbono e em menor proporção por hidrogénio, oxigénio, enxofre e azoto (Coelho, et al., 2007).

#### 3.5 Poluentes

Diversos poluentes são libertados durante a combustão da biomassa, sendo que estes podem dividir-se em não-queimados e em poluentes produzidos na combustão.

Os poluentes associados aos não-queimados, resultantes de uma combustão deficiente, incluem o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-queimados (HC), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e partículas de carvão.

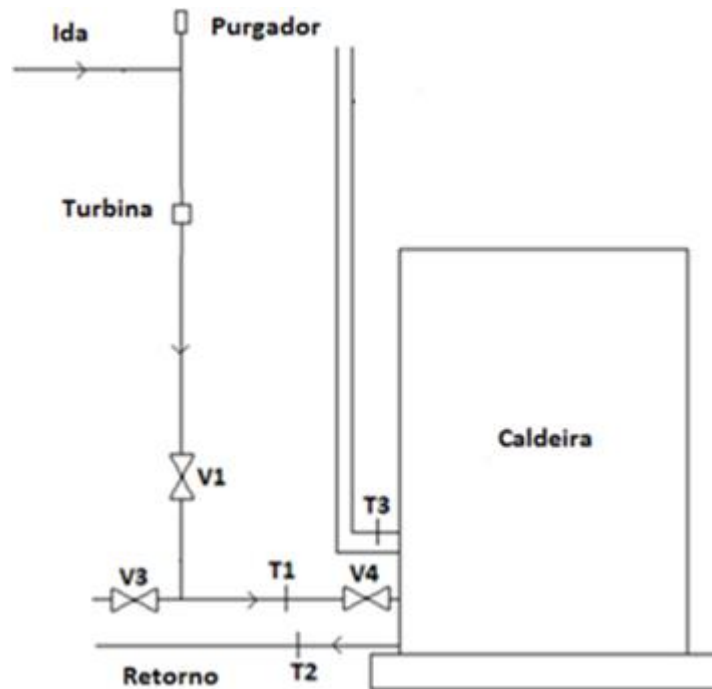
Os poluentes produzidos no processo de combustão, incluem as emissões de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), cinza, metais pesados e cloretos de hidrogénio (HCl) (Khan, et al., 2009).

Na combustão de péletes, embora o seu teor de azoto seja relativamente baixo, as emissões de NO<sub>x</sub> são consideráveis. Para uma combustão mais eficiente, as emissões de hidrocarbonetos não queimados devem ser menores, sendo que o objetivo passa por conseguir estabelecer um equilíbrio entre as emissões de NO<sub>x</sub> e as emissões de hidrocarbonetos (Van Loo, et al., 2008).

## 4. Instalação experimental

### 4.1 Descrição da instalação experimental

A instalação experimental encontra-se representada esquematicamente na figura seguinte, Figura 4.1.



**Figura 4.1-** Instalação experimental - Adaptado de Ferreira, 2013.

A instalação experimental é composta por uma caldeira, uma turbina e por três termopares que permitem a medição das temperaturas, T1, T2 e T3; estas correspondem à temperatura da água na entrada da caldeira, na saída da caldeira e à temperatura dos gases de combustão, respetivamente.

De modo a efetuar o cálculo do caudal mássico de combustível, procedeu-se à pesagem dos péletes antes e depois de cada ensaio. Para a medição do caudal mássico de água recorreu-se a um medidor de caudal de turbina.

## 4. Instalação Experimental

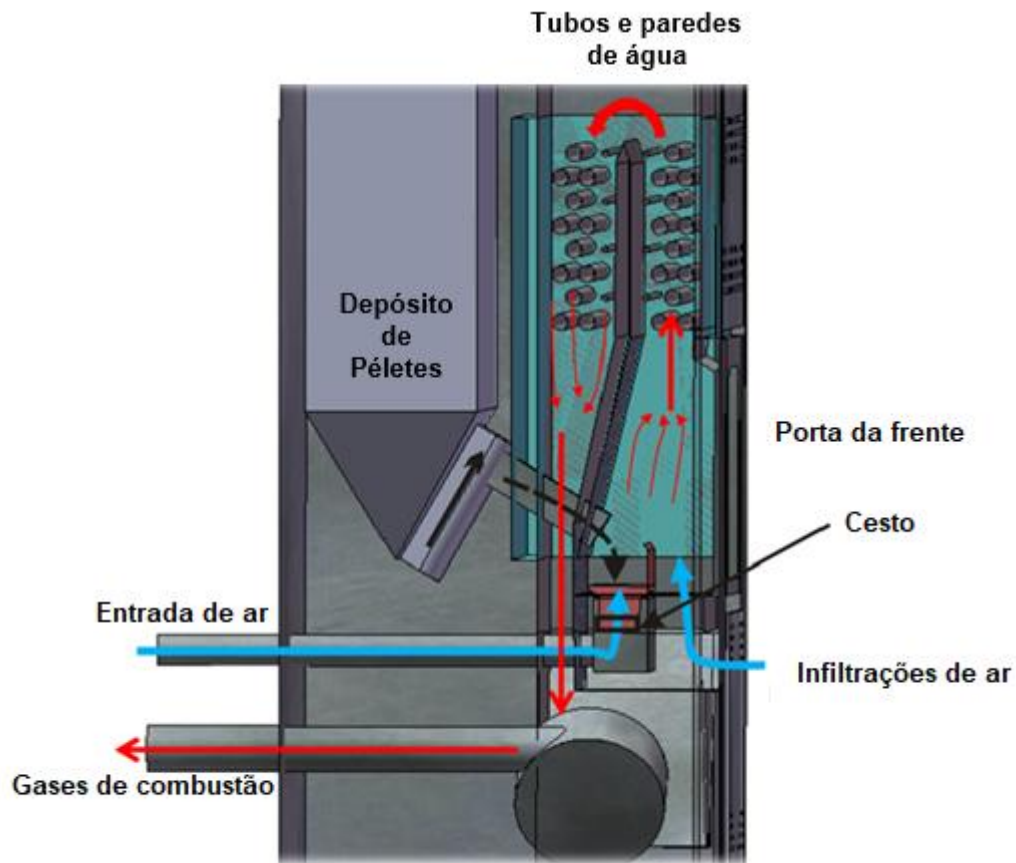
### 4.2 Caldeira

A caldeira utilizada neste trabalho, Figura 4.2, era uma caldeira doméstica da marca *Metlor*, modelo *Aqualux*, com uma potência térmica nominal de 20 kW.



**Figura 4.2-** Caldeira utilizada no trabalho experimental.

Conforme já foi referenciado nos trabalhos de Ferreira (2013) e Pinto (2015), a caldeira é composta por um depósito com uma capacidade de 35 kg de péletes. O seu sistema de alimentação é de topo, pelo que os péletes têm que ser introduzidos manualmente no depósito; com o auxílio de um parafuso sem-fim, os péletes são conduzidos para a câmara de combustão. A caldeira possui 5 cargas, que correspondem a 5 modos de operação do parafuso sem-fim.



**Figura 4.3-** Princípio de funcionamento da caldeira doméstica – Adaptado de Gómez, et al., 2012.

Através da Figura 4.3 é possível observar o princípio de funcionamento da caldeira utilizada. No interior da câmara de combustão, a ignição dos pólenes é efetuada com recurso a uma resistência elétrica; a passagem de ar dá-se através dos orifícios existentes no cesto amovível. A água circula dentro das tubagens existentes na câmara de combustão, o que possibilita o seu aquecimento por intermédio das trocas de calor existentes durante o processo de combustão. Os produtos de combustão são escoados através de uma tubagem ligada ao sistema de ventilação.

Para a caldeira em estudo é possível delinear um padrão aproximado da duração das etapas que constituem cada ensaio. Desde a fase de arranque da caldeira até à sua estabilização, decorre um intervalo de tempo de aproximadamente 12 minutos; durante a fase de aquecimento da caldeira, dá-se o aquecimento da resistência elétrica, com uma duração de 5 minutos, e em simultâneo a pré-carga dos pólenes, que dura aproximadamente 2 minutos. A caldeira possui um modo de estabilização que é ativado assim que se atinge a temperatura de 60 °C.

## 4. Instalação Experimental

### 4.3 Procedimento experimental

#### 4.3.1 Medição do consumo de péletes

O caudal mássico de péletes consumidos durante um ensaio foi determinado através da razão entre a massa de péletes consumidos e o intervalo de tempo correspondente (Ferreira, 2013).

$$\dot{m}_{péletes} = \frac{\Delta m_{péletes}}{\Delta t} \quad (4.1)$$

onde  $\dot{m}_{péletes}$  corresponde ao caudal mássico de péletes (kg/s),  $\Delta m_{péletes}$  representa a variação de massa dos péletes num dado ensaio (kg) e  $\Delta t$  o intervalo de tempo correspondente a esse ensaio (s).

#### 4.3.2 Medição das temperaturas

As temperaturas foram medidas com o auxílio a termopares do tipo K, com 3 mm. Estes foram usados para a medição das temperaturas referidas no ponto 4.1. Os três termopares encontravam-se ligados a um sistema de aquisição *TC08* da *Pico*, que por sua vez estava conectado a um computador, utilizando o *software PicoLog* da *Pico Technology Ltd*. O registo das temperaturas foi efetuado a cada segundo.

#### 4.3.3 Medição do caudal mássico de água

A medição do caudal mássico de água foi efetuada através de um medidor de caudal de turbina, modelo *DFC.9000.100* da *Parker*. A turbina encontrava-se conectada a uma placa *NI USB-6008* da *National Instruments* e foi alimentada a 5 Volts; esta placa encontrava-se ligada a um computador, onde era possível monitorizar o caudal mássico de água através do *software Labview 8.6* da *National Instruments*. O registo dos dados foi realizado a cada segundo.

#### 4.3.4 Medição da composição dos gases de combustão

A medição da composição dos gases de combustão durante os ensaios foi efetuada com recurso a um analisador de gases da marca *Testo*, modelo *350*. Foi colocada uma sonda na chaminé de modo a permitir a medição das concentrações de Oxigénio (O<sub>2</sub>), Dióxido de

Carbono (CO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO) e Óxidos de Azoto (NO<sub>x</sub>), com uma taxa de aquisição de dez segundos.

No final de cada ensaio o analisador de gases era ligado a um computador e os dados eram obtidos através do *software EasyEmission* da *Testo*. Após a obtenção dos dados foi necessário efetuar a sua correção para 13% de O<sub>2</sub>, na base seca. A correção do valor da emissão de um dado poluente é efetuada recorrendo à Equação 4.2 (Pinto, 2015).

$$[P]_{\text{corrigido}} = [P]_{\text{medido}} \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2medido}} \quad (4.2)$$

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

## 4. Instalação Experimental

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia dealbata*

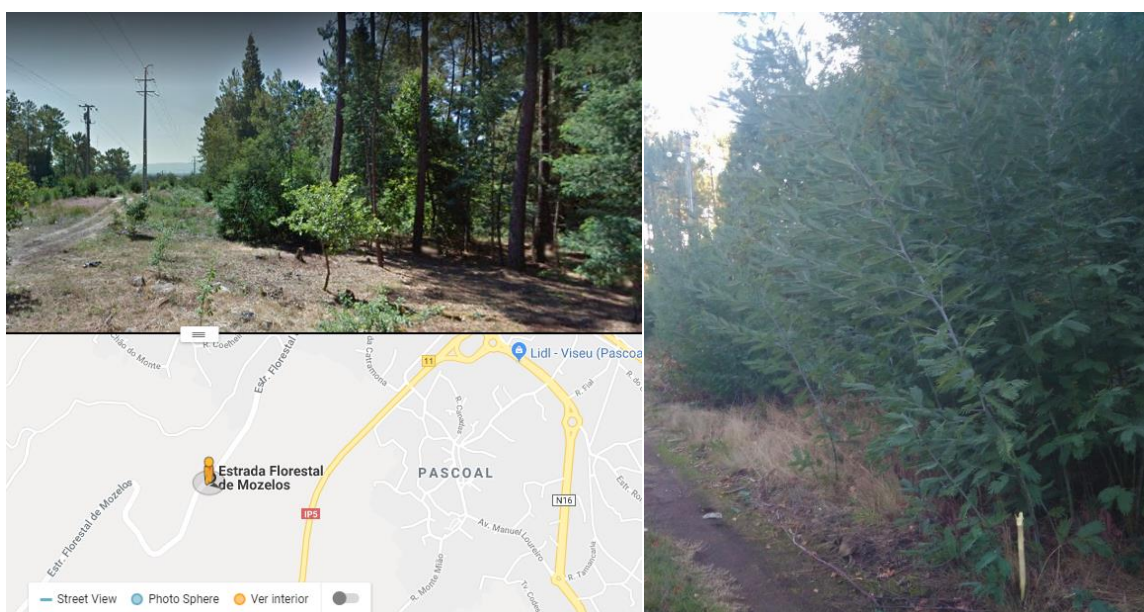
O processo de pré-tratamento da matéria-prima inclui três principais etapas: a recolha, a secagem e o destroçamento.

### 5.1 Recolha da matéria-prima

A espécie *Pinus Pinaster*, mais conhecida como Pinho, utilizada nas misturas das duas espécies, foi adquirida através de uma unidade industrial de produção de derivados de madeira.

A *Acacia dealbata*, mais comumente denominada Mimosa, foi recolhida numa floresta na região de Viseu; foram efetuadas várias recolhas desta matéria-prima que, posteriormente, foram transportadas para a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) para a sua secagem.

Na figura seguinte, Figura 5.1, encontra-se representado o local de recolha da espécie *Acacia dealbata*.



**Figura 5.1-** Local de recolha da espécie *Acacia dealbata*.

### 5.2 Secagem

A humidade da matéria-prima é um parâmetro que deve ser monitorizado antes do processo de peletização; este valor deve variar entre 8 a 12% (base húmida) (Oberberger, et al., 2010).

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

Quando efetuada a recolha da biomassa, esta encontrava-se com um teor de humidade elevado, pelo que foi necessário proceder à sua secagem; foi determinado o seu teor de humidade segundo a norma EN ISO 18134-2:2016.

A secagem da *Acacia dealbata* foi efetuada na estufa solar que se encontra localizada na cobertura da ESTGV, como é possível observar através da Figura 5.2.



**Figura 5.2-** Estufa solar da ESTGV.

O processo de secagem foi realizado maioritariamente no Outono e no Inverno, sendo que os últimos ciclos foram efetuados durante a Primavera e com melhores condições climáticas.

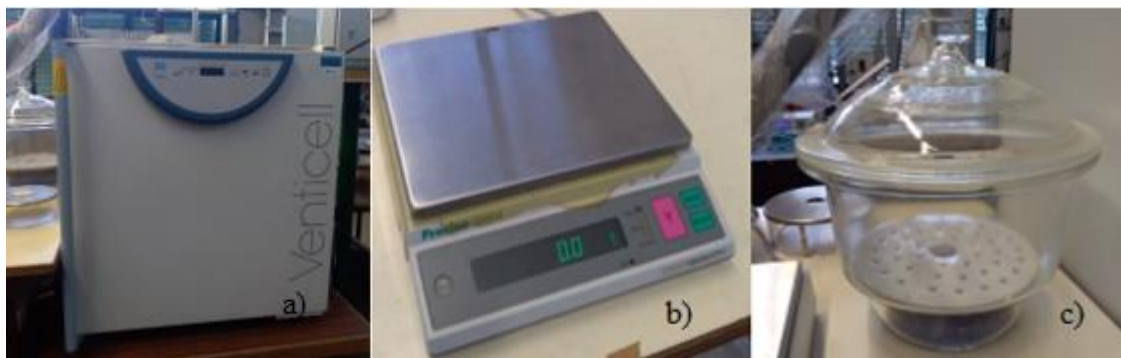
A estufa solar estava instrumentada com sensores de temperatura, humidade e radiação, sendo que:

- Para a medição da temperatura, utilizou-se o *software PicoLog* da *Pico Technology Ltd*, com um *hardware Pico TC08 USB* e termopares do tipo K; foram registados dados das temperaturas na zona superior, intermédia e inferior da estufa, a cada minuto.
- Para a medição da humidade relativa, dois sensores da marca *Honeywell*, modelo *HIH 4000*, colocados na parte superior e inferior da estufa, ligados ao *datalogger ADC-20* da *Pico Technology Ltd*, efetuaram medições a cada minuto. A humidade relativa corresponde à relação entre a humidade absoluta e a humidade em ponto de saturação, ou seja, a relação entre a quantidade de água existente no ar e quantidade máxima de água à temperatura da matéria-prima (Faria, 2008; Futureng, 2011).

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

- Para a medição da radiação, utilizaram-se dois piranómetros *SP 215* que se encontravam ligados a uma placa *NI USB-6008 DAQ* da *National Instruments*, localizados no interior e exterior da estufa; os dados foram recolhidos a cada trinta segundos. O piranómetro exterior permitiu a medição da radiação exterior à estufa solar, enquanto que o piranómetro interior possibilitou a medição da radiação que chegava ao interior da estufa; como esperado o valor da radiação exterior é sempre superior ao valor da radiação interior, visto que a radiação incidente na estufa é obrigada a atravessar uma tampa de policarbonato alveolar, levando à reflexão de parte desta (Monteiro, et al., 2009).

O teor de humidade da matéria-prima foi monitorizado; durante a secagem da biomassa na estufa solar, foram recolhidas amostras e colocadas numa estufa laboratorial, modelo *Venticell*, à temperatura de  $105 \pm 2$  °C. Durante este processo, foram efetuadas medições das massas das amostras, com recurso a uma balança digital, *Precisa 6200 D*. Quando se encontravam secas, as amostras eram colocadas num exsicador de forma a atingirem a temperatura ambiente, sem que houvesse absorção da humidade do ar. Através da Figura 5.3 é possível observar a estufa laboratorial, a balança digital e o exsicador utilizados.



**Figura 5.3-** a) Estufa laboratorial, b) balança digital e c) exsicador.

O cálculo do teor de humidade pode ser efetuado na base húmida (5.1) ou na base seca (5.2).

$$H_{bh} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$H_{bs} = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{final}} \times 100 \quad (5.2)$$

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

onde  $m_{inicial}$  e  $m_{final}$  corresponde à massa inicial (kg) e à massa final (kg) das amostras, respetivamente.

Foram efetuados vários ciclos de secagem, sendo que neste trabalho apenas estão representados dois deles, efetuados em condições meteorológicas diferentes, como em seguida se descreve.

### 5.2.1 Primeiro ciclo de secagem

O primeiro ciclo de secagem demonstrado abaixo, foi efetuado durante a primavera, mas com um tempo bastante chuvoso e húmido.

Antes do processo de secagem e de modo a facilitar o destroçamento da matéria-prima, esta foi cortada em pedaços mais pequenos no departamento de Madeiras da ESTGV, o que levou, por si só, à perda de uma dada quantidade de humidade da mesma. Inicialmente o teor de humidade da matéria-prima era cerca de 30%.

Durante o controlo da humidade eram analisadas duas amostras retiradas da estufa solar, Figura 5.4, uma com casca e outra sem.



**Figura 5.4-** Secagem da *Acacia dealbata* em estufa solar.

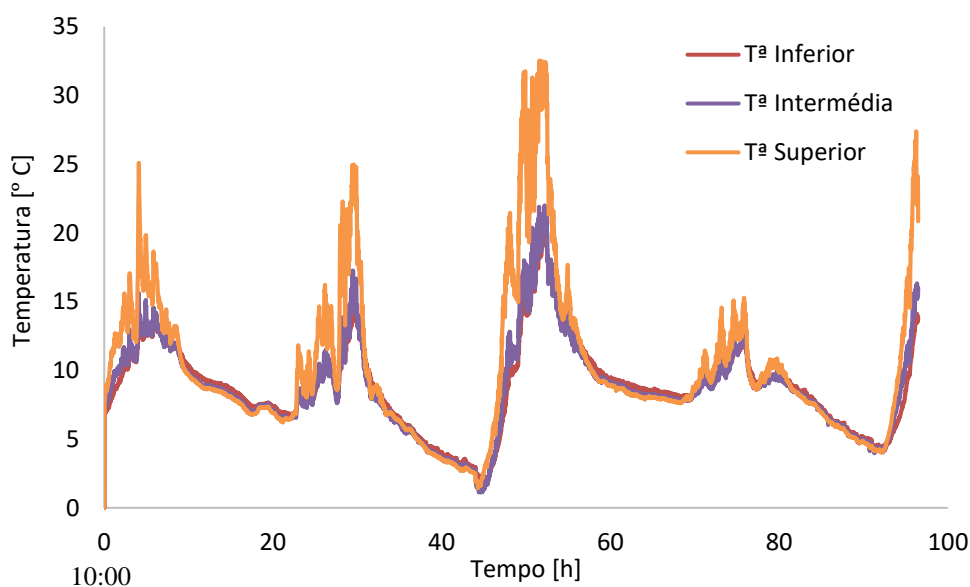
Na tabela seguinte, Tabela 5.1, é possível observar os teores de humidade na base seca e na base húmida, no início e no fim do ciclo de secagem.

