



**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**  
Universidade Técnica de Lisboa

**Influência das características do combustível no  
desempenho energético e ambiental de caldeiras  
domésticas**

**Miriam Estefânia Rodrigues Fernandes Rabaçal**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

**Júri**

Presidente: Professor Doutor Hélder Carrico Rodrigues

Orientador: Professor Doutor Mário Manuel Gonçalves da Costa

Vogal: Professor Doutor Edgar Caetano Fernandes

**Maior de 2010**



## Resumo

A crescente procura de *pellets* de biomassa fomenta a necessidade de procura de matérias-primas alternativas ao tradicional pinho. Nesse âmbito o presente trabalho consiste na avaliação experimental da influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de uma caldeira doméstica, tendo considerado três tipos de *pellets* de origem distintas, pinho, resíduos lenhosos e caroço de pêssego. O estudo incluiu ensaios em fase de arranque e em modo estacionário, tendo sido medidas as concentrações de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarbonetos e NO<sub>x</sub> nos gases de exaustão da caldeira, entre outras grandezas, que permitiram caracterizar a emissão de poluentes e, no caso dos testes em regime estacionário, determinar o rendimento térmico da caldeira. Os resultados obtidos revelam que as características do combustível têm uma forte influência nas condições de operação da caldeira, nomeadamente no seu rendimento térmico e na emissão de poluentes. Verificou-se que o aumento do rendimento térmico com o aumento da carga não é necessariamente acompanhado de uma melhoria das condições de combustão. A minimização da emissão de produtos de combustão incompleta exige um compromisso entre a temperatura e oxigénio disponível, em função do teor de voláteis do combustível, sendo as emissões de NO<sub>x</sub> fortemente influenciadas pelo teor em azoto do combustível. As *pellets* de pinho apresentaram o melhor desempenho energético com um rendimento térmico de 81% e emissões de CO de 140 ppm@13%O<sub>2</sub>, seguidas pelas *pellets* de caroço de pêssego com um rendimento térmico de 71% e emissões de CO de 200 ppm@13%O<sub>2</sub>, e pelas *pellets* de resíduos lenhosos com um rendimento térmico de 79% e emissões de CO de 950 ppm@13%O<sub>2</sub>. As *pellets* de caroço de pêssego apresentam um potencial elevado para serem utilizadas em caldeiras domésticas, exigindo, no entanto, estudos adicionais de forma a reduzir as elevadas emissões de CO que se observaram de modo a cumprir a norma EN 14785.

Palavras-chave: Biomassa, *Pellets*, Caldeira doméstica, Rendimento térmico, Poluentes

## Abstract

The growing demand of biomass pellets creates the need of using new raw materials besides the traditional pine. Within this scope, the present work evaluates the effect of the characteristics of the fuel on the energetic and environmental performance of a domestic boiler, using three types of pellets from different origins, pine, furniture and peach stone. Tests were performed at boiler start-up and under steady-state conditions with measurements of flue-gas concentrations of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, HC e NO<sub>x</sub> allowing for the characterization of the pollutant emissions and, in the case of the steady state tests, evaluation of the boiler thermal efficiency. The results reveal that the fuel characteristics have a strong influence on the boiler operating conditions, including on its thermal efficiency and pollutant emissions. The increase of the boiler thermal efficiency with the thermal input is not necessarily accompanied by improvements in the combustion conditions. The minimization of the emission of products of incomplete combustion requires a compromise between temperature and oxygen availability, depending upon the pellets' volatiles content, being the NO<sub>x</sub> emissions strongly affected by the fuel nitrogen content. Pine pellets present the best performance with a thermal efficiency of 81% and CO emissions of 140 ppm@13%O<sub>2</sub>, followed by the peach stone pellets with a thermal efficiency of 71% and CO emissions of 200 ppm@13%O<sub>2</sub>, and the furniture pellets with a thermal efficiency of 79% and CO emissions of 950 ppm@13%O<sub>2</sub>. Peach stone pellets appear to have an attractive potential to be used in domestic boilers, should the observed high CO emissions being minimize through additional research in order to comply with the normative EN 14785.

Key-words: Biomass, Pellets, Domestic boiler, Thermal efficiency, Pollutants

## Agradecimentos

Ao professor Mário Costa agradeço o apoio e orientação prestados durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos colegas Franck Buddekker e Ulisses Fernandes, que me acompanharam em equipa durante o trabalho, contribuindo de forma significativa para a realização do mesmo.

Agradeço ao Sr. Norberto e restante pessoal das oficinas das Áreas Científicas de Energia e Termofluidos e Ambiente e Energia do Departamento de Engenharia Mecânica, pela construção de equipamento utilizado nos ensaios.

Agradeço ao Sr. Rui Paulo Carreira da Casal & Carreira Biomassa, Lda, Alcobaça, pelo fornecimento de *pellets* de resíduos lenhosos e pela produção de *pellets* de caroço de pêssego.

Agradeço ao Manuel Pratas pelo apoio técnico prestado durante a montagem da instalação experimental e durante a realização dos ensaios.

Agradeço ainda a todos os colegas de laboratório que contribuíram para um bom ambiente de trabalho, assim como produtivo, nomeadamente o Pedro Quaresma, a Rute Henriques, o Wang Gongliang, o Anton Veríssimo, a Maura Rocha, o Amândio Rebola, a Maria Luís Castela e o José Pedro Madeira.

Por último quero agradecer e dedicar a tese à minha família, incluindo ao Hugo Chainho, pelo apoio prestado em todos os momentos.

# Índice de Conteúdos

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Âmbito e enquadramento .....	1
1.2 Biomassa em Portugal .....	5
1.3 Produção de calor para aquecimento no sector doméstico .....	16
1.4 Estudos prévios .....	24
1.5 Objectivos .....	33
<b>2. Fundamentos da combustão da biomassa</b> .....	<b>34</b>
2.1 Caracterização da biomassa como combustível .....	34
2.2 Combustão da biomassa .....	37
<b>3. Instalação experimental</b> .....	<b>48</b>
3.1 Descrição da caldeira .....	48
3.2 Descrição da instalação .....	51
3.3 Técnicas de medida e incertezas experimentais .....	51
<b>4. Resultados e discussão</b> .....	<b>55</b>
4.1 Condições experimentais .....	55
4.2 Estudos paramétricos .....	59
4.3 Recomendações para a melhoria do desempenho energético de caldeiras e controlo das suas emissões de poluentes .....	71
<b>5. Conclusões e recomendações para trabalhos futuros</b> .....	<b>73</b>
<b>6. Referências</b> .....	<b>77</b>
<b>7. Bibliografia</b> .....	<b>81</b>
<b>Anexo</b> .....	<b>83</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 – Balanço de carbono resultante da combustão de biomassa.....	1
Figura 2 – Consumo de energia primária nos países europeus pertencentes à OCDE em 2007 (IEA). .....	2
Figura 3 – Consumo de energia primária em Portugal no ano 2007 (IEA).....	2
Figura 4 – Taxas de IVA aplicadas aos combustíveis utilizados no sector de aquecimento doméstico e serviços em 2009.....	4
Figura 5 – Taxa de arborização por concelho e área florestal por espécie em Portugal [3]. .....	8
Figura 6 – Biomassa sólida: toros, casca de árvore, estilha e <i>pellets</i> . .....	9
Figura 7 – Tipos de biomassa densificada.....	10
Figura 8 – Esquema de uma unidade de produção de <i>pellets</i> [5]. .....	11
Figura 9 – Peletizadoras de discos planos [5]. .....	12
Figura 10 – Matriz de peletização em tambor.....	13
Figura 11 – Distribuição de <i>pellets</i> produzidas numa unidade de peletização para os consumidores finais.....	13
Figura 12 – Mapa das principais unidades de produção de <i>pellets</i> de grande escala em Portugal [7]. .....	15
Figura 13 – Combustíveis utilizados na indústria cerâmica [8].....	16
Figura 14 – Consumo de energia primária no sector doméstico (DGEG, 2007). .....	16
Figura 15 – Preços de combustível por kWh (CEBIO).....	17
Figura 16 – Estimativa de consumo de energia em equipamentos munidos de queimadores a propano/GN, <i>pellets</i> e estilha (CEBIO). .....	18
Figura 17 – Relação entre o custo específico e o tipo de sistema de aquecimento [10].....	19
Figura 18 – Estrutura típica de uma caldeira alimentada a <i>pellets</i> [11]. .....	19
Figura 19 – Depósito de combustível isolado: sala de armazenamento de <i>pellets</i> [12]. .....	20
Figura 20 – Sistemas de alimentação de <i>pellets</i> [11]. a) Através da base, b) pelo topo.....	20
Figura 21 – Células distribuidoras rotativas [11]. .....	22
Figura 22 – Evolução da eficiência e da emissão de monóxido de carbono de caldeiras de pequena escala (< 300 kW) alimentadas a biomassa nas últimas três décadas [11]. .....	23
Figura 23 – Evolução da massa de uma partícula de biomassa ao longo dos processos que ocorrem durante a combustão [1]. .....	38
Figura 24 – Modelo de uma partícula esférica em combustão. ....	39
Figura 25 – Mecanismo global de formação de partículas de cinzas durante a combustão da biomassa [6]. .....	45
Figura 26 – Instalação experimental. ....	48
Figura 27 – Dimensões da caldeira doméstica. ....	49

Figura 28 – Instalação experimental.....	51
Figura 29 – Representação esquemática da sonda de amostragem de gases e respectivas dimensões.....	52
Figura 30 – Fotografias das <i>pellets</i> utilizadas nos ensaios.....	55
Figura 31 – Temperatura e concentração de espécies gasosas presentes nos gases de exaustão da caldeira durante a fase de arranque.....	59
Figura 32 – Concentração de O <sub>2</sub> nos gases de exaustão e coeficiente de excesso de ar em função da carga térmica.....	61
Figura 33 – Emissões de CO, HC e NO <sub>x</sub> em função da carga térmica.....	61
Figura 34 – Desempenho energético da caldeira em função da carga térmica. a) Calor útil, perdas de calor sensível e outras perdas. b) Rendimento térmico e fracção de perdas de calor sensível e outras perdas.....	62
Figura 35 – Balanço de carbono em função da carga térmica.....	63
Figura 36 – Emissões de CO e NO <sub>x</sub> em função da concentração de O <sub>2</sub> nos gases de exaustão.....	64
Figura 37 – Emissão de CO, HC e NO <sub>x</sub> em função da carga térmica; a) pinho; b) resíduos lenhosos.....	66
Figura 38 – Emissão de poluentes provenientes de <i>pellets</i> de pinho, resíduos lenhosos e caroço de pêsego a carga térmica elevada.....	68
Figura 39 – Emissão de poluentes provenientes de <i>pellets</i> de pinho, resíduos lenhosos e caroço de pêsego a carga térmica reduzida.....	68
Figura 40 – Micrografias de partículas presentes nas cinzas residuais obtidas com o auxílio do microscópio de varrimento electrónico.....	70



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Resíduos de biomassa produzidos directamente da actividade florestal e agrícola. .	5
Tabela 2 – Resíduos de biomassa produzidos pelas actividades industriais de 1ª e 2ª transformação.....	6
Tabela 3 – Resíduos de biomassa de finalização do seu ciclo de vida.....	7
Tabela 4 – Área ocupada pelas espécies florestais existentes em Portugal [3].....	7
Tabela 5 – Disponibilidade de resíduos de biomassa para combustão [1].	8
Tabela 6 – Características principais da biomassa densificada: <i>pellets</i> e briquetes [2].....	10
Tabela 7 – Principais unidades de produção de <i>pellets</i> e capacidade de produção [7].....	14
Tabela 8 – Características típicas de caldeira suecas e austríacas [13].....	22
Tabela 9 – Limites de emissão de CO e rendimento imposto pela norma EN 14785. ....	24
Tabela 10 – Sumário dos estudos prévios (continua).....	25
Tabela 11 – Métodos analíticos normalizados para determinação das propriedades físicas e químicas da biomassa.....	35
Tabela 12 – Características de diferentes tipos de biomassa. ....	36
Tabela 13 – Composição química em percentagem mássica das cinzas presentes em vários tipos de biomassa e em carvão betuminoso [2].....	37
Tabela 14 - Principais fontes de emissões poluentes na combustão da biomassa [1]. ....	43
Tabela 15 – Características das <i>pellets</i> de acordo com a norma DIN 51731. ....	50
Tabela 16 – Principais características dos analisadores utilizados para a medição da concentração das espécies químicas. ....	52
Tabela 17 – Principais características das <i>pellets</i> utilizadas. ....	57
Tabela 18 – Caudal da bomba do circuito interno de água da caldeira.....	58
Tabela 19 – Condições de operação da caldeira para os testes da série A. ....	58
Tabela 20 – Condições de operação da caldeira para os testes da série B. ....	58
Tabela 21 – Condições de operação da caldeira para os testes da série C. ....	59
Tabela 22 – Condições nominais de operação da caldeira .....	67
Tabela 23 – Morfologia e composição das partículas presentes nas cinzas residuais. ....	70

# Nomenclatura

## Caracteres romanos

$C_p$	Calor específico a pressão constante
$\dot{m}_{H_2O}$	Caudal mássico de água
$\dot{m}_{ar}$	Caudal mássico de ar
$\dot{m}_{pellets}$	Caudal mássico de pellets
$M_i$	Massa molar da espécie i
$P$	Carga térmica
$\dot{Q}_u$	Calor útil
$\dot{Q}_{ge}$	Perdas de calor sensível nos gases de exaustão
$\dot{Q}_{perda}$	Perdas de calor por combustão incompleta e transferência de calor para a envolvente
$T$	Temperatura
$T_e$	Temperatura de entrada da água na caldeira
$T_s$	Temperatura de saída da água na caldeira

## Caracteres gregos

$\eta$	Eficiência térmica
$\lambda$	Coefficiente de excesso de ar

## Abreviações

bs	Base seca
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
EDS	Espectrómetro de dispersão de energia de raios-X
DLPI	<i>Dekati low pressure impactor</i>
MEV	Microscópio electrónico de varrimento
PCI	Poder calorífico inferior
SMPS	<i>Scanning mobility particle sizer</i>
XRD	<i>Energy dispersive X-ray spectrometer</i>
daf	<i>Dry ash free</i>

# 1. Introdução

## 1.1 Âmbito e enquadramento

A utilização de fontes renováveis para a produção de energia foi incentivada e fortemente divulgada na Europa e nos Estados Unidos da América a partir dos finais dos anos setenta do século passado. Neste contexto, a produção de energia a partir de biomassa vegetal constitui uma componente importante, inicialmente valorizando os resíduos agrícolas, florestais e agro-industriais já existentes, e posteriormente dando cada vez mais importância à produção de biomassa com fins energéticos. No que diz respeito à sua classificação, segundo a definição de biomassa constante na Directiva 2001/77/EC de 27 de Setembro de 2001, é “a fracção biodegradável de produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da floresta e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”.

O sol é a fonte primária da energia potencial contida em todos os biocombustíveis. A energia proveniente do sol, sob a forma de radiação, é capturada e armazenada pelo processo de fotossíntese e pode ser aproveitada através da combustão. A combustão de biocombustíveis produz emissões de  $\text{CO}_2$ , o qual é absorvido durante o ciclo de crescimento da biomassa, que será novamente capturado pelo cultivo sustentável de biomassa. Desta forma o balanço de carbono é neutro (ver Figura 1).

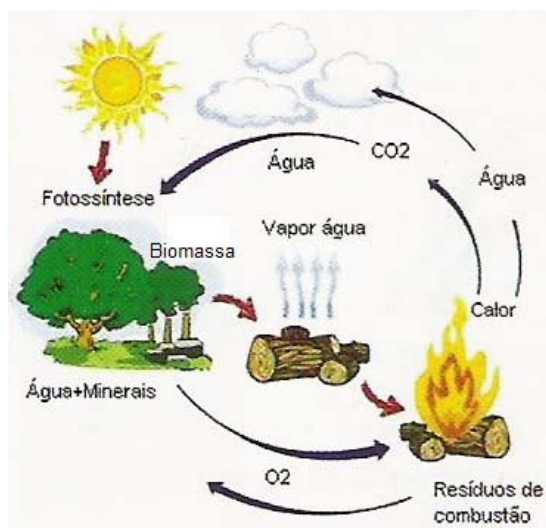


Figura 1 – Balanço de carbono resultante da combustão de biomassa.

Apesar de o  $\text{CO}_2$  emitido durante a combustão da biomassa não contribuir para um incremento de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, o cultivo, a recolha e o processamento do combustível, a par da sua produção e da operação das infra-estruturas necessárias, implicam uma contribuição

para o aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, dado o modelo actual de energia, assente principalmente no uso de combustíveis fósseis.

Actualmente, em todo o Mundo, milhões de pessoas utilizam a biomassa como fonte de energia, principalmente nos países em vias de desenvolvimento, sendo, no entanto, uma grande parte utilizada em processos simples, poluidores e ineficazes em termos energéticos [1]. Na Figura 2 está representado o consumo de fontes de energia primária nos países europeus pertencentes OCDE no ano 2007, onde se verifica que os combustíveis derivados de biomassa e resíduos representam a maior fatia de renováveis. Constata-se ainda que 77% da energia primária é proveniente de combustíveis fósseis, seguindo-se a energia nuclear e, por último, apenas 9,1% da energia primária é proveniente de fontes renováveis, num consumo total de 1827 Mtep.

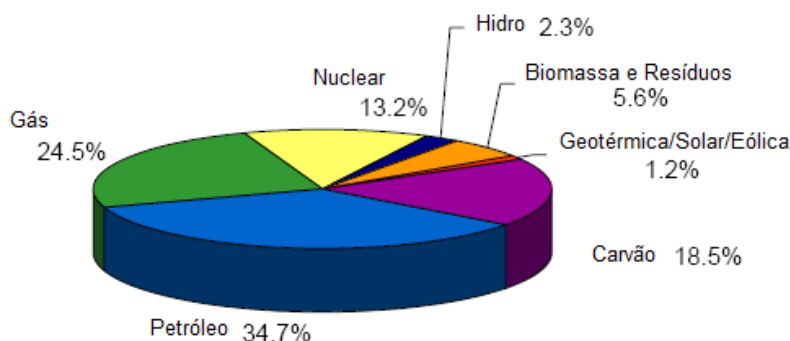


Figura 2 – Consumo de energia primária nos países europeus pertencentes à OCDE em 2007 (IEA).

Em Portugal o consumo de energia primária proveniente de fontes renováveis representa 18,8% de consumo total de 25 Mtep, sendo o restante proveniente de combustíveis fósseis. Mais uma vez, dentro das fontes renováveis, os combustíveis provenientes da biomassa e resíduos apresenta a maior fatia, sendo que é expectável que o crescimento exponencial do sector eólico que se tem verificado nestes últimos anos tenha um impacto considerável no consumo de energia primária a breve trecho (ver Figura 3).

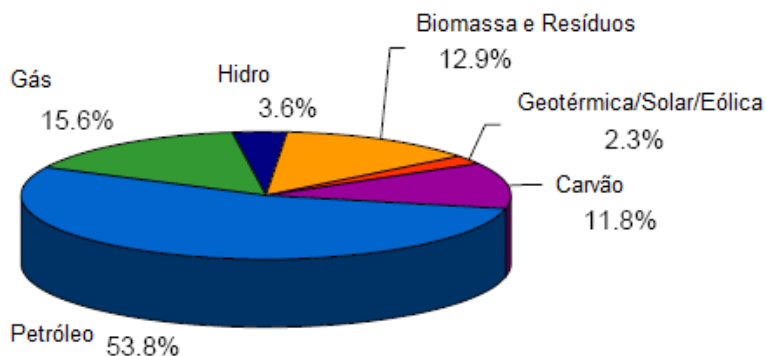


Figura 3 – Consumo de energia primária em Portugal no ano 2007 (IEA).

A Figura 3 revela ainda a grande dependência de Portugal do petróleo, correspondendo a mais de 50% do consumo de energia primária. Face ao declínio das reservas de petróleo, que se reflectiu em grandes oscilações do preço do barril nos últimos anos, aos problemas de sustentabilidade ambiental associados ao uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) e ainda à dependência energética externa, torna-se obvia a necessidade de uma mudança do modelo energético actual, baseado em combustíveis fósseis, para um modelo baseado num *mix* de fontes de energia com uma elevada participação de fontes de energia renovável.

Em Março de 2007 a União Europeia (UE) aprovou uma abordagem integrada da política climática e energética, que visa combater as alterações climáticas e aumentar a segurança energética da UE, reforçando simultaneamente a sua competitividade. Os Chefes de Estado e de Governo definiram uma série de exigências climáticas e de energia a serem cumpridas até 2020, nomeadamente:

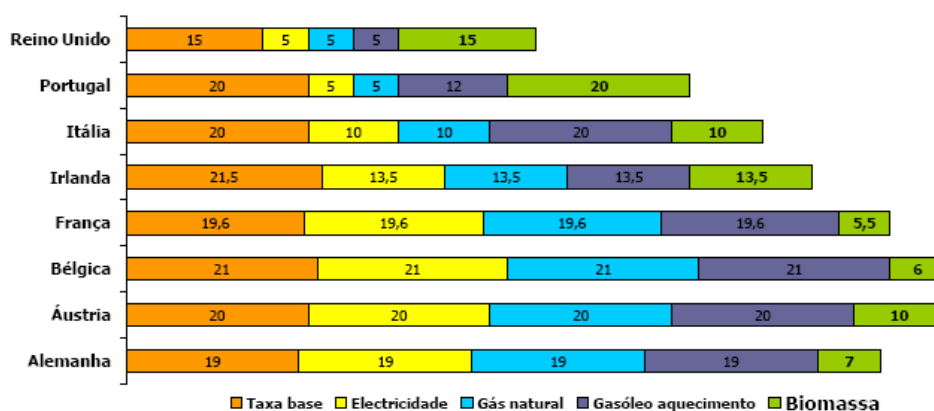
- Redução das emissões de gases com efeito de estufa na UE, no mínimo 20% abaixo dos níveis de 1990.
- Contributo de 20% de fontes de energia renováveis no consumo de energia primária total da UE.
- Redução de 20% no consumo de energia primária em comparação com os níveis previstos, a ser alcançado através da melhoria da eficiência energética.

Colectivamente, estes são conhecidos como os objectivos "20-20-20". Na negociação da adopção da Directiva 2009/28/CE Portugal estabeleceu um compromisso de atingir uma meta de 31% do consumo de energia primária proveniente de renováveis até 2020.

Com vista ao cumprimento das metas foram tomadas diversas medidas de incentivo, verificando-se, todavia, uma lacuna ao nível da promoção do uso de biomassa no mercado do aquecimento doméstico e serviços. Nesta área é necessária a criação de incentivos fiscais para a sua implementação no mercado interno, tal como uma redução da taxa de IVA aplicada actualmente aos biocombustíveis sólidos. A Figura 4 revela que, nalguns países da UE existe uma tendência para a penalização do uso de combustíveis fósseis no sector do aquecimento doméstico e serviços, a favor do uso de biomassa. No entanto, em Portugal a realidade é completamente oposta.