**Tabela 5.1-** Teor de humidade inicial e final da *Acacia dealbata* durante o 1º ciclo de secagem.

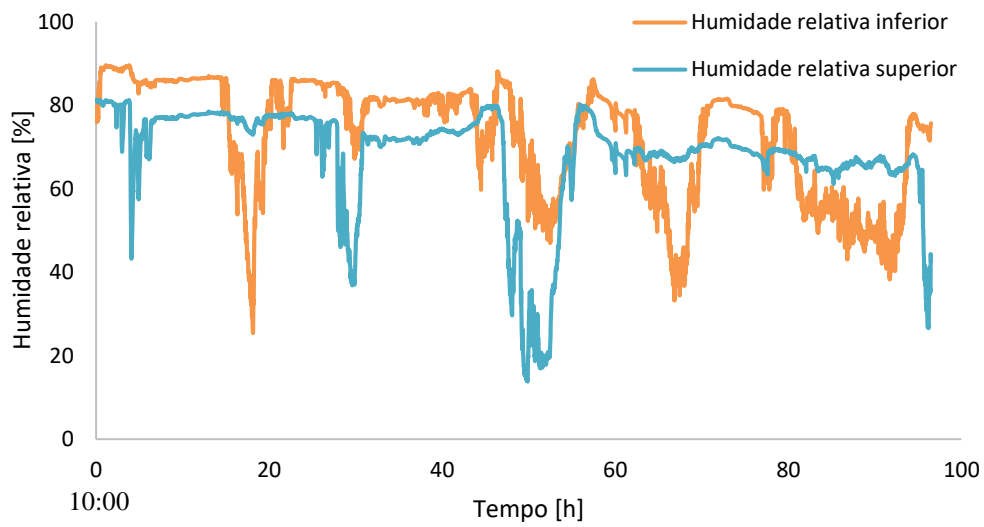
	Início do ciclo		Fim do ciclo	
	Biomassa com casca	Biomassa sem casca	Biomassa com casca	Biomassa sem casca
Teor de humidade na base húmida (%)	27,09	26,73	17,98	16,52
Teor de humidade na base seca (%)	37,15	36,49	21,92	19,79

O teor de humidade da tabela anterior foi expresso de duas formas distintas, base húmida e base seca; a percentagem na base húmida, foi obtida através do quociente entre a variação da massa do processo de secagem e a massa inicial, enquanto que a percentagem na base seca obteve-se através do quociente entre a variação de massa e a massa final, conforme é possível observar através das Equações 5.1 e 5.2. De notar, que o teor de humidade na base seca é superior ao teor de humidade na base húmida, uma vez que no processo de secagem a massa final é sempre inferior à massa inicial da matéria-prima.

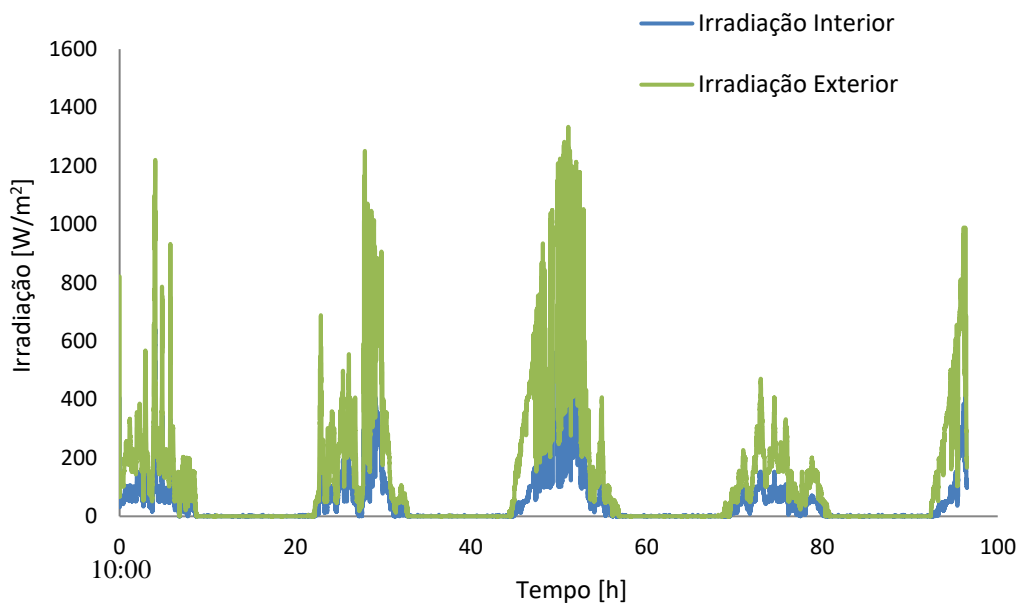
Durante o período de secagem, foram registados os valores das temperaturas, da humidade e da irradiação, Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, respetivamente.

**Figura 5.5-** Temperaturas registadas durante o período de secagem (1º ciclo de secagem).

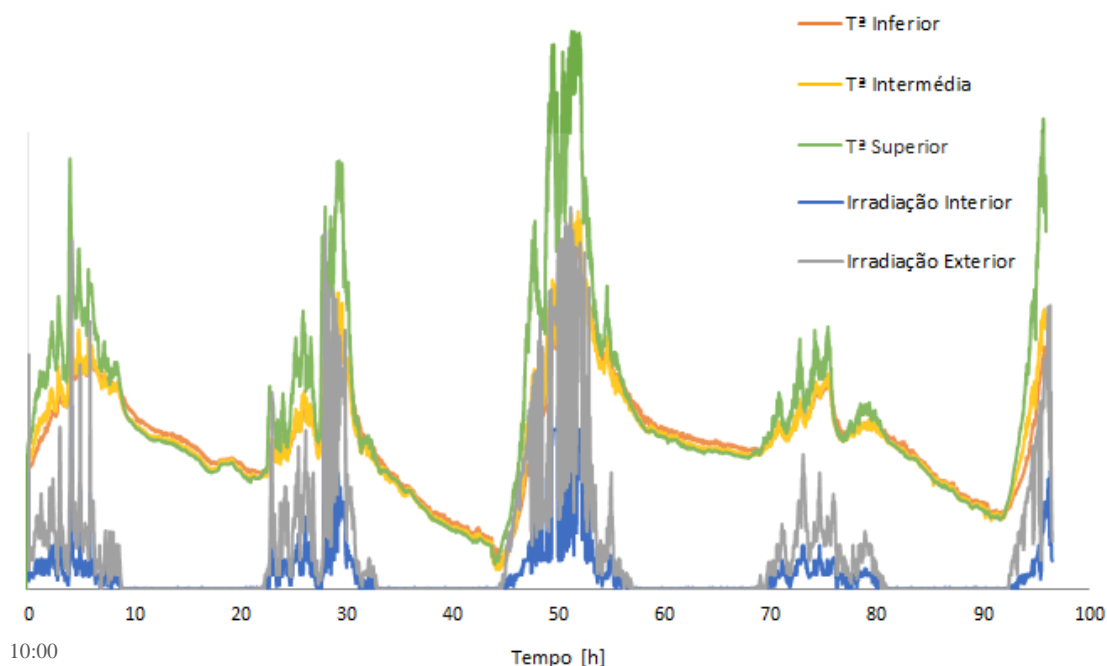
## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*



**Figura 5.6-** Umidades registadas durante o período de secagem (1º ciclo de secagem).



**Figura 5.7-** Irradiação registada durante o período de secagem (1º ciclo de secagem).



**Figura 5.8-** Sobreposição dos gráficos das temperaturas e da irradiação (1º ciclo de secagem).

Observando o gráfico das humidades, Figura 5.6, é de notar o elevado teor de humidade existente na zona superior e inferior da estufa solar; tal é justificado pelas condições climáticas adversas durante o período de secagem, uma vez que a humidade exterior era elevada, o teor de humidade medido dentro da estufa era igualmente superior. Os picos observados resultam da variação das temperaturas na estufa ao longo do dia.

A Figura 5.8 representa a sobreposição dos gráficos das temperaturas e da irradiação. É possível observar um comportamento idêntico para ambos, sendo que desta forma se pode concluir que as temperaturas possuem uma forte dependência da radiação incidente na estufa.

### 5.2.2 Segundo ciclo de secagem

O segundo ciclo de secagem foi efetuado igualmente na primavera, mas em condições climáticas opostas ao primeiro ciclo, ou seja, agora com tempo quente e seco.

A matéria utilizada para o segundo ciclo de secagem foi colhida no mesmo dia da matéria utilizada no primeiro ciclo, pelo que a humidade inicial desta era relativamente mais baixa. Tal é justificado pelo facto de a matéria-prima não ter sido condicionada em sacos herméticos, não permitindo a conservação da sua humidade, antes de se colocar na estufa solar.

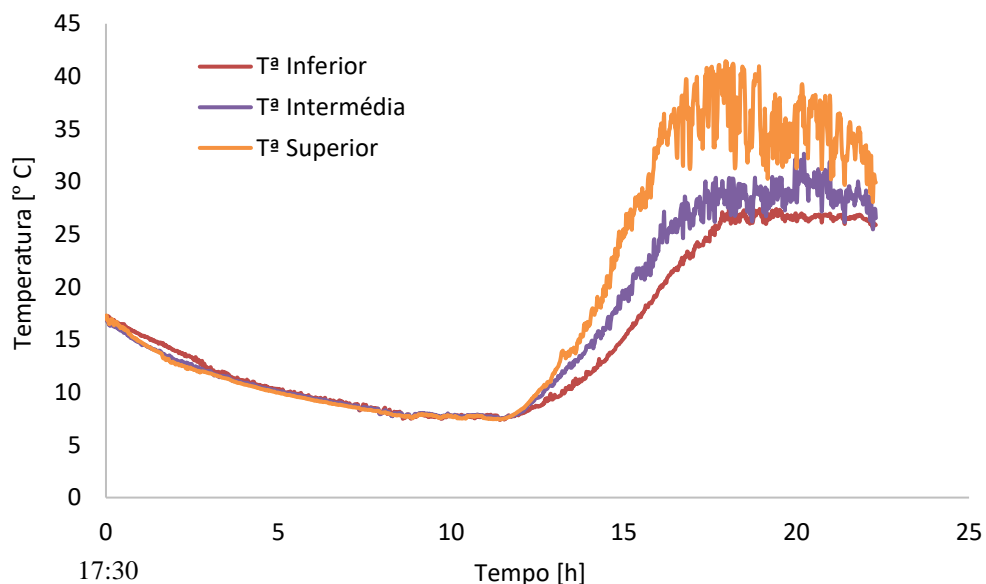
Para o controlo da humidade do segundo ciclo, foram igualmente retiradas duas amostras da estufa solar, uma com casca e outra sem, conforme é possível observar na Tabela 5.2.

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

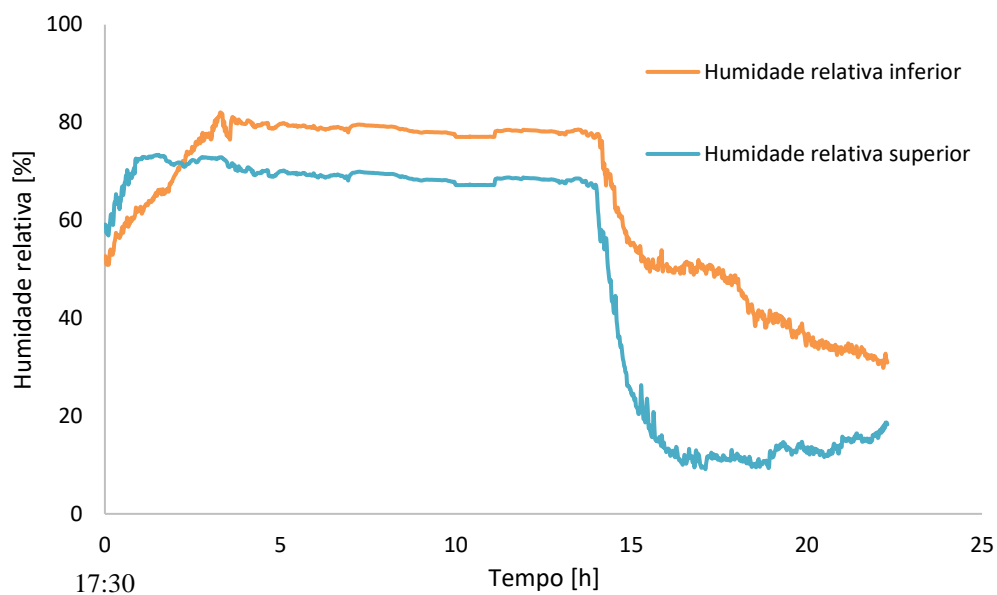
**Tabela 5.2-** Teor de humidade inicial e final da *Acacia dealbata* durante o 2º ciclo de secagem.

	Início do ciclo		Fim do ciclo	
	Biomassa com casca	Biomassa sem casca	Biomassa com casca	Biomassa sem casca
Teor de humidade na base húmida (%)	24,43	22,27	12,35	10,09
Teor de humidade na base seca (%)	32,33	28,66	14,09	11,22

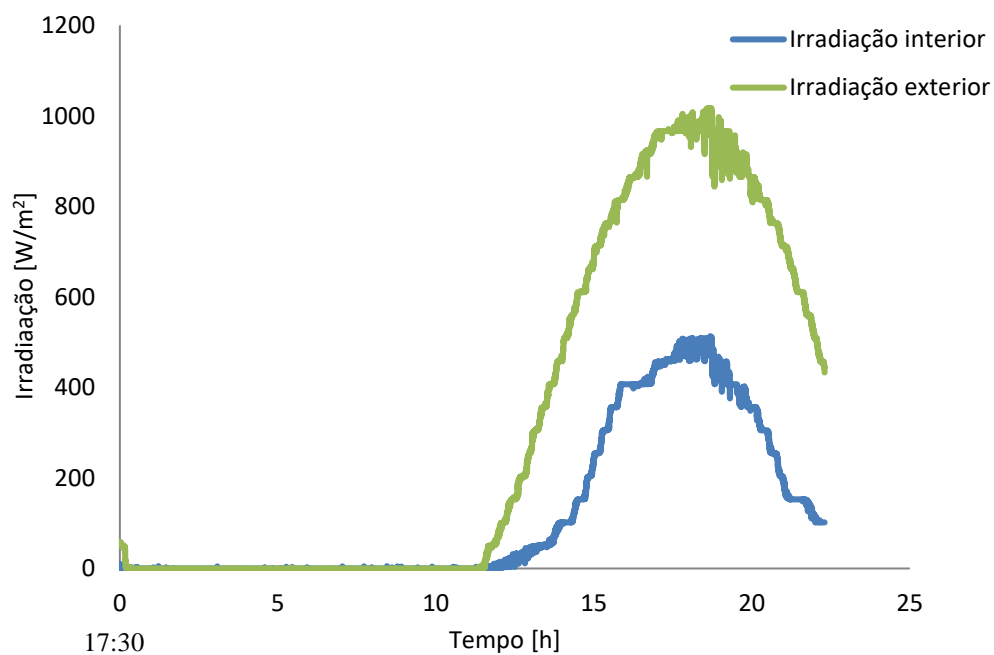
O período de secagem para o 2º ciclo foi inferior ao período requerido para o 1º ciclo, sendo que para este foram igualmente retirados os valores das temperaturas, humidades e irradiação, Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, respetivamente.



**Figura 5.9-** Temperaturas registadas durante o período de secagem (2º ciclo de secagem).



**Figura 5.10-** Umidades registradas durante o período de secagem (2º ciclo de secagem).



**Figura 5.11-** Irradiação registrada durante o período de secagem (2º ciclo de secagem).

Para o segundo ciclo de secagem o comportamento obtido para as temperaturas, umidades e irradiação foi idêntico ao descrito acima para o primeiro ciclo.

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

### 5.3 Destroçamento

Após a secagem da matéria-prima procedeu-se ao seu destroçamento. Este foi efetuado com o recurso a um moinho de navalhas, *Retsch SM100*, existente no Laboratório de Termodinâmica e Transferência de Calor da ESTGV, Figura 5.12, utilizando um crivo de 10 mm de furos quadrados.



**Figura 5.12-** Moinho de navalhas laboratorial.

### 5.4 Caracterização da matéria-prima

A caracterização da matéria-prima consiste na determinação de algumas propriedades físicas, químicas e físico-químicas. Dentro das propriedades físicas temos a massa volúmica, o poder calorífico superior e inferior, entre outras; as propriedades químicas fornecem informações relativas aos compostos químicos, tais como, celulose, hemicelulose, lenhina, extrativos, cinzas e outras características relativas aos carboidratos e lenhina. Para as físico-químicas temos a análise granulométrica, o teor de humidade, entre outras propriedades (Brienzo, 2015). Neste trabalho limitou-se a caracterização à verificação do teor de humidade e à análise granulométrica, uma vez que são parâmetros críticos para a peletização.

#### 5.4.1 Teor de humidade

Após o destroçamento da *Acacia dealbata* foram retiradas três amostras de forma a determinar o seu teor de humidade, conforme se encontra descrito no ponto 5.2. Numa fase

inicial, apenas se procedeu à peletização da *Acacia*, estando o teor de humidade da matéria-prima respetiva representado na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3-** Teor de humidade da *Acacia dealbata* antes da peletização.

<i>Acacia dealbata</i>	
Teor de humidade na base húmida (%)	32,09
Teor de humidade na base seca (%)	48,32

Para se proceder à peletização das misturas de *Acacia dealbata* e de *Pinus Pinaster*, foram analisadas as humidades das duas espécies em separado; após as misturas se encontrarem feitas, foi igualmente analisado o teor de humidade de cada uma. Foram retiradas três amostras de cada uma das espécies e misturas. Na Tabela 5.4 encontram-se representados os valores do teor de humidade médio correspondente a essas mesmas amostras.

**Tabela 5.4-** Teor de humidade da matéria-prima antes da peletização.

	<i>Acacia dealbata</i>	<i>Pinus Pinaster</i>	25% <i>Acacia dealbata</i> /75% <i>Pinus Pinaster</i>	50% <i>Acacia dealbata</i> /50% <i>Pinus Pinaster</i>	75% <i>Acacia dealbata</i> /25% <i>Pinus Pinaster</i>
Teor de humidade na base húmida (%)	13,57	12,93	12,97	12,88	12,71
Teor de humidade na base seca (%)	15,71	14,84	14,91	14,79	14,56

#### 5.4.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica baseia-se na separação de uma amostra em tamanhos de partículas diferentes, com recurso a um conjunto de peneiros. Recorre-se, para tal, a um agitador de peneiros, que permite a separação das partículas da amostra através da vibração; as partículas vão atravessando os peneiros maiores, até atingirem um peneiro onde fiquem retidas (GEA, 2015).

Na Figura 5.13 encontra-se uma fotografia do agitador de peneiros mecânico utilizado para efetuar a separação das amostras, um equipamento vibratório com a referência *AS 200 Control*, da marca *Retsch*.

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

Cada teste efetuado teve a duração de 10 minutos e uma amplitude de vibração de 1,50 mm.



**Figura 5.13** – Agitador de peneiros *Retsch*.

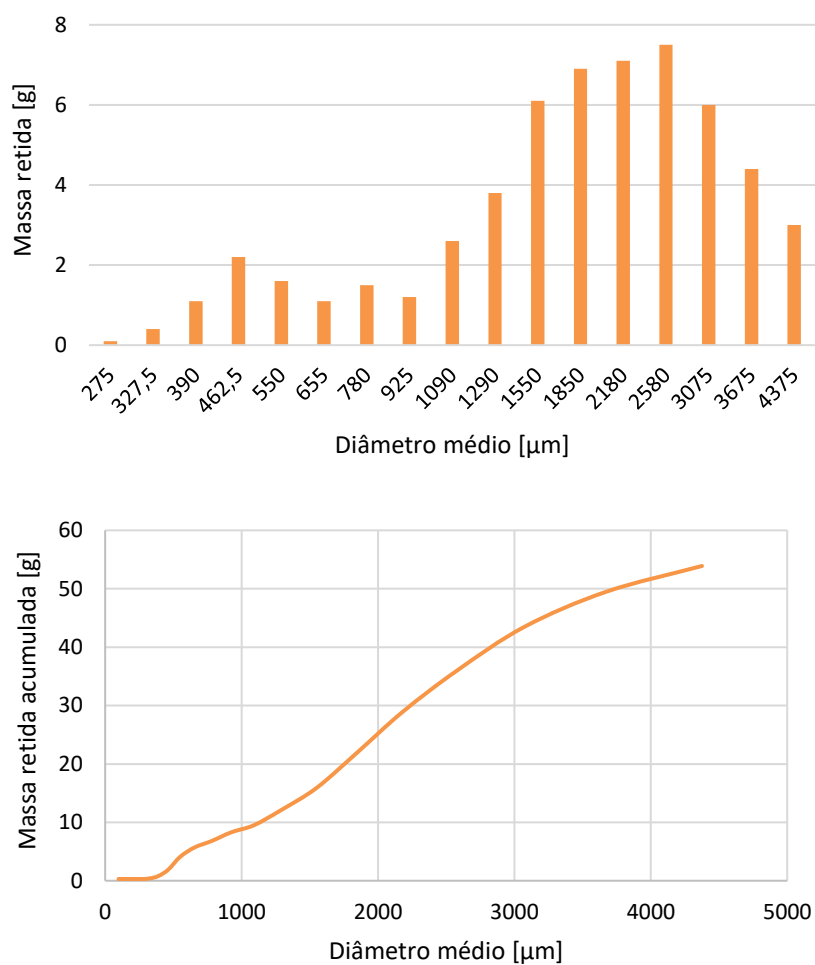
De forma a determinar a distribuição mássica de cada amostra, procedeu-se à pesagem da massa retida em cada peneiro. Foram efetuados três testes para cada uma das espécies e misturas de espécies em estudo. Posteriormente, foi feito o tratamento das amostras e calculado o diâmetro médio das partículas através da Equação 5.3 (Kunii, et al., 1969):

$$d_p = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (5.3)$$

onde  $x_i$  representa a fração mássica das partículas do material retido no intervalo de tempo  $i$  e  $d_{pi}$  a média aritmética do espaçamento das malhas de dois peneiros consecutivos (m).

Nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18, é possível observar a representação da distribuição granulométrica da amostra 1, para as espécies e misturas de espécies em estudo, sendo que a representação das amostras 2 e 3 se encontra no Apêndice A.

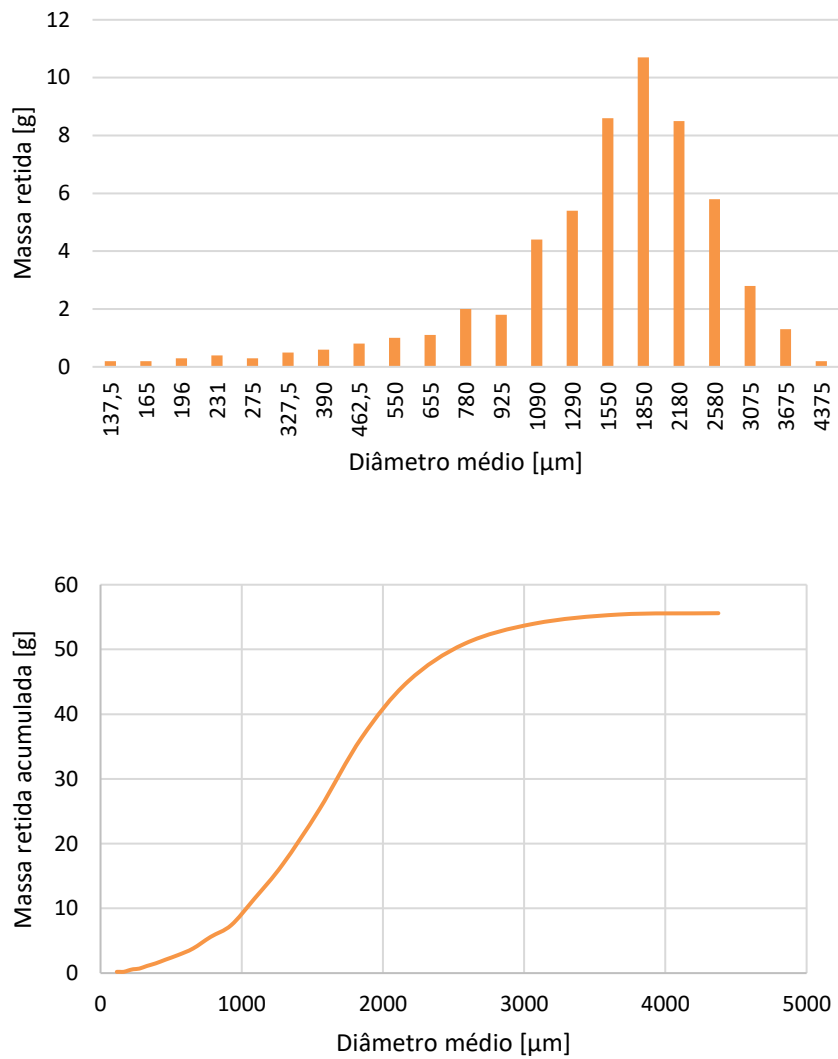
Das três amostras de *Acacia dealbata* foi obtido um diâmetro médio de 1495  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.14-** Distribuição granulométrica da amostra 1 de *Acacia dealbata*.

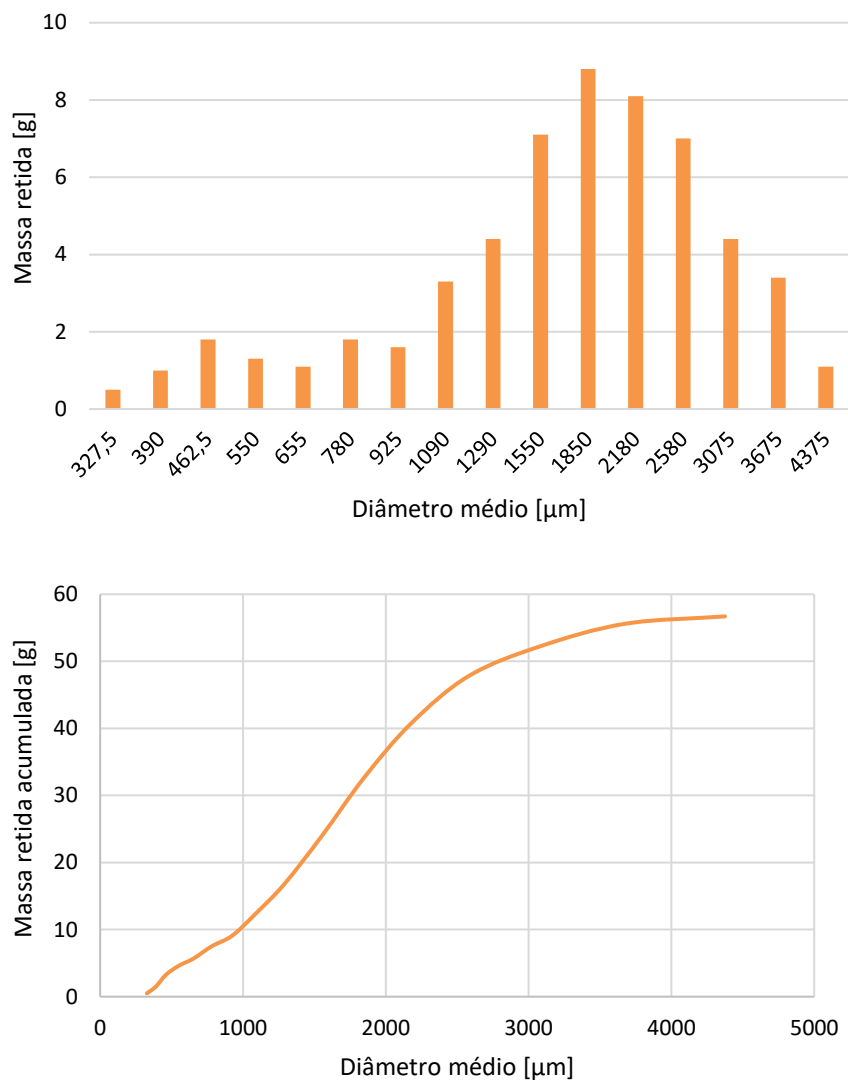
## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

Das três amostras de *Pinus Pinaster* foi obtido um diâmetro médio de 1265  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.15-** Distribuição granulométrica da amostra 1 de *Pinus Pinaster*.

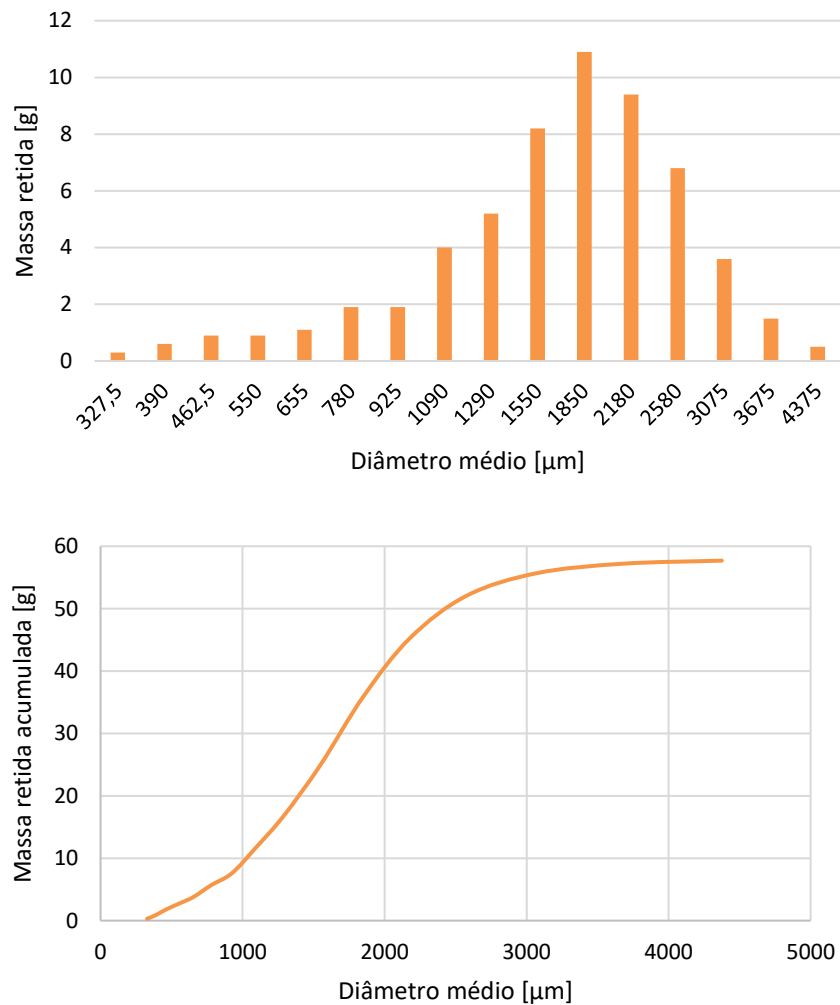
Para a mistura ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’, das três amostras foi obtido um diâmetro médio de 1396  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.16-** Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’.

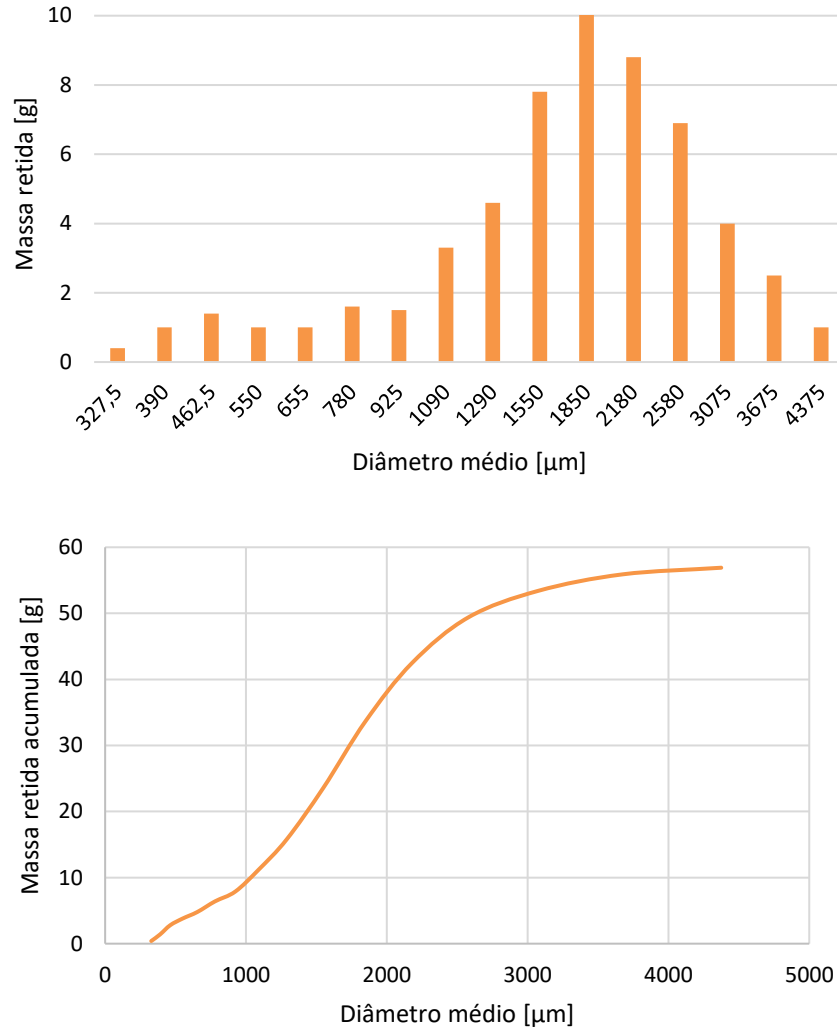
## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

Para a mistura '50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*', das três amostras foi obtido um diâmetro médio de 1431  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.17-** Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura '50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*'.

Para a mistura ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’, das três amostras foi obtido um diâmetro médio de 1455  $\mu\text{m}$ .



**Figura 5.18-** Distribuição granulométrica da amostra 1 da mistura ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’.

Através da observação dos gráficos anteriores e dos gráficos presentes no Apêndice A, é possível concluir que as amostras das espécies e misturas em estudo possuem um carácter bimodal, uma vez que os gráficos apresentam duas modas distintas, ou seja, dois picos diferentes (Jacques, 2003); o carácter bimodal é resultado da distribuição assimétrica da granulometria e da mistura de duas distribuições com modas diferentes (Lopes, 2003). Tal pode comprometer o desempenho dos péletes produzidos (Jordan, et al., 2016). A *Acacia dealbata*

## 5. Pré-tratamento da espécie *Acacia Dealbata*

foi a espécie que demonstrou um carácter bimodal mais acentuado, face às restantes amostras tratadas.

## 6. Peletização

Para o processo de peletização foi utilizada uma peletizadora da marca *AGP International*, modelo *GK5500*, Figura 6.1, que se encontrava no Laboratório de Termodinâmica e Transferência de Calor da ESTGV. A produção dos péletes foi efetuada com recurso a uma matriz de 6 mm, de forma a produzir péletes com esse diâmetro. O processo foi realizado com monitorização de temperatura e pressão.



**Figura 6.1-** Peletizadora utilizada no trabalho experimental.

Este processo consiste num aquecimento antecipado da matriz até aproximadamente 90 ° C, de modo a garantir uma temperatura adequada para a fusão da lenhina e para a agregação dos compostos da madeira. Após a produção dos péletes seguiu-se o seu arrefecimento natural; estes foram colocados numa superfície ao ar livre, durante um período de 24 horas.

Foram produzidos péletes de *Acacia dealbata* e péletes resultantes das misturas de *Acacia* e Pinho, com ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’, ‘50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*’ e ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’.

## 6. Peletização



**Figura 6.2-** Amostra de péletes produzidos.

A partir da Figura 6.2 é possível observar uma amostra de péletes produzidos para a mistura ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’.

### **6.1 Testes de qualidade efetuados aos péletes**

Foram efetuados alguns testes de qualidade aos péletes comerciais de Pinho e aos péletes produzidos, de forma a ser possível avaliar as características dos mesmos. Os resultados obtidos foram comparados com os valores estabelecidos pela norma EN ISO 17225-2:2014.

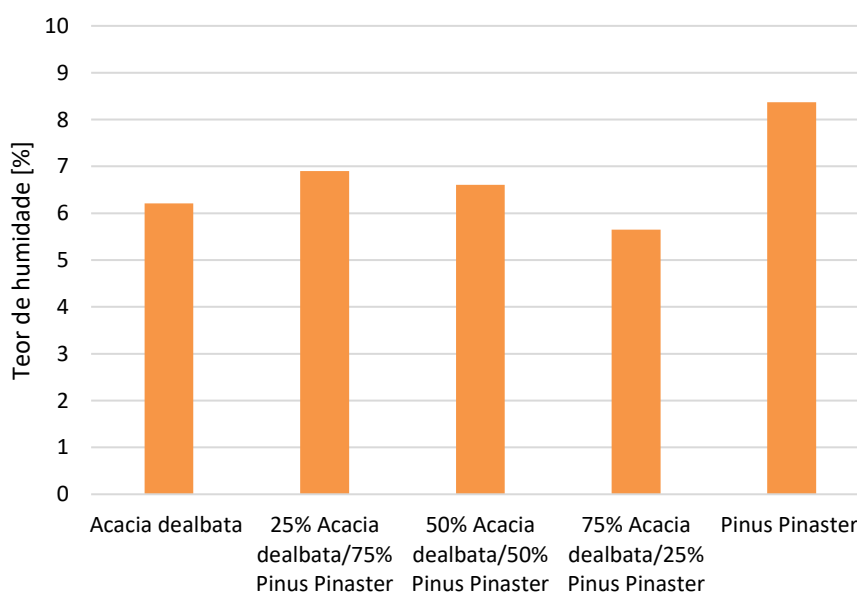
#### **6.1.1 Teor de humidade**

Após a produção dos péletes, estes foram colocados em cadinhos dentro da estufa laboratorial, Figura 6.3, de modo a controlar o teor de humidade das amostras. Segundo a norma descrita acima, o valor do teor de humidade na base húmida tem que ser  $\leq 10\%$ .



**Figura 6.3-** Processo de secagem dos péletes em estufa laboratorial.

Na figura seguinte, Figura 6.4, encontra-se representado o teor de humidade (base húmida) dos péletes estudados.



**Figura 6.4-** Teor de humidade dos péletes estudados.

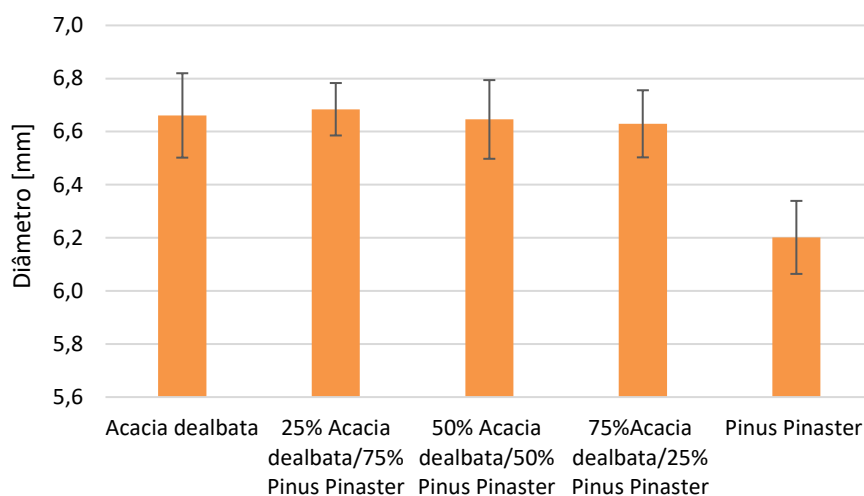
Os péletes encontravam-se todos de acordo com a norma, uma vez que apresentavam valores inferiores a 10% para o teor de humidade.

## 6. Peletização

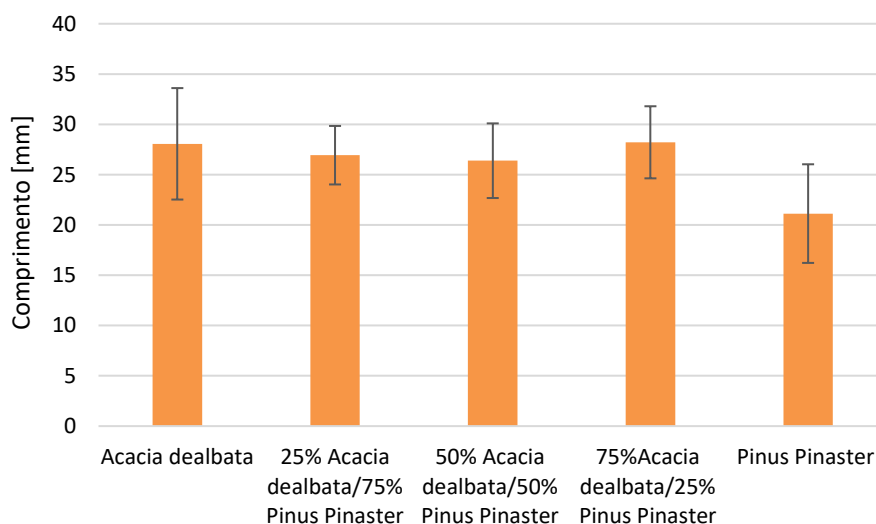
### 6.1.2 Dimensões

De acordo com a norma, 20 amostras aleatórias de cada tipo de péletes foram selecionadas e foram medidos os seus comprimentos e diâmetros, com recurso a um paquímetro digital; este processo foi repetido três vezes para cada, sendo posteriormente calculados o volume médio e a massa volúmica média.

Segundo a norma, o diâmetro dos péletes deve situar-se entre 6 a 8 mm e o seu comprimento entre 3,15 e 40 mm.



**Figura 6.5-** Diâmetro médio dos péletes e correspondente desvio padrão.



**Figura 6.6-** Comprimento médio dos péletes e correspondente desvio padrão.

Como é possível observar através dos gráficos anteriores, Figura 6.5 e Figura 6.6, o diâmetro médio e o comprimento médio dos péletes encontravam-se dentro da gama de valores estabelecidos pela norma. Os péletes produzidos tinham um diâmetro médio de 6,66 mm.