Mesmo assim, têm verificado alguns avanços na utilização desta fonte de energia no aquecimento doméstico, apesar de ser utilizada com uma baixa eficiência energética. Em paralelo, a biomassa continua a ser uma fonte de energia marginal na utilização em larga escala, como em centrais térmicas e termoeléctricas. Em outros países europeus, como a Suécia, Áustria e Alemanha, a biomassa tem vindo a consolidar-se como alternativa fiável às fontes energéticas convencionais, sendo já bastante largo o número de aplicações em grandes centrais. Entre as causas que contribuem para a fraca penetração no mercado nacional encontram-se a sua imaturidade no mercado da energia, o facto de utilizar tecnologias

relativamente novas ou introduzir problemas de operação nas instalações onde é utilizada em co-combustão [1].



**Figura 4 – Taxas de IVA aplicadas aos combustíveis utilizados no sector de aquecimento doméstico e serviços em 2009.**

A grande vantagem da biomassa em relação a outras fontes de energia renovável é a possibilidade de controlo da geração de energia de acordo com as necessidades. A sua aplicação para produção de electricidade restringe-se a média e grande escala, dado que, devido ao baixo rendimento em pequena escala, não é uma fonte de micro-produção de energia eléctrica rentável. No entanto, para a micro-produção de calor a biomassa é extremamente competitiva face à generalidade dos combustíveis fósseis, com excepção do gás natural.

Os tipos de biomassa com alto potencial energético incluem resíduos agrícolas tais como palha, bagaço de azeitona, cascas de café e arroz, para além dos resíduos provenientes de actividades florestais e indústria madeireira tais como podas e serradura [2]. Tradicionalmente usa-se biomassa densificada proveniente de serrações e podas florestais, mas a elevada procura torna necessário encontrar outras matérias-primas para a produção de biomassa densificada. A grande desvantagem da biomassa é a forma de conversão de energia, através da combustão, que resulta na emissão de gases e partículas nocivas para o meio ambiente e provocam a deterioração da qualidade do ar. A combustão de madeira densificada foi extensamente caracterizada em estudos antecedentes, tornando-se necessário caracterizar a combustão de biomassa densificada proveniente de outras matérias-primas de uma forma comparativa.

O uso de resíduos agrícolas como combustível é reduzido, devido principalmente à escassa informação sobre as características da combustão e emissão de poluentes associadas a este tipo de combustíveis, fundamentais para o projecto e operação eficiente de sistemas de combustão. Ao contrário dos combustíveis convencionais, determinadas propriedades físicas e químicas, tais como o elevado teor em humidade, a baixa densidade, as baixas temperaturas de fusão das cinzas e o elevado teor em voláteis, tornam o processamento e combustão dos

resíduos agrícolas bastante complexos. A perspectiva de utilização de resíduos agrícolas é um factor que leva à necessidade de se realizarem estudos para averiguar o impacto ambiental devido à emissão de gases poluentes e partículas, assim como a eficiência da sua combustão, para futuros desenvolvimentos na concepção de sistemas de combustão de biomassa.

## 1.2 Biomassa em Portugal

### Caracterização da biomassa disponível

De acordo a definição de biomassa, esta pode ter origem em diversos sectores da actividade humana. São produzidos resíduos de biomassa directamente da actividade florestal e agrícola, das actividades industriais de 1ª e 2ª transformação e ainda da finalização do ciclo de vida de produtos lenhosos. No entanto este resíduos possuem outras utilizações finais, para além da obtenção de energia através da queima ou produção de biocombustíveis líquidos e gasosos. As Tabelas 1 a 3 apresentam os principais resíduos produzidos pelas actividades supra indicadas, onde se incluem as principais utilizações finais.

Os resíduos florestais incluem os topos e ramos de pinheiros e eucaliptos, podas de sobreiros e azinheiras. Em alguns casos a casca do eucalipto é retirada ainda no eucaliptal, começando, no entanto, a ser mais frequente a sua remoção na indústria durante o processamento dos toros. Os resíduos da actividade agrícola são constituídos por podas de culturas permanentes (árvores de fruto, olivais) e resíduos resultantes do processamento para a obtenção do produto principal de culturas temporárias (centeio, milho, girassol). Pode-se incluir biomassa originada em culturas energéticas, no entanto, neste caso não se trata de um resíduo, mas do produto final.

Tabela 1 – Resíduos de biomassa produzidos directamente da actividade florestal e agrícola.

Processo gerador	Resíduos gerados	Principais utilizações finais
<b>Tratamentos silvícolas (limpezas, cortes sanitários, podas e limpezas de matos)</b>	Árvores e toros sem valor comercial, ramos, matos, etc.	Combustível Biocombustíveis sólidos Compostagem Incorporação no solo
<b>Desbastes comerciais Cortes finais</b>	Copas, ramos, troncos sem valor comercial, lenha, material contaminado	Combustível Biocombustíveis sólidos Indústria da madeira
<b>Actividade agrícola</b>	Podas de culturas permanentes, palhas, cascas, etc.	Rações Combustível

A indústria produz uma ampla variedade de resíduos de biomassa com diversas utilizações finais. O sector agro-industrial apresenta-se como um sector onde a produção de resíduos de biomassa atinge valores consideráveis, no entanto, a grande maioria apresenta elevados teores de humidade (50% a 80%), como é caso do ramo das bebidas ou do

concentrado de tomate. Por outro lado, os resíduos resultantes de algumas indústrias, como as do fabrico de óleo de soja de girassol e do fabrico de açúcar de beterraba, apresentam baixos valores de humidade (10% a 13%). No entanto, devido ao seu elevado valor proteico, estes resíduos têm uma grande procura pelas indústrias de rações para animais, o que eleva bastante o seu valor de mercado (133 a 215 €/ton), tornando-os economicamente inviáveis para utilização como fonte de energia renovável [1].

**Tabela 2 – Resíduos de biomassa produzidos pelas actividades industriais de 1ª e 2ª transformação.**

<b>Processo gerador</b>	<b>Resíduos gerados</b>	<b>Principais utilizações finais</b>
<b>Serrações</b>	Serrim, costaneiras, retestos, casca, lenha, etc...	Indústria da madeira Combustível Biocombustíveis sólidos
<b>Produtos da cortiça</b>	Placas de má qualidade, pó e aparas de cortiça	Outra indústria da cortiça Combustível
<b>Produtos semi-acabados de madeira</b>	Fitas, serrim, costaneiras, retestos, casca, etc...	Indústria da madeira Produção animal Combustível Biocombustíveis sólidos
<b>Fabrico de mobiliário e carpintarias</b>	Fitas, serrim, retestos	
<b>Outras indústrias da madeira</b>	Fitas, serrim, costaneiras, retestos, casca, lenha etc...	
<b>Fabrico de pasta e papel</b>	Casca	Combustível
<b>Agro-indústria</b>	Resíduos lenhosos Resíduos da exploração animal	Combustível Rações Biogás e Bioetanol

A valorização energética de produtos de madeira em fim de vida é uma alternativa atractiva à reciclagem. No entanto a contaminação das madeiras com vestígios de produtos derivados de petróleo e produtos cuja presença no combustível implica um cuidado especial na operação dos sistemas de combustão, em particular na manutenção, implica que o uso destes resíduos com combustível seja cuidadosamente ponderado.

Em Portugal, a principal fonte de biomassa é, sem dúvida, a floresta a qual representa um terço da área total do País, constituindo desta forma um importante recurso que deverá ser avaliado no sentido de se obter um conveniente aproveitamento dos resíduos aí produzidos. A floresta portuguesa cobre cerca de 38% do território. Esse valor demonstra claramente a importância da biomassa sólida como recurso em Portugal. Contudo, a área florestal tem sofrido reduções ao longo dos anos, ao ser devastada por contínuos incêndios, geralmente ocasionados por mão criminosa e uso indevido do fogo [3].



Tabela 3 – Resíduos de biomassa de finalização do seu ciclo de vida.

Processo gerador	Resíduos gerados	Principais utilizações finais
<b>Produtos lenhosos (embalagens, postes, vedações, ornamentação)</b>	Madeiras contaminadas (tratamento, tintas, vernizes, cimentos, etc...)	Combustível (queima controlada)
<b>Material de demolição Construção civil (caixilharia, revestimentos, cofragens)</b>		Reciclagem

Para estimar a disponibilidade da biomassa de origem florestal em Portugal é necessário avaliar os recursos florestais do país e o uso por parte de múltiplas indústrias que obtêm da floresta a sua matéria-prima, tais como a indústria da madeira ou a indústria do papel. Apesar da produção de madeira para a indústria ser o principal objectivo da exploração florestal, o aproveitamento dos resíduos não implica alterações no seu modelo de gestão, apenas algumas alterações logísticas necessárias à recolha dos resíduos produzidos [1].

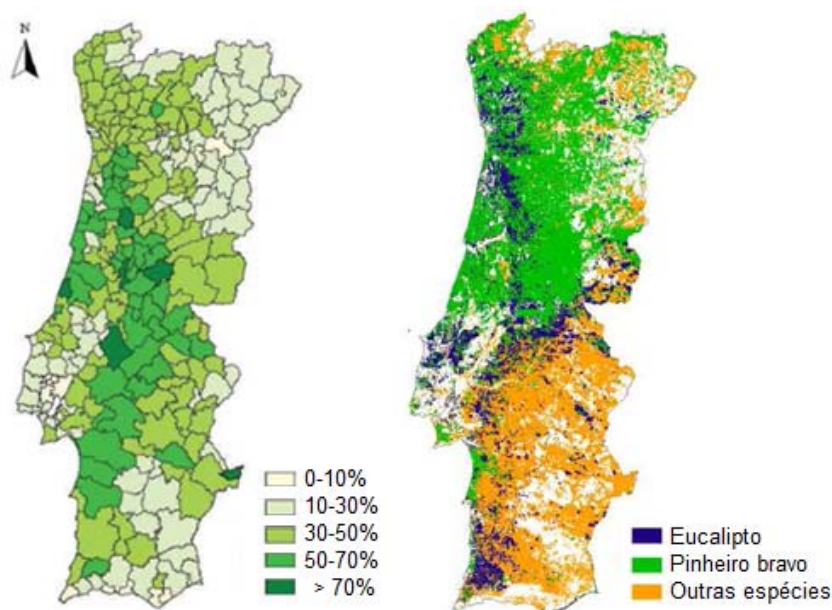
Segundo a Direcção Geral de Florestas, actualmente AFN, a floresta ocupa 3 349 327 hectares. Existem condições para que este valor seja superior, caso sejam aproveitadas as extensas áreas de incultos e improdutivo que, segundo a AFN, ocupam aproximadamente 2 300 000 hectares. Este aproveitamento, realizado de forma sustentável, aumentaria a área arborizada para quase o dobro, totalizando cerca de 64% do território nacional. A floresta portuguesa é dominada pelo pinheiro bravo, o eucalipto, e o sobreiro e a azinheira, ambos com uma percentagem inferior em relação aos anteriores, ocupando no seu conjunto quase 85% da floresta portuguesa. Dos restantes 15% fazem parte o carvalho e o castanheiro, entre outras espécies de resinosas e folhosas (ver Tabela 4 e Figura 5).

Tabela 4 – Área ocupada pelas espécies florestais existentes em Portugal [3].

Espécies florestais	Área (ha)
<b>Pinheiro bravo (<i>pinus pinaster</i>)</b>	976 069
<b>Pinheiro manso (<i>pinus pinea</i>)</b>	77 650
<b>Outras resinosas</b>	27 358
<b>Azinheira (<i>Quercus ilex</i>)</b>	461 577
<b>Carvalho</b>	130 899
<b>Castanheiro</b>	40 579
<b>Eucalipto</b>	672 149
<b>Sobreiro</b>	712 813
<b>Outras folhosas</b>	102 037
<b>Total</b>	3 349 327

O pinheiro bravo tem encontra-se sobretudo no Centro e Norte Litoral, sendo que esta espécie ocupa a maior área florestal, com uma grande importância económica como matéria-prima para a indústria da madeira. Em segundo lugar surge o eucalipto, espécie nativa da Oceânia, cuja implantação e crescimento (meados do séc. XX) coincide com a criação e

desenvolvimento da indústria papelreira, para a qual o eucalipto é fonte de matéria-prima, assim como o pinheiro. Na margem Sul do Tejo, o sobreiro e azinheira predominam.



**Figura 5 – Taxa de arborização por concelho e área florestal por espécie em Portugal [3].**

Dias [1] avaliou a disponibilidade anual de resíduos de biomassa em Portugal nos seus sectores principais. Estimou uma produção anual total de 5630 mil toneladas secas/ano de resíduos, sendo que a biomassa produzida com potencial de utilização para a combustão engloba 2628 mil toneladas secas/ano, provenientes principalmente da floresta e agricultura. Na

Tabela 5 encontram-se resumidos os resultados obtidos.

**Tabela 5 – Disponibilidade de resíduos de biomassa para combustão [1].**

Resíduos	Quantidade disponível (mil ton secas/ano)	Período
<b>Resíduos florestais<sup>1</sup></b>	988	Todo o ano
<b>Caules de milho e girassol</b>	829	Agosto – Outubro
<b>Podas de árvores de fruto, olival<sup>2</sup> e vinha</b>	603	Dezembro – Janeiro
<b>Bagaço de azeitona</b>	61	Novembro – Fevereiro
<b>Transformação da madeira e cortiça</b>	147	Todo o ano
<b>TOTAL</b>	<b>2628</b>	

<sup>1</sup> Produção anual de resíduos, excepto resíduos com valor comercial e resíduos consumidos pela central termoelectrétrica de Mortágua

<sup>2</sup> Fracção dos ramos sem valor comercial

Tendo em conta as diferenças na composição dos resíduos obtidos nos diferentes sectores e a irregularidade na oferta ao longo do ano, a densificação do material poderá ser um

importante meio de homogeneização do combustível para subsequente utilização. Esta homogeneização é indispensável para aproveitamento destes resíduos para combustão, uma vez que estão em causa combustíveis de natureza diferentes e com composições químicas diferentes (e.g., teor em cinzas), que poderá levar ao funcionamento irregular do sistema de combustão.

A estimativa da disponibilidade de resíduos de biomassa para combustão, por si só, não permite uma avaliação completa do potencial de utilização de biomassa para a produção de energia, visto que é meramente um indicador global da disponibilidade do recurso. A distribuição geográfica dispersa das fontes de biomassa implica uma avaliação dentro do contexto geográfico da zona em estudo onde se inclui, não só a distribuição de fontes de biomassa, como o acesso a infra-estruturas de transporte a armazenamento, a partir do qual se possa mapear o potencial energético e económico relacionando a oferta com a procura. Com vista a este fim, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) torna-se uma ferramenta útil, sendo que o numerosos investigadores têm feito uso desta ferramenta para estimar e mapear as fontes de energia renovável em diversas regiões do planeta, incluído Portugal. Fernandes e Costa [4] avaliaram o potencial dos resíduos florestais e agrícolas na região de Marvão para a produção de energia e utilização, utilizando o SIG em conjunto com informação estatística. A maior vantagem da utilização deste sistema é a obtenção de uma avaliação quantitativa, tendo em conta os factores geográficos que influenciam a disponibilidade e o custo da produção de biomassa.

### **Densificação da biomassa para obtenção de pellets**

A biomassa sólida encontra-se disponível em várias formas para a combustão, tal como recolhida ou processada. Na Figura 6 observa-se, da esquerda para a direita, toros (lenha), casca de árvore, estilha e *pellets*, sendo que o nível de processamento também aumenta no mesmo sentido.



**Figura 6 – Biomassa sólida: toros, casca de árvore, estilha e *pellets*.**

O uso de biomassa densificada possui vantagens importantes em relação ao uso de biomassa não densificada, tais como:

- Maior tempo de armazenamento, em comparação com a lenha, dado que não ocorre degradação acentuada devido ao baixo teor em humidade.

- Elevada densidade energética – uma tonelada de *pellets* contém o mesmo conteúdo energético do que meia tonelada de lenha, ocupando um terço do espaço.
- Custo reduzido – o rendimento térmico elevado torna o custo por unidade de energia mais baixo.
- Manuseamento fácil – alimentação dos sistemas de combustão é automática, fáceis de transportar e armazenar.
- Manutenção fácil, os equipamentos de combustão exigem remoção de cinzas e limpezas periódicas.
- Ignição rápida, devido a um teor de humidade e dimensões uniformes.
- Menor emissão de partículas.
- Características homogêneas – a combustão dá-se de forma uniforme e consistente.

A biomassa densificada também se apresenta em diversas formas como se pode observar na Figura 7, nomeadamente em briquetes e *pellets*. Na Tabela 6 comparam-se as características destes dois tipos de biomassa densificada.

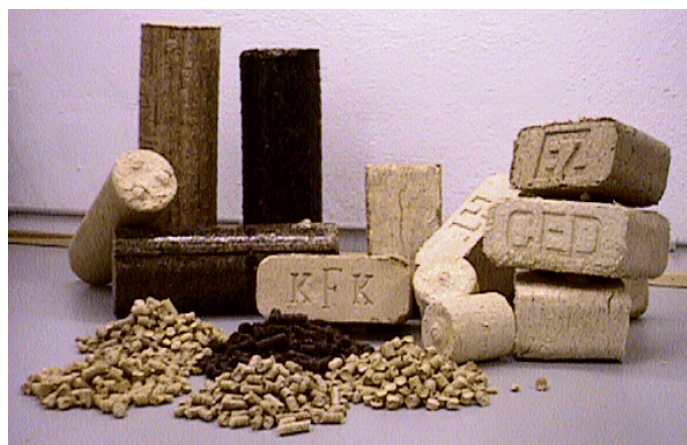


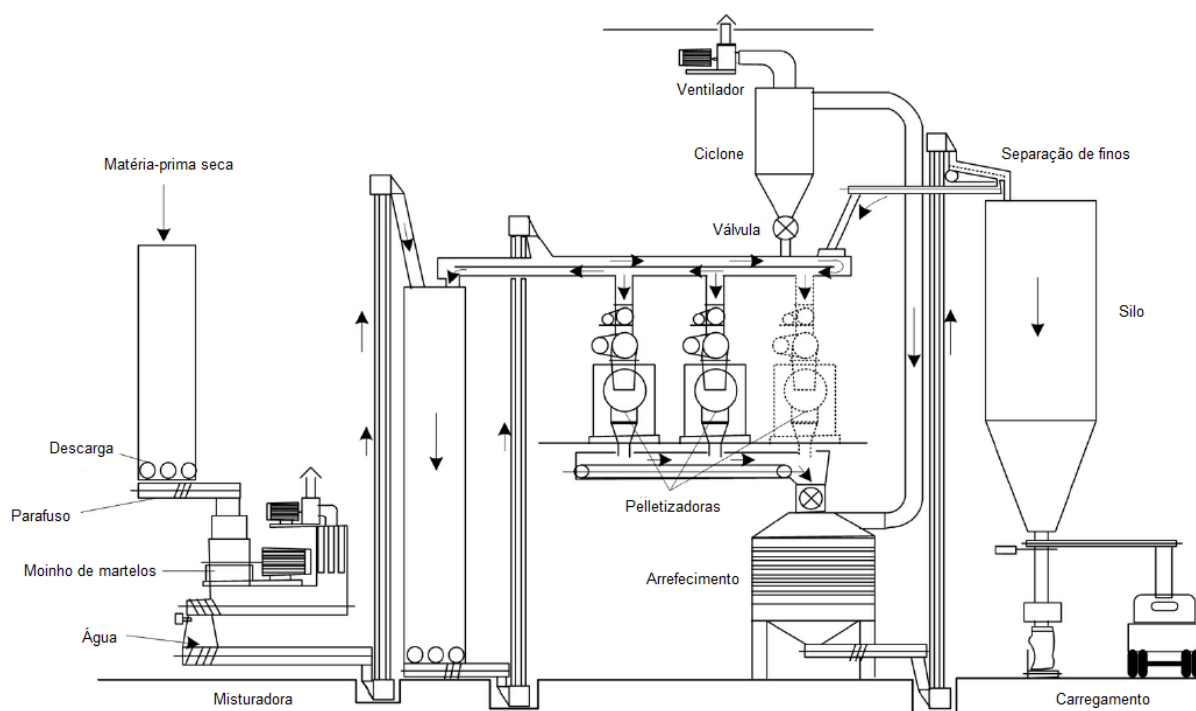
Figura 7 – Tipos de biomassa densificada.

Tabela 6 – Características principais da biomassa densificada: *pellets* e briquetes [2].

Combustível	<i>Pellets</i>	Briquetes
Humidade da biomassa de origem	10-20%	10-15%
Capacidade máxima de produção	4-6 ton/h	1-1,5 ton/h
Consumo energético (corte e prensagem)	80-90 kWh/ton	40-50 kWh/ton
Preparação da biomassa	Trituração em pequenas partículas	Trituração em partículas maiores
Dimensões do produto final	Diâmetro: 6-12 mm Comprimento: 10-30 mm	Largura: 20-100 mm Comprimento: 30-300 mm
Sistemas de combustão	Automatizados	Podem ser usadas em instalações para toros
Matéria-prima	Serradura, desperdícios de madeira e resíduos agrícolas	Serradura, desperdícios de madeira e resíduos agrícolas

Na utilização de biomassa densificada em sistemas domésticos automáticos é necessário obter altos padrões de qualidade, pelo que em alguns países europeus já se encontra em vigor a aplicação de algumas normas que regulamentam a produção deste tipo de combustível, enquanto noutros ainda se encontram em preparação. No entanto, estes altos padrões de qualidade a exigir na utilização em pequenos equipamentos não são aplicáveis para os equipamentos industriais, uma vez que estes se encontram equipados com sistemas mais sofisticados para o controlo da combustão, tratamento dos gases de exaustão e controlo do processo [1]. Actualmente, em alguns países europeus, onde a utilização de biomassa densificada em aplicações domésticas está mais divulgada, já estão em vigor normas que regulamentam os critérios de qualidade a exigir ao combustível. As especificações físico-químicas a cumprir pelas *pellets* e briquetes de biomassa são regulamentadas pelas normas vigentes mais relevantes, nomeadamente a ÖNORM M 7135 (Áustria), DIN 51731 (Alemanha), SN 166000 (Suíça), SS 18 71 20 (Suécia) e normas da *Austrian Pellets Association*.

A densificação de biomassa para obtenção de *pellets* segue a sequência de operações: recolha de matéria-prima, secagem, separação de material indesejado, pulverização, adição de água, peletização (prensagem), arrefecimento, separação de finos e embalagem/transporte. Na Figura 8 mostra-se a sequência de operações numa unidade típica de produção de *pellets*.



**Figura 8 – Esquema de uma unidade de produção de *pellets* [5].**

### Secagem

A matéria-prima deve ser sujeita a secagem uniformemente de modo a obter um teor baixo em humidade (8-12% massa seca), antes de ser prensada. Durante a prensagem, a

temperatura e a pressão sobem consideravelmente, pelo que excesso de humidade pode causar problemas, em particular a formação de vapor pode provocar a desintegração das *pellets*. Por outro lado, um baixo teor de humidade é desejável para garantir uma combustão eficiente, no entanto, se o teor em humidade for excessivamente baixo a superfície e os agentes de aglomeração das *pellets* podem carbonizar durante a prensagem, tornando o processo difícil devido a inadequada transferência de calor.

#### Moagem

Após a secagem, a matéria-prima é conduzida à moagem, onde martelos pulverizam a matéria-prima, diminuindo e homogeneizando a granulometria. Desta forma obtêm-se *pellets* com uma densidade constante.

#### Adição de água

A adição de água, na forma de vapor, cobre a superfície das partículas com uma fina camada de líquido, melhorando a capacidade de aglomeração.