### 6.1.3 Massa volúmica

O valor da massa volúmica pode ser determinado utilizando o método das dimensões (Raiber, et al., 2006).

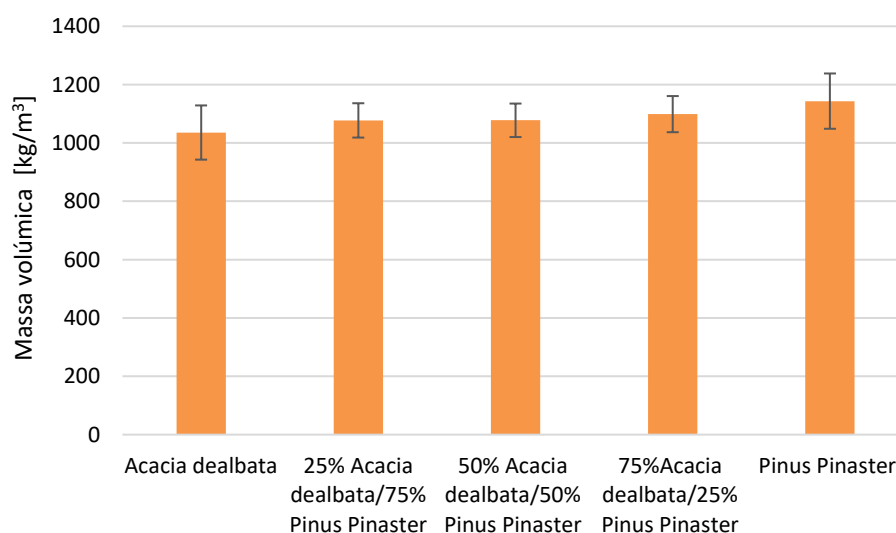
Segundo este método, a massa volúmica da unidade pode ser calculada dividindo a sua massa pelo seu volume; o valor da massa foi obtido por uma balança analítica e o volume calculado através das dimensões dos péletes.

$$\rho_{pélete} = \frac{m_{pélete}}{V_{pélete}} \quad (6.1)$$

onde,

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

em que  $m_{pélete}$  corresponde à massa de um pélete (kg),  $D$  representa o seu diâmetro (m) e  $h$  o comprimento (m).



**Figura 6.7-** Massa volúmica média dos péletes e correspondente desvio padrão.

Através da Figura 6.7 é possível observar a massa volúmica média dos péletes obtida.

## 6. Peletização

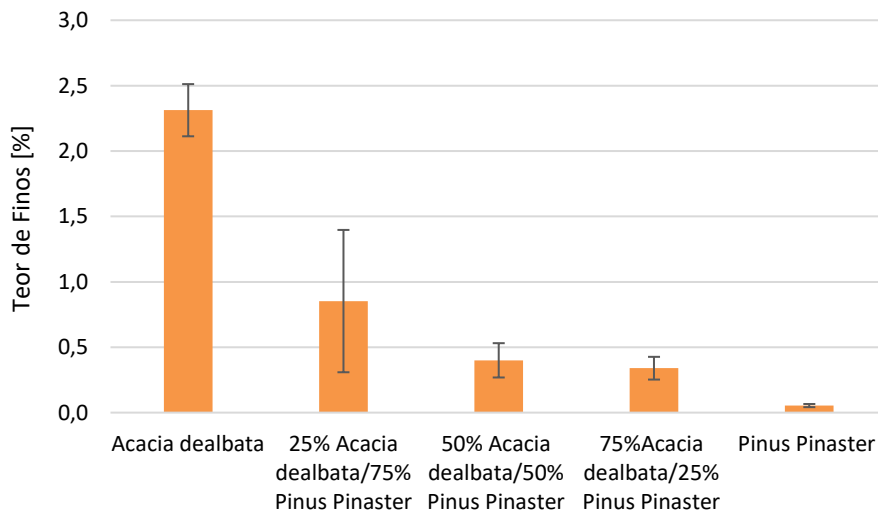
### 6.1.4 Teor de finos

O teor de finos foi determinado de acordo com a norma EN 15210-1:2009. Três amostras de cada tipo de péletes foram pesadas e peneiradas manualmente com um peneiro de 3,35 mm. Apesar da norma ISO 3310-1:2000 referenciar o uso de um peneiro de 3,15 mm, este não se encontrava disponível no laboratório; desta forma foi utilizado um peneiro de 3,35 mm.

Após o processo de peneiração, pesou-se o material e calculou-se o teor de finos de acordo com a Equação 6.3.

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

onde  $m_{\text{finos}}$  representa a massa de finos (kg) e  $m_{\text{inicial}}$  a massa inicial da amostra (kg).



**Figura 6.8-** Teor de finos dos péletes e correspondente desvio padrão.

Através do gráfico anterior, Figura 6.8, é possível observar que das espécies e misturas de espécies estudadas, apenas a *Acacia dealbata* não apresentava um teor de finos  $\leq 1\%$ , conforme é referenciado pela norma.

### 6.1.5 Durabilidade mecânica

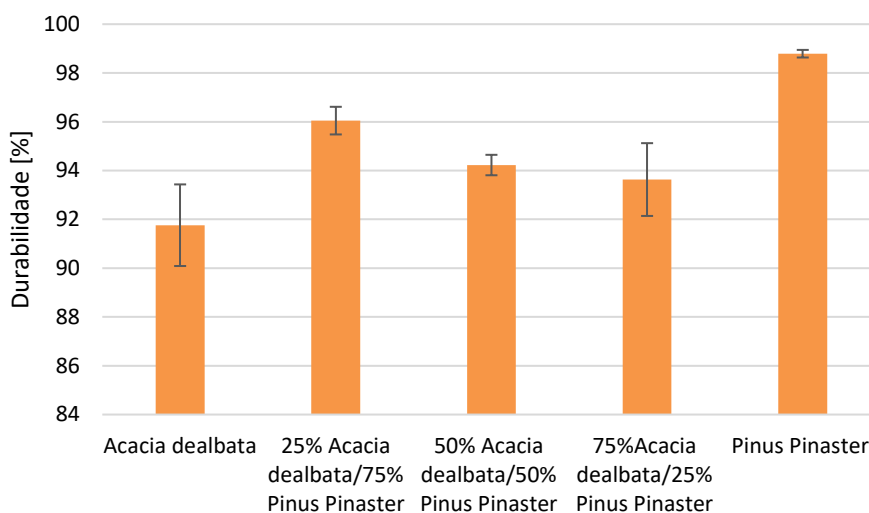
Este parâmetro é determinado segundo a norma ASAE S 269.5:2012. Esta descreve a utilização de um recipiente metálico, com dimensões de 300×300×1259 mm e um defletor com 230×50 mm (Temmerman, et al., 2006). Para se obterem os seus resultados, colocou-se uma amostra de 500±10g dentro do recipiente, a uma velocidade de 50 rpm, ou seja, 500 rotações

num período de 10 minutos. Foi efetuada uma peneiração manual antes e depois de cada ensaio, com recurso a um peneiro de 3,35 mm, sendo pesada a massa retida neste. Foram realizados três ensaios de durabilidade para cada um dos tipos de péletes produzidos.

A durabilidade dos péletes foi obtida através da Equação 6.4.

$$Du (\%) = \frac{m_{péletes\ final}}{m_{péletes\ inicial}} \times 100 \quad (6.4)$$

onde  $m_{péletes\ final}$  representa a massa de péletes final (kg) e  $m_{péletes\ inicial}$  a massa de péletes inicial (kg).



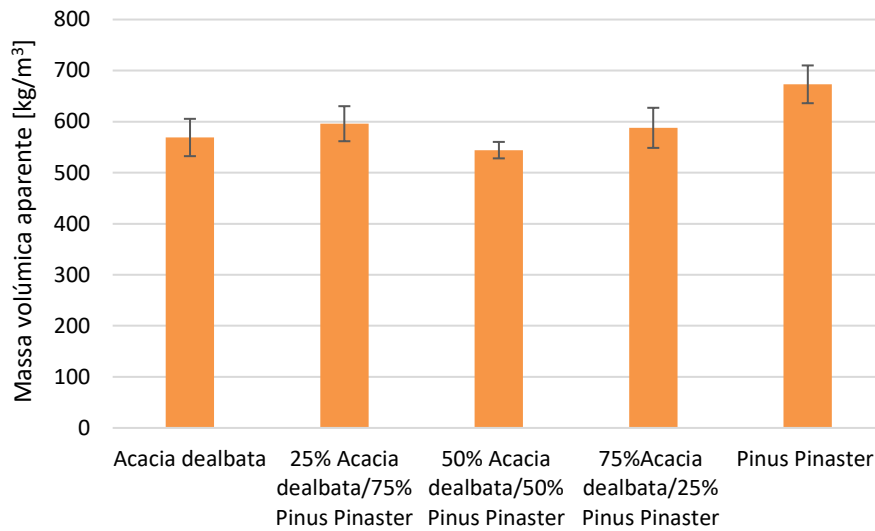
**Figura 6.9-** Durabilidade mecânica dos péletes e correspondente desvio padrão.

Para os péletes se encontrarem de acordo com a norma, a durabilidade destes necessita de ser superior ou igual a 98,0%. Como é possível observar através da Figura 6.9, de entre os péletes estudados, apenas os péletes comerciais de Pinho cumprem estes requisitos. Os péletes de *Acacia* são os que possuem menor durabilidade, cerca de 92%.

## 6. Peletização

### 6.1.6 Massa volúmica aparente

Segundo a norma, a massa volúmica aparente (BD) dos péletes deve situar-se entre a gama de valores  $600 \leq BD \leq 750$  (kg/m<sup>3</sup>).



**Figura 6.10-** Massa volúmica aparente dos péletes e correspondente desvio padrão.

Através da Figura 6.10 é possível observar que apenas os péletes de *Pinus Pinaster* se encontram de acordo com os valores estabelecidos pela norma.

## 7. Resultados e discussão

No presente capítulo encontram-se apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados aos diferentes tipos de péletes; são avaliadas as emissões de poluentes resultantes da combustão e o rendimento térmico da caldeira nas três cargas estudadas.

### 7.1 Procedimento de cálculo

O cálculo do rendimento térmico da caldeira foi efetuado com base nos dados obtidos em regime permanente. O período correspondente ao regime permanente foi considerado a partir do instante em que a temperatura de saída da água se mantinha aproximadamente constante.

O cálculo do rendimento térmico da caldeira foi efetuado de acordo com a Equação 7.1 (Pinto, 2015).

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{\dot{Q}_{\text{transf. água}}}{\dot{Q}_{\text{fornecida}}} \times 100 \quad (7.1)$$

onde  $\dot{Q}_{\text{transf. água}}$  representa a potência térmica transferida para a água durante o ensaio (kW) e  $\dot{Q}_{\text{fornecida}}$  a potência térmica libertada durante o processo de combustão dos péletes (kW).

A potência fornecida à caldeira durante a combustão foi calculada pela Equação 7.2 (Pinto, 2015).

$$\dot{Q}_{\text{fornecida}} = \dot{m}_{\text{péletes}} \times PCI_{\text{péletes}} \quad (7.2)$$

em que  $\dot{m}_{\text{péletes}}$  representa o caudal mássico de péletes (kg/s) e  $PCI_{\text{péletes}}$  o poder calorífico inferior dos péletes (kJ/kg).

Para o cálculo da potência térmica transferida para a água recorreu-se à Equação 7.3 (Pinto, 2015).

$$\dot{Q}_{\text{transf. água}} = \dot{m}_{\text{água}} \times \bar{c}_{H_2O} \times (T_{\text{água saída}} - T_{\text{água entrada}}) \quad (7.3)$$

onde  $\dot{m}_{\text{água}}$  representa o caudal mássico de água (kg/s),  $\bar{c}_{H_2O}$  o calor específico da água à temperatura média (kJ/(kg-K)),  $T_{\text{água entrada}}$  a temperatura da água à entrada da caldeira (° C) e  $T_{\text{água saída}}$  a temperatura da água à saída da caldeira (° C).

Durante o processo de combustão, parte da energia térmica libertada foi transferida para a água, a restante corresponde às perdas pela chaminé, por radiação e convecção; apesar da

## 7. Resultados e discussão

existência de perdas por radiação e convecção, estas não foram calculadas no presente trabalho. A potência térmica fornecida à caldeira durante a combustão é também possível obter através da Equação 7.4.

$$\dot{Q}_{fornecida} = \dot{Q}_{transf\ água} + \dot{Q}_{chaminé} + \dot{Q}_{conv+rad} \quad (7.4)$$

onde  $\dot{Q}_{chaminé}$  representa as perdas pela chaminé (kW) e  $\dot{Q}_{conv+rad}$  as perdas por convecção e radiação (kW).

As perdas pela chaminé incluem as perdas inerentes à corrente dos gases de combustão, as perdas por não queimados e as perdas associadas à humidade do combustível.

As perdas associadas à corrente dos gases de combustão foram calculadas através da Equação 7.5 (Pinto, 2015).

$$\dot{Q}_{gases} = [(nM\bar{c}_p)_{H_2O} + (nM\bar{c}_p)_{CO_2} + (nM\bar{c}_p)_{CO} + (nM\bar{c}_p)_{O_2} + (nM\bar{c}_p)_{N_2}] \times \dot{m}_{péletes}(T_{gases} - T_{amb}) \quad (7.5)$$

em que  $n$  representa o número de kmol do produto por kg de combustível (kmol/kg),  $M$  a massa molecular (kg/kmol),  $\bar{c}_p$  o calor específico mássico do produto em questão à temperatura média (kJ/(kg-K)),  $T_{gases}$  a temperatura dos gases de combustão (° C) e  $T_{amb}$  a temperatura do ar ambiente (° C).

As perdas térmicas associadas aos gases não-queimados, alusivas ao CO não queimado no estado gasoso e sólido, foram calculadas de acordo com a Equação 7.6 (Pinto, 2015).

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{m}_{CO} \times PCI_{CO} \quad (7.6)$$

onde  $\dot{m}_{CO}$  representa o caudal mássico de CO (kg/s) e  $PCI_{CO}$  o poder calorífico inferior do CO (kJ/kg).

O cálculo das perdas associadas à humidade dos péletes foi efetuado segundo a Equação 7.7 (Pinto, 2015).

$$\dot{Q}_{humidade} = \dot{m}_{péletes} H_{bh} [\bar{c}_{H_2O}(100 - T_{amb}) + h_{lv} + \bar{c}_{H_2O}(T_{gases} - 100)] \quad (7.7)$$

em que  $h_{lv}$  representa a entalpia latente de vaporização da água (kJ/kg).

O excesso de ar foi calculado de acordo com a Equação 7.8, sendo esta representativa da relação entre o excesso de ar e as concentrações de O<sub>2</sub> e de CO<sub>2</sub> nos produtos de combustão, medidas pelo analisador (Pinho, 2015).

$$e(\%) = \frac{100 \times \frac{\tau_{N_2}}{\tau_{O_2}}}{\frac{100 - (\alpha + \Omega)}{\Omega} \frac{\tau_{N_2}}{\tau_{O_2}}} \quad (7.8)$$

onde  $\alpha$  representa o volume na base seca de CO<sub>2</sub> (%),  $\Omega$  o volume na base seca de O<sub>2</sub> (%) e a razão  $\frac{\tau_{N_2}}{\tau_{O_2}} = 3,76$ .

## 7.2 Ensaios Experimentais

Os ensaios experimentais foram realizados apenas em três das cinco cargas disponíveis pela caldeira, nível 1, 3 e 5, sendo que a unidade funcional foi o tempo.

De forma a comparar os ensaios realizados para os diferentes tipos de péletes, as condições de utilização da caldeira foram semelhantes para todos os casos.

Durante os ensaios o caudal de alimentação do combustível e o caudal de ar fornecido encontravam-se de acordo com os valores indicados pelo fabricante da caldeira (Pinto, 2015).

A partir da Tabela 7.1, é possível observar os valores médios obtidos durante os ensaios, para o regime permanente.

**Tabela 7.1-** Ensaios realizados aos diferentes tipos de péletes em estudo.

Espécie	Caudal de péletes [kg/h]	Potência térmica [kW]	Caudal de água [l/min]	Potência transferida para a água [kW]	Rendimento térmico [%]
<b>Carga 1</b>					
<i>Pinus Pinaster</i>	0,98	5,11	12,95	2,84	55,50%
<i>Acacia dealbata</i>	0,83	4,32	13,82	2,20	51,22%
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	1,19	5,62	13,22	3,07	54,91%
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	1,17	5,68	13,42	3,09	54,41%
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	0,96	4,80	13,04	2,57	53,44%

## 7. Resultados e discussão

<b>Carga 3</b>					
<i>Pinus Pinaster</i>	1,58	8,24	13,88	5,03	61,12%
<i>Acacia dealbata</i>	1,17	6,04	12,97	3,33	55,12%
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	1,74	8,20	13,58	4,79	58,48%
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	1,63	7,94	13,55	4,52	56,99%
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	1,46	7,32	13,02	4,07	55,53%
<b>Carga 5</b>					
<i>Pinus Pinaster</i>	2,62	13,66	14,18	8,81	64,49%
<i>Acacia dealbata</i>	2,67	13,86	13,72	7,91	57,12%
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	2,82	13,32	13,29	8,05	60,41%
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	2,72	13,23	13,02	7,83	59,16%
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	2,16	10,78	12,90	6,32	58,70%

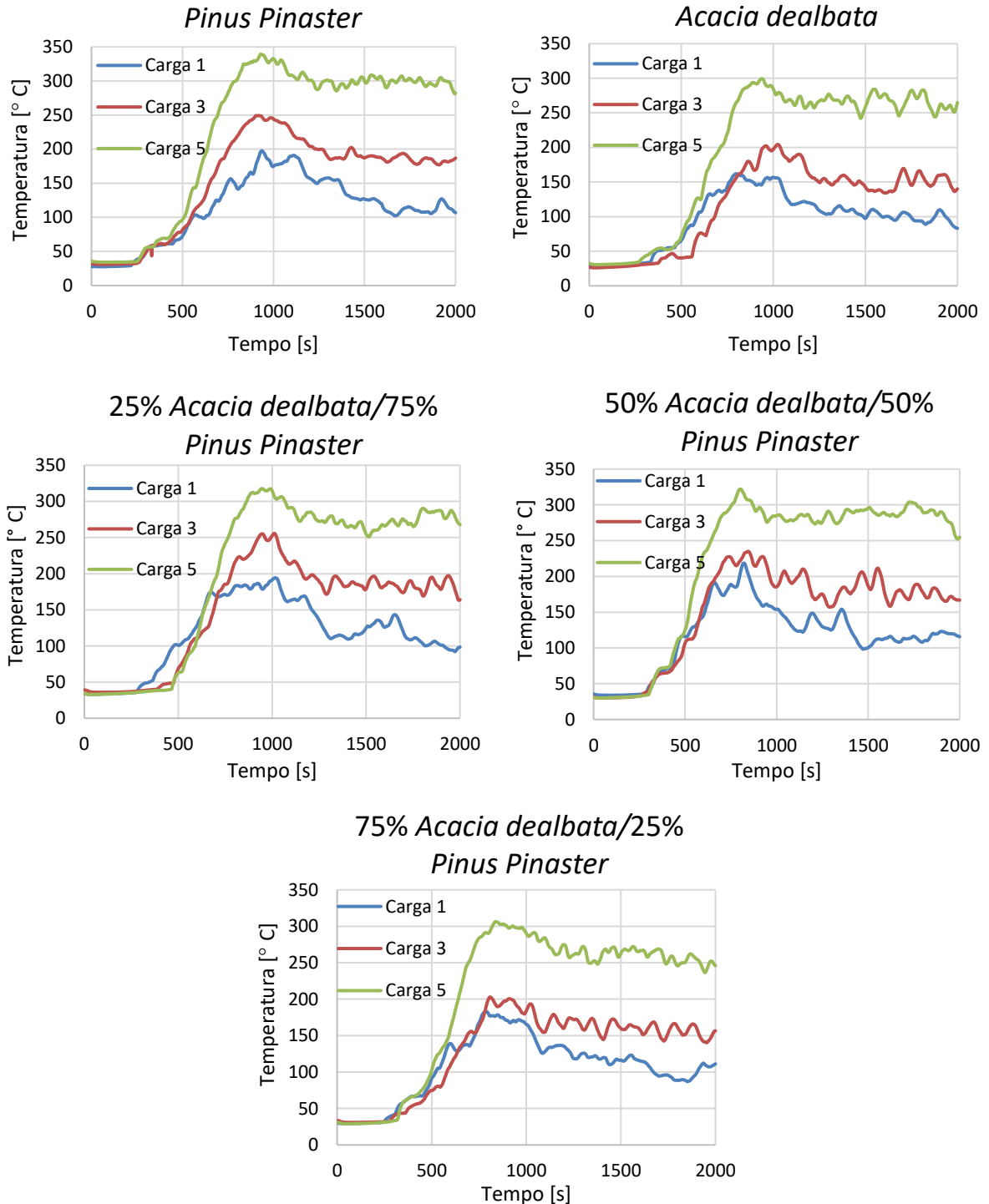
De modo a uniformizar os ensaios, tentou assegurar-se um valor idêntico para o caudal de água. Para esse caudal foi verificado um aumento da potência transferida para a água, para maiores valores de potência térmica da caldeira. Tal é justificado pelo aumento da temperatura da água à saída da caldeira para maiores cargas, aumentando assim a diferença entre as temperaturas da água à entrada e à saída da caldeira, levando a um aumento da potência transferida para esta.