#### Peletização (prensagem)

A peletização é obtida com recurso a matrizes de compressão, que podem ser na forma de discos planos (ver Figura 9) ou tambores (ver Figura 10). Durante o processo geram-se elevadas temperaturas e pressões, tornando as componentes da madeira maleáveis e aglomerando o material sob a forma de *pellets*. O processo dispensa o uso de agentes aglomerantes adicionais. A capacidade das peletizadoras pode variar entre 100 kg e 10 ton/h [6].

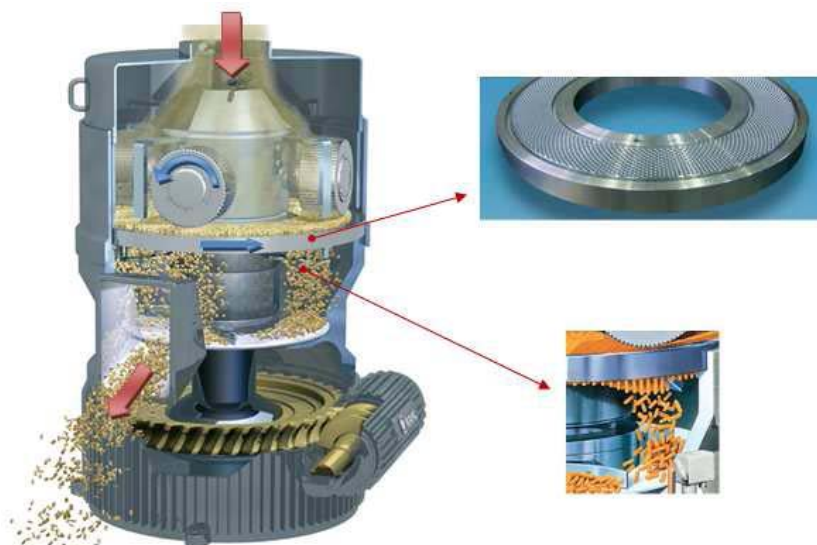


Figura 9 – Peletizadoras de discos planos [5].



Figura 10 – Matriz de peletização em tambor.

### Arrefecimento

Durante o processo de densificação a temperatura do material aumenta. Um arrefecimento controlado estabiliza e aumenta a dureza das *pellets*. É um passo importante porque o vapor formado durante a densificação condensa e as *pellets* não podem perder o seu formato. O excesso de condensado é removido na linha de arrefecimento.

Após a produção de *pellets*, estas podem ser embaladas em sacos de pequena ou grande dimensão, ou distribuídas a granel para a indústria, sector do comércio, ou ainda directamente ao consumidor, com se esquematiza na Figura 11.

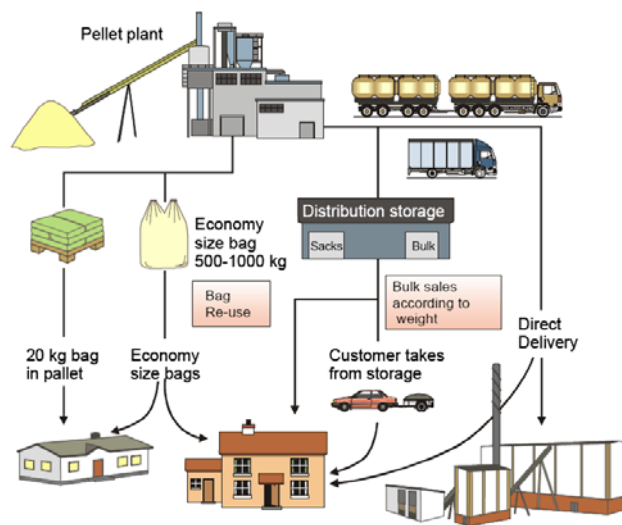


Figura 11 – Distribuição de *pellets* produzidas numa unidade de peletização para os consumidores finais.

### **Mercado de *pellets***

O mercado Português de *pellets* está ainda numa fase inicial, não estruturado e sem uma rede de distribuição estabelecida. Não existe nenhuma associação de produtores de *pellets*, pelo que não existe uma base que contenha dados históricos. No sentido de

desenvolver e promover um mercado de *pellets* europeu transparente, o projecto *pellets@las* tem como objectivo o desenvolvimento de uma base de dados com informação sobre o mercado de *pellets*, tendo sido fundado pelo Programa Europeu de Energia Inteligente. Com base no relatório elaborado para o caso português [7] são apresentados os aspectos fundamentais do mercado de *pellets*.

O mercado começou a desenvolver-se em 2005, e desde esse ano que empreendedores e investigadores envolveram-se activamente no crescimento deste. A produção encontra-se em franca expansão, tendo havido um crescimento substancial de 200% em 2007, relativamente a 2006. O consumo interno é pouco significativo, apesar de as vendas de equipamentos domésticos para aquecimento que utilizam *pellets* como combustível estarem a crescer. A maior parte da produção é exportada.

Em 2008 existiam 11 fábricas produtoras de *pellets*, mas 4 encontravam-se em fase inicial, enquanto as outras 6 estavam totalmente operacionais. No ano de 2008 existiam unidades em construção pelo que actualmente o número total de fábricas é superior ao registado em 2008. Em 2008 a produção total atingiu 100 000 toneladas, no entanto a capacidade de produção é muito maior existindo um potencial de produção de 390 000 toneladas. Os produtores portugueses são na maioria de grande escala, com uma capacidade de produção que pode ultrapassar 70 000 toneladas anuais.

Pequenos produtores também estão operacionais, no entanto enfrentam uma forte competição dos grandes produtores. O crescimento notório da produção em Portugal deve-se em parte ao investimento e gestão por parte de grandes empresas internacionais que facilita o desenvolvimento evitando problemas técnicos graças à experiência acumulada. Na Tabela 7 estão listados as principais unidades de produção de *pellets* em funcionamento ou em fase inicial no ano de 2008. A sua distribuição geográfica pode ser vista na Figura 12.

**Tabela 7 – Principais unidades de produção de *pellets* e capacidade de produção [7].**

<b>Unidades de produção de <i>pellets</i></b>	<b>Capacidade de produção (ton/ano)</b>
<b>Biomad Energias Renováveis, Lousada</b>	2000
<b>Enermontijo, Pegões</b>	85 000
<b><i>Pellets</i> Power, Mortágua</b>	100 000
<b><i>Pellets</i> Power, Alcácer do Sal</b>	90 000
<b>Jungle Power, Porto</b>	90 000
<b>Porto de Aveiro, Aveiro</b>	Em fase inicial
<b>Porto de Sines, Sines</b>	Em fase inicial
<b>BioBriquette, Quimbres</b>	30 000
<b>Flogística, Vila Verde</b>	Em fase inicial
<b>Briquetes Raro, Vila Nova de Gaia</b>	Em fase inicial
<b>Enerplegy, Lisboa</b>	Em fase inicial



A maior parte da produção, cerca de 90%, ou 90 000 toneladas no ano de 2008, foram exportadas principalmente para países do norte da Europa. Note-se que a distribuição das unidades de produção de *pellets* concentra-se no litoral do país, em redor dos principais portos (Aveiro, Figueira da Foz, Sines) evidenciando a posição estratégica com vista à exportação.



Figura 12 – Mapa das principais unidades de produção de *pellets* de grande escala em Portugal [7].

A matéria-prima utilizada pelos produtores em geral consiste em resíduos da indústria madeireira (pinho Mediterrânico) e restos de poda de eucalipto e pinho. Não existe ainda no mercado Português a produção de *pellets* constituídas por misturas de diversos tipos de biomassa, incluindo resíduos agrícolas (caroço de azeitona, cascas de semente de girassol, vides, entre outros), ao contrário do que se verifica noutros países, tais como Espanha ou o Brasil. São produzidos essencialmente dois tipos de *pellets* para duas aplicações:

- Industriais: *pellets* provenientes de resíduos de baixa qualidade, apropriados para queimadores de grande escala,
- Residenciais: *pellets* provenientes de resíduos de melhor qualidade, seguindo as normas DIN plus.

O consumo interno português é extremamente reduzido. Devido ao clima temperado as necessidades de aquecimento em Portugal são muito inferiores às necessidades nos países onde existe um mercado mais desenvolvido, como a Alemanha, Áustria, países Escandinavos, entre outros, e conseqüentemente a procura é muito menor. A utilização de madeira prensada na forma de *pellets* como combustível de aquecimento tem sido marginal, a população em

geral está pouco familiarizada com as vantagens da utilização deste combustível para aquecimento doméstico, recorrendo a tecnologias que usam combustíveis convencionais como o gás natural ou o o gasóleo.

Dado o clima temperado do país, mesmo com uma crescente utilização de *pellets* como combustível de aquecimento, prevê-se que a exportação irá sempre ultrapassar o consumo interno, pelo que é crucial identificar os mercados com potencial para exportação e criar e aplicar medidas legais, financeiras e económicas que permitam o desenvolvimento do sector de uma forma sustentável. A produção de calor na indústria (panificação, cerâmica, etc) é um nicho de mercado com um elevado potencial que deve ser explorado, tendo em conta que a biomassa é utilizada em apenas 15,4% da indústria cerâmica (ver Figura 13).

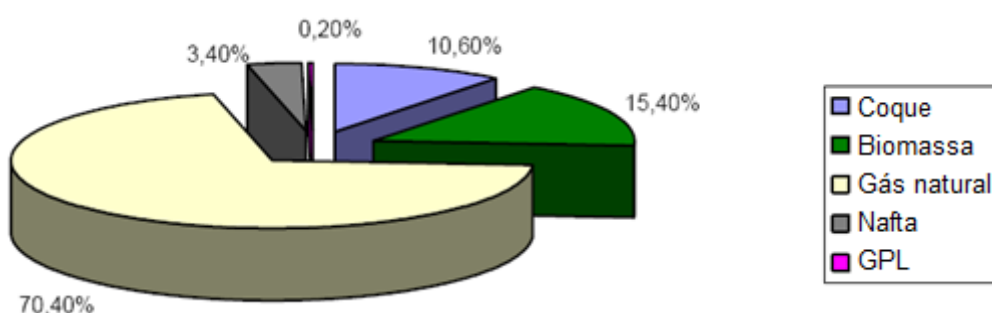


Figura 13 – Combustíveis utilizados na indústria cerâmica [8].

### 1.3 Produção de calor para aquecimento no sector doméstico

#### Consumo energético e tecnologias de aquecimento

A biomassa tem sido uma importante fonte de energia primária para o aquecimento residencial, tradicionalmente através da queima de lenha em lareiras. No entanto, tem sofrido uma forte concorrência por parte da electricidade, como se pode observar na Figura 14.

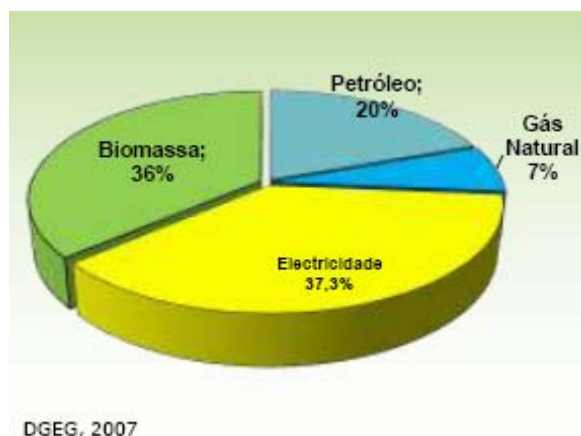


Figura 14 – Consumo de energia primária no sector doméstico (DGEG, 2007).

As tecnologias de aquecimento com base na electricidade (bomba de calor, resistência eléctrica, etc) caracterizam-se por uma baixa manutenção, elevado controlo, fácil e limpa operação, o que potencia a sua popularidade. O consumo de petróleo é inferior ao consumo de biomassa ou electricidade, e o consumo de gás natural é marginal.

Com o advento da liberalização do mercado energético todos os combustíveis passam a estar sujeitos a flutuações de preços. Dado que prevê-se que se atinja o pico do petróleo e do gás natural, é natural esperar que os preços dos combustíveis fósseis aumentem, diminuindo a sua competitividade. De facto, o preço por kWh da biomassa (*pellets* e *estilha*) é inferior ao preço dos combustíveis fósseis, como se verifica na Figura 15.

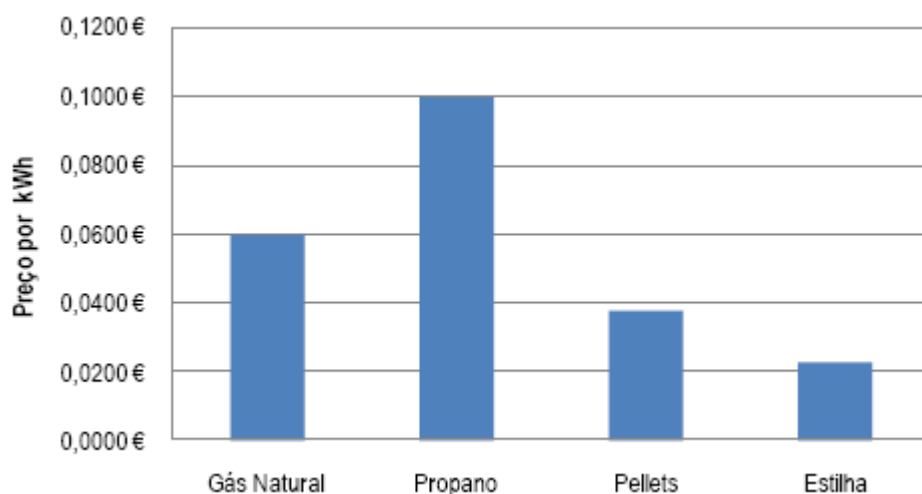
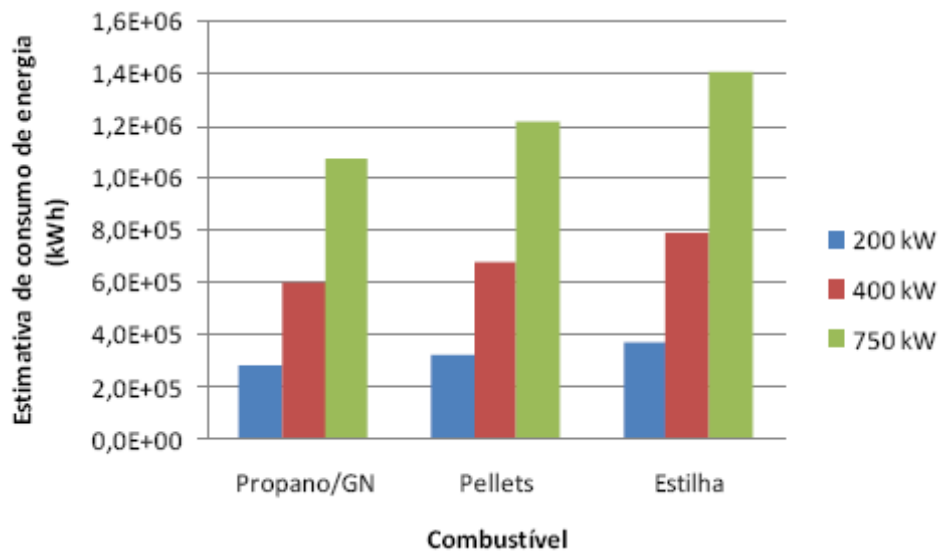


Figura 15 – Preços de combustível por kWh (CEBIO).

O facto de o preço por kWh da biomassa ser inferior ao preço dos combustíveis fósseis não significa que o seu uso seja mais económico. As tecnologias de aquecimento alimentadas a biomassa têm tipicamente rendimentos inferiores, resultando num maior consumo de energia face a uma necessidade térmica específica, como se pode constatar na Figura 16. No entanto, têm-se verificado melhorias significativas no rendimento de caldeiras de aquecimento doméstico alimentadas a *pellets*, como será discutido no estado da arte.

### Estado da arte das caldeiras alimentadas a *pellets* de pequena escala

A combustão de biomassa progrediu desde a queima a céu aberto para sistemas sofisticados de combustão controlada de biomassa. Tradicionalmente, a biomassa tem sido usada sob a forma de toros, mas actualmente a biomassa é sujeita a um conjunto de transformações físicas, tal como a densificação, com vista à homogeneização das suas propriedades físico-químicas.



**Figura 16 – Estimativa de consumo de energia em equipamentos munidos de queimadores a propano/GN, *pellets* e estilha (CEBIO).**

No sector doméstico os equipamentos de combustão de biomassa são utilizados em duas vertentes: sistemas de aquecimento centralizado usando caldeiras ou fornalhas; ou sistemas de aquecimento localizado baseados em fogões, estufas e lareiras, dependendo não só da necessidade térmica, como também da necessidade de distribuição calor. Os sistemas de aquecimento localizado aplicam-se a pequenas áreas, especificamente para o aquecimento de áreas/zonas singulares de uma habitação. Por outro lado os sistemas centralizados permitem uma gama de utilização incluindo o aquecimento de residências unifamiliares em toda a área habitável, aquecimento de edifícios de habitação e serviços e sistemas de aquecimento domiciliário (*district heating*), onde a distribuição de calor é feita através de um sistema dedicado de tubagens e radiadores, onde circula água como fluido de transporte de calor. O calor pode ser fornecido ao ambiente recorrendo a radiadores convencionais ou a um sistema de piso/superfície radiante. Os sistemas de aquecimento podem ser usados em conjunto com colectores solares, tendo, desta forma, a caldeira uma função de apoio, entrando em funcionamento sempre que a energia absorvida pelos colectores não for suficiente para suprimir as necessidades térmicas. A associação de colectores solares a caldeira domésticas pode reduzir até cerca de metade as emissões de CO [9].

Na Figura 17 observa-se a relação entre o custo específico e a potência típica dos sistemas de combustão apropriadas para o aquecimento no sector doméstico. Verifica-se que existe uma tendência que relaciona sistemas de aquecimento para habitações unifamiliares e sistemas de aquecimento para grandes edifícios. Quanto maior for a necessidade térmica, menor será o custo específico de investimento. Os custos específicos de investimento associados aos grandes sistemas de aquecimento domiciliário, comuns em certos países do norte e centro da Europa, incluem os custos associados à instalação de uma rede dedicada de distribuição de calor.

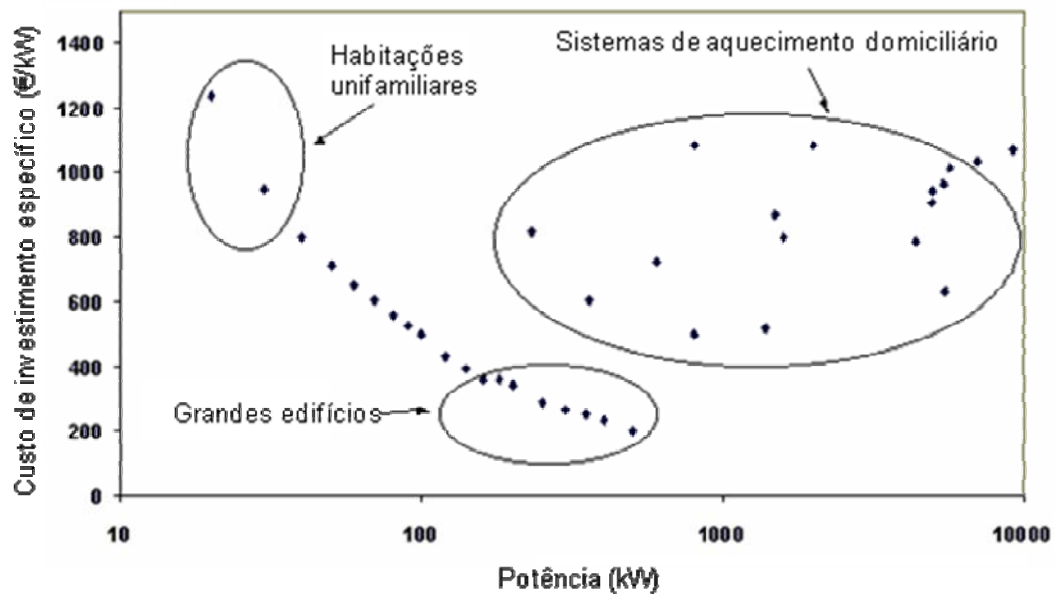


Figura 17 – Relação entre o custo específico e o tipo de sistema de aquecimento [10].

Em geral os sistemas de combustão de biomassa são mais complexos que os sistemas de aquecimento convencionais (gás, electricidade), especialmente no que toca ao armazenamento e manuseamento do combustível e à câmara de combustão. Na Figura 18 observa-se a estrutura típica de uma caldeira alimentada a *pellets*, que inclui (começando no canto superior direito, no sentido do ponteiro do relógio) um depósito de combustível, sistema de alimentação, fornecimento de ar, câmara de combustão e permutador de calor.

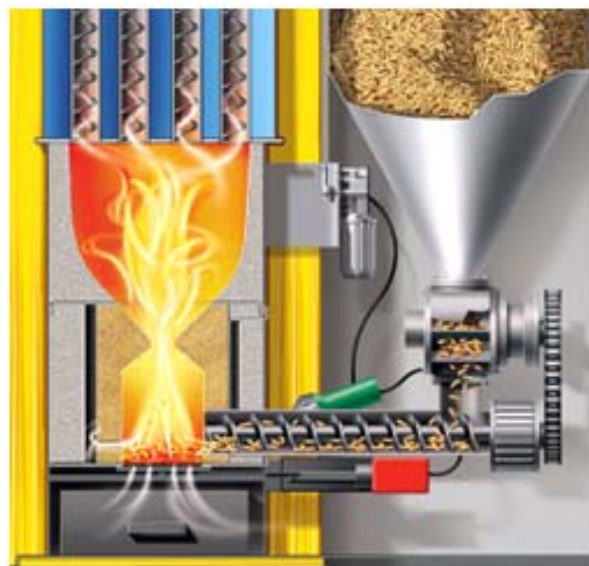


Figura 18 – Estrutura típica de uma caldeira alimentada a *pellets* [11].

### Depósito de combustível

O depósito pode ser isolado ou integrado, sendo mais adequado para utilização intensiva ou reduzida, respectivamente. Os depósitos integrados (Figura 18) possuem uma capacidade limitada, implicando o reabastecimento periódico, enquanto um depósito isolado (sala ou tanque de armazenamento), ver Figura 19, permite o armazenamento de combustível suficiente para a estação de aquecimento.



Figura 19 – Depósito de combustível isolado: sala de armazenamento de *pellets* [12].

### Tipos de alimentação de combustível

O transporte de *pellets* desde o armazenamento até à câmara de combustão é feito tipicamente através de parafusos sem fim. A frequência com que o parafuso roda um determinado passo dita o caudal de alimentação de *pellets* e, desta forma, faz-se o controlo da carga térmica. Os parafusos são posicionados de três formas, permitindo três tipos de alimentação: horizontal (Figura 18), pelo topo (Figura 20b) e através da base (Figura 20a). Os tipos de alimentação apresentam diferentes vantagens e desvantagens.

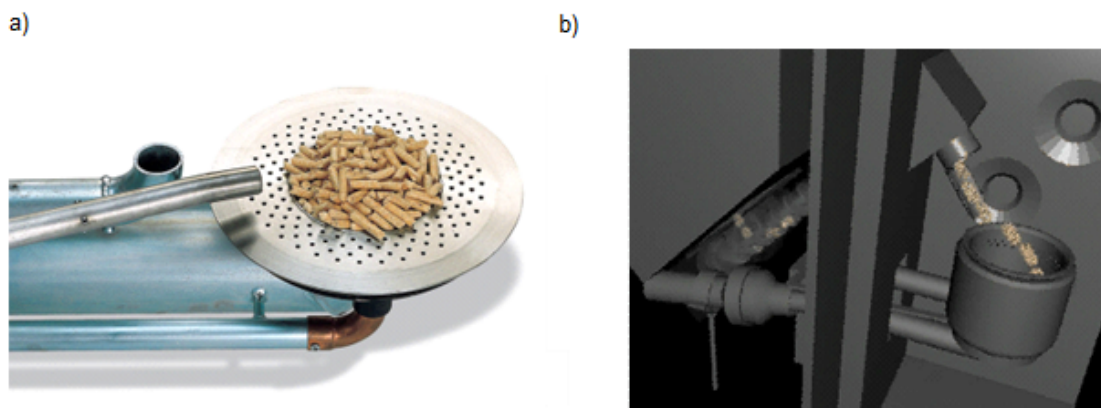


Figura 20 – Sistemas de alimentação de *pellets* [11]. a) Através da base, b) pelo topo.

Os queimadores alimentados pelo topo são frequentemente utilizados tanto nas caldeiras como em estufas com a grande vantagem de o depósito de combustível estar separado da câmara e combustão, sendo o perigo de retorno de chama para o depósito mínimo. Por outro lado, previne a ocorrência de um período longo com partículas incandescentes após o fim da combustão, assegurando um doseamento adequado de *pellets* de acordo com a necessidade. Como desvantagem, a queda de *pellets* no leito de combustão têm um efeito negativo, resultando num aumento da ejeção de finos e partículas não queimadas causando uma combustão irregular.

Os queimadores alimentados pela base foram originalmente projectados para o uso de estilha, mas também são adequados para as *pellets*. O parafuso sem fim impulsiona as *pellets* para o disco de combustão, onde ocorre a combustão primária. O ar secundário é injectado na periferia. A combustão é consistente, seguida por um longo período com partículas incandescentes. São necessárias medidas adicionais de segurança para minimizar o risco de retorno da chama.

A alimentação horizontal é semelhante à alimentação pela base, diferindo no tipo de grelha. Implica ainda um mecanismo adicional de remoção de cinzas.

#### Controlo da combustão

A modulação é um método típico de controlo de potência, consistindo na operação em potência máxima e mínima, para o funcionamento no inverno e no verão, respectivamente. Para cada potência, a alimentação de ar e de *pellets* são mantidas constantes. As possibilidades de controlo são desta forma limitadas. Um adequado ajuste inicial das condições de operação efectuado pelo instalador é de extrema importância, pois um ajustamento desadequado resulta em combustão deficiente, com elevada emissão de poluentes e baixo rendimento. Alguns fabricantes incluem um sensor lambda, permitindo uma regulação adequada de alimentação de ar e de combustível. Tipicamente a ignição é obtida com recurso a ar aquecido por uma resistência eléctrica.

#### Segurança

O maior problema de segurança reside na possibilidade de ocorrência de retorno de chama para o depósito. Para prevenir esta situação algumas medidas preventivas podem ser aplicadas. A solução mais simples é o uso de alimentação pelo topo com uma válvula de fecho no túnel de queda controlada por um sensor de temperatura. O uso de células distribuidoras (ver Figura 21) rotativas é comumente usado em queimadores com alimentação horizontal e pela base. Caso ocorra retorno de chama, as células funcionam como uma barreira entre a chama e o depósito. Os materiais que constituem o sistema de alimentação de *pellets* desde o depósito até à câmara de combustão devem ser inflamáveis.



Figura 21 – Células distribuidoras rotativas [11].

### Manutenção

As operações de manutenção de caldeiras alimentadas a biomassa implicam uma maior manutenção por parte do consumidor do que as caldeiras alimentadas a combustíveis líquidos e gasosos [13]. As operações de manutenção incluem:

- Reposição de combustível
- Limpeza da grelha (remoção de cinzas e depósitos)
- Remoção das cinzas do tabuleiro
- Limpeza da tubagem de exaustão

Alguns queimadores possuem sistemas integrados de remoção de cinzas e limpeza do sistema.

Na Tabela 8 encontram-se listadas as principais características de caldeiras suecas e austríacas, incluídos características estruturais, propriedades da combustão e o custo de investimento.

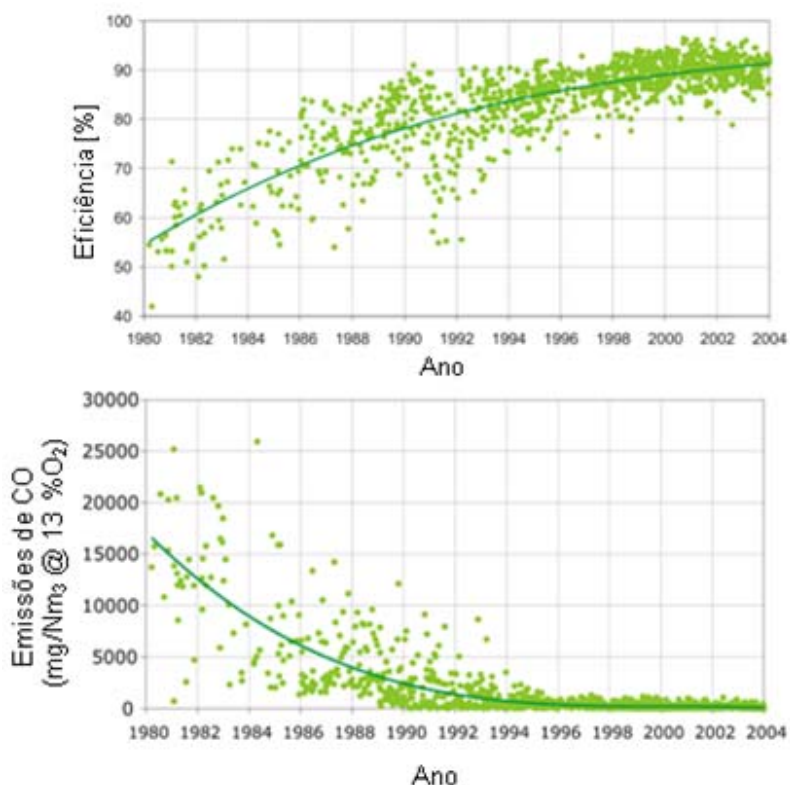
Tabela 8 – Características típicas de caldeira suecas e austríacas [13].

Propriedade	Caldeiras Suecas	Caldeiras Austríacas
Depósito	Isolado	Integrado
Modulação de Potência	50%/100%	30-100%
Rendimento nominal	78-85%	86-94%
Fornecimento de ar de combustão	Ventilador, sobrepessão	Ventilador, sobrepessão
Controlo de combustão	Inexistente	Inexistente Sensor lambda Ventilador de velocidade variável
Ignição	Automático	Automático
Limpeza da exaustão	Manual	Automático, opcional
Limpeza da grelha	Manual	Automático, opcional
Remoção de cinzas	Manual	Automático, opcional
Intervalo de remoção de cinzas	Semanal	2-8 vezes por ano
Emissões de CO (mg/m <sup>3</sup> )	260-650 (10% O <sub>2</sub> )	12-250 (13% O <sub>2</sub> )
Custo de investimento	4000-6000 €	7000-10 000 €



Comparando as características das caldeiras, verifica-se que as caldeiras austríacas possuem um rendimento superior e emissões de CO inferiores, possivelmente devido aos sistemas de controlo de combustão que possuem.

Nas últimas décadas tem-se verificado um desenvolvimento considerável das caldeiras de queima de biomassa de pequena escala, com potência inferior a 300 kW, como se pode constatar pela Figura 22. O aumento de eficiência que se verificou (Figura 22), chegando a ultrapassar 90%, em contraste com os valores típicos do princípio da década de 80 do século passado de cerca de 50%, coloca estes equipamentos no mesmo patamar de eficiências dos equipamentos alimentados a combustíveis fósseis. A emissão de monóxido de carbono, por sua vez, sofreu uma redução drástica. Com efeito, no princípio da década de 80 do século passado verificavam-se valores de emissão de monóxido de carbono (normalizado a 13% de O<sub>2</sub> na exaustão) na ordem de 15 000 mg/Nm<sup>3</sup>, e actualmente os equipamentos produzem emissões extremamente reduzidas (Figura 22).



**Figura 22 – Evolução da eficiência e da emissão de monóxido de carbono de caldeiras de pequena escala (< 300 kW) alimentadas a biomassa nas últimas três décadas [11].**

Actualmente as caldeiras de aquecimento residencial são sujeitas ao cumprimento de requisitos de projecto, fabrico, segurança e emissões impostos pela norma EN 14785, aprovada pelo *European Committee for Standardization* (CEN) em 2006. Estes requisitos visam proteger a população de gases e partículas nocivas para a sua saúde, assim como encorajar

os fabricantes a otimizar os seus produtos de modo a minimizar as emissões de poluentes [14]. A norma impõe os limites máximos de emissão de CO e mínimos de rendimento térmico, os quais se encontram na Tabela 9.

**Tabela 9 – Limites de emissão de CO e rendimento imposto pela norma EN 14785.**

<b>EN 14785</b>	<b>Emissão máxima de CO (ppm@13% O<sub>2</sub>)</b>	<b>Rendimento térmico mínimo (%)</b>
<b>Potência reduzida</b>	600	70
<b>Potência máxima</b>	400	75

## 1.4 Estudos prévios

Neste subcapítulo são apresentados os estudos científicos prévios que, dentro do âmbito desta dissertação, apresentam resultados de relevância para comparação com os resultados obtidos. Foram seleccionados estudos em que foi avaliada a influência dos parâmetros de funcionamento e das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras/estufas de pequena escala ou de reactores que simulem as câmaras de combustão deste tipo de sistema de combustão de biomassa. Na Tabela 10 são listados sumariamente: instalação, combustível, metodologia e principais conclusões dos vários autores seleccionados; seguindo-se uma avaliação de como os vários parâmetros de funcionamento e as características do combustível afectam a desempenho energético e ambiental dos sistemas de combustão, com base nos resultados obtidos pelos autores.

Os resultados obtidos pelos vários autores permitem avaliar o efeito de diversas condições de operação e das características do combustível no desempenho e energético e ambiental, tal como se descreve em seguida.

### Arranque da caldeira

Dias et al. [15] caracterizaram a fase de arranque de uma caldeira doméstica para diferentes tipos de *pellets*. O tempo de propagação de chama difere entre os tipos de *pellets*, tendo-se registado velocidades de propagação entre 0,03 e 0,07 m/s. Quando o processo de ignição se inicia a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão diminui drasticamente. Simultaneamente a concentração de CO aumenta, atingido máximos relativamente elevados, tendo-se registado uma concentração de 1,5% para dois tipos de *pellets* em particular. Para um terceiro tipo de *pellet* foi registado um máximo inferior, de 0,8%, possivelmente devido a uma maior concentração de O<sub>2</sub>, dureza diferente e um *burnout* diferente. Para um quarto tipo de *pellets*, que possuíam um diâmetro superior ao recomendado pelo fabricante da caldeira, observaram-se irregularidades na alimentação das *pellets* à câmara de combustão. Como resultado, a temperatura durante a combustão era reduzida e instável, produzindo elevadas emissões de CO.

Tabela 10 – Sumário dos estudos prévios (continua).

Referência/ Objetivo	Instalação experimental	Combustível	Principais conclusões
Dias et al. [15]  Análise da influência da carga térmica no rendimento e nas emissões de poluentes em regime de arranque e em regime estacionário.	Caldeira comercial de 13 kW.  Medições de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub> e a temperatura dos gases de exaustão, temperaturas de entrada e saída de água da caldeira.	4 tipos de <i>pellets</i> de origem florestal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As perdas por combustão incompleta são superiores no caso das <i>pellets</i> com o diâmetro médio superior ao recomendado.</li> <li>• As emissões de CO, em regime estacionário, foram na maior parte dos casos inferiores a 1500 mg/Nm<sup>3</sup>, com valores mínimos de concentração de O<sub>2</sub> próximo de 13%.</li> <li>• As emissões de NO<sub>x</sub>, em regime estacionário, correlacionam-se com o excesso de ar e teor em azoto das <i>pellets</i>.</li> <li>• Em regime de arranque as emissões de CO atingiram um máximo de 1,5% e são dependentes da intensidade de combustão.</li> </ul>
Sippula et al. [16]  Análise da influência das características do combustível nas emissões de poluentes.	Estufa comercial de 13 kW.  Medições de CO, CO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão.  Medição de concentração mássica (mg/m <sup>3</sup> ) de partículas usando um DLPI e de COVs usando uma resina adsorvente, após diluição de acordo com a norma ISO 8178-1.	11 tipos de <i>pellets</i> de origem florestal, incluindo madeira e cascas, bétula, abeto, pinho, amieiro e salgueiro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O tipo de combustível tem influência na emissão de poluentes e partículas, em particular o teor de cinzas.</li> <li>• O teor em cinzas do combustível influencia a condições de operação.</li> <li>• As emissões de partículas são influenciadas pelo aumento da libertação de matéria orgânica e pelas condições com conduzem a combustão incompleta.</li> </ul>
Díaz et al. [17]  Análise da influência das características do combustível na emissão de poluentes.	Caldeira experimental de 170 kW.  Medição de O <sub>2</sub> , CO e NO <sub>x</sub> nos gases de exaustão.	1 tipo de <i>pellets</i> de origem florestal (pinho)  3 tipos de <i>pellets</i> de origem em culturas energéticas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As emissões de CO obtidas aparentam estar relacionadas com o excesso de ar, no entanto são necessários testes adicionais.</li> <li>• As <i>pellets</i> de culturas energéticas apresentam valores de emissões de CO equiparáveis às <i>pellets</i> de origem florestal.</li> <li>• As emissões de NO<sub>x</sub> correlacionam-se com o teor em azoto do combustível.</li> </ul>

Tabela 10 - Sumário dos estudos prévios (continuação).

Referência/ Objectivo	Instalação experimental	Combustível	Principais conclusões
<p>González et al. [18], [19] e [20]</p> <p>Análise da influência das características do combustível no desempenho energético e emissão de poluentes em regime estacionário.</p>	<p>Caldeira comercial de 12 kW.</p> <p>Medições de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, HC, temperatura e pressão nos gases de exaustão.</p>	<p>1 tipo de <i>pellets</i> de origem florestal.</p> <p>5 tipos de <i>pellets</i> de origem em resíduos agrícolas (peles e sementes de tomate, de caroço de azeitona, podas de amendoeira, cascas de amêndoa e peles de amêndoa).</p> <p>3 tipos de <i>pellets</i> de origem em culturas energéticas (cardo, caniço-de-água e sorgo).</p> <p>Foram ainda testadas várias misturas nas proporções 50%/50%, 75%/25% e 25%/75%.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O efeito da variação da carga térmica e do caudal de ar é semelhante em todos os tipos de <i>pellets</i> utilizadas nos 3 estudos. As emissões de CO estão relacionadas com a escassez de oxigénio.</li> <li>• As <i>pellets</i> de misturas de diferentes resíduos revelaram melhor desempenho do que as <i>pellets</i> de composição individual.</li> <li>• As misturas de resíduos com maior PCI proporcionam um maior rendimento.</li> </ul>
<p>Klason e Bai [21]</p> <p>Estudo computacional do processo de combustão de pellets e mecanismos de formação de NO, em grelha fixa e comparação com resultados experimentais.</p>	<p>Reactor experimental 8-11 kW.</p> <p>Medições de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO e temperatura em 10 posições ao longo do eixo vertical do reactor, desde o leito de combustão até à saída dos gases de exaustão.</p>	<p>1 tipo de <i>pellets</i> de origem florestal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O processo de combustão pode ser controlado de forma eficaz através dos jactos de ar secundário e de ar terciário.</li> <li>• A montante da zona de combustão o processo de formação de N<sub>2</sub>O pelo mecanismo intermédio é dominante.</li> </ul>

Tabela 10 - Sumário dos estudos prévios (continuação).

Referência/ Objectivo	Instalação experimental	Combustível	Principais conclusões
Johansson et al. [22]  Comparação das emissões de poluentes provenientes de caldeiras alimentadas a toros, briquetes e <i>pellets</i> .	7 caldeiras com diferentes configurações, depósitos e tipo de combustível.  Medições de CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , COT, COV, NO <sub>x</sub> , PAH, e partículas nos gases de exaustão.	Madeira (toros), briquetes, <i>pellets</i> de origem florestal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As caldeira alimentadas a <i>pellets</i> produzem emissões de poluente reduzidas.</li> <li>• As emissões de CO estão relacionadas com a temperatura.</li> <li>• De modo a minimizar a emissão de poluentes, as caldeiras alimentadas a toros devem ser acopladas a tanques de acumulação ou ser substituídas por caldeiras alimentadas a <i>pellets</i>.</li> </ul>
Winter et al. [23]  Estudo dos mecanismos de formação de NO e N <sub>2</sub> O de diferentes biomassas num rector experimental em condições estacionárias.	Reactor experimental.  Medições de CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , HC, NO, N <sub>2</sub> O, HCN, e NH <sub>3</sub> nos gases de exaustão.	6 tipos de <i>pellets</i> de origem florestal e em resíduos agrícolas (abeto, faia, amieiro, turfa, palha, resíduos de malte).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O efeito do caudal de ar de combustão e da temperatura nas emissões de NH<sub>3</sub>, HCN, NO e N<sub>2</sub>O foi sumarizado num modelo de reacções.</li> <li>• A maior parte do azoto do combustível é libertada durante a volatilização, na forma de azoto volátil (66-75%).</li> <li>• Apesar de a volatilização ocorrer rapidamente, é durante esta fase que a maior quantidade de NO, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> e HCN foi emitida. A combustão do resíduo carbonoso tem uma importância marginal na formação de NO.</li> </ul>
Winnikka et al. [24]  Análise da influência das condições de operação na emissão de partículas.	Reactor experimental de 10 kW.  Medições de CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O e CH <sub>4</sub> na zona de combustão primária Medições de CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O e NO <sub>x</sub> nos gases de exaustão.  Amostragem isocinética de partículas e recolha num filtro de fibra de vidro na zona de combustão primária e nos gases de exaustão.	1 tipo de <i>pellets</i> de origem florestal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A formação de partículas na zona de combustão secundária de não se relaciona com a formação de partículas na zona de combustão primária.</li> <li>• A variação das condições de operação, em particular o factor de ar total, afecta a emissão de partículas.</li> <li>• A formação de partículas na zona primária de combustão é fortemente afectada pelo padrão de escoamento.</li> </ul>

Tabela 10 - Sumário dos estudos prévios (conclusão).

Referência	Instalação experimental	Combustível	Principais conclusões
Winnikka et al. [25] Análise da influência das condições de operação na emissão de partículas.	Reactor experimental de 10 kW. Medições de O <sub>2</sub> , CO e NO <sub>x</sub> nos gases de exaustão. Medição de partículas, com recurso a um DLPI e um SMPS. Medição da temperatura na parede junto à zona de combustão primária.	1 tipo de <i>pellets</i> de origem florestal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>As partículas são formadas por 3 mecanismos: partículas grosseiras (&gt;10 µm) são ejectadas da grelha pelo escoamento de ar; partículas finas inorgânicas são formadas por vaporização e nucleação das cinzas presentes no combustível; partículas finas de fuligem são produzidas por combustão incompleta.</li> <li>A emissão total de partículas pode ser reduzida através da minimização da temperatura na zona de combustão primária e maximização da temperatura na zona de combustão primária</li> </ul>
Winnikka et al. [26] Análise da influência da composição das cinzas presentes no combustível na emissão de partículas e na sua composição e morfologia.	Reactor experimental de 10 kW. Medições de O <sub>2</sub> , CO e NO <sub>x</sub> nos gases de exaustão. Medição de partículas, com recurso a um DLPI e um SMPS. Medição da temperatura na parede junto à zona de combustão primária.	2 tipos de <i>pellets</i> de origem florestal (madeira e casca). 1 tipo de <i>pellets</i> de origem em resíduos de hidrólise.	<ul style="list-style-type: none"> <li>A emissão de partículas inorgânicas correlaciona-se com o teor de cinzas do combustível.</li> <li>Se as condições de operação resultarem em combustão incompleta a emissão de fuligem torna-se dominante.</li> <li>A emissão de partículas é mais afectada pelo tipo de combustível do que pelas condições de operação.</li> </ul>

### Carga térmica

A carga térmica é directamente proporcional ao caudal mássico, logo a influência da variação do caudal mássico pode ser interpretada também como a influência da variação da carga térmica. Em sistemas onde o caudal de ar é aproximadamente constante [15] verifica-se que, com o aumento da carga térmica, a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão diminui numa curva monótona, dado que um aumento do caudal de combustível implica um aumento de consumo do oxigénio disponível. González et al. [18], [19] e [20], obtiveram o mesmo resultado mantendo o caudal de alimentação de ar constante. Da mesma forma, o coeficiente de excesso de ar diminui com o aumento da carga térmica [18], [19] e [20].

González et al. [18] avaliaram como as emissões de CO são influenciadas pela variação da carga térmica, para um dado caudal de ar de alimentação. Verificaram que o aumento da carga térmica resulta no aumento das emissões de CO. Tenho em conta que as emissões de CO estão relacionadas com combustão incompleta, devido a um défice de ar disponível, este resultado está relacionado com a diminuição de O<sub>2</sub> disponível para a oxidação do carbono. Dias et al. [15], por outro lado, obtiveram uma curva de emissão de CO com um mínimo para uma carga térmica mássica média. O valor mínimo de emissão de CO (cerca de 500 mg/Nm<sup>3</sup>) corresponde a 13% de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão. Dias et al. [15] indicam que, para concentrações baixas de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão, as limitações de mistura e a baixa disponibilidade de oxigénio, em relação à quantidade de combustível, resultam no aumento de emissões de CO. Para valores de oxigénio disponível elevados, para os quais a temperatura na câmara de combustão é inferior, as emissões de CO aumentam, indicando que para além influência do ar disponível, as emissões de CO e a temperatura na câmara de combustão também estão relacionadas.

A variação da carga térmica afecta a temperatura dentro da câmara de combustão e dos gases de exaustão, tal como observado por González et al. [18], [19] e [20]. Para o mesmo caudal de ar, estes autores verificaram que um aumento do caudal mássico de *pellets* resulta num aumento de fornecimento de energia à câmara de combustão, aumentando desta forma a temperatura dentro da câmara de combustão, [19] e [20], e nos gases de exaustão, [18], [19] e [20]. Consistentemente, a temperatura na câmara de combustão e nos gases de exaustão segue uma curva monótona crescente em função do caudal máximo, não excedendo 550 °C e 250 °C, respectivamente.

O rendimento também é afectado pela variação da carga térmica, como constataram González et al. [19] e [20]. De forma consistente, o rendimento é tanto maior quanto maior for a carga térmica, sendo que a curva estabiliza quando se aproxima da carga térmica máxima. Tendo em conta que o rendimento traduz a fracção da energia introduzida que é fornecida ao exterior de forma útil, este resultado não se deve só ao incremento energético. Em termos percentuais, relativamente à carga térmica, as perdas térmicas nos gases de exaustão diminuem [18], [19] e [20].