Para o rendimento da caldeira, foi observado um aumento deste com o aumento da carga, sendo superior para os péletes comerciais de Pinho, nas três cargas estudadas. Sendo a *Acacia* a espécie que apresentou menores valores de rendimento, era esperado que a adição de uma maior percentagem desta nas misturas resultasse numa diminuição do rendimento; tal foi verificado nos ensaios realizados para as misturas, nas três cargas.

### 7.2.1 Fase de arranque

Devido às elevadas emissões de CO na fase de arranque da caldeira, o analisador apenas era ligado quando se atingia o regime permanente, sendo que no período de arranque apenas

foram monitorizados os dados das temperaturas dos gases de combustão e das temperaturas de entrada e de saída da água na caldeira.



**Figura 7.1-** Temperaturas dos gases de combustão para as três cargas durante a fase de arranque da caldeira.

## 7. Resultados e discussão

Através da Figura 7.1 é possível observar que na fase inicial dos ensaios, a temperatura dos gases de combustão se manteve constante, uma vez que a caldeira se encontrava numa fase de pré-carga de combustível e a resistência elétrica em aquecimento. Após esta fase, deu-se a combustão e verificou-se um aumento rápido da temperatura até ser atingido um pico. Devido aos parâmetros de estabilização da caldeira, observou-se uma ligeira descida de temperatura que tendeu para um valor aproximadamente constante.

Verificou-se que quanto maior a carga da caldeira, maiores eram as temperaturas que os gases de combustão atingiam. Tal é justificado pela diminuição da disponibilidade de ar com o aumento do caudal de péletes consumido, o que leva a um incremento da temperatura na câmara de combustão, aumentando a temperatura dos gases de combustão.

### 7.2.2 Regime permanente

Quando as temperaturas se encontravam aproximadamente constantes, regime permanente, o analisador de gases era ligado de modo a obter a composição dos gases de combustão.

Na tabela seguinte, Tabela 7.2, estão representados os valores médios das emissões, corrigidas para 13% de O<sub>2</sub>, através da equação presente no ponto 4.3.4.

**Tabela 7.2-** Resultados obtidos em regime permanente.

Espécie	Caudal de péletes [kg/h]	Temperatura Gases de combustão [° C]	O <sub>2</sub> [% volume seco]	CO [ppm volume seco]	CO <sub>2</sub> [% volume seco]	NO <sub>x</sub> [ppm volume seco]
<b>Carga 1</b>						
<i>Pinus Pinaster</i>	0,98	109,55	19,80	5041,30	10,55	48,30
<i>Acacia dealbata</i>	0,83	88,60	20,06	11120,11	10,36	392,84
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	1,19	112,57	19,80	7481,79	10,47	154,77
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	1,17	108,91	19,79	7178,84	10,41	169,13
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	0,96	110,02	19,69	7388,31	9,80	247,52

<b>Carga 3</b>						
<i>Pinus Pinaster</i>	1,58	170,62	18,84	2398,17	9,43	67,03
<i>Acacia dealbata</i>	1,17	148,80	19,11	6425,83	9,29	397,53
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	1,74	173,24	18,90	4182,92	10,04	188,48
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	1,63	168,70	18,67	3663,07	9,27	203,74
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	1,46	159,50	18,55	4189,95	9,20	295,97
<b>Carga 5</b>						
<i>Pinus Pinaster</i>	2,62	271,36	16,28	213,19	9,28	100,27
<i>Acacia dealbata</i>	2,67	279,50	15,81	990,05	8,85	378,15
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	2,82	265,61	17,21	1547,79	9,15	203,94
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	2,72	266,33	16,16	937,73	8,90	215,72
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	2,16	224,53	15,93	899,96	8,89	306,47

Com o aumento da carga da caldeira foi possível constatar que existe um decréscimo da percentagem de O<sub>2</sub> nos gases de combustão, para todos os tipos de péletes. Conforme foi observado nos trabalhos de Ferreira (2013) e Pinto (2015), a caldeira não efetua o ajuste automático do caudal de ar, pelo que não existe uma quantidade de ar apropriada ao caudal de combustível correspondente. Um aumento do caudal mássico leva a uma necessidade de ar disponível para a combustão superior, diminuindo desta forma a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de combustão.

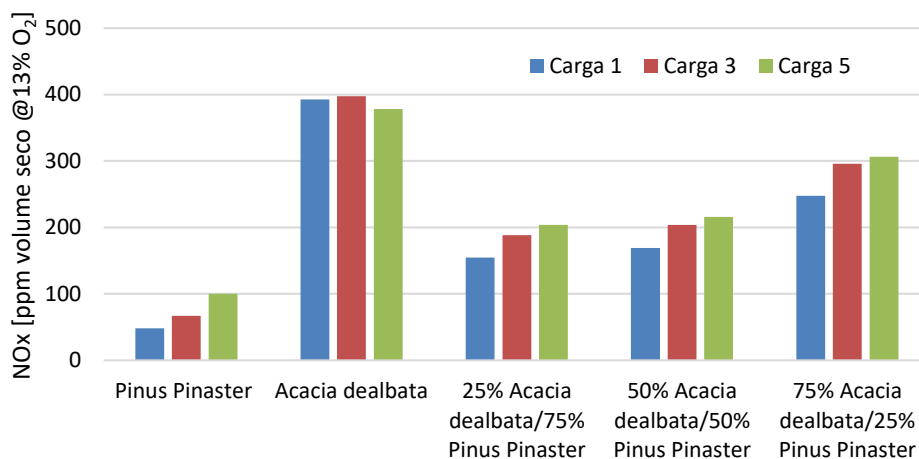
Verificou-se que a combustão era mais eficiente para cargas mais elevadas, uma vez que as emissões de CO diminuíam.

## 7. Resultados e discussão

Relativamente às emissões de NO<sub>x</sub> observou-se que quanto maior a potência térmica da caldeira, maiores as emissões deste poluente.

### 7.2.3 Influência da potência térmica nas emissões

Neste ponto encontram-se apresentadas as emissões de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, para todos os tipos de péletes.

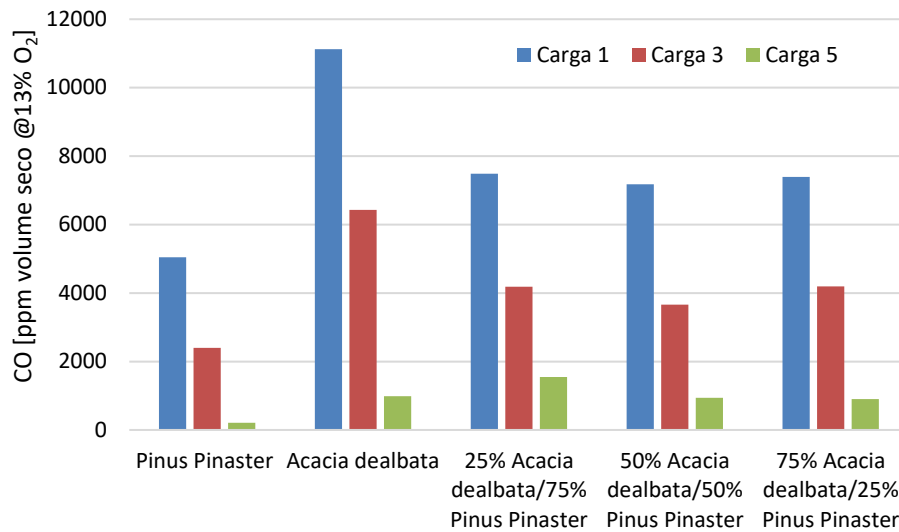


**Figura 7.2-** Emissões de NO<sub>x</sub> para os diferentes tipos de péletes.

A partir do gráfico anterior, Figura 7.2, é possível observar as emissões de NO<sub>x</sub> para os diferentes tipos de péletes e para as três cargas estudadas.

O NO<sub>x</sub> resulta da mistura de NO (óxido nítrico) e de NO<sub>2</sub> (dióxido de azoto). A formação deste, pode ocorrer de duas formas: da oxidação do azoto molecular presente no ar atmosférico e da oxidação dos compostos de azoto existentes no combustível (Martins, et al., 2010; Rosa, 2011).

Verificou-se que as menores emissões foram correspondentes aos péletes de Pinho, sendo que a *Acacia* foi a espécie que apresentou maiores valores de emissões de NO<sub>x</sub>. As elevadas emissões de NO<sub>x</sub> dos péletes de *Acacia dealbata* poderão ser resultado de um elevado teor de azoto, comparativamente ao teor de azoto do Pinho.



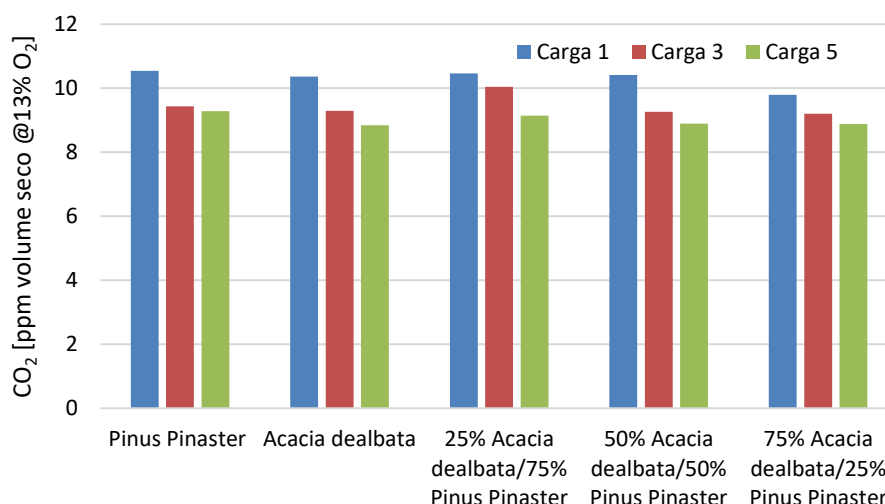
**Figura 7.3-** Emissões de CO para os diferentes tipos de péletes.

Durante uma combustão, a detecção de grandes emissões de CO significa que estamos perante uma combustão incompleta. O elevado excesso de ar presente na câmara de combustão para cargas inferiores, leva a uma redução da temperatura da combustão e consequentemente à formação de CO (Van Loo, et al., 2008).

Através da Figura 7.3 é possível observar emissões mais elevadas para a menor carga, carga 1, diminuindo para cargas mais elevadas. Apesar das emissões de CO serem mais reduzidas para cargas mais elevadas, o excesso de ar presente na câmara de combustão continua a ser demasiado elevado, para o caudal de péletes consumido. A *Acacia dealbata* foi a espécie que apresentou valores mais elevados de emissões de CO, para a carga 1 e para a carga 3; o Pinho por sua vez foi a espécie que apresentou menores valores para as três cargas estudadas.

A norma europeia EN 14785:2006 estabelece limites de emissões de CO para as caldeiras domésticas, 600 ppm a 13% O<sub>2</sub> e 400 ppm a 13% O<sub>2</sub>, para a potência mínima e máxima, respetivamente. Observando o gráfico anterior, é possível concluir que para a potência mais baixa, nenhum dos tipos de péletes em estudo cumpre os valores estabelecidos pela norma; para a potência máxima, apenas os péletes comerciais de Pinho apresentam um valor inferior a 400 ppm a 13% O<sub>2</sub>.

## 7. Resultados e discussão

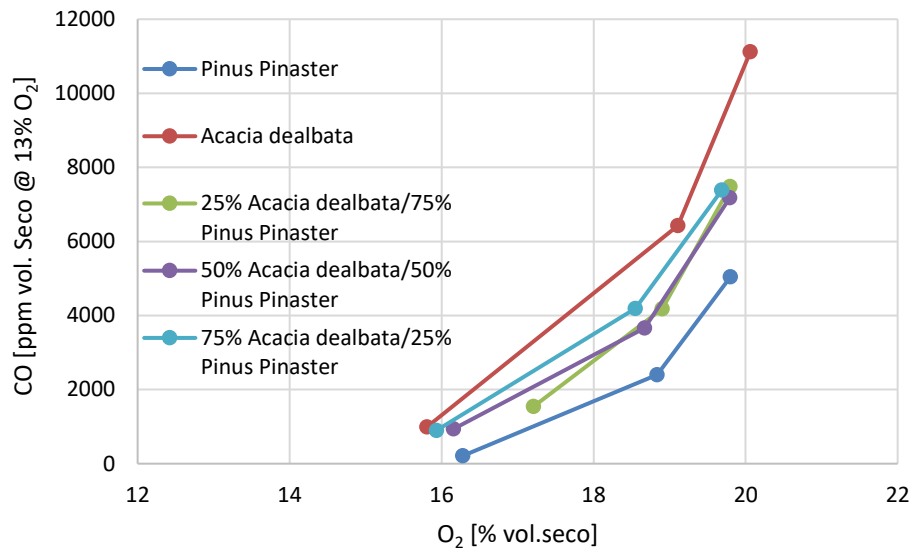


**Figura 7.4-** Emissões de CO<sub>2</sub> para os diferentes tipos de péletes.

Para o caso das emissões de CO<sub>2</sub>, é possível observar através da Figura 7.4, que estas eram semelhantes a nível percentual, para os cinco tipos de péletes. É ainda possível verificar uma ligeira diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> com o aumento da carga da caldeira, para todos os casos estudados.

### 7.2.4 Influência da concentração de oxigénio nas emissões

Através das Figuras 7.5, 7.6 e 7.7 é possível observar-se as emissões de CO, NO<sub>x</sub> e de CO<sub>2</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub> nos gases de combustão.

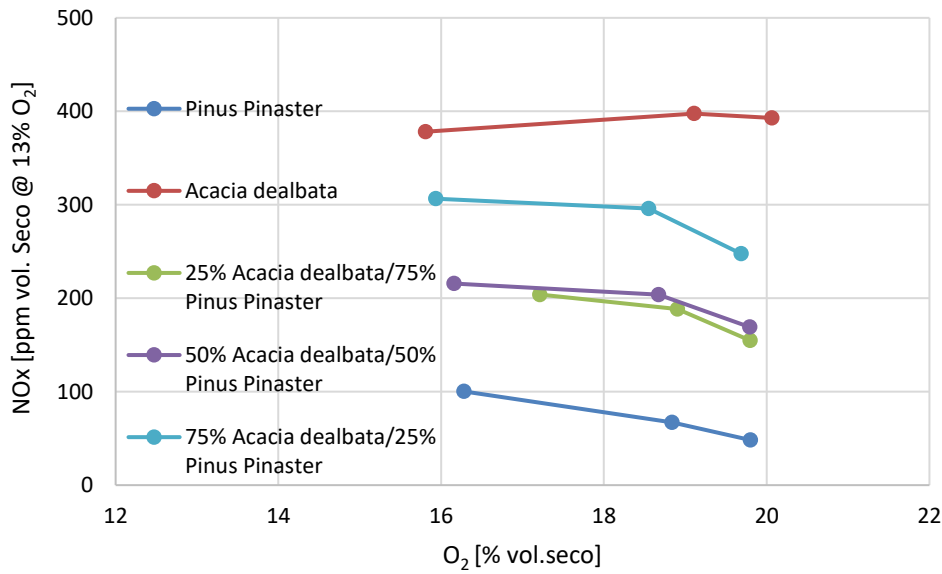


**Figura 7.5-** Emissões de CO em função da concentração de O<sub>2</sub>.

O gráfico anterior representa os valores médios das emissões de CO em função da concentração de O<sub>2</sub>, para todos os tipos de pélletes em estudo, nas três cargas. O gráfico com os resultados obtidos para cada ensaio realizado encontra-se apresentado no Apêndice B, Figura B.1.

O excesso de ar, resultante de uma mistura ineficiente entre o combustível e o ar, representa o fator que tem mais influência no teor de CO (Van Loo, et al., 2008). Uma vez que a concentração de CO se encontra diretamente relacionada com o excesso de ar, quanto maior a concentração de O<sub>2</sub>, maior a concentração de CO libertado. Através da observação do gráfico anterior é possível verificar o mesmo comportamento para todos os tipos de pélletes estudados.

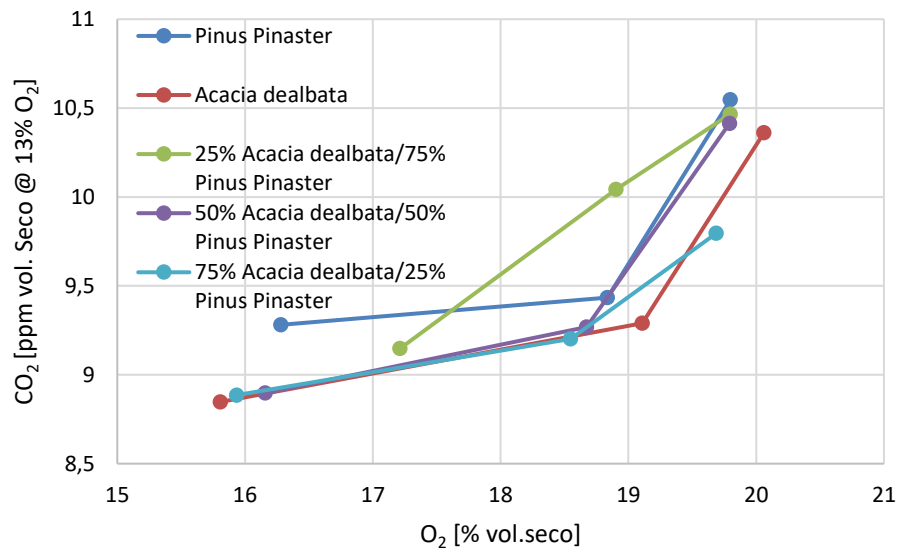
## 7. Resultados e discussão



**Figura 7.6-** Emissões de NO<sub>x</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub>.

A Figura 7.6 representa os valores médios das emissões de NO<sub>x</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub>. No Apêndice B, Figura B.2, encontra-se apresentado o gráfico com os resultados obtidos para cada ensaio realizado, para os diferentes tipos de pêsletes nas três cargas.

Através da observação do gráfico anterior é possível concluir que para os pêsletes de *Acacia dealbata* as emissões de NO<sub>x</sub> não possuem grande dependência da concentração de O<sub>2</sub>, uma vez que não se verifica uma variação significativa. Para os pêsletes de *Pinus Pinaster* observou-se um aumento das emissões de NO<sub>x</sub> em função da diminuição da concentração de O<sub>2</sub>. As três misturas apresentam um comportamento idêntico; verificou-se que não existia grande dependência da concentração de O<sub>2</sub> para cargas mais elevadas, uma vez que nas cargas 3 e 5, os valores das emissões de NO<sub>x</sub> eram idênticos.



**Figura 7.7-** Emissões de CO<sub>2</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub>.

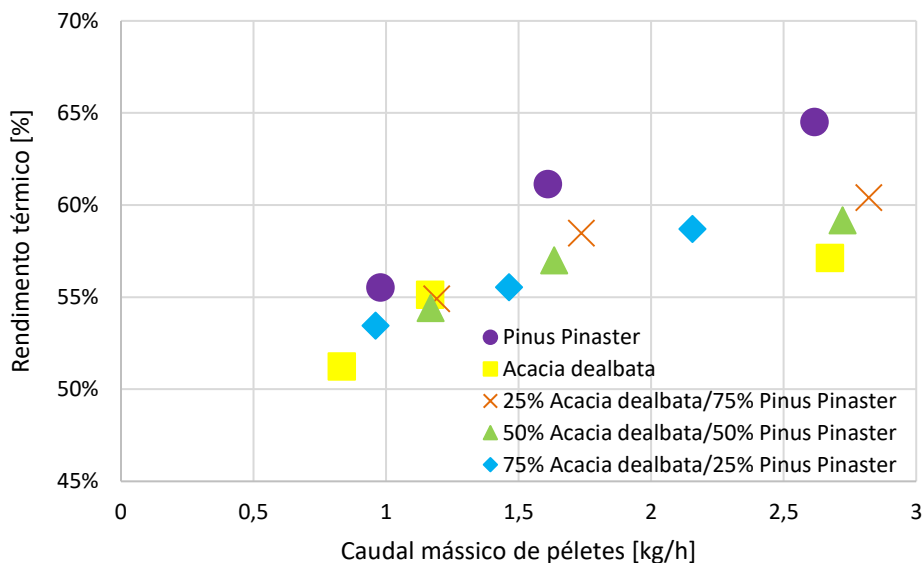
Através da Figura 7.7 é possível observar a representação dos valores médios das emissões de CO<sub>2</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub>. O gráfico com os resultados obtidos para cada ensaio realizado encontra-se representado no Apêndice B, Figura B.3.