### Distribuição de ar

Previsivelmente, González et al. [18] e [19] verificaram que, para uma dada carga térmica, o aumento do caudal de ar de alimentação resulta num aumento da concentração do  $O_2$  nos gases de exaustão, dado que a quantidade de ar disponível para a combustão é cada vez maior, em relação à quantidade de combustível. As curvas obtidas para a concentração de  $O_2$  nos gases de exaustão e para o coeficiente de excesso de ar são do tipo monótona crescente. Desta forma, para uma determinada carga térmica, o ar disponível para a oxidação do carbono presente no combustível é maior, resultando em emissões de CO inferiores, como verificado por González et al. [18] e [19]. Klason e Bai [21] verificaram que o processo de combustão é fortemente influenciado pelo escoamento de ar estagiado. Winnikka et al. [24] confirmaram este resultado, acrescentado ainda a influência do tipo de escoamento na câmara de combustão na emissão de CO. Winnikka [24] constatou que, para uma elevada quantidade de ar disponível, a ausência de *swirl* resulta num aumento de cerca de 4 vezes na emissão de CO (0,6 para 4,2 mg/MJ). Winnikka et al. [25] verificaram que existe correlação linear entre a emissão de fuligem e HC e a emissão de CO, evidenciando que a origem deste tipo de emissões é a combustão incompleta devido a uma deficiente distribuição de ar. Os resultados obtidos por Winnikka et al. [25] são consistentes com os resultados obtido por Sippula et al. [16], que observaram também uma correlação linear entre a emissão de fuligem e HC e a emissão de CO. A emissão total de partículas relaciona-se com a quantidade de ar total de uma forma marginal. Sippula et al. [16] constataram que de facto as emissões de CO estão relacionadas com a temperatura e a concentração de oxigénio nos gases de exaustão, tal como mencionado previamente. Para as mesmas condições de operação, variando o tipo de combustível, Sippula et al. [16] verificaram que a concentração de oxigénio nos gases de exaustão está relacionada com a temperatura nos gases de exaustão, numa curva linear monótona decrescente. Da mesma forma, a emissão de CO (reduzidas a 10% de  $O_2$ ) diminui com o aumento da temperatura nos gases de exaustão, de uma forma não linear. Estes autores [16] observaram ainda que durante a fase de limpeza da grelha, quando o caudal de ar é aumentado e o caudal de combustível diminuído momentaneamente, de modo a expulsar as partículas de cinza da grelha, as emissões de CO aumentam devido ao arrefecimento rápido da câmara de combustão. Estes resultados evidenciam que, em condições que proporcionam uma elevada concentração de  $O_2$  nos gases de exaustão e conseqüente diminuição de temperatura, as emissões de CO são mais elevadas. De forma consistente, González, et al. [18], [19] e [20] verificaram que o aumento do caudal total de ar resulta num aumento da temperatura dos gases de exaustão, assim como Winnikka et al. [24], contrariamente aos resultados obtidos por Sippula [16]. Nenhum dos autores refere a influência do tempo de residência dos gases dentro da câmara de combustão, apesar de este factor ser importante para a oxidação completa do CO. O aumento de temperatura traduz-se num aumento das perdas sensíveis nos gases de exaustão, logo, a eficiência da caldeira diminui, tal como se pode constatar nos resultados obtidos por González, et al. [18], [19] e [20].



Dias et al. [15] constataram que as emissões de NO<sub>x</sub> não são influenciadas pela quantidade de ar disponível quando o conteúdo de N no combustível é inferior a 0,3% em fracção mássica (daf). Contrariamente, Winnikka et al. [24] verificaram que *pellets* contendo 1% de azoto (daf) produzem emissões de NO<sub>x</sub> superiores quando a quantidade de ar disponível é também superior, pelo que as emissões estão relacionadas ainda com outro parâmetro, possivelmente a relação entre o ar primário e o ar secundário. Winnikka et al. [24] sugerem ainda que existe uma correlação entre a emissão de NO<sub>x</sub> e a emissão de partículas.

#### Poder calorífico

González et al. [18], [19] e [20] constataram que a eficiência da caldeira é tanto maior quanto maior for o poder calorífico das *pellets*. Dado que os testes foram realizados para um caudal mássico de combustível constante, o aumento de eficiência deve-se ao incremento enérgico proporcionado por um poder calorífico mais elevado. Esta constatação torna-se evidente ao verificar que a utilização de biomassa com um baixo poder calorífico (sorgo e caniço) misturada com biomassa com um poder calorífico superior (podas de amendoeira) conduziu a uma eficiência superior à obtida com a queima de *pellets* compostas unicamente de resíduos de baixo poder calorífico, com aumento de 84-85% para 86-87% [20].

#### Dureza

As *pellets* mais frágeis têm uma maior tendência para fragmentarem mais facilmente do que *pellets* com maior dureza. Dias et al. [15] verificaram que as *pellets* mais frágeis testadas emitiram menos CO durante a fase de arranque, sugerindo que tal se pode dever ao facto de se fragmentarem mais depressa. Sippula et al. [16] verificaram que quanto maior o conteúdo em cinzas, maior é a dureza das *pellets*, sugerindo que a dureza afecta a taxa de combustão devido à menor fragmentação das *pellets* durante a combustão.

#### Conteúdo de cinzas

Tal como já foi mencionado, o conteúdo de cinzas afecta a dureza das *pellets*. Sippula et al. [16] verificaram que a combustão de *pellets* com maior conteúdo em cinzas ocorria com uma maior razão de ar/combustível e a menores temperaturas, indicando que a combustão ocorre que o processo de combustão se dá de uma forma mais lenta.

Uma maior quantidade de cinzas na grelha resulta numa maior formação de *slag* [26], o que pode alterar a distribuição do ar. No entanto, durante os testes efectuados por Sippula et al [16] com *pellets* com elevado conteúdo em cinzas, a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão e os níveis de emissões mantiveram-se aproximadamente constantes ao longo de cada teste, pelo que concluiu que a aglomeração de cinzas na grelha não provoca alterações substanciais nas emissões. No entanto, os testes duraram no máximo 90 min, e a formação de depósitos do tipo *slag* ocorre num período de horas, pelo são necessários testes de maior duração para poder concluir de forma consistente se a formação de depósitos altera ou não as

emissões de poluentes. Ao comparar as emissões resultantes da combustão dos vários tipos de *pellets*, Sippula et al. [16] verificou que as concentrações de CO, COV e de NO<sub>x</sub> eram tanto maiores quanto maior o conteúdo em cinzas. Analisando a emissão de CO, em particular, Sippula et al. [16] verificaram que, para uma temperatura semelhante, os testes efectuados com *pellets* com maior conteúdo em cinzas apresentavam maiores emissões de CO. Sendo assim as emissões de CO, para além de dependerem da disponibilidade de oxigénio, temperatura e tempo de residência, também dependem do conteúdo em cinzas, concluindo-se que o conteúdo em cinzas afecta directamente a taxa de reacção.

De uma forma consistente Sippula et al. [16] e Winnikka et al. [26] verificaram que a emissão de partículas está correlacionada linearmente com o conteúdo de cinzas. Winnikka et al. [26] mediram a concentração de partículas em várias posições no reactor, desde a grelha até aos gases de exaustão, observando que a concentração total de partículas aumenta ao longo do comprimento do reactor, de onde concluíram que as partículas não se formam somente na grelha. A concentração de partículas finas aumenta substancialmente depois da grelha, evidenciando a sua origem na condensação e nucleação de voláteis após a zona de combustão primária. Por outro lado, a concentração de partículas grosseiras não apresenta uma tendência clara. Winnikka et al. [26] verificaram que as *pellets* de casca de árvore, com um conteúdo superior em cinzas quando comparadas com as *pellets* de madeira, apresentavam uma concentração total de PM<sub>2,5</sub> substancialmente superior (27,2 e 16,4 mg/Nm<sup>3</sup> para madeira e 81,6 mg/Nm<sup>3</sup> para casca de árvore). Este resultado é consistente com os resultados obtidos por Sippula et al. [16], que concluíram que as cascas de árvore emitem mais partículas PM<sub>1,0</sub> do que as madeiras (4-8 vezes mais), dado que as cascas de árvores possuem um conteúdo superior em cinzas.

Winnikka et al. [26] analisaram ainda a composição das partículas emitidas nas várias posições do reactor de modo a identificar as alterações químicas e físicas que ocorrem desde a grelha até à saída dos gases de exaustão. Junto à grelha as partículas são maioritariamente de carbono na forma de partículas grosseiras, sendo estas formadas na zona primária de combustão. Estas partículas de carbono são rapidamente oxidadas na zona secundária, explicando a diminuição de concentração de partículas grosseiras. A partir da zona secundária de combustão, as partículas são maioritariamente compostos inorgânicos (K, Na, S, Zn, Cl) na forma de partículas finas. Comparando as emissões deste tipo de compostos com a composição das cinzas dos combustíveis utilizados, Winnikka et al. [26] constataram que quanto maior for a concentração de Na, Zn e P presentes nas cinzas, maior será a concentração destas espécies na zona secundária. Estes investigadores [26] concluíram ainda que a temperatura é um factor importante na formação de partículas.

### Teor de azoto

Dias et al. [15], Díaz et al. [17], Winnikka et al. [26], Winter et al. [23] e Klason e Bai [21] verificaram, de uma forma consistente, que quanto maior for o teor em N no combustível maior será a emissão de NO<sub>x</sub>. Dias et al. [15] constataram ainda que, para um dado combustível, com um teor em N de 1,6% (daf), o aumento do ar disponível resulta também no aumento das emissões de NO<sub>x</sub>.

## 1.5 Objectivos

O objectivo desta dissertação é avaliar experimentalmente a influência das características do combustível na desempenho energética e ambiental de uma caldeira doméstica alimentada a *pellets* com uma potência máxima de 22 kW. De modo a atingir este fim, propôs-se a obtenção de *pellets* de diversas composições, a preparação da instalação experimental e a realização de ensaios experimentais de acordo com uma metodologia de análise paramétrica. Para cada ensaio foi obtido um vasto conjunto de dados, nomeadamente temperaturas e composição dos gases de exaustão, que permitem a caracterização do comportamento energético e ambiental da caldeira na fase de arranque e em regime estacionário. Com a comparação entre os resultados obtidos e aqueles provenientes de trabalhos prévios intenta-se avaliar a influência das características do combustível na emissão de gases poluentes e na eficiência energética da caldeira. Com base na avaliação experimental pretende-se ainda estabelecer um conjunto de directrizes, isto é, recomendações, com foco nos vários parâmetros que caracterizam a combustão e na escolha das características do combustível, com vista a uma utilização mais eficiente e de baixo impacto ambiental e na saúde humana das caldeiras domésticas alimentadas a *pellets*.

## 2. Fundamentos da combustão da biomassa

Este capítulo aborda os aspectos fundamentais da combustão da biomassa, em particular as suas características como combustível e o processo da combustão, assim como a influência das suas características na operação de caldeiras. Os vários processos de combustão e os mecanismos de formação de poluentes são abordados separadamente, embora durante a combustão existam interações entre os vários processos físicos e químicos que ocorrem simultaneamente. Estas interações são de elevada complexidade e não são aqui abordadas.

### 2.1 Caracterização da biomassa como combustível

Os componentes da biomassa incluem a celulose, hemi-celulose, lenhina, lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos. A concentração de cada classe depende da espécie, tipo de tecido, estado de crescimento e condições de crescimento [1]. O tipo de biomassa, as suas características físicas e composição química têm influência em todo o processo de utilização da biomassa, incluindo o tipo de sistema de combustão, tipo de sistema de alimentação, emissões gasosas, emissões de partículas e formação de depósitos.

Nos últimos anos têm surgido muitos estudos de caracterização química e física da biomassa. Dado o elevado número e heterogeneidade das fontes de biomassa tem sido feito um esforço para a criação de bases de dados, em particular pela *Task on Biomass Combustion and Co-Firing* [27], pelo Instituto de Engenharia Química, Combustíveis e Tecnologia Ambiental da Universidade de Tecnologia de Viena [28] e pela Fundação de Investigação em Energia da Holanda (ECN) [29]. A Tabela 11 apresenta os métodos analíticos normalizados usados para a determinação das propriedades físicas e químicas que caracterizam a biomassa e a Tabela 12 lista as características de alguns tipos de biomassa.

Dependendo do processo de preparação, os combustíveis provenientes de biomassa estão disponíveis tal como recolhidos (e.g., toros), triturados (e.g., estilha, serrim), ou densificados (e.g., briquetes, *pellets*). A granulometria pode ser homogénea (e.g., *pellets*) ou heterogénea (e.g., casca de árvore não tratada). O bagaço de azeitona ou de cana-de-açúcar apresenta-se como uma matéria pastosa. A densidade das partículas e a granulometria determinam o sistema de alimentação de combustível apropriado assim como a tecnologia de combustão. Com efeito, a densidade das partículas afecta a condutividade e decomposição térmica da biomassa e a granulometria, em particular a quantidade de finos, tem influência na quantidade de partículas emitidas visto que facilmente as pequenas partículas são arrastadas pelo escoamento dentro da câmara de combustão.

O teor de humidade é uma característica importante que têm influência na durabilidade de armazenamento, ignição, temperatura adiabática de combustão e volume de gases de exaustão produzidos [6]. O teor em humidade nos resíduos agrícolas na maior parte dos casos é determinado pelo processo de separação dos resíduos. Durante o processamento primário do café, as bagas são sujeitas a secagem de modo a obter um teor de humidade inferior a 12% em massa, antes do processo de remoção da casca, onde os grãos de café são separados das cascas. De forma semelhante, o arroz, o amendoim e o coco são sujeitos à secagem antes da remoção das cascas, resultando num baixo teor em humidade. Em geral, o teor em humidade é relativamente baixo quando comparado com o teor em humidade do bagaço, podendo situar-se entre 40-60% em massa [2].

**Tabela 11 – Métodos analíticos normalizados para determinação das propriedades físicas e químicas da biomassa.**

<b>Propriedade</b>	<b>Método analítico</b>
<b>Granulometria</b>	ASTM E828
<b>Poder Calorífico</b>	ASTM D 2015, E711
<b>Análise imediata</b>	
<b>Humidade</b>	ASTM E871
<b>Cinzas</b>	ASTM D1102 (873 K), ASTM E830 (848 K)
<b>Matéria Volátil</b>	ASTM E872, ASTM E897
<b>Carbono Fixo</b>	Por diferença
<b>Análise elementar</b>	
<b>Carbono, Hidrogénio</b>	ASTM E777
<b>Azoto</b>	ASTM E778
<b>Enxofre</b>	ASTM E775
<b>Cloro</b>	ASTM E776
<b>Oxigénio</b>	Por diferença
<b>Cinzas</b>	ASTM D3682, ASTM D2795, ASTM D4278, AOAC 14.7

A matéria volátil existente num dado combustível sólido resulta principalmente de combinações entre o carbono e o hidrogénio. O PCS da biomassa geralmente situa-se entre 18 e 22MJ/kg (bs), sendo que os valores mais baixos e os mais elevados correspondem a combustíveis herbáceos e a madeira e cascas de madeira, respectivamente. Devido ao conteúdo residual de óleo nos resíduos de azeitona, o seu poder calorífico é ainda mais elevado [6]. O carbono fixo é a fracção residual do combustível sólido, descontados os teores de humidade, matéria volátil e cinzas, desempenhando igualmente um papel crucial no processo de combustão. Dada o elevado conteúdo de voláteis presentes na biomassa, o teor de carbono fixo na biomassa é reduzido, em comparação com o carvão.

O carbono, hidrogénio e oxigénio são os principais componentes dos combustíveis provenientes da biomassa (ver Tabela 12). O carbono e o hidrogénio são oxidados durante a combustão numa reacção exotérmica, formando dióxido de carbono e vapor de água. O oxigénio, presente em ligações orgânicas, é libertado através de degradação térmica suprimindo parte da necessidade total de oxigénio para a reacção de combustão, sendo que o resto é fornecido por injeção de ar. A concentração de carbono nos combustíveis derivados de

madeira é geralmente superior à dos combustíveis derivados de biomassa herbácea, o que explica o PCS ligeiramente superior dos primeiros.

Tabela 12 – Características de diferentes tipos de biomassa.

Biomassa/ Referência	Análise Imediata (% mássica, base tal e qual)				Análise elementar (% mássica, bs)					PCS (MJ/kg)
	Hum	MV	CF	Cinzas	C	H	N	S	O	
Serrim [30]	14,0	73,2	12,6	0,2	44,7	6,4	0,006	0	34,5	17,37
Casca de pinheiro [30]	16,7	57,6	24,5	1,2	46,2	5,9	0,19	0	29,7	17,68
Podas de pinheiro [30]	12,5	63,7	21,2	2,6	46,6	6,2	0,94	0	31,0	18,32
Salgueiro [32]	7,2	78,1	13,7	1,0	45,9	6,6	-	-	39,3	17,8
Choupo* [31]	na	-	16,4	1,3	48,4	5,9	0,4	0,01	42,6	-
Miscanthus [32]	6,1	67,9	13,1	12,9	39,9	6,3	-	-	34,8	15,4
Arundo Donax [33]	8,2	68,4	18,4	5,0	42,7	7,5	0,8	0,2	48,7	17,2
Sorgo [20]	25,7	61,3	10,3	2,7	34,0	4,5	0,8	0,024	60,2	16,0
Caniço malhado [20]	28,0	58,4	11,4	2,2	40,3	5,3	0,4	0,073	53,1	17,4
Panicum virgatum* [31]	na	76,7	14,4	8,9	46,7	5,9	0,8	0,19	37,4	-
Barbas de milho* [31]	na	84,0	10,9	5,1	42,5	5,0	0,8	0,2	42,6	-
Talos de alfafa* [31]	na	76,1	17,4	6,5	45,4	5,8	2,1	0,09	36,5	-
Casca de arroz [30]	9,8	59,9	14,7	15,6	38,8	4,6	1,3	0,3	29,6	15,09
Caroço de pêssego [30]	13,3	66,4	19,3	1,0	45,9	6,2	0,73	0	33,2	18,11
Caroço de azeitona [30]	9,4	57,8	19,7	13,1	43,2	5,5	1,86	0	26,8	17,54
Bagaço de cana-de-açúcar* [31]	na	-	11,3	15,0	44,8	5,4	0,4	0,01	39,6	-

\* bs; MV – Matéria Volátil; CF – Carbono Fixo; PCS – Poder Calorífico Superior; na – não aplicável.

O azoto, enxofre e cloro encontram-se na biomassa em quantidades normalmente inferiores a 1% da matéria seca, sendo no entanto responsáveis pela formação de emissões de poluentes [1]. A razão entre o teor de cloro e o teor de enxofre é indicador do potencial corrosivo por mecanismo de oxidação activa. Tipicamente uma razão Cl/S superior a 1 indica um potencial corrosivo elevado, sendo comum em biomassas herbáceas [31]. O azoto, por sua vez, constituinte da fracção proteica das plantas e elemento indispensável para o seu

crescimento, é responsável pela emissão de NO e NO<sub>2</sub> [34]. Em alguns resíduos de biomassa provenientes da agricultura, como é o caso da palha dos cereais e a casca de arroz, a sílica é o terceiro maior componente, atingindo teores até 10-15% da matéria seca [34].

O teor de cinzas na biomassa é altamente variável. A Tabela 12 revela que não é possível atribuir uma gama típica do teor de cinzas a biomassa proveniente de culturas energéticas ou de resíduos agrícolas, existindo uma clara variação do teor de cinzas em cada tipo de biomassa. Por outro lado, as madeiras possuem tipicamente teores de cinzas baixos, próximos de 1% em massa. Refira-se que as cascas e podas, por sua vez, possuem teores em cinza superiores devido à contaminação com areias durante o seu manuseamento. Em geral, os resíduos agrícolas apresentam teores de cinzas dentro de limites aceitáveis. Certos resíduos agrícolas, em particular as cascas de grão de café, apresentam teores em cinza inferiores a 1% em massa; a casca de arroz, no entanto, pode conter teores em cinza próximos de 25% em massa. Os principais elementos presentes nas cinzas da biomassa são Si, Ca, Mg, Na e P, estando presentes na biomassa na forma de óxidos, ver Tabela 13. Em geral, o conteúdo de K<sub>2</sub>O é superior nos resíduos agrícolas, quando comparado com outras biomassas e com o carvão, atribuído ao uso de fertilizantes [2]. A presença de teores elevados de cinzas origina normalmente emissões de partículas elevadas e formação de incrustações e depósitos nas superfícies onde ocorre transferência de calor.

**Tabela 13 – Composição química em percentagem mássica das cinzas presentes em vários tipos de biomassa e em carvão betuminoso [2].**

<b>Biomassa</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>AlO<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
<b>Casca de sementes de girassol</b>	17,8	6,4	0,2	9,4	14,5	14,6	8,5	6,8	0,1	21,1
<b>Casca de algodão</b>	10,8	1,9	0,0	4,0	1,3	20,7	7,5	1,7	1,3	49,6
<b>Casca de café</b>	3,8	0,2	0,2	4,1	7,5	9,2	2,2	0,4	0,6	43,8
<b>Casca de mostarda</b>	16,9	0,8	0,1	2,0	1,5	42,8	9,2	14,3	2,0	7,4
<b>Casca de palma</b>	63,2	3,9	0,2	2,8	4,5	n.m.	3,8	2,8	0,8	9,0
<b>Resíduos de pimento</b>	13,2	2,9	0,1	9,6	7,2	8,6	3,9	9,1	0,9	30,3
<b>Casca de soja</b>	1,7	2,5	0,2	4,9	7,4	21,4	7,1	3,7	5,3	30,5
<b>Casca de avelã</b>	27,7	10,3	0,1	3,7	8,3	24,8	5,4	10,4	0,8	8,5
<b>Casca de coco</b>	69,3	6,4	0,01	1,6	8,8	2,5	1,6	0,01	4,8	8,8
<b>Carvão betuminoso</b>	43,7	10,2	1,0	0,3	24,7	5,8	3,8	5,7	0,9	3,2
<b>Madeira</b>	12,8	5,2	nm	2,1	4,1	45,2	0,9	nm	0,6	0,5
<b>Turfa</b>	24,6	8,2	nm	5,4	8,1	31,7	1,2	nm	0,4	0,6

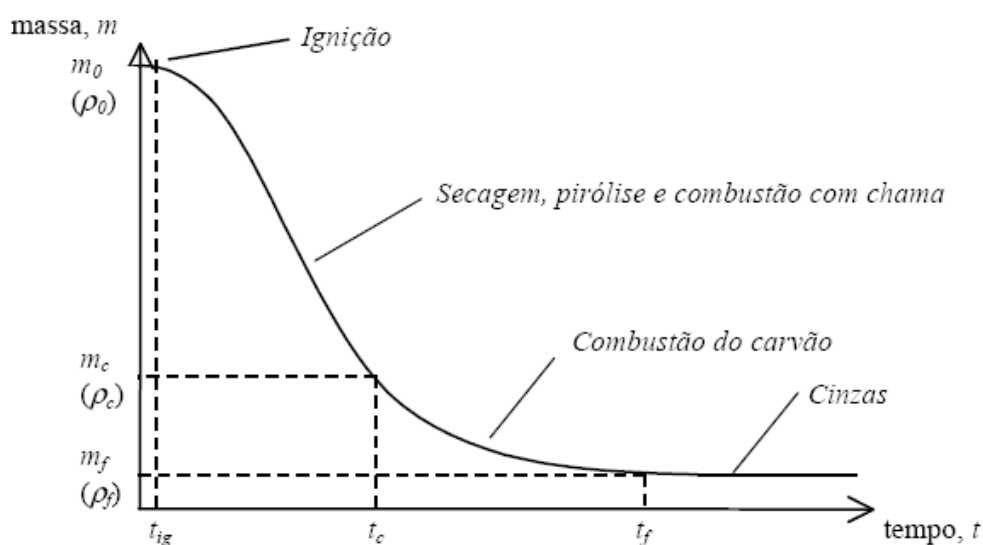
nm – não medido

## 2.2 Combustão da biomassa

A combustão da biomassa envolve processos físicos e químicos de elevada complexidade. A combustão da biomassa pode ser modelada como a sequência das seguintes fases: ignição, secagem, pirólise e combustão do resíduo carbonoso. A importância relativa

destas fases varia de acordo com as propriedades do combustível e o tipo de queimador. Na combustão de biomassa em grandes instalações, com alimentação contínua, tal como grelha móvel, as fases podem ocorrer simultaneamente em várias secções da grelha; no entanto em aplicações de pequena escala, em grelha fixa, há uma separação distinta entre a pirólise e a combustão do resíduo carbonoso, no tempo e no espaço [6].

A Figura 23 mostra a variação da massa de uma partícula de biomassa ao longo dos processos que ocorrem durante a combustão. A combustão da partícula inicia-se com a ignição, num instante de tempo  $t_{ig}$ , para o qual a partícula se encontra com uma massa inicial  $m_0$  e uma densidade inicial  $\rho_0$ . Após a ignição ocorrem a secagem e a pirólise, dando-se a vaporização da humidade presente no combustível e libertação das espécies voláteis. Como resultado, a massa da partícula diminui drasticamente para uma dada massa  $m_c$  e uma dada densidade  $\rho_c$ , dado que o teor de matéria volátil, em particular, é muito elevado na biomassa. As espécies voláteis oxidam na presença de oxigénio na periferia da partícula dando origem à chama visível. Finda a pirólise, num determinado instante  $t_c$ , a partir do qual a taxa de volatilização é nula, inicia-se a combustão do resíduo carbonoso em condições heterogéneas. Para além das cinzas, os produtos de combustão também incluem espécies gasosas, em particular  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  e COV, e partículas de fuligem e cinzas leves que devido ao tamanho reduzido são arrastadas pelo escoamento dos produtos de combustão.

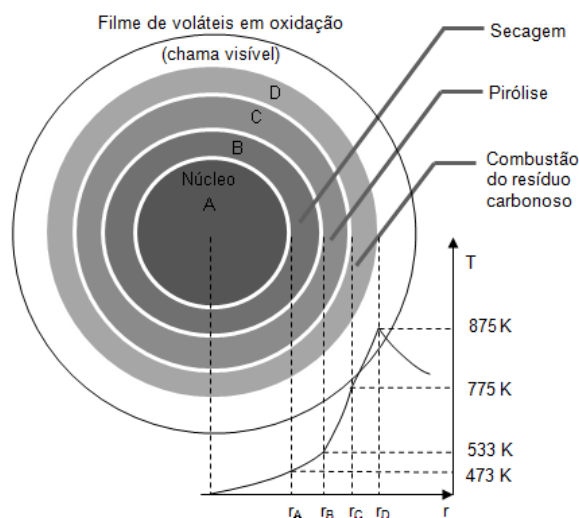


**Figura 23 – Evolução da massa de uma partícula de biomassa ao longo dos processos que ocorrem durante a combustão [1].**

Demirbas [35] descreve os processos que ocorrem durante a combustão, incluindo os produtos das reacções que ocorrem e a gama de temperaturas correspondente. A Figura 24 é uma representação de um modelo de combustão de uma partícula esférica, relacionando os vários processos com a gama de temperaturas típica de cada um. O processo de secagem ocorre na zona A, a temperaturas inferiores a 473 K, libertando-se vapor de água, dióxido de



carbono, ácido fórmico, ácido acético e glyoxal. Entre 473 e 535 K liberta-se uma pequena quantidade de monóxido de carbono para além das espécies anteriores, sendo que esta gama de temperaturas corresponde à zona B. Até este ponto as reacções são na sua maioria endotérmicas, os produtos são de difícil condensação e a madeira começa a carbonizar. A pirólise, que corresponde à zona C, ocorre entre 533 e 775 K. As reacções são exotérmicas produzindo gases tais como monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogénio e começa a formar-se o resíduo carbonoso. Esta fase é crucial para a combustão da biomassa, uma vez que, ao contrário do carvão mineral, a principal fonte de energia provém da queima dos voláteis, tendo sido observado que no caso da madeira e da palha, corresponde a cerca de 67% da energia total libertada na combustão [1]. De facto, uma das vantagens da biomassa relativamente ao carvão é o elevado teor em matéria volátil, o que facilita a sua combustão, no entanto, esta diferença faz com que os sistemas desenhados para a combustão do carvão não sejam inteiramente apropriados para a combustão de biomassa. A partir de 775 K, na zona D, forma-se uma camada de resíduo carbonoso. À superfície das partículas de biomassa, o vapor de água e os voláteis misturam-se com ar ambiente e a matéria combustível reage com o oxigénio, estabelecendo-se a chama. Verifica-se que o sentido da difusão dos produtos é em direcção ao exterior da partícula, pelo que a quantidade de oxigénio que atinge a superfície é desprezável e, conseqüentemente, as reacções de oxidação da fracção residual de carbono são praticamente inexistentes.



**Figura 24 – Modelo de uma partícula esférica em combustão.**

As características que afectam a combustão da biomassa podem dividir-se em dois tipos principais [1]:

*Termoquímicas:* entre as características mais importantes encontram-se a entalpia da reacção de combustão, a temperatura de combustão, a energia de activação e o teor em

cinzas. Estas características são influenciadas pelas propriedades dos combustíveis (análise imediata, teor de humidade, minerais, etc.) e pelas características da instalação de queima;

*Taxa de combustão*: este factor afecta tanto o processo de combustão no interior da partícula como à sua superfície. Certas propriedades, tais como o tamanho da partícula, condutividade térmica, densidade, calor específico e porosidade são propriedades físicas que afectam os processos internos. Por outro lado, as propriedades que afectam os processos à superfície estão essencialmente relacionadas com a transferência de calor desde o ambiente exterior para a partícula, com a circulação do ar e com a transferência de massa entre os voláteis e o ar.

### **Ignição e propagação**

Para que ocorra a ignição de uma partícula de biomassa é necessário um fluxo de energia incidente, proveniente de uma fonte de energia externa, podendo ser uma chama piloto ou ar aquecido por uma resistência eléctrica. A partícula é exposta a transferência de calor por convecção, no caso de ser utilizado ar aquecido, e adicionalmente por radiação, no caso de se utilizar uma chama piloto. Nesta situação, as primeiras etapas de aquecimento apenas afectam as camadas adjacentes às superfícies expostas e, quando a superfície atinge uma temperatura suficientemente elevada, a pirólise inicia-se a uma taxa significativa, com difusão dos voláteis até à superfície, misturando-se com o ar [1], ocorrendo a ignição.

Um elevado teor em humidade pode dificultar a ignição e reduzir a temperatura [2], dado que a vaporização da água é uma reacção endotérmica. O limite máximo de humidade para que a reacção de combustão se processe autonomamente é cerca de 65%, uma vez que acima deste valor é libertada uma quantidade insuficiente de energia para satisfazer as necessidades do aquecimento dos reagentes e da evaporação da água. De um modo geral, verifica-se que é necessária uma fonte de combustível extra, por exemplo gás natural, quando a humidade da biomassa é superior a 50-55%, verificando-se emissões de CO e outros produtos de combustão incompleta muito maiores [2].

### **Secagem e volatilização**

O teor de matéria volátil de um combustível sólido afecta directamente o processo de combustão, em particular a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão. Em comparação com o carvão, a biomassa têm um conteúdo francamente superior de matéria volátil tornando a ignição e a combustão mais rápidas, mas de difícil controlo. Este facto implica que os princípios de projecto e operação normalmente adoptados para sistemas de combustão de carvão podem não ser aplicáveis para sistemas de combustão de biomassa [2].

Na primeira fase a seguir à ignição, a superfície da partícula sofre um aumento de temperatura e à medida que a temperatura da câmara aumenta, a superfície externa da partícula recebe energia, por convecção, devido à passagem do ar quente. Seguidamente, no interior da partícula, a temperatura aumenta devido à transmissão de energia, por condução, a partir da superfície externa mais quente, verificando-se a migração simultânea da humidade no sentido oposto [1]. A secagem ocorre a temperaturas entre 50 °C e 150 °C [2], no entanto, verifica-se na generalidade dos casos que esta é superior à temperatura do início da pirólise, o que significa que pelo menos parcialmente as duas etapas processam-se simultaneamente [1].

A pirólise<sup>1</sup> é a degradação térmica (volatilização) na ausência de um agente oxidante externo [6]. O processo consiste na quebra de ligações químicas dos principais componentes da matéria seca da biomassa (hemi-celulose, celulose e lenhina). A pirólise da biomassa resulta na libertação de asfaltos condensáveis, gases de baixo peso molecular e energia, permanecendo uma fracção rica em minerais e carbono, denominado resíduo carbonoso [1]. Quando a biomassa é rica em oxigénio podem se formar monóxido e dióxido de carbono em quantidades consideráveis. As quantidades e espécies formadas dependem da temperatura, pressão, taxa de aquecimento e tempo de reacção e tamanho da partícula [6]. A pirólise, e subsequente combustão, são processos muito complexos devido às diferenças substanciais da composição química entre os vários tipos de biomassa. Desta forma, nenhum modelo cinético pode simular o mecanismo de degradação térmica para todos os tipos de biomassa [33]. Por outro lado, Jalan e Srivastava [36] concluíram que é possível modelar o processo de pirólise de uma partícula de biomassa, de geometria cilíndrica (*pellet*), conjugando a equação de calor com equações de cinética química, baseadas nos mecanismos fundamentais da pirólise. Neste modelo um número de equações diferenciais descrevem a variação da massa e as reacções secundárias dos produtos, tendo revelado uma precisão a baixas e elevadas temperaturas superior à dos modelos desenvolvidos anteriormente.

O fenómeno que governa a pirólise de uma partícula é baseado em mudanças físicas e químicas em simultâneo. As reacções químicas incluem pirólise primária e secundária, e as mudanças químicas e físicas são controladas por fenómenos de transferência de calor. Os produtos gasosos difundem-se através dos poros da partícula, resultando na variação da densidade da partícula. O processo de pirólise inicia-se com uma taxa dependente da temperatura local. Durante a pirólise, os poros das *pellets* aumentam em dimensão e em número à medida que a biomassa é convertida em gases, voláteis e resíduo carbonoso. O aumento do tamanho dos poros resulta num incremento de pontos onde os voláteis e os produtos gasosos interagem com a partícula quente. À medida que a temperatura aumenta é natural que se formem maiores quantidades de voláteis e gases. As mudanças nas condições de transferência de calor podem alterar a taxa de reacção e afectar as taxas de pirólise no geral.

---

<sup>1</sup> Também designa o processo de obtenção de biogás de síntese através da volatilização de biomassa em condições controladas.

## **Combustão do resíduo carbonoso**

O resíduo carbonoso que resulta do processo de volatilização tem na sua composição essencialmente carbono e cinzas com pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre. O resíduo carbonoso é frequentemente esférico (especialmente no caso de partículas pequenas), pode apresentar muitas fissuras ou cavidades, em resultado do escape dos gases resultantes do processo de volatilização; e ser muito poroso internamente, com a estrutura dos poros e o tamanho do resíduo dependentes do tipo de sólido, da dimensão das partículas e das condições sob as quais ocorreu a volatilização.

Nesta fase as reacções são heterogéneas, envolvendo espécies químicas em diferentes estados físicos (reacções gás-sólido). O processo global de reacções gás-sólido pode ser subdividido nos seguintes passos [30]:

- Transporte das moléculas de reagente para a superfície por convecção e/ou difusão.
- Adsorção das moléculas de reagente na superfície.
- Reacção(ões) elementar(es) envolvendo várias combinações de moléculas adsorvidas, a própria superfície e moléculas na fase gasosa.
- Dessorção das moléculas de produtos da superfície.
- Transporte das moléculas de produtos para longe da superfície por convecção e/ou difusão.

A estrutura porosa do resíduo carbonoso depende do tipo de biomassa, assim como das condições durante o processo de pirólise. Dada a complexidade do fenómeno em causa (cinética de reacções heterogéneas e transporte de massa) é usual caracterizar a taxa de consumo do resíduo carbonoso por uma taxa de reacção aparente referida à área externa da partícula. Esta taxa de reacção é expressa na forma de Arrhenius, sendo usual assumir como de primeira ordem em relação ao oxigénio junto à superfície da partícula. Como esta concentração não é conhecida, a taxa de reacção aparente cinética é combinada com uma taxa de difusão dos produtos de combustão da partícula para o exterior, permitindo definir uma taxa global de combustão da partícula em função da concentração de oxigénio longe da partícula [37].

## **Poluentes e depósitos**

As emissões poluentes resultantes da combustão da biomassa podem ser classificadas em dois grupos principais: o primeiro grupo inclui as emissões de poluentes resultantes da combustão incompleta, que são em grande medida influenciadas pelo equipamento e pelo processo, enquanto o segundo grupo inclui as emissões inerentes a cada tipo de combustível [2], de acordo com a origem da biomassa, ver Tabela 14.

Tabela 14 - Principais fontes de emissões poluentes na combustão da biomassa [1].

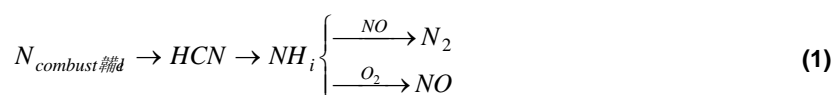
Combustível	Emissões
Todas as biomassas	CO, HC, condensados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, fuligem
Todas as biomassas	Óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> )
Madeiras urbanas, palha, ervas, culturas energéticas	HCl, SO <sub>2</sub> , KCl, K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> Cl
Todas as biomassas	Cinzas
Biomassas com metais pesados	Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg, etc.

Dentro do primeiro grupo, ou seja, os poluentes resultantes da combustão incompleta, incluem-se o CO, hidrocarbonetos, voláteis condensados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, etc. Estes poluentes formam-se devido à baixa temperatura de combustão, à deficiente mistura combustível/ar e, ainda, ao curto tempo de residência na câmara de combustão.

Os óxidos de azoto que se formam durante os processos de combustão resultam de duas fontes distintas [30]:

- Oxidação dos compostos de azoto presentes no combustível (mecanismo do combustível);
- Oxidação do azoto molecular proveniente do ar de combustão, através dos seguintes mecanismo de formação:
  - Mecanismo térmico;
  - Mecanismo imediato (Fenimore);
  - Mecanismo com óxido nitroso como intermédio.

A importância relativa dos mecanismos de formação de NO num dado sistema de combustão é uma função complexa da configuração do sistema, combustível, condições de operação do equipamento, entre outras [30], no entanto a formação de NO na combustão da biomassa ocorre tipicamente através da oxidação do azoto presente no combustível [21]. Inicialmente, o azoto emerge do combustível na forma de radicais HCN, os quais rapidamente originam radicais NH<sub>i</sub> (i = 1, 2, 3). De seguida os radicais NH<sub>i</sub> reagem competitivamente com O<sub>2</sub> e NO formando NO e N<sub>2</sub>, respectivamente, de acordo com as seguintes reacções globais [30]:



A formação de NO através do mecanismo de combustível é fortemente dependente da fracção mássica de azoto presente no combustível e da concentração local de O<sub>2</sub>. Em contraste, a sua dependência da temperatura da chama é marginal [30].

O mecanismo térmico envolve a formação de NO a partir de azoto atmosférico através das seguintes reacções [30]:



As reacções (2) e (3) constituem o chamado mecanismo de Zeldovich, enquanto o conjunto das 3 equações é habitualmente designado de mecanismo de Zeldovich estendido. A reacção (2) apresenta uma elevada energia de activação e, como tal, a formação de NO via mecanismo térmico depende fortemente da temperatura (superior a 1800 K) [30].

O mecanismo imediato (mecanismo de Fenimore) envolve reacções de radicais de hidrocarbonetos com azoto molecular, as quais originam os denominados compostos de ciano. Estes, por sua vez, são convertidos em compostos intermédios que potenciam a formação de NO. Este mecanismo tem expressão a baixas temperaturas e pode, nesses casos, contribuir significativamente para a emissão total de NO. Este mecanismo é particularmente importante em misturas ricas.

O mecanismo de  $N_2O$  como intermédio envolve as seguintes reacções [30]:



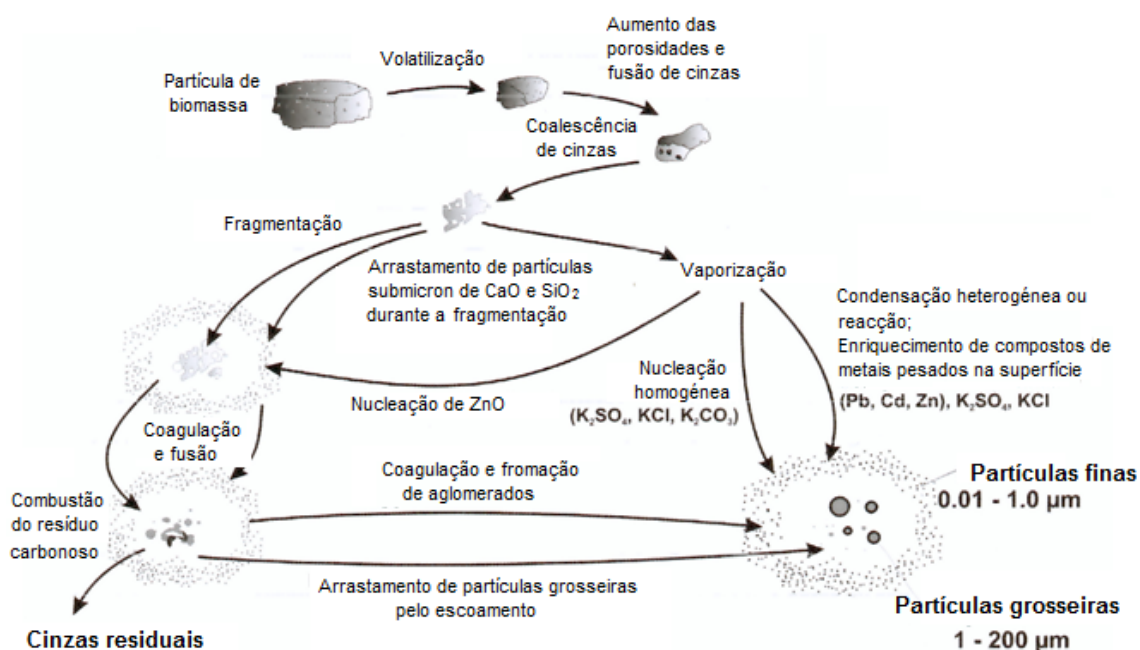
Este mecanismo é importante na formação de NO em chamas pobres, de pré mistura, portanto, caracterizadas por baixas temperaturas.

Dado que tipicamente o mecanismo de formação de  $NO_x$  mais importante na queima de biomassa é a oxidação do azoto presente no combustível, o fornecimento de ar deve ser estagiado. Numa zona primária, onde ocorre a secagem e volatilização, a relação ar/combustível deverá encontra-se abaixo da estequiometria, evitando a oxidação do azoto. Na zona secundária, os voláteis são oxidados, devendo existir uma mistura apropriada do ar com os gases, obtida através de um projecto cuidado da câmara de combustão.

O consumo continuado do resíduo carbonoso leva à redução da sua massa até apenas uma porção de cinza residual, constituindo a fracção inorgânica da biomassa, a qual varia de composição de acordo com o tipo de biomassa [1]. A libertação do material inorgânico do combustível é influenciada tanto pela volatilidade inerente a cada componente, como pelas reacções da fracção orgânica do combustível. O material que é inerentemente volátil à temperatura de combustão inclui os derivados de alguns metais alcalinos e alcalinos terrosos, geralmente o potássio e o sódio. Por outro lado, o material não-volátil pode ser arrastado durante o transporte convectivo da pirólise [34].

A Figura 25 representa esquematicamente o mecanismo global de formação de partículas de cinzas durante a combustão da biomassa, baseado em resultados de trabalhos

anteriores ([38], [39], [40], [43], [44], [41] e [42], citados em [6]). Na superfície da partícula de biomassa em combustão, onde a temperatura é elevada e existe deficiência de oxigénio, uma pequena fracção de óxidos refractários, tais como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ , podem converter-se em espécies altamente voláteis,  $\text{SiO}$ ,  $\text{Ca}$  e  $\text{Mg}$ , que de facto volatilizam. Na vizinhança da partícula de biomassa em combustão, onde as condições são fortemente oxidáveis, estes elementos volatilizados formam partículas muito pequenas na superfície da partícula de biomassa em combustão, por oxidação e nucleação. Os elementos  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{S}$  e  $\text{K}$  irão difundir-se para a vizinhança das partículas incandescentes no estado gasoso.



**Figura 25 – Mecanismo global de formação de partículas de cinzas durante a combustão da biomassa [6].**

As partículas primárias são formadas por volatilização e subsequente nucleação homogénea na camada exterior às partículas de biomassa em combustão, com diâmetros aerodinâmicos na ordem de 5-10 nm. Ao serem arrastadas pelo escoamento, as partículas irão crescer por coagulação, aglomeração e condensação heterogénea. Estas partículas formam a base das cinzas leves finas, caracterizadas por uma dimensão inferior a 1  $\mu\text{m}$  (ver Figura 25). Os elementos não-voláteis que constituem as cinzas irão permanecer na partícula em combustão, fundindo e coalescendo dentro e na superfície da partícula de biomassa em combustão, dependendo da temperatura e composição química das partículas. Como resultado, estas partículas residuais de cinzas possuem uma grande variedade de composição, forma, dimensão e propriedades tais que estão relacionadas com as características das cinzas originais. Dependendo da densidade e dimensão das partículas de cinzas residuais, tecnologia de combustão e velocidade do escoamento no interior da câmara de combustão, uma fracção das cinzas residuais irá ser arrastada pelo escoamento, sendo denominada a fracção de cinzas

leves grosseiras, enquanto a restante irá permanecer no tabuleiro das cinzas. Em contraste com as partículas de cinzas leves finas, as partículas de cinzas leves grosseiras são maiores, tipicamente excedendo 5  $\mu\text{m}$  (ver Figura 25).

Junto ao permutador de calor, os gases resultantes da combustão irão arrefecer por convecção, onde os compostos voláteis no estado gasoso irão reagir e condensar heterogeneamente na superfície das partículas de cinzas que se formaram durante a combustão da partícula de biomassa. Se a concentração de vapores inorgânicos nos gases e a taxa de arrefecimento no permutador de calor forem ambas elevadas poderá ocorrer super saturação dos compostos voláteis no estado gasoso, levando à nucleação homogénea destes, formando novas partículas.