Verifica-se uma relação entre as concentrações de CO<sub>2</sub> e de O<sub>2</sub>, uma vez que ambas diminuíram com o aumento da carga, para todos os casos estudados.

### 7.2.5 Influência do tipo de péletes e do caudal mássico

Na Figura 7.8 encontram-se representados os valores médios do rendimento térmico da caldeira em função do caudal mássico de combustível, para todos os tipos de péletes. O gráfico com os resultados obtidos para cada ensaio realizado encontra-se representado no Apêndice B.

## 7. Resultados e discussão



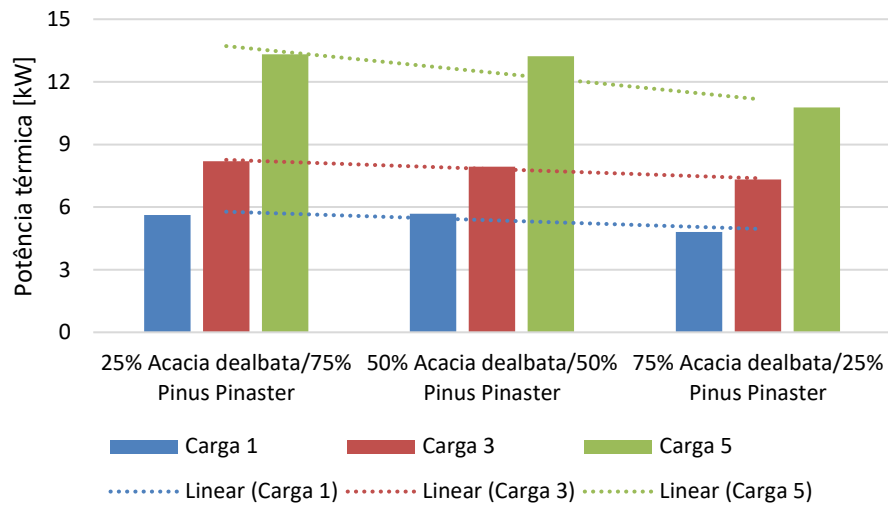
**Figura 7.8-** Rendimento térmico em função do tipo de péletes e do seu caudal mássico.

O rendimento térmico máximo obtido nos ensaios foi para os péletes comerciais de Pinho na carga 5, 70% para um caudal mássico de 2,64 kg/h; o menor valor de rendimento obtido foi de 48%, para um caudal mássico de péletes de 0,87 kg/h, para os péletes de *Acacia dealbata* na carga 1, conforme é possível observar através da Figura B.4, presente no Apêndice B.

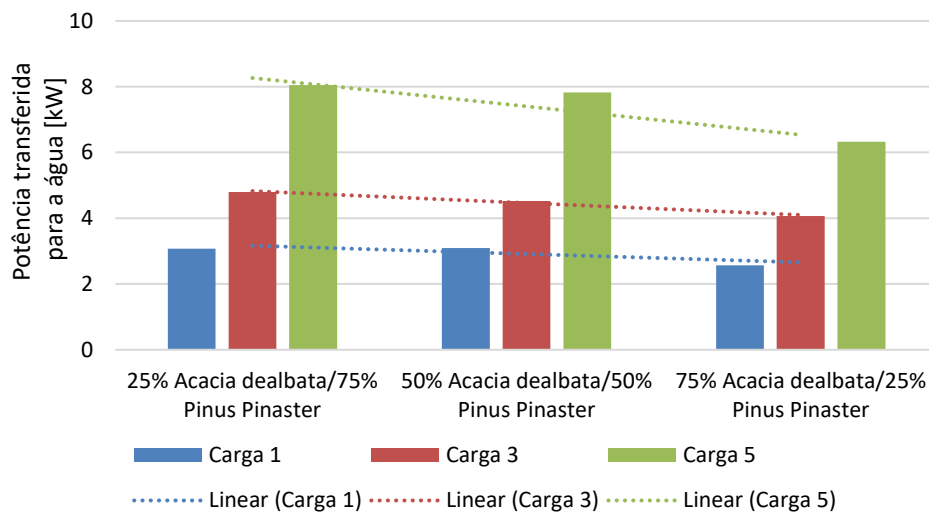
A norma europeia EN 14785:2006 estabelece que os valores de rendimento não deverão ser inferiores a 70% e 75%, para as potências mínima e máxima (carga 1 e carga 5), respetivamente; verificando os valores obtidos nos ensaios realizados para todos os tipos de péletes, nenhum destes se encontra de acordo com a norma.

### 7.2.6 Influência da percentagem de *Acacia dealbata* nas variáveis estudadas

Neste ponto encontram-se apresentados os resultados obtidos durante a combustão dos péletes das misturas das espécies, de forma a verificar a influência da percentagem de *Acacia dealbata* em cada uma das variáveis estudadas.



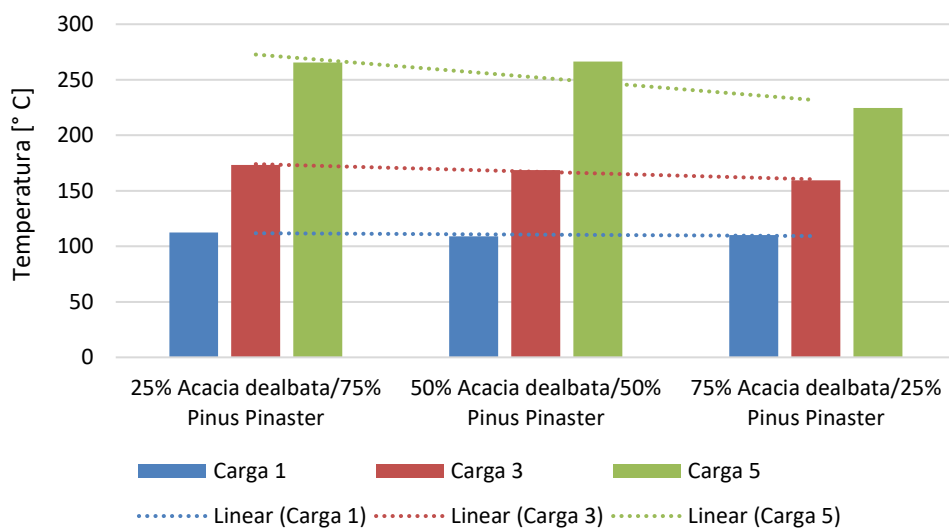
**Figura 7.9-** Influência da porcentagem de *Acacia dealbata* na potência térmica da caldeira.



**Figura 7.10-** Influência da porcentagem de *Acacia dealbata* na potência transferida para a água.

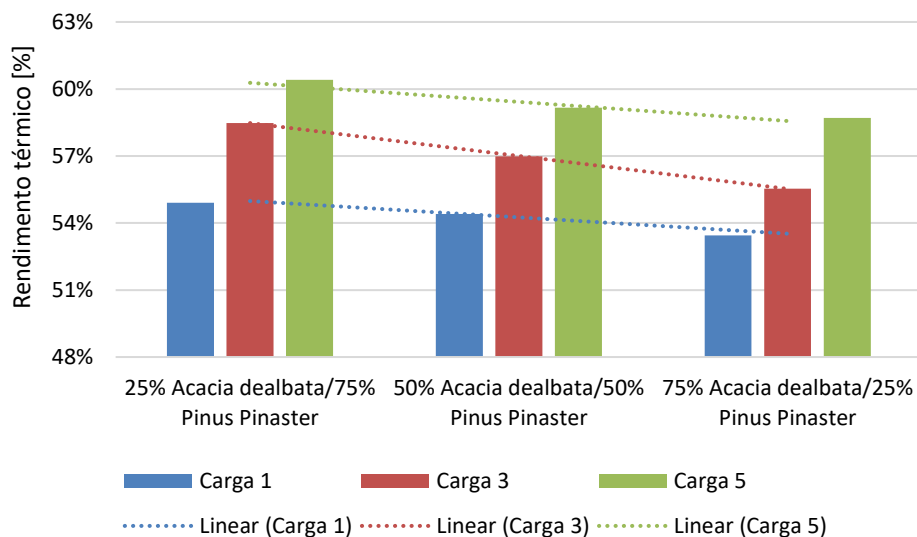
Observando os gráficos anteriores, Figuras 7.9 e 7.10, é possível concluir que existe uma diminuição da potência térmica da caldeira e da potência transferida para a água com o aumento da porcentagem de *Acacia* nas misturas, para as três cargas estudadas.

## 7. Resultados e discussão



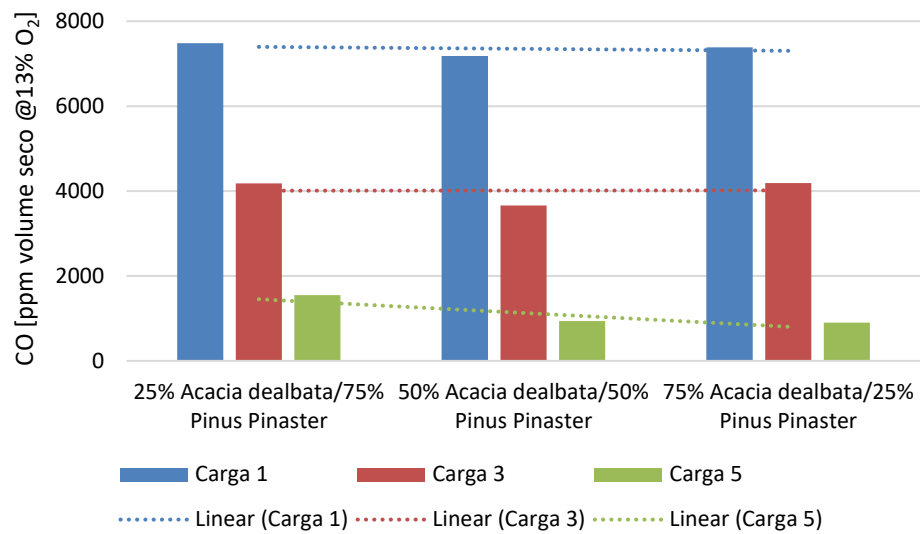
**Figura 7.11-** Influência da porcentagem de *Acacia dealbata* nas temperaturas dos gases de combustão.

Para as temperaturas dos gases de combustão, Figura 7.11, observou-se para as cargas 3 e 5, uma diminuição destas com o aumento da porcentagem de *Acacia* nas misturas. Para a carga 1 as temperaturas obtidas foram idênticas para os péletes das três misturas.

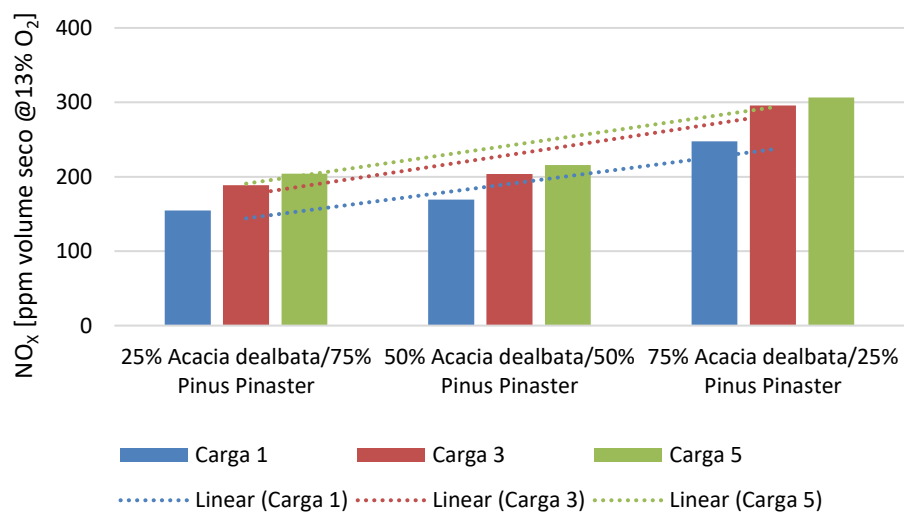


**Figura 7.12-** Influência da porcentagem de *Acacia dealbata* no rendimento da caldeira.

Através do gráfico anterior é possível observar uma diminuição do rendimento térmico da caldeira para maiores porcentagens de *Acacia* nas misturas; tal foi observado para as três cargas.

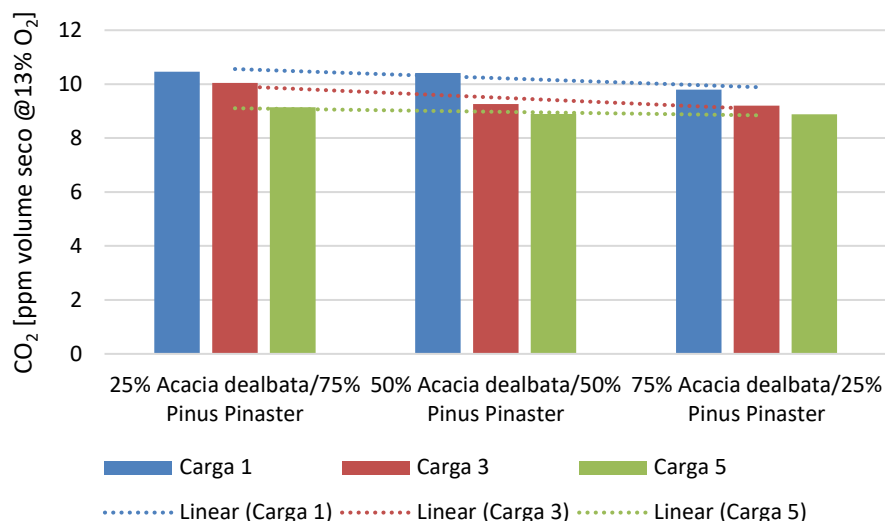


**Figura 7.13-** Influência da percentagem de *Acacia dealbata* nas emissões de CO.



**Figura 7.14-** Influência da percentagem de *Acacia dealbata* nas emissões de NO<sub>x</sub>.

## 7. Resultados e discussão



**Figura 7.15-** Influência da percentagem de *Acacia dealbata* nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Através da Figura 7.13 é possível verificar para cargas mais baixas, carga 1 e carga 3, emissões de CO idênticas para as três misturas; para a carga mais elevada verifica-se uma diminuição das emissões com o aumento da percentagem de *Acacia dealbata* nas misturas. Para as emissões de NO<sub>x</sub>, Figura 7.14, observa-se um aumento destas para maiores percentagens de *Acacia*, nas três cargas em estudo. Na Figura 7.15 é possível observar as emissões de CO<sub>2</sub> para as misturas em estudo; é possível concluir que existe uma ligeira diminuição destas emissões com o aumento da *Acacia* nas misturas, para as diferentes cargas.

### 7.2.7 Perdas térmicas da caldeira

Neste ponto são analisadas as perdas pela chaminé, para os cinco tipos de péletes. Os dados relativos à composição dos péletes de *Pinus Pinaster* e de *Acacia dealbata* foram retirados do trabalho de Ferreira (2013); recorrendo às composições químicas destas duas espécies e aos pesos mássicos de cada mistura, foi efetuado um cálculo ponderado de cada uma, obtendo-se assim as composições químicas aproximadas das misturas (Petrin, 2018).

Tabela 7.3- Análise das perdas térmicas para as três cargas estudadas.

	Potência fornecida [kW]	Rendimento térmico [%]	Perdas chaminé [kW]	Perdas chaminé [%]
<b>Carga 1</b>				
<i>Pinus Pinaster</i>	5,11	55,50%	0,41	7,99
<i>Acacia dealbata</i>	4,32	51,22%	0,25	5,86
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	5,62	54,91%	0,45	7,99
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	5,68	54,41%	0,43	7,60
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	4,80	53,44%	0,29	6,10
<b>Carga 3</b>				
<i>Pinus Pinaster</i>	8,24	61,12%	1,04	12,39
<i>Acacia dealbata</i>	6,04	55,12%	0,44	7,20
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	8,20	58,48%	0,91	11,08
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	7,94	56,99%	0,82	10,20
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	7,32	55,53%	0,60	8,20
<b>Carga 5</b>				
<i>Pinus Pinaster</i>	13,66	64,49%	2,96	21,65
<i>Acacia dealbata</i>	13,86	57,12%	2,32	16,77
<i>25% Acacia dealbata/75% Pinus Pinaster</i>	13,32	60,41%	2,39	17,97
<i>50% Acacia dealbata/50% Pinus Pinaster</i>	13,23	59,16%	2,36	17,83
<i>75% Acacia dealbata/25% Pinus Pinaster</i>	10,78	58,70%	1,34	12,40

Através da Tabela 7.3 é possível observar os valores médios obtidos para as perdas pela chaminé, para as três cargas estudadas.

## 7. Resultados e discussão

**Tabela 7.4-** Análise das perdas por humidade para as três cargas estudadas.

	Perdas humidade [kW]	Perdas humidade [%]
<b>Carga 1</b>		
<i>Pinus Pinaster</i>	0,33	6,37
<i>Acacia dealbata</i>	0,17	3,90
<b>25% <i>Acacia dealbata</i>/75% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,35	6,31
<b>50% <i>Acacia dealbata</i>/50% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,34	5,98
<b>75% <i>Acacia dealbata</i>/25% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,20	4,21
<b>Carga 3</b>		
<i>Pinus Pinaster</i>	0,96	11,42
<i>Acacia dealbata</i>	0,36	5,95
<b>25% <i>Acacia dealbata</i>/75% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,82	9,97
<b>50% <i>Acacia dealbata</i>/50% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,73	9,11
<b>75% <i>Acacia dealbata</i>/25% <i>Pinus Pinaster</i></b>	0,51	7,02
<b>Carga 5</b>		
<i>Pinus Pinaster</i>	2,87	21,03
<i>Acacia dealbata</i>	2,23	16,13
<b>25% <i>Acacia dealbata</i>/75% <i>Pinus Pinaster</i></b>	2,30	17,29
<b>50% <i>Acacia dealbata</i>/50% <i>Pinus Pinaster</i></b>	2,27	17,16
<b>75% <i>Acacia dealbata</i>/25% <i>Pinus Pinaster</i></b>	1,25	11,62

Na tabela anterior encontram-se representadas as perdas térmicas por humidade para todos os tipos de péletes em estudo.

Quanto maior a potência térmica da caldeira, maiores são as temperaturas atingidas por esta, o que resulta numa diferença de temperatura com a envolvente superior; quanto maior o valor desta diferença de temperatura, maiores as perdas térmicas observadas. É possível verificar que os péletes de Pinho possuem perdas superiores comparativamente aos outros tipos de péletes em estudo; tal pode ser justificado pelo seu teor de humidade, uma vez que este era superior ao teor de humidade dos restantes, levando conseqüentemente a maiores perdas por humidade, conforme é possível observar na Tabela 7.4.

Os baixos rendimentos relativamente ao que seria esperado pela norma, como foi referido no ponto 7.2.5, resultam principalmente das perdas térmicas existentes durante todo o processo

de combustão e do elevado excesso de ar na câmara de combustão. O excesso de ar provoca uma diminuição da temperatura de combustão, diminuindo a taxa de transferência de calor para a água.

## 7. Resultados e discussão

## 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O estudo em questão procurou avaliar a influência da espécie invasora *Acacia dealbata* e das três misturas de diferentes percentagens de *Acacia dealbata* e *Pinus Pinaster*, enquanto combustível, numa caldeira doméstica a péletes. Os resultados obtidos para a *Acacia* e para as misturas, foram comparados com os resultados obtidos nos ensaios para péletes comerciais de Pinho. Foi avaliado o rendimento térmico da caldeira e as emissões de poluentes resultantes da combustão, para todos os tipos de péletes.

Após a recolha da matéria-prima foi necessário proceder à redução do seu tamanho, de forma a evitar danos no moinho de navalhas durante o processo de destroçamento; durante a redução do tamanho da matéria-prima ocorreu sempre a perda de alguma humidade desta.

O processo de secagem da matéria-prima foi o mais demorado, uma vez que a recolha foi efetuada maioritariamente no Outono e no Inverno, sendo o teor de humidade inicial desta bastante elevado e os ciclos de secagem em estufa solar mais morosos.

Após a secagem da *Acacia* recolhida, procedeu-se ao seu destroçamento; a matéria-prima obtida de Pinho já se encontrava com dimensões reduzidas, de forma a facilitar o seu destroçamento.

Foram efetuadas três misturas da matéria-prima destroçada de ambas as espécies, ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’, ‘50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*’ e ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’; foi realizada a análise granulométrica para as espécies e misturas, de forma a obter os diâmetros médios das partículas, nos diferentes casos. Foi observado um carácter bimodal nos gráficos da distribuição granulométrica, sendo a *Acacia dealbata* a espécie que apresentou um carácter bimodal mais acentuado. Este comportamento é resultado de uma distribuição assimétrica da granulometria da matéria-prima e de uma mistura de duas distribuições com modas diferentes.

Antes de se efetuar a peletização da *Acacia dealbata*, verificou-se que o seu teor de humidade era inferior a 10%, pelo que foi necessário efetuar a sua mistura com água, de forma a facilitar a compactação da mesma.