Na combustão da biomassa o elemento volátil mais abundante é o potássio, presente na composição da biomassa na forma de silicatos minerais estáveis, pelo que não irá vaporizar. De acordo com cálculos de equilíbrio químico, o potássio está presente nos gases resultantes da combustão na forma de KCl ou KOH no estado gasoso. Com o decréscimo da temperatura, o cloreto e o hidróxido de potássio irão converter-se em sulfato de potássio através de reacções homogéneas na fase gasosa. O sulfato de potássio, na forma de vapor, encontra-se super saturado imediatamente após a sua formação, sendo que uma fracção irá formar um elevado número de partículas primária por nucleação homogénea. A outra fracção poderá nuclear heterogeneamente como KCl ou  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; ou ainda condensar em partículas existentes formando partículas de cinzas secundárias a temperaturas significativamente inferiores. Por outro lado, o cloreto e o carbonato de potássio poderão ser submetidos a reacções heterogéneas com dióxido de enxofre no estado gasoso formando  $\text{K}_2\text{SO}_4$  no estado sólido. Esta reacção pode promover a corrosão causada por partículas minúsculas, contendo KCl, que se depositam nas superfícies onde ocorre transferência de calor, em partículas junto ao permutador de calor. A sulfatação de KCl liberta Cl, o qual pode reagir cataliticamente com a superfície do permutador de calor pelo mecanismo de oxidação activa.

Uma fracção das cinzas leves resultantes da combustão da biomassa irá depositar-se nas superfícies da câmara de combustão arrastadas pelo escoamento, formando aglomerações e depósitos (*slagging* e *fouling* na literatura inglesa). Como já foi referido, estas partículas podem reagir com os gases de combustão ou outras partículas, formando uma variedade de compostos que podem estar em qualquer uma das fases gasosa, líquida ou sólida. O termo *slagging* refere-se à formação depósitos nas paredes dos equipamentos onde ocorre transferência de calor por radiação [2]. O *slag* forma-se a temperaturas relativamente elevadas, tipicamente acima do 800 °C [6], num curto intervalo de tempo, podendo ser da ordem de horas, quando as condições são favoráveis. O baixo ponto de fusão das cinzas originadas durante a combustão facilita a ocorrência deste fenómeno, que envolve a deposição das cinzas leves na superfície e subsequente sinterização e fusão. O termo *fouling* refere-se à formação de depósitos na superfície do permutador de calor. A formação de depósitos de cinzas na superfície do permutador de calor ocorre a temperaturas inferiores a 1000 °C, e geralmente é



um processo muito mais moroso do que a formação de *slag*, num intervalo de tempo da ordem de dias. O processo envolve a formação de depósitos nos quais as partículas estão ligadas entre si por constituintes cujo ponto de fusão é baixo, principalmente espécies metálicas e alcalinas. A temperatura é demasiado baixa para que ocorra sinterização e fusão das partículas de uma forma significativa, pelo que os depósitos tendem a ser menos extensos e mais frágeis do que os depósitos de *slag*. Dada a natureza química dos elementos que constituem os depósitos, este fenómeno de deposição apresenta um grande potencial corrosivo.

Tal como nos combustíveis fósseis sólidos, muitos dos efeitos dos constituintes inorgânicos presentes na biomassa são considerados negativos, acarretando problemas ambientais e técnicos, como é o caso dos metais alcalinos, sulfatos ou cloretos. Mas, por outro lado, esta fracção inorgânica vai actuar como catalisador da pirólise e das reacções de gaseificação, influenciando o rendimento do processo [1]. Tal como foi referido, as cinzas provenientes da combustão da biomassa possuem um elevado teor em compostos alcalinos, os quais poderão formar compostos com baixo ponto de fusão durante a combustão ou gaseificação, cerca de 1200-1450 °C [1]. Estes compostos poderão formar aglomerados constituídos por cinza e areia ligados após a fusão, apresentando algum material vítreo, o que pode levar a problemas no funcionamento da instalação. A formação de depósitos na superfície do permutador de calor irá criar uma resistência térmica adicional, dificultando a transferência de calor, diminuindo o rendimento da instalação e aumentando a temperatura no interior da câmara de combustão. Por outro lado os depósitos têm um potencial corrosivo não desprezável. A formação de cinzas residuais tem como implicação uma necessidade de manutenção e limpeza muito superior ao que se verifica em sistema de combustão a gás. Por outro lado, a emissão de partículas implica a necessidade de tratamento dos gases de exaustão.

### 3. Instalação experimental

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Combustão do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico. A Figura 26 mostra uma fotografia da instalação experimental. Neste capítulo é descrita a instalação experimental, incluído a caldeira e as técnicas de medida e incertezas experimentais.



Figura 26 – Instalação experimental.

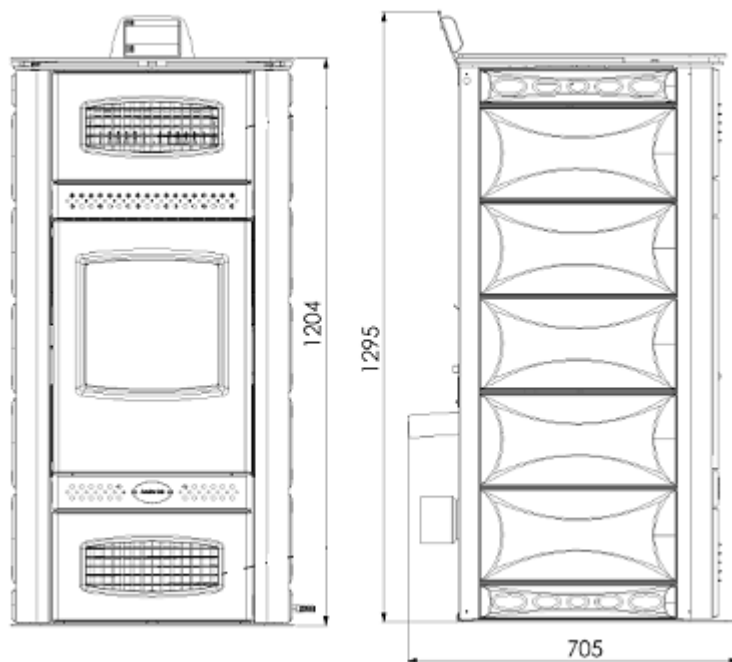
#### 3.1 Descrição da caldeira

A caldeira utilizada é o modelo TERMO IDEAL CERAMIC 22 kW, do fabricante Anselmo Cola. Este tipo de equipamentos de combustão de biomassa está sujeito à norma EN 14785:2006. As dimensões da caldeira são 1204 mm de altura (excluindo o painel de controlo), 602 mm de largura e 638 mm de profundidade, com uma tara de 210 kg (ver Figura 27). A estrutura e a câmara de combustão são constituídas por aço e ferro forjado.

A caldeira possui um circuito interno de água dedicado ao aquecimento central e um circuito de uso opcional para o aquecimento de águas sanitárias. Neste trabalho, foi utilizado apenas o circuito dedicado ao aquecimento central.

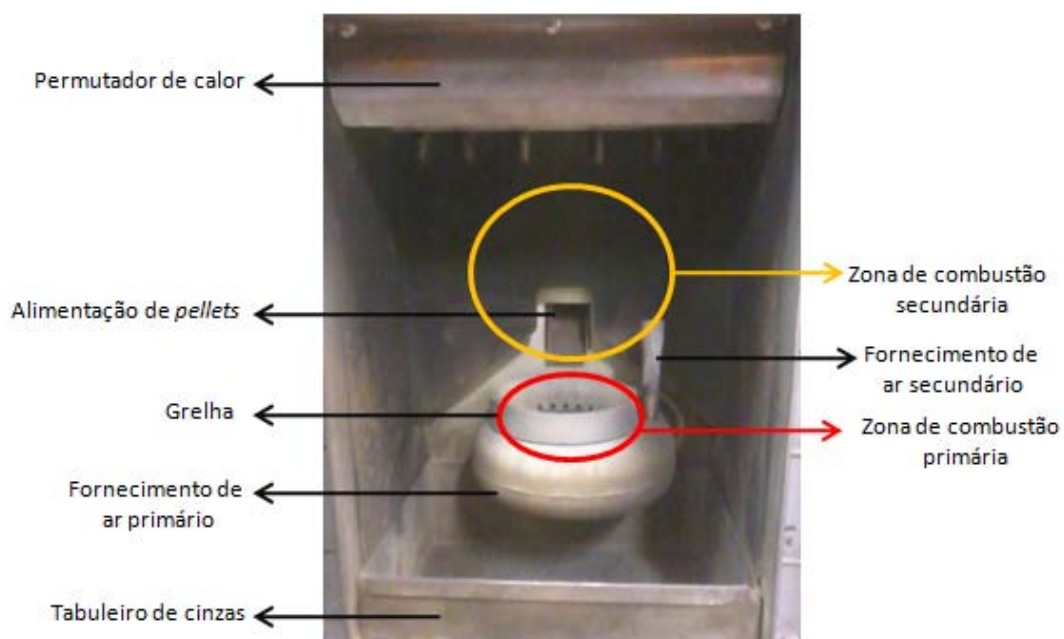
A caldeira possui um depósito de 45 dm<sup>3</sup> para colocar *pellets*. As *pellets* são transportadas desde este depósito até à câmara de combustão através de um parafuso sem fim. A alimentação é do tipo vertical pelo topo. A carga térmica é ajustada através de uma escala de potência que regula a frequência com que o parafuso executa um determinado número de rotações. A caldeira possui uma escala arbitrária de 0 a 30, que

regula a frequência de rotação do parafuso sem fim, correspondendo ao valor mínimo e máximo, respectivamente.



**Figura 27 – Dimensões da caldeira doméstica.**

A Figura 27 mostra a câmara de combustão da caldeira, onde se identificam: tabuleiro de cinzas, fornecimento de ar primário, grelha, alimentação de *pellets*, permutador de calor, fornecimento de ar secundário e as zonas de combustão primária e secundária.



**Figura 28 – Câmara de combustão da caldeira.**

A ignição é obtida com recurso a uma resistência eléctrica. O ar primário é injectado por baixo da grelha através de orifícios. O ar secundário é injectado através de um tubo vertical, próximo da grelha. Os gases de combustão trocam calor com o permutador de calor no topo da câmara de combustão. Posteriormente, esses gases passam por um ventilador e escoam-se através de um tubo de exaustão. O ventilador encontra-se junto à saída dos gases de exaustão, pelo que a câmara de combustão se encontra em depressão.

A temperatura na superfície do permutador de calor, do gás de exaustão e do depósito de *pellets* são monitorizadas através de sensores de temperatura. O caudal de ar total é monitorizado através de uma tomada de pressão junto à entrada do ar.

O controlo da operação da caldeira é totalmente automático. O utilizador apenas pode regular a potência térmica para o modo normal. A velocidade do ventilador e o caudal de *pellets* varia dependendo da fase de funcionamento: arranque, modo normal, modulação ou limpeza. O arranque corresponde à fase inicial, de ignição e propagação de chama até obter uma determinada temperatura dentro da câmara de combustão. O modo normal corresponde ao modo de funcionamento estacionário. O modo de modulação corresponde a um ajuste de caudal de *pellets* quando a temperatura na câmara de combustão se desvia da gama de temperatura de funcionamento normal. O modo de limpeza é activado a cada 10 minutos de funcionamento, durando cerca de 2 minutos. No modo de limpeza, o caudal de *pellets* é reduzido e o caudal de ar aumentado, de modo a ejectar as cinzas presentes na grelha, para evitar acumulação de cinzas e obstrução da grelha.

A caldeira possui sequências de alarme de modo a evitar situações que possam provocar acidentes, tais como temperatura excessiva na câmara de combustão, temperatura excessiva no depósito de *pellets*, depressão excessiva, entre outras. O fabricante recomenda o uso de *pellets* que cumpram a norma DIN 51731, que estabelece as características listadas na Tabela 15.

**Tabela 15 – Características das *pellets* de acordo com a norma DIN 51731.**

<b>Poder Calorífico Inferior mínimo</b>	<b>17,28 MJ/kg (4180 kcal/kg)</b>
Densidade	680-720 kg
Humidade máxima	10% peso
Diâmetro	6±0,5 mm
Percentagem máxima de cinzas	1,5% peso
Comprimento	Min. 6mm – Max. 30mm
Composição	100% Madeira não tratada sem aditivos ou resíduos

### 3.2 Descrição da instalação

A Figura 29 é uma representação esquemática da instalação experimental utilizada para a realização dos presentes testes.

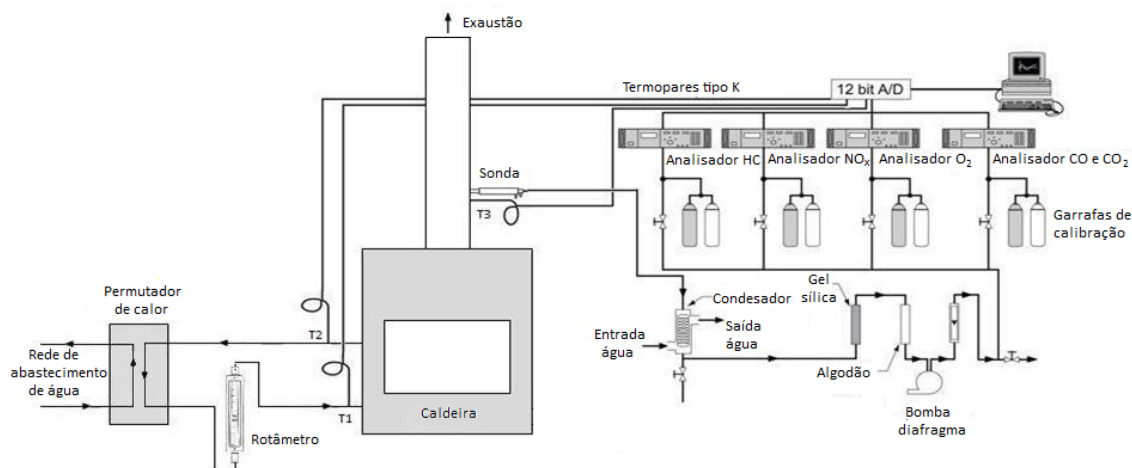


Figura 29 – Instalação experimental.

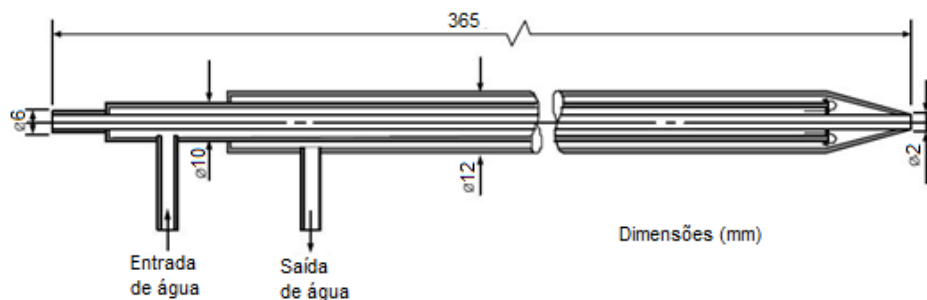
O calor produzido pela caldeira é dissipado através de um permutador de calor, onde a água do circuito interno da caldeira troca calor com a água da rede de abastecimento. O caudal do circuito interno da caldeira é medido com recurso a um rotâmetro convencional, e termopares colocados à entrada (T1) e à saída (T2) da caldeira permitem a monitorização da variação de temperatura. Na conduta de exaustão, um termopar (T3) é usado para monitorizar a temperatura e uma sonda para efectuar a amostragem dos gases de exaustão. A exaustão da caldeira está ligada ao sistema de exaustão de gases do laboratório.

### 3.3 Técnicas de medida e incertezas experimentais

#### Amostragem e medição das emissões gasosas

A amostragem do efluente gasoso para a medição das concentrações das espécies químicas gasosas foi efectuada recorrendo a uma sonda de aço inoxidável convencional, devido à sua resistência à corrosão, de arrefecimento convectivo indirecto com recurso a água. A sonda foi colocada a 0,75 m da secção de entrada da conduta de exaustão (ver Figura 29). A Figura 30 é uma representação esquemática da sonda utilizada, onde as principais dimensões são indicadas. A amostra é recolhida através do tubo central da sonda, com 2 mm de diâmetro. Dois tubos concêntricos exteriores envolvem o tubo central de modo a permitir a passagem da água de arrefecimento. Tal como mostra a Figura 29, após deixar a sonda, a amostra de gases de combustão é condicionada num circuito onde a humidade é retirada num condensador e em

gel de sílica e as partículas são recolhidas em filtros, sendo depois enviada uma amostra limpa e seca para os vários analisadores que medem a concentração das espécies em percentagem volumétrica em base seca. Na Tabela 16 encontram-se listados analisadores utilizados para a medição da concentração das espécies gasosas, assim como o princípio de funcionamento dos mesmos. Foram realizadas calibrações do zero e da escala dos analisadores, com misturas padrão antes e após cada sessão de medidas. Os sinais analógicos provenientes dos analisadores são transmitidos para um computador, usando placas de conversão A/D, onde os dados são registados a cada segundo.



**Figura 30 – Representação esquemática da sonda de amostragem de gases e respectivas dimensões.**

Os principais aspectos que influenciam a precisão das medidas de concentrações de espécies químicas gasosas são [45]: (i) perturbações induzidas pelas sondas e erros associados a amostragem não isocinética; (ii) eficiência do congelamento das reacções químicas e (iii) dissolução de certas espécies químicas gasosas em água. No caso presente, dado que as medidas foram realizadas somente na exaustão da caldeira, as incertezas resultam essencialmente da eficiência do congelamento das reacções químicas e da dissolução de certas espécies químicas gasosas em água. Uma vez que as temperaturas de exaustão de caldeiras de pequena escala são baixas ( $< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), as incertezas resultantes do congelamento das reacções químicas são desprezáveis, sendo que a incerteza introduzida pela dissolução de certas espécies químicas em água (HC,  $\text{NO}_x$ ) foi aqui também marginal.

**Tabela 16 – Principais características dos analisadores utilizados para a medição da concentração das espécies químicas.**

Espécie	Analisador	Método de análise
$\text{O}_2$	Horiba Modelo CMA-311 A	Paramagnetismo
$\text{CO}_2$	Horiba, Modelo CMA-311 A	Não dispersivo de infravermelhos
$\text{CO}$	Horiba Modelo CMA-311 A	Não dispersivo de infravermelhos
$\text{NO}_x$	Horiba Modelo CLA-510 SS	Quimiluminescência
$\text{HC}$	Amluk Modelo FID E 2020	Detecção por ionização de chama

#### Medição da temperatura

Para a medição da temperatura nos 3 pontos assinalados na Figura 29 (T1, T2 e T3) foram utilizados termopares do tipo K (Ni-Cr/Ni-Al), apropriados para medições de temperaturas inferiores a 1000 °C. Os sinais analógicos provenientes dos termopares são transmitidos para um computador, usando uma placa de conversão A/D, onde os dados são registados a cada segundo.

#### Medição do caudal de água

Para a medição do caudal de água que circula no circuito interno da caldeira foi utilizado um rotâmetro convencional. A leitura do caudal é feita através de uma escala graduada (0-100%), sendo que a incerteza de leitura na escala é de 0,5%.

#### Medição do consumo de pellets

No decorrer dos ensaios foram utilizadas duas técnicas de medição do consumo de massa de *pellets*.

Na primeira série de testes, correspondente à avaliação do desempenho da caldeira, foi utilizada uma técnica baseada na perda de massa. O depósito de *pellets* da caldeira possui uma grelha que marca o nível máximo de *pellets*, considerando-se o nível de referência. No início de cada ensaio a quantidade de *pellets* no depósito era a máxima. No final de cada ensaio colocava-se *pellets* no depósito até atingir o nível de referência, registando-se a massa numa balança digital.

Nas séries posteriores, o arranque da caldeira era feito com uma quantidade reduzida de *pellets*. No momento em que se começava a aquisição de dados, em condições estacionárias, no qual a quantidade de *pellets* no depósito era aproximadamente nula, colocava-se uma quantidade de *pellets* conhecida, cuja massa era previamente determinada com recurso a uma balança digital.

#### Análises às cinzas residuais

No final dos ensaios foram recolhidas amostras das cinzas para posterior análise no microscópio electrónico de varrimento (MEV, ou SEM na literatura inglesa) e análise ao resíduo carbonoso.

O MEV permite obter imagens tridimensionais de uma área seleccionada da amostra através da irradiação da amostra por um feixe de electrões. O microscópio electrónico está equipado com um espectrómetro de dispersão de energia de raio-X (EDS). A análise química associada à microscopia electrónica de varrimento é feita através da medida da distribuição de energia e intensidade dos sinais de raio-X, gerados pela acção do feixe electrónico incidente sobre a amostra. Desta forma é possível caracterizar a composição elementar do volume da amostra com uma resolução cujo diâmetro mínimo é de, aproximadamente, 1 µm. A

determinação da análise quantitativa é feita por comparação da intensidade das riscas espectrais características de uma amostra com a intensidade das mesmas riscas, obtidas nas mesmas condições instrumentais, mas em amostras de elementos puros (ou de composição bem conhecida).



## 4. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentadas as condições de operação da caldeira e apresentados e discutidos os resultados obtidos. Com base na discussão dos resultados, no final do capítulo são apresentadas algumas recomendações relativas ao combustível e à operação da caldeira.

### 4.1 Condições experimentais

#### Características do combustível

De modo a avaliar a influência das características do combustível no desempenho da caldeira foram utilizados três tipos de *pellets* de origem em resíduos de origem distinta, dois tipos em comercialização e um tipo produzido especificamente para este trabalho (ver Figura 31). Considera-se como referência as *pellets* comerciais produzidas a partir de resíduos da indústria de transformação de madeira (serradura de pinho), sendo este o tipo de *pellets* mais comum no mercado (Figura 31a). Estas *pellets* foram produzidas pela Vimasol, em Guimarães. Foram também utilizadas *pellets* produzidas a partir de resíduos lenhosos, contendo paletes, mobília e outros resíduos em fim de vida (Figura 31b) e ainda *pellets* produzidas a partir de caroço de pêssigo pulverizado, contendo vestígios de serradura (Figura 31c). Estes dois tipos de *pellets* foram produzidos pela empresa Casal & Carreira Biomassa, Lda, Alcobaça. As *pellets* de resíduos lenhosos são produzidas continuamente, sendo comercializadas maioritariamente para exportação. Uma fracção é comercializada para o mercado interno, maioritariamente para a indústria panificadora. O caroço de pêssigo é um resíduo da indústria alimentar, tendo sido produzidas *pellets* com este resíduo especificamente para este trabalho.