O processo de peletização foi efetuado recorrendo a uma peletizadora laboratorial. Após o arrefecimento dos péletes produzidos, foram efetuados testes de qualidade aos mesmos. Para todos os tipos de péletes estudados, o seu teor de humidade e dimensões encontravam-se de acordo com a norma EN ISO 17225-2:2014. Para o teor de finos, somente os péletes de *Acacia* tinham um valor superior ao definido pela norma. Os péletes de *Acacia* foram os que obtiveram

## 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

menores valores de durabilidade; de entre os péletes em estudo, os péletes comerciais de Pinho eram os únicos que possuíam um valor de durabilidade mecânica de acordo com o estabelecido pela norma ENPlus A1  $\geq 98\%$ . No que diz respeito à massa volúmica aparente, apenas os péletes de Pinho se encontravam de acordo com a gama de valores descrita pela norma.

O comportamento dos diferentes tipos de péletes em estudo foi analisado na fase de arranque e em condições de regime permanente da caldeira.

Na fase inicial dos ensaios, fase de arranque da caldeira, não se ligou o analisador de gases, uma vez que as emissões de CO eram demasiado elevadas e podiam danificar o aparelho; desta forma, apenas foram retirados os valores das temperaturas dos gases de combustão e das temperaturas de entrada e de saída da água na caldeira. Nesta fase foi possível observar que quanto maior a carga da caldeira, maior o valor que as temperaturas dos gases de combustão atingiam.

Quando se atingiu o regime permanente, o analisador de gases foi ligado e foram medidas as concentrações de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub>. Durante o regime permanente foi possível observar que quanto maior a carga, maior o caudal de combustível consumido e por sua vez maior o rendimento térmico. Verificou-se que os péletes comerciais de Pinho obtiveram os maiores valores de rendimento e a *Acacia* os menores; para as misturas foi possível concluir que quanto maior a percentagem de *Acacia*, menores os valores de rendimento obtidos.

Com o aumento da potência da caldeira as concentrações de O<sub>2</sub> obtidas nos gases de combustão foram menores, uma vez que a necessidade de ar disponível para o processo de combustão é superior.

Através da observação das emissões de CO foi possível concluir que estas diminuem para cargas superiores. A norma europeia EN 14785:2006 define limites máximos para as emissões de CO, para as potências mínima e máxima da caldeira. Nenhum dos tipos de péletes em estudo cumpre os limites para a carga mínima; apenas os péletes de *Pinus Pinaster* cumprem os valores estabelecidos pela norma, para a carga máxima. Os péletes de *Acacia* foram os que obtiveram maiores emissões de CO para as cargas mais baixas, carga 1 e carga 3, o que indicava que a combustão era pobre; as menores emissões foram obtidas para os péletes de Pinho. Nas misturas observou-se para as cargas 1 e 3 emissões de CO idênticas; para a carga 5 verificou-se um decréscimo destas para maiores percentagens de *Acacia* nas misturas. O fator que tem mais influência nas emissões de CO é o excesso de ar; quanto maior a concentração de O<sub>2</sub>, maior a quantidade libertada deste poluente.

## 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Para as emissões de  $\text{NO}_x$  observou-se que estas aumentam com o aumento da potência térmica, para todos os tipos de péletes produzidos, com exceção dos péletes de *Acacia*, onde se verificou menores emissões para a carga mais alta. As menores emissões foram obtidas para os péletes de Pinho e as maiores para os péletes de *Acacia*; nas misturas, para maiores percentagens de *Acacia*, maiores eram as emissões de  $\text{NO}_x$ . Tal pode ser justificado por um teor de azoto superior por parte dos péletes de *Acacia*. Para os péletes de Pinho, foi observada uma dependência das emissões de  $\text{NO}_x$  da concentração de  $\text{O}_2$ ; verificou-se que quanto maior a carga da caldeira, menores as emissões de  $\text{O}_2$  e por sua vez, maiores as concentrações de  $\text{NO}_x$  obtidas. As emissões de  $\text{NO}_x$  para os péletes de *Acacia* não possuem grande dependência da concentração de  $\text{O}_2$ , uma vez que as suas emissões para as cargas em estudo foram bastante idênticas. Para as misturas foi observado que para as cargas superiores, carga 3 e 5, ou seja, para menores concentrações de  $\text{O}_2$ , as emissões não sofriam grandes alterações.

As concentrações de  $\text{CO}_2$  obtidas foram idênticas a nível percentual, para todos os tipos de péletes em estudo. Observou-se uma ligeira diminuição destas com o aumento da potência da caldeira.

Analisando as perdas pela chaminé, foi possível observar maiores perdas para cargas mais elevadas; tal é justificado pelo facto de as temperaturas atingidas pela caldeira serem superiores para cargas mais elevadas e, por sua vez, a diferença entre esta e a envolvente ser igualmente superior. Os péletes de Pinho foram os que obtiveram maiores perdas, o que pode ser justificado pelo seu teor de humidade, uma vez que este era superior ao teor de humidade dos restantes péletes. Os baixos rendimentos em relação ao que seria esperado pela norma, são resultado de todas as perdas existentes durante todo o processo de combustão dos péletes e do elevado excesso de ar.

Através dos resultados obtidos durante este trabalho poderá sugerir-se para trabalhos futuros, uma adaptação da caldeira à queima de péletes de espécies invasoras, assim como, procurar diferentes misturas destas espécies com outros tipos de espécies autóctones. Outro aspeto que deverá ser analisado no futuro é o permutador de calor existente na casa de máquinas, de forma a aproveitar a energia térmica proveniente da caldeira para aquecimento da água da cantina e do bar da ESTGV.

## 8. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

## 9. Referências

- Barbosa, Manuel T. 2008. *Análise da utilização de biomassa e resíduos florestais para a produção de pellets*. Universidade de Aveiro : s.n., 2008.
- Brienzo, Michel. 2015. *Heterogeneidade, composição química e propriedades físico-químicas da biomassa*. São Paulo : s.n., 2015.
- BUN-CA. 2002. *Manuales sobre energía renovable: Biomasa (BUN-CA), 1ª Edición*. San José, Costa Rica : s.n., 2002.
- Celignis Analytical. 2015. Celignis Analytical. *Volatile Matter*. [Online] 2015. [Citação: 26 de junho de 2018.] <https://www.celignis.com/analyte.php?value=24>.
- Cerqueira, Wagner e Francisco. 2010. *MUNDO EDUCAÇÃO*. [Online] 2010. [Citação: 26 de junho de 2018.] <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/fontes-energia.htm>.
- Cheng, Jay. 2010. *Biomass to Renewable Energy Processes*. Estados Unidos : CRC Press, 2010.
- Clarke, S., Eng., P. e Preto, F. 2011. *Biomass Densification for Energy Production*. 2011.
- Coelho, P. e Costa, M. 2007. *Combustão*. s.l. : Edições Orion, 2007.
- Cronk, Q.B e Fuller, Janice L. 1995. *Plant Invaders*. London, UK : Chapman and Hall, 1995.
- Dayton, David C. e Milne, Thomas A. 2008. *Mechanisms of Alkali Metal Release During Biomass Combustion*. 1617 Cole Boulevard : National Renewable Energy Laboratory, Industrial Technologies Division , 2008.
- DGEG. 2016. DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. [Online] 2016. [Citação: 15 de maio de 2018.] <http://www.dgeg.gov.pt/>.
- Dias, J.M.C.S, et al. 2012. *Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, 1ª Edição*. Brasília : Embrapa Agroenergia, 2012.
- EIA. 2017. International Energy Outlook 2017. [Online] 2017. [Citação: 15 de maio de 2018.] [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf).
- energenium. 2005. *energenium*. [Online] 2005. [Citação: 22 de maio de 2018.] <http://www.energenium.pt/energias/biomassa.html>.
- Energia Biomassa. 2009. *Energia Biomassa - Energias Renováveis em Portugal*. [Online] 2009. [Citação: 25 de junho de 2018.] <http://www.energiabiomassa.com/>.

## 9. Referências

- Energy, Gemco. 2014. *GEMCO Energy*. [Online] 2014. [Citação: 25 de junho de 2018.] <http://www.biofuelmachines.com/>.
- EPC. 2015. *ENplus Handbook, Part 2: Certification Procedure*. Belgium : European Biomass Association, 2015.
- EPC. 2015. *ENplus Handbook, Part 3: Pellet Quality Requirements*. Belgium : European Biomass Association, 2015.
- Fakhri, Ahmed, Waleed, Al-sallami e Nawar, H.Imran. 2015. *The Current World Energy Situation and Suggested Future Energy Scenarios to Meet the Energy Challenges by 2050 in the UK*. UK : International Journal of Sustainable and Green Energy, 2015. pp. 212-218.
- FAO. 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online] 2017. [Citação: 28 de junho de 2018.] <http://www.fao.org/docrep/007/x3996p/x3996p0j.htm>.
- FAPAS. 2017. CIDADANIA, SUSTENTABILIDADE & CONSERVAÇÃO. [Online] 2017. [Citação: 29 de junho de 2018.] <http://cidadania.fapas.pt/habitats-florestais/>.
- Faria, Caroline. 2008. InfoEscola - Navegando e Aprendendo. [Online] 13 de março de 2008. [Citação: 10 de outubro de 2018.] <https://www.infoescola.com/meteorologia/umidade-relativa-do-ar/>.
- Ferreira, Tânia V. 2013. *Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de péletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW*. Viseu : Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2013.
- Futureng. 2011. Futureng. [Online] 11 de agosto de 2011. [Citação: 10 de outubro de 2018.] <http://www.futureng.pt/humidade-relativa>.
- Gásmaia. 2008. Gásmaia: Renovamos a sua Energia. [Online] 2008. [Citação: 21 de maio de 2018.] [http://www.gasmaia.com/ener\\_ren\\_ser\\_biom.html](http://www.gasmaia.com/ener_ren_ser_biom.html).
- GEA. 2015. *GEA*. [Online] 2015. [Citação: 07 de junho de 2018.] <https://www.gea.com/pt/stories/innopharma.jsp>.
- Gómez, Miguel A., et al. 2012. *Simulation of the Effect of Water Temperature on Domestic Biomass Boiler Performance*. Vigo : Industrial Engineering School, University of Vigo, 2012. pp. 1044-1061.

- Hansen, Morten, et al. 2009. *English Handbook for Wood Pellet Combustion*. Davy Avenue, Knowlhill : European Biomass Industry Association, 2009.
- IEA. 2016. [Online] 2016. [Citação: 15 de maio de 2018.] <http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-297203538>.
- IEA. 2016. Energy Policies of IEA Countries: Portugal 2016 Review. [Online] 2016. [Citação: 15 de maio de 2018.] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-policies-of-iea-countries---portugal-2016-review.html>.
- IEA. 2015. World Energy Outlook 2015. [Online] 2015. [Citação: 15 de maio de 2018.] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015.pdf>.
- Invasoras. 2014. *invasoras.pt*. [Online] 2014. [Citação: 21 de maio de 2018.] <http://invasoras.pt/wp-content/uploads/2012/10/Acacia-dealbata.pdf>.
- Jacques, Sidia. 2003. *Bioestatística - Princípios e Aplicações*. Brasil : Artmed Editora, 2003.
- Jordan, Rodrigo A., et al. 2016. *Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico*. s.l. : Journal of the Brazilian Association of Agricultural, 2016.
- Karampinis, E., et al. 2012. *The Bioenergy System Planners Handbook -BISYPLAN*. 2012.
- Khan, A., et al. 2009. *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*. s.l. : Fuel Processing Technology, 2009. pp. 21-50.
- Kunii, Daizo e Levenspiel, Octave. 1969. *Fluidization Engineering*. New York : Wiley, 1969.
- Lee, Sunggyu, Speight, James G. e Loyalka, Sudarshan K. 2007. *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. Boca Raton, London, New York : Taylor & Francis Group, 2007.
- Liberal, M. e Esteves, M. 1999. *Invasão de Acacia dealbata Link no Parque Nacional da Peneda-Gerês*. Gerês : SPCF/ADERE, 1999.
- Lopes, Luis. 2003. *Apostila Estatística*. s.l. : D E - UFSM, 2003.
- macolis. 2017. *macolis*. [Online] 2017. [Citação: 17 de agosto de 2018.] <https://www.macolis.pt/pt/detalhe-solucao/-34>.

## 9. Referências

- Magalhães, Teresa. 2006. *O uso da biomassa na gestão do risco de incêndio florestal no concelho de Fafe*. Porto : Dissertação de Mestrado em Gestão de Riscos Naturais, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 2006.
- Marchante, H., Campelo, F. e Freitas, H. 1999. *Ecologia do género Acacia nos ecossistemas dunares portugueses*. Gerês : SPPCF/ADERE, 1999.
- Martins, Cristiane e Ferreira, Marco. 2010. *Considerações sobre a formação de NOx na combustão*. Brasil : s.n., 2010.
- McAllister, Sara, Chen, Jyh-Yuan e Fernandez-Pello, A. Carlos. 2011. *Fundamentals of Combustion Processes*. New York : Springer, 2011.
- McKendry, Peter. 2002. *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*. UK : Bioresource Technology, 83, pp. 37-46, 2002.
- Monteiro, Olavo, Peixoto, Ricardo e Oliveira, Mário. 2009. Estufa solar para a bioenergia. [Online] 3 de junho de 2009. [Citação: 8 de novembro de 2018.] [https://bioestufasolar.blogspot.com/?fbclid=IwAR25QpL7I\\_5q6y-DcSXqCL9z5gGus1eBqKivt8LP1Wyc7UIiyL-eQTAnSKw](https://bioestufasolar.blogspot.com/?fbclid=IwAR25QpL7I_5q6y-DcSXqCL9z5gGus1eBqKivt8LP1Wyc7UIiyL-eQTAnSKw).
- Obernberger, Ingwald e Thek, Gerold. 2010. *The Pellet Handbook - The production and thermal utilization of biomass pellets*. Washington DC : Earthscan, 2010.
- Oeco. 2014. Oeco. [Online] 2014. [Citação: 21 de maio de 2018.] <http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28434-o-que-e-uma-especie-exotica-e-uma-exotica-invasora/>.
- PEFC. 2006. PEFC Portugal. [Online] 2006. [Citação: 21 de maio de 2018.] <https://www.pefc.pt/certificacao-gfs/introducao/floresta-portuguesa>.
- Perez-Jimenez, J.A. 2015. Biomass Pellet- Fired Boilers. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*. Spain : WIT Press, 2015, Vol. 85.
- Petrin, Natália. 2018. estudo prático. [Online] 2018. [Citação: 12 de outubro de 2018.] <https://www.estudopratico.com.br/media-aritmetica/>.
- Pinho, C. 2005. *Sebenta de combustão*. Porto : Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- Pinho, Carlos. 2015. *Sistemas Térmicos*. Porto : Faculdade de Engenharia do Porto, 2015.

- Pinto, Andrea I. 2015. *Avaliação da biomassa de Paulownia enquanto combustível na forma peletizada*. Viseu : Instituto Politécnico de Viseu - Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2015.
- Pires, Catarina. 2012. Portugal Um país com imensa energia. *Diário de notícias*. [Online] 2012. [Citação: 18 de julho de 2018.] <https://www.dn.pt/revistas/nm/interior/portugal-um-pais-com-imensa-energia-2546081.html>.
- Quaak, Peter, Knoef, Harrie e Stassen, Hubert. 1999. *Energy from biomass : a review of combustion and gasification technologies*. Washington D.C : The World Bank, 1999.
- Quercus. 2016. Associação Nacional de Conservação da Natureza. [Online] 2016. [Citação: 25 de junho de 2018.] <http://www.quercus.pt/comunicados/2016-col-150/dezembro/5059-desflorestacao-em-portugal-e-uma-das-mais-elevadas-do-mundo>.
- Raiber, F., et al. 2006. *Particle density determination of pellets and briquettes*. Oxford, UK : Biomass and Bioenergy, 2006. pp. 954-963.
- Raizer, Fernando. 2014. Avicultura. [Online] 2014. [Citação: 25 de junho de 2018.] <https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/a-importancia-do-processo-de-resfriamento-de-pellets-por-fernando-raizer/20140526-114254-h482>.
- Richardson, David M. e Van Wilgen, Brian W. 2004. *Invasive alien plants in South Africa: how well do we understand the ecological impacts?* s.l. : South African Journal of Science, 2004.
- Rosa, Catarina. 2011. *Formação e Emissão de NO em Atmosferas - Características da Combustão Oxy-Fuel*. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2011.
- Saidur, R., et al. 2011. *A review on biomass as a fuel for boilers*. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pp. 2262-2289, 2011.
- Temmerman, M., et al. 2006. *Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes*. s.l. : Biomass and Bioenergy, 2006. pp. 964-972.
- Thorium Energy World. 2016. Thorium Energy World. [Online] 2016. [Citação: 15 de maio de 2018.] <http://www.thoriumenergyworld.com/energy.html>.
- Van Loo, Sjaak e Koppejan, Jaap. 2008. *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing, 2nd Edition*. United Kingdom : Earthscan, 2008.

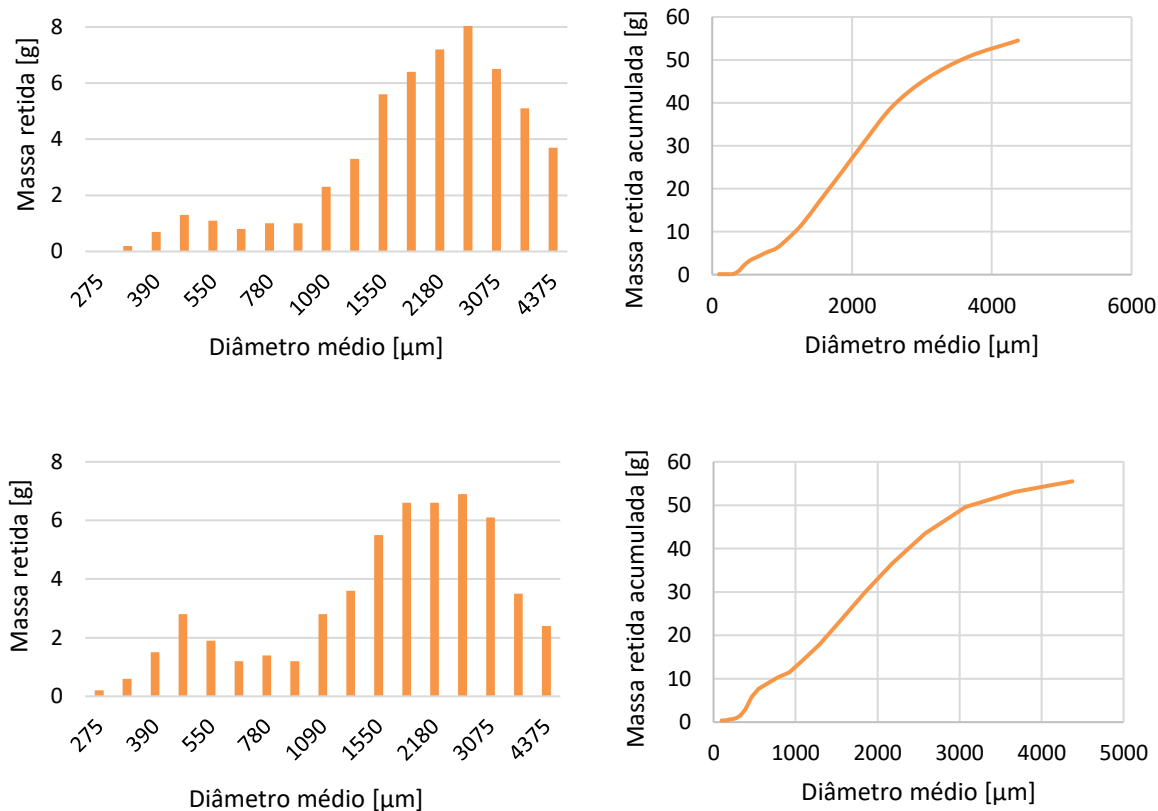
## 9. Referências

## APÊNDICES

### Apêndice A – Distribuição de Partículas

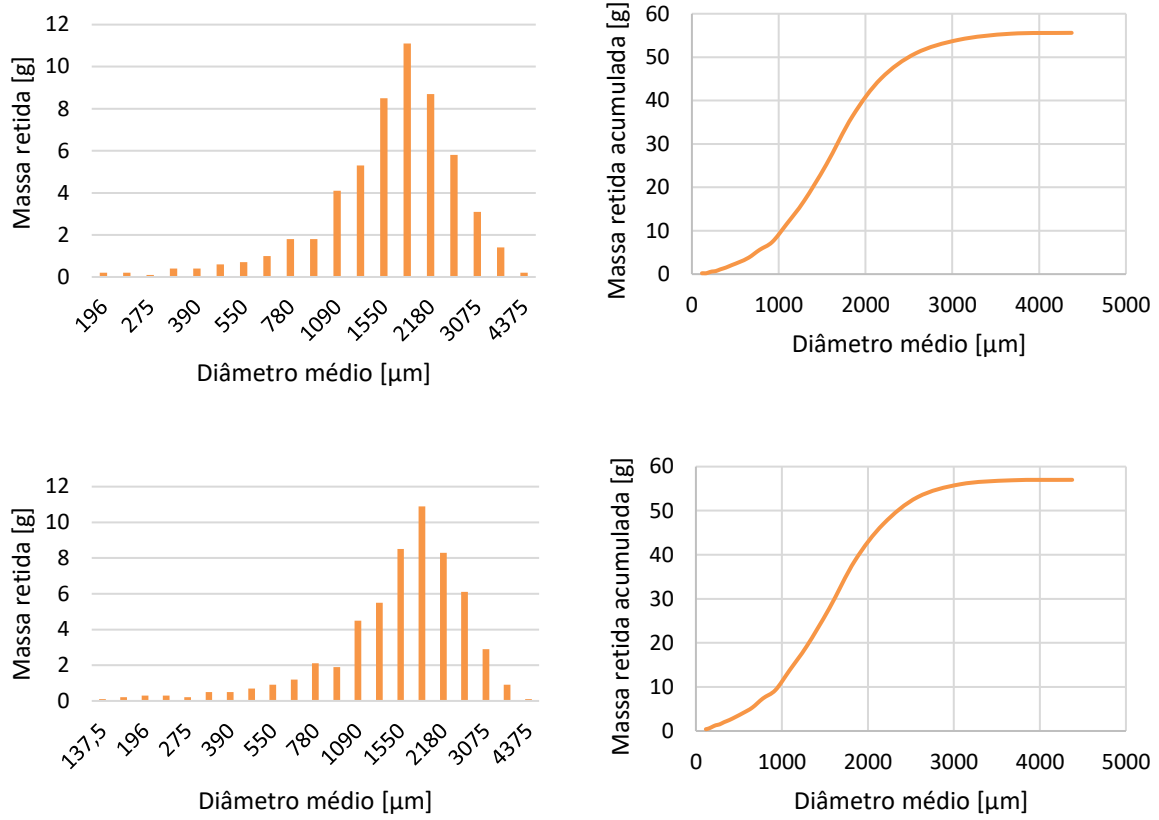
Nesta secção encontra-se apresentada a análise granulométrica das amostras 2 e 3, para as espécies *Acacia dealbata*, *Pinus Pinaster* e para as três misturas, ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’, ‘50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*’ e ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’.

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



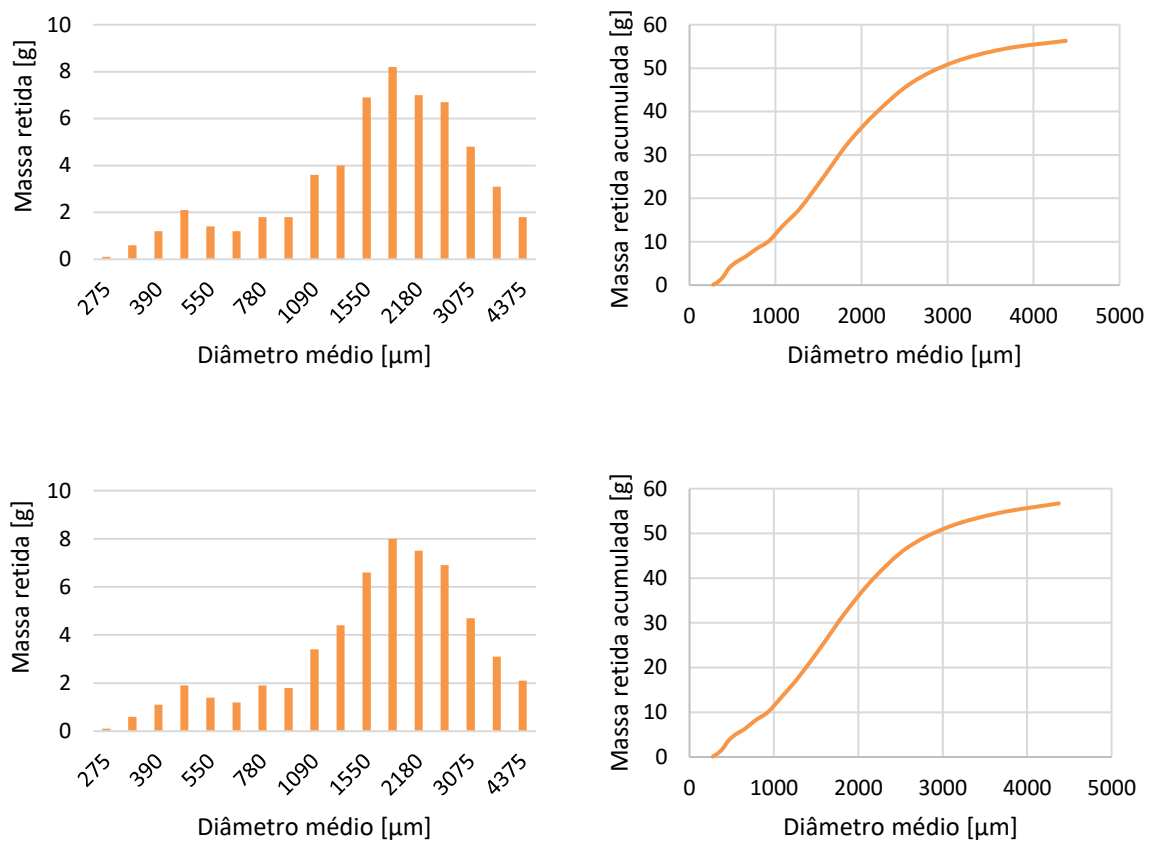
**Figura A.1-** Distribuição da matéria-prima da espécie *Acacia dealbata*.

**Distribuição de partículas da espécie *Pinus Pinaster***



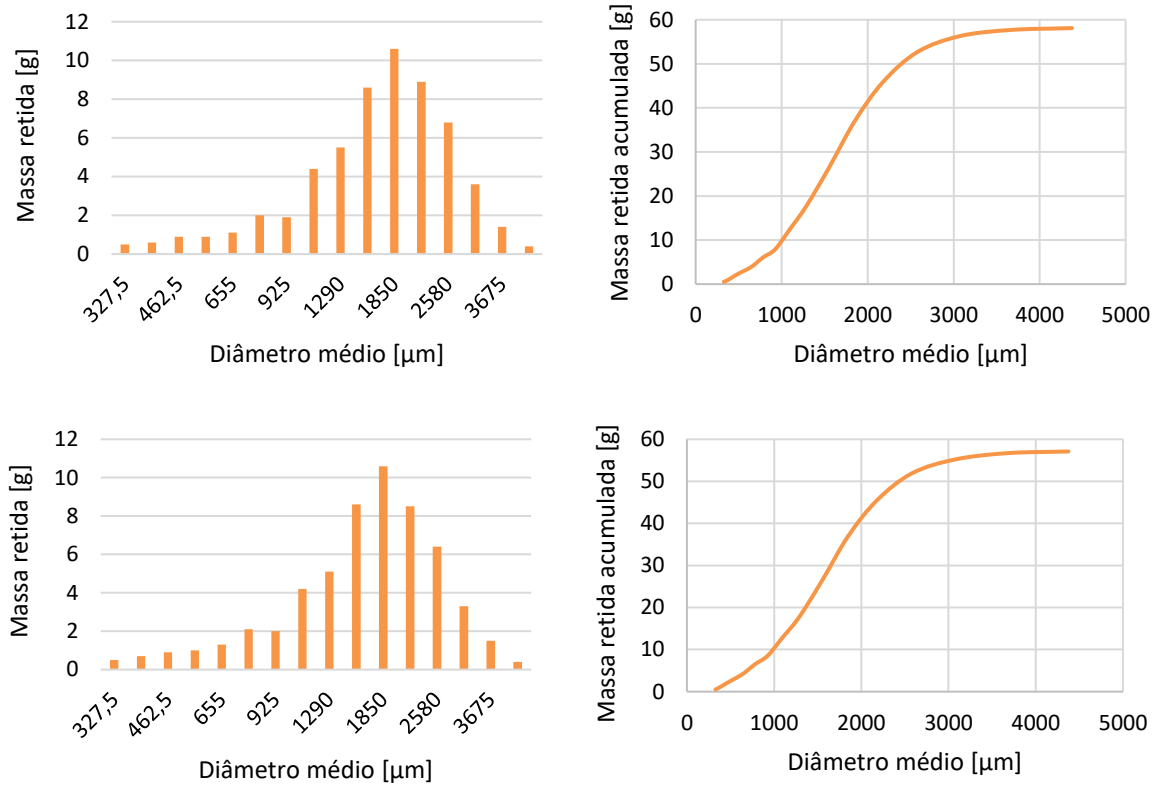
**Figura A.2-** Distribuição da matéria-prima da espécie *Pinus Pinaster*.

**Distribuição de partículas da mistura ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’**



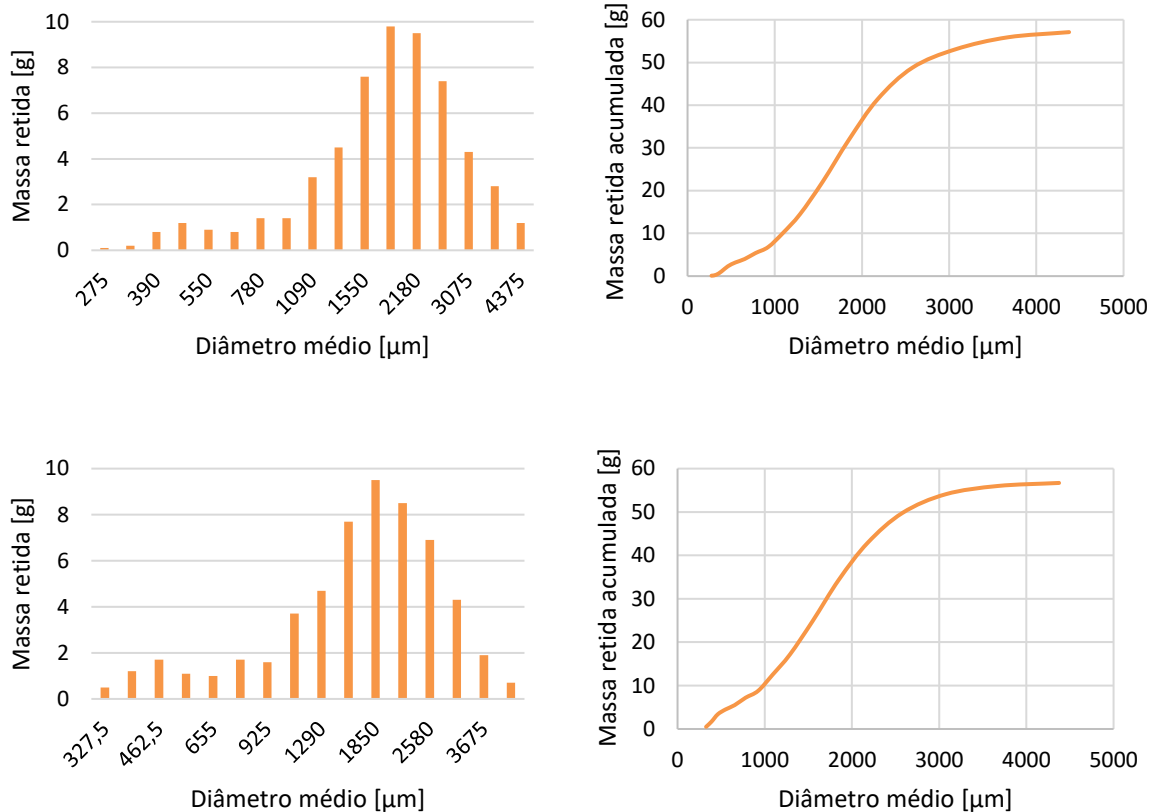
**Figura A.3-** Distribuição da matéria-prima da mistura ‘25% *Acacia dealbata*/75% *Pinus Pinaster*’.

**Distribuição de partículas da mistura ‘50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*’**



**Figura A.4-** Distribuição da matéria-prima da mistura ‘50% *Acacia dealbata*/50% *Pinus Pinaster*’.

**Distribuição de partículas da mistura ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’**

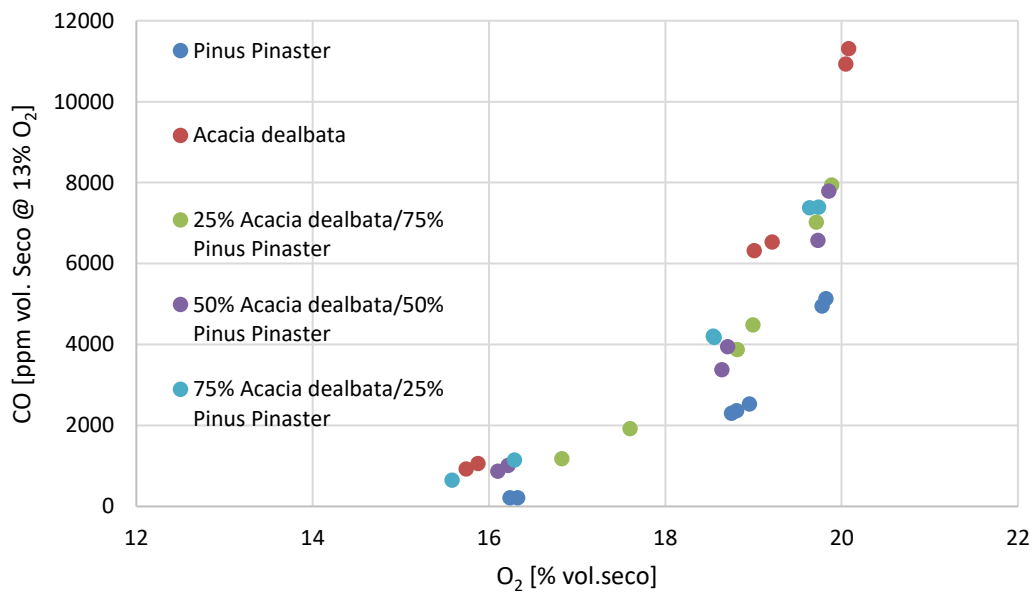


**Figura A.5-** Distribuição da matéria-prima da mistura ‘75% *Acacia dealbata*/25% *Pinus Pinaster*’.

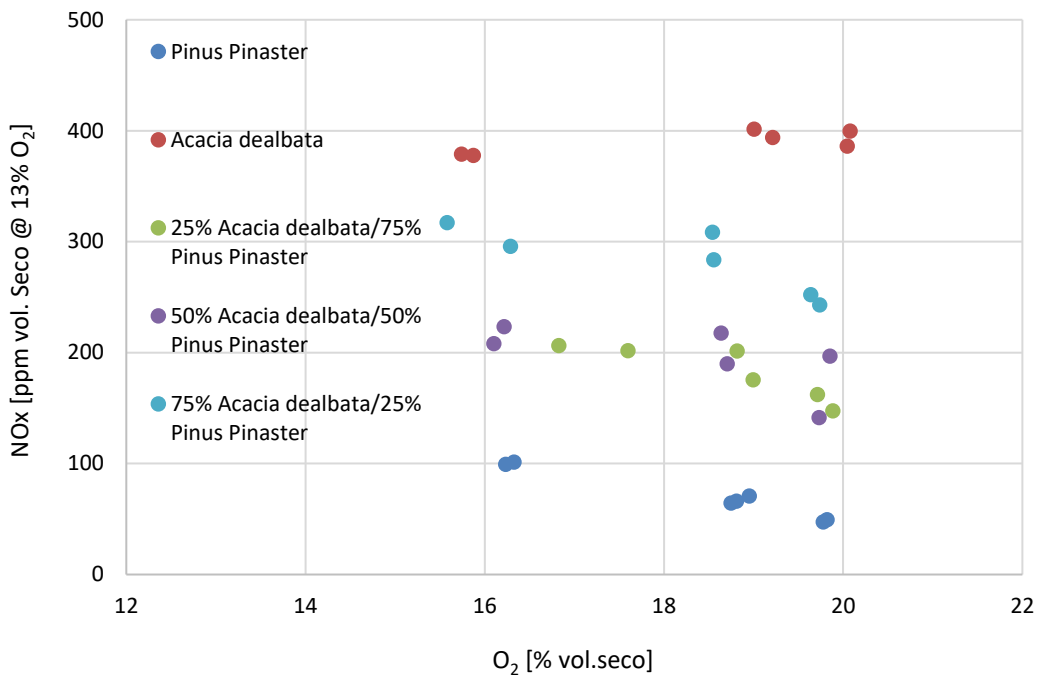
## Apêndice B – Resultados obtidos para os ensaios realizados

No presente apêndice encontram-se apresentados os gráficos representativos dos resultados obtidos para cada ensaio realizado, para os diferentes tipos de péletes nas três cargas.

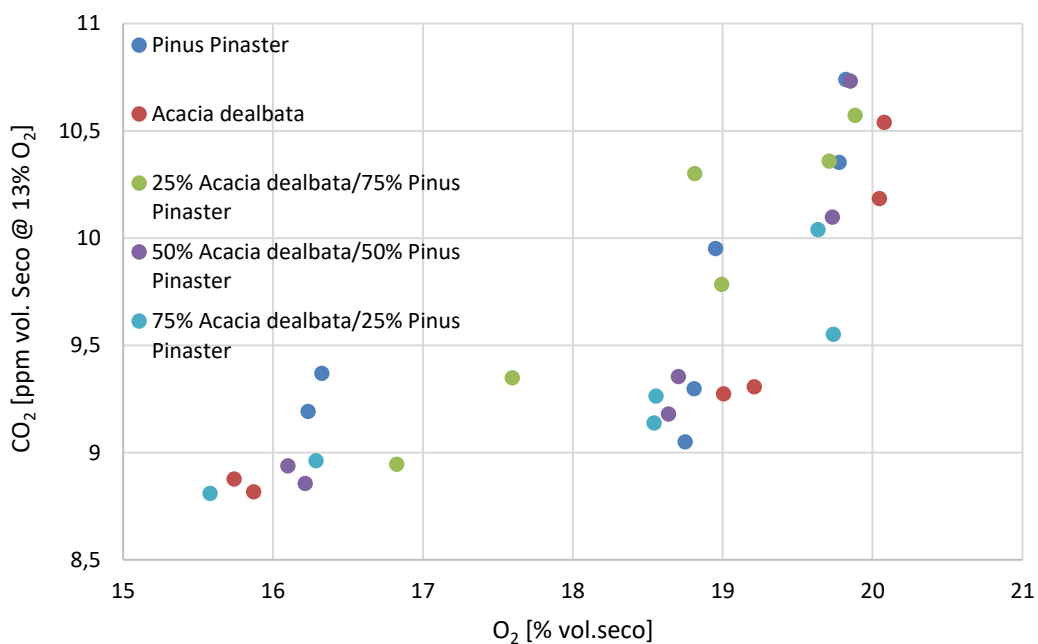
### Emissões de CO, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub>



**Figura B.1-** Emissões de CO em função da concentração de O<sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.

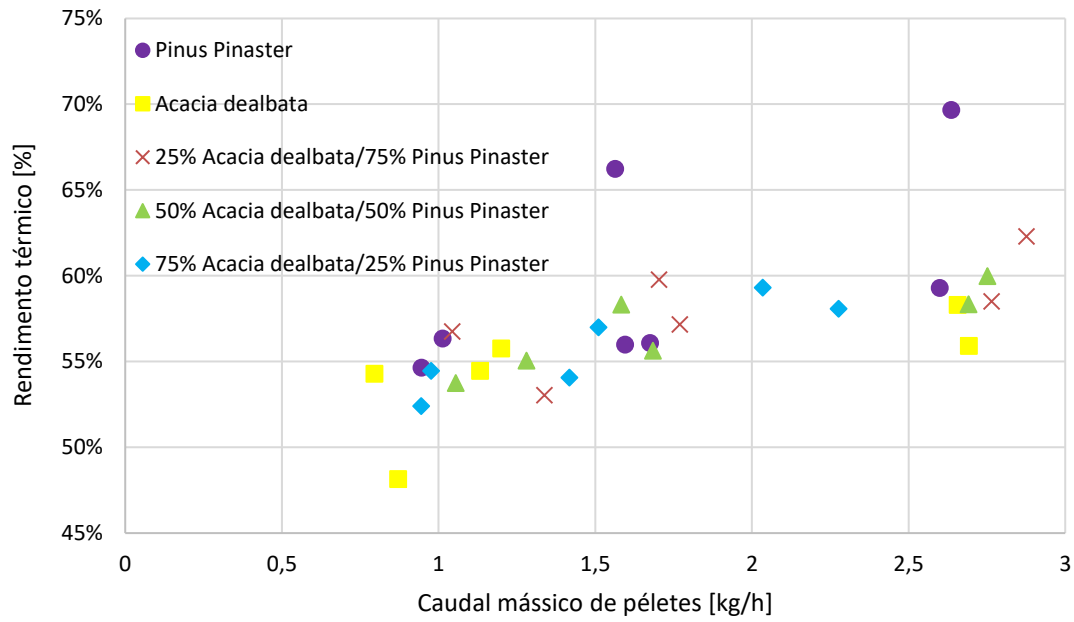


**Figura B.2-** Emissões de NO<sub>x</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.



**Figura B.3-** Emissões de CO<sub>2</sub> em função da concentração de O<sub>2</sub> para todos os ensaios realizados.

**Rendimento térmico em função do caudal mássico de combustível**



**Figura B.4-** Rendimento térmico em função do tipo de péletes e do seu caudal mássico para todos os ensaios realizados.