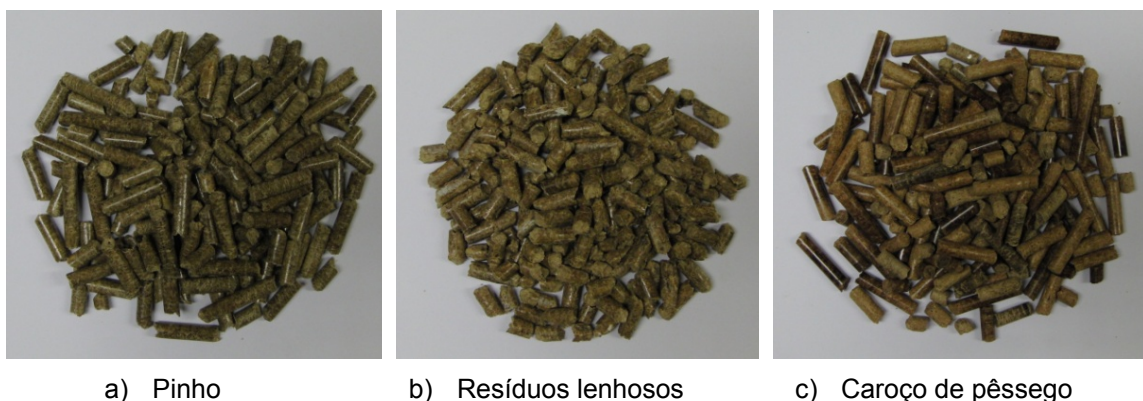


Figura 31 – Fotografias das *pellets* utilizadas nos ensaios.

Na Figura 31 é possível observar que o comprimento médio das *pellets* de resíduos lenhosos é inferior ao comprimento médio das *pellets* de pinho e de caroço de pêssego. Durante o manuseio verificou-se que as *pellets* de resíduos lenhosos são substancialmente mais frágeis do que as *pellets* de pinho ou caroço de pêssego, dado que fracturavam com muita facilidade, resultando num comprimento médio inferior. Durante o manuseio e os ensaios com as *pellets* de caroço de pêssego pode-se constatar que estas *pellets* são as que possuem a maior dureza. Na Figura 31 é possível ainda observar diferenças na coloração das *pellets*. As *pellets* de pinho e de resíduos lenhosos possuem uma coloração homogénea, enquanto as *pellets* de caroço de pêssego possuem uma coloração heterogénea. A heterogeneidade da cor é um resultado do processo de densificação, no qual foi atingida uma temperatura superior à temperatura normal de operação, podendo ter ocorrido carbonização.

As análises imediata e elementar e composição das cinzas foram efectuadas pelo Laboratório de Análises do Centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico. Tendo em conta a análise elementar, foi calculada razão ar/combustível ( $A/F_{est}$ ) para condições estequiométricas. Com base na composição das cinzas é possível calcular índices de *slagging* ( $S_R$ ) e *fouling* ( $F_u$ ), suportados em correlações de fusibilidade, a partir dos quais se pode estimar a tendência para a ocorrência desses fenómenos 0.

Na Tabela 17 estão listadas as principais características das *pellets*, mencionadas no parágrafo anterior. Comparando as características das *pellets*, constata-se que o caroço de pêssego aparenta possuir um elevado potencial como combustível alternativo dado que o seu poder calorífico inferior e o teor em cinzas são equiparáveis aos valores correspondentes do pinho e de resíduos lenhosos. Verifica-se que o caroço de pêssego requer a maior quantidade de ar para combustão, seguindo-se o pinho e, por último, os resíduos lenhosos. As *pellets* ordenam-se por ordem crescente de teor em azoto da seguinte forma: pinho > caroço de pêssego > resíduos lenhosos.

O índice  $S_R$  é um indicador de viscosidade, sendo que a tendência para a ocorrência de *slagging* é inversamente proporcional a este índice. Por outro lado, a tendência para a ocorrência de *fouling* é directamente proporcional ao índice  $F_u$ . A tendência para ocorrência de *fouling* é elevada ( $0,6 < F_u \leq 40$ ) para todos os tipos de *pellets*. A tendência para ocorrência de *slagging* é baixa no caso do caroço de pêssego ( $S_R > 72$ ) e elevada no caso do pinho e dos resíduos lenhosos ( $S_R \leq 65$ ). Verifica-se que o caroço de pêssego apresenta a tendência mais baixa quer para a ocorrência de *slagging* quer para a ocorrência de *fouling*.

Neste trabalho foram ainda testadas *pellets* de palha, contendo cevada, trigo e milho, as quais se revelaram inadequadas para a combustão na presente caldeira. Para além de apresentarem um tempo de ignição elevado, o elevado teor em cinzas provoca uma aglomeração das *pellets* durante a combustão o que dificulta a ejeção de cinzas e finos durante a fase de limpeza. Por tal, ocorre a obstrução do ar de combustão, causando acumulação de *pellets* na grelha e tornando a combustão insustentável.

Tabela 17 – Principais características das *pellets* utilizadas.

	Pinho	Resíduos lenhosos	Caroço de pêssego
<b>Análise imediata (% massa)<sup>1</sup></b>			
Voláteis	80,5	76,9	75,6
Carbono Fixo	10,9	15,0	15,9
Humidade	7,3	6,3	7,1
Cinzas	1,3	1,8	1,4
<b>Análise elementar (% massa)<sup>2</sup></b>			
Carbono	46,0	45,5	47,7
Hidrogénio	6,2	5,9	5,9
Azoto	0,5	3,5	1,3
Enxofre	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Oxigénio	47,3	45,1	45,1
<b>A/F<sub>est</sub> (kg<sub>ar</sub>/kg<sub>fuel</sub>)</b>	5,39	5,32	5,58
<b>Composição das cinzas (% massa)</b>			
SiO <sub>2</sub>	20,9	15,6	5,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,2	7,4	2,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,6	3,7	6,0
CaO	26,2	40,6	12,1
SO <sub>3</sub>	0,3	3,7	2,4
MgO	4,3	11,5	12,3
TiO <sub>2</sub>	0,0	9,5	0,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,2	2,2	25,7
K <sub>2</sub> O	11,5	2,4	30,4
Na <sub>2</sub> O	2,5	2,1	1,9
Outros óxidos	2,3	1,3	1,1
<b>S<sub>R</sub></b>	36	9	353
<b>F<sub>u</sub></b>	29	22	15
<b>PCI (MJ/kg)</b>	16,9	17,3	17,8
<b>Diâmetro médio das <i>pellets</i> (mm)</b>	6	6	6
<b>Comprimento médio das <i>pellets</i> (mm)</b>	18	12	18

<sup>1</sup> Base tal e qual

<sup>2</sup> bs

### Condições de operação da caldeira

De modo a caracterizar a influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental da caldeira foram realizadas 3 séries de ensaios experimentais, sendo que em cada série foi utilizado um tipo de *pellets*: pinho (série A), resíduos lenhosos (série B) e caroço de pêssego (série C).

Todos os ensaios apresentados foram efectuados com o caudal de água da bomba do circuito interno correspondente à posição 3. Na Tabela 18 apresenta-se o caudal volumétrico de água debitado pela bomba em função da posição de funcionamento e do valor observado no rotâmetro. O caudal volumétrico foi calculado com base na equação (8), no Anexo, específica para o rotâmetro utilizado.

**Tabela 18 – Caudal da bomba do  
circuito interno de água da caldeira**

<b>Posição</b>	<b>Valor observado no rotâmetro</b>	<b>Caudal (l/min)</b>
<b>Caudal III</b>	50,0	20,7

As Tabelas 19, 20 e 21 apresentam as condições de operação para os testes das séries A, B e C, respectivamente. As condições de operação apresentadas referem-se ao funcionamento da caldeira após a fase de arranque, cuja duração é aproximadamente 30 min. As tabelas apresentam o caudal de alimentação, a carga térmica, a percentagem volumétrica de oxigénio, a temperatura nos gases de exaustão e, no caso da série A (Tabela 19), a percentagem mássica de carbono não queimado nas cinzas residuais. A carga térmica foi calculada com base na equação (17), no Anexo.

**Tabela 19 – Condições de operação da caldeira para os testes da série A.**

<b>Teste no.</b>	<b>Caudal de pellets (kg/h)</b>	<b>Carga térmica (kW)</b>	<b>O<sub>2</sub> (% volume seco)</b>	<b>Temperatura na exaustão (°C)</b>	<b>Carbono nas cinzas residuais (%)</b>
1	2,49	11,6	16,70	127,27	48,3
2	2,77	12,9	16,04	139,99	50,9
3	2,95	13,8	15,50	149,57	50,3
4	3,32	15,5	14,93	162,26	67,9
5	3,63	17,0	14,25	168,15	56,9
6	3,69	17,3	13,55	166,66	55,0
7	4,39	20,6	13,22	167,91	46,3

As Tabelas 19, 20 e 21 revelam que a temperatura nos gases de exaustão é tanto maior quanto maior for a carga térmica. Note-se que a temperatura dos gases de exaustão não reflecte a temperatura de chama ou a temperatura local na câmara de combustão, no entanto é um indicador global da temperatura dentro da câmara de combustão. Por outro lado, a percentagem volumétrica de oxigénio nos gases de exaustão é tanto menor quanto maior for a carga térmica.

**Tabela 20 – Condições de operação da caldeira para os testes da série B.**

<b>Teste no.</b>	<b>Caudal de pellets (kg/h)</b>	<b>Carga térmica (kW)</b>	<b>O<sub>2</sub> (% volume seco)</b>	<b>Temperatura na exaustão (°C)</b>
1	2,26	10,8	17,65	128,83
2	3,03	14,5	16,51	165,95
3	3,42	16,4	15,94	171,17
4	3,65	17,5	14,47	169,85
5	4,02	19,3	14,41	187,92
6	4,30	20,6	13,53	195,92

Dado que a quantidade de *pellets* de caroço de pêsego era reduzida foram realizados apenas dois ensaios experimentais (ver Tabela 21), para a escala de potência média e para a escala de potência máxima.

Tabela 21 – Condições de operação da caldeira para os testes da série C.

Teste no.	Caudal de <i>pellets</i> (kg/h)	Carga térmica (kW)	O <sub>2</sub> (% volume seco)	Temperatura na exaustão (°C)
1	2,59	13,6	15,82	160,82
2	3,35	17,8	13,37	176,36

## 4.2 Estudos paramétricos

### Desempenho da caldeira

#### Arranque – regime transiente

A Figura 32 mostra a temperatura do gases de exaustão e a concentração das espécies gasosas nos gases de exaustão durante a fase de arranque da caldeira, referente à série A de ensaios – ver Tabela 19.

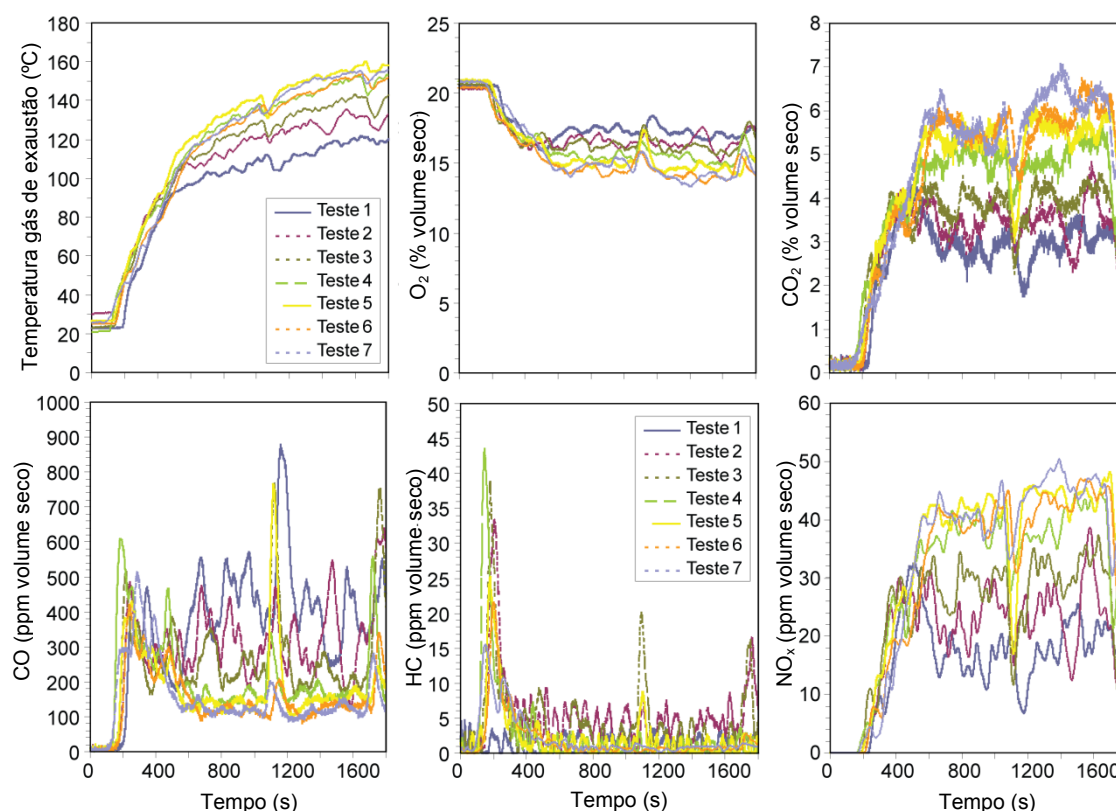


Figura 32 – Temperatura e concentração de espécies gasosas presentes nos gases de exaustão da caldeira durante a fase de arranque.

As medições são apresentadas num período de 1800 segundos, sendo que o início corresponde ao instante em que a caldeira entra em operação, após o diagnóstico. Os primeiros 200 segundos correspondem ao aquecimento da resistência eléctrica, que assegura a ignição das *pellets*, e ao carregamento de *pellets*. A ignição começa aos 200 segundos, seguindo-se a propagação da frente de chama até que todas as *pellets* no leito estejam em combustão. Entre os 1100 e os 1200 segundos ocorre uma fase de limpeza.

Analisando a dependência com o tempo, verifica-se que no intervalo entre 200 e 400 segundos (< 4 minutos) a temperatura dos gases de exaustão e a concentração de gases poluentes aumenta rapidamente devido à ignição. Com o início da combustão e, por conseguinte, o início das reacções de oxidação, a concentração de O<sub>2</sub> torna-se inferior a 21% em volume seco. Após o estágio inicial do processo de combustão, a partir da qual as curvas de concentração são aproximadamente estacionárias apresentando ciclos, a Figura 32 revela que as espécies gasosas seguem comportamentos distintos, com excepção do CO<sub>2</sub> e do NO<sub>x</sub> que seguem tendências semelhantes, tanto em função do tempo como da carga térmica. As emissões de HC e CO tendem a diminuir, no entanto as curvas destas duas espécies não se relacionam com qualquer uma das outras espécies.

Analisando o efeito da carga térmica, observa-se que as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> possuem um comportamento semelhante. Consistentemente, as emissões de CO diminuem com o aumento da carga térmica, mas no caso das emissões de HC a dependência é marginal. Analisando as curvas de temperatura dos gases de exaustão, verifica-se que a influência da carga térmica é consistente com os dados apresentados na Tabela 19.

A Figura 32 mostra que as emissões de CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub> são fortemente influenciadas pela carga térmica, sendo que as emissões de HC são mais influenciadas pelas condições de combustão heterogénea durante a ignição do que pela carga térmica. Durante a fase de arranque, as emissões de CO apresentam um valor máximo de aproximadamente 900 ppm, sendo que a dependência da carga térmica é semelhante à observada por Dias et al. [15]. Nesse estudo, os autores verificaram que, no pior caso, as emissões de CO atingiam um máximo de 1,5%, uma ordem de grandeza superior ao valor medido no presente trabalho.

#### *Efeito da carga térmica – regime estacionário*

A Figura 33 mostra a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão, assim como o coeficiente de excesso de ar, em função da carga térmica.

Verifica-se que o aumento da carga térmica é acompanhado pela diminuição da concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão, o que se reflecte na diminuição do coeficiente de excesso de ar. A concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão atinge o mínimo de 13% (volume seco), valor correspondente à carga máxima. Da análise da Figura 33 constata-se que o caudal de ar de combustão é aproximadamente constante, independentemente do caudal de *pellets*. Os resultados obtidos por González et al. [18], [19] e [20], que realizaram ensaios mantendo o

caudal de ar constante, são concordantes com os dados apresentados na Figura 33, assim como os resultados obtidos por Dias et al. [15].

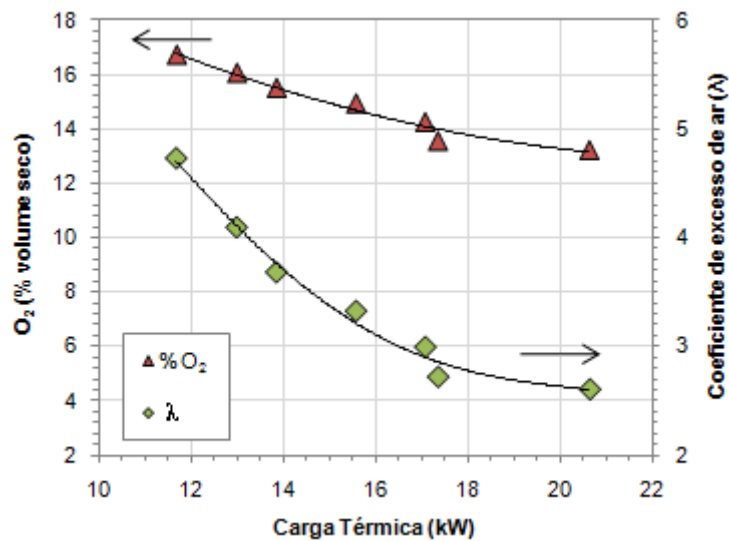


Figura 33 – Concentração de  $O_2$  nos gases de exaustão e coeficiente de excesso de ar em função da carga térmica.

A Figura 34 mostra as emissões de CO, HC e  $NO_x$  em função da carga térmica. Note-se que as emissões de HC são apresentadas com um factor multiplicativo de 10 de modo a facilitar a sua visualização no gráfico. Desta forma as emissões de HC são sempre inferiores a 5 ppm (volume seco).

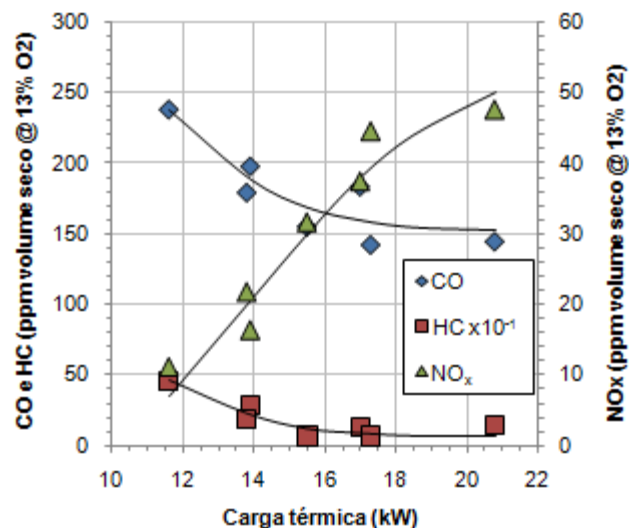
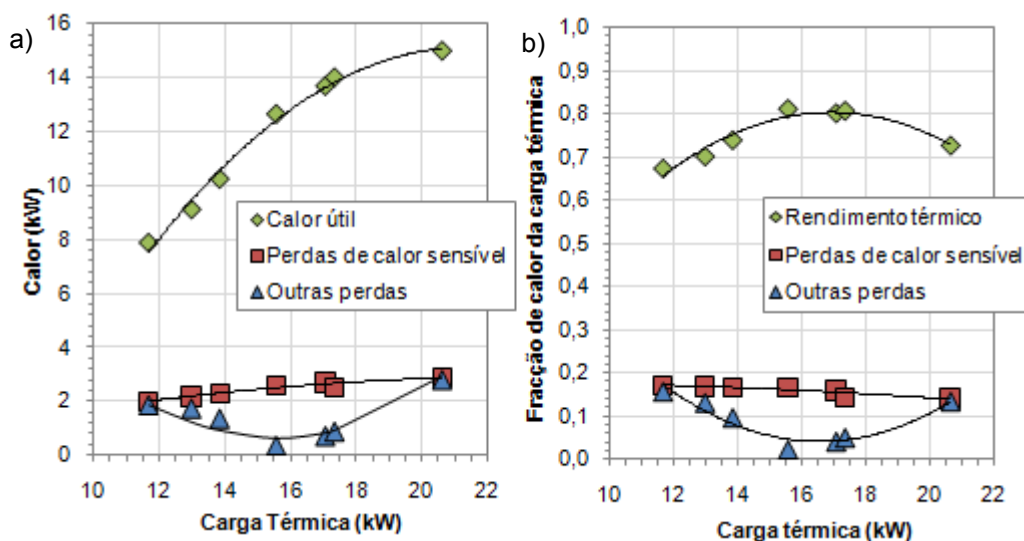


Figura 34 – Emissões de CO, HC e  $NO_x$  em função da carga térmica.

Verifica-se que as emissões de produtos provenientes da combustão incompleta (CO e HC) diminuem à medida que a carga térmica aumenta, indicando que as condições em que se

a combustão ocorre são mais favoráveis para cargas térmicas mais elevadas. Por outro lado, as emissões de  $\text{NO}_x$  são afectadas negativamente pelo aumento da carga térmica. Observando as curvas de tendência das emissões de poluentes, verifica-se que os declives das mesmas diminuem ao aproximarem-se da carga térmica máxima. De forma análoga, a curva de tendência da concentração de  $\text{O}_2$  apresenta uma diminuição do declive, apesar de não ser tão acentuada (ver Figura 33), sugerindo uma relação entre a quantidade de ar disponível para a combustão e a emissão de poluentes.

Na Figura 35 pode-se observar o desempenho energético da caldeira em função da carga térmica, onde à esquerda (a) se representa o calor útil, perdas de calor sensível e outras perdas, e à direita (b) se representa o rendimento térmico e a fracção de perdas de calor sensível e de outras perdas em relação à carga térmica. O calor útil, as perdas de calor sensível e as outras perdas foram calculadas através das equações (19), (18) e (16), respectivamente. O rendimento térmico foi calculado de forma directa, ou seja, é a razão entre o calor útil e a carga térmica. De forma análoga, a fracção de perdas de calor sensível e das outras perdas é referente à carga térmica.



**Figura 35 – Desempenho energético da caldeira em função da carga térmica. a) Calor útil, perdas de calor sensível e outras perdas. b) Rendimento térmico e fracção de perdas de calor sensível e outras perdas.**

Na Figura 35a observa-se que o aumento da carga térmica é acompanhado, previsivelmente, pelo aumento do calor útil, isto é, do calor transferido para a água. Observa-se, ainda, pela curva de tendência do calor útil, que o aumento não é linear. O calor sensível aumenta ligeiramente, principalmente devido ao aumento da temperatura nos gases de exaustão, o que se reflecte na entalpia dos produtos de combustão.

O rendimento máximo ( $\approx 81\%$ ) ocorre a uma carga térmica de aproximadamente 16 kW (ver Figura 35b). Observa-se que as perdas de calor sensível são aproximadamente constantes



(cerca de 20%), concluindo-se que são, de facto, as outras perdas, associadas à combustão incompleta e transferência de calor por radiação e convecção, as responsáveis pela diminuição do rendimento que se observa a cargas térmicas reduzidas e elevadas.

A Figura 36 mostra o balanço de carbono, isto é, como o carbono inicialmente presente nas *pellets* se distribui pelos produtos de combustão, em função da carga térmica. Na legenda da figura  $C_{pellets}$  representa o carbono presente inicialmente nas *pellets*;  $C \rightarrow CO_2$  representa o carbono completamente oxidado;  $C_{n\grave{a}o\ queimado}$  o carbono parcialmente oxidado (CO) e  $C_{n\grave{a}o\ medido}$  representa fuligem e HC. Note-se que as emissões de HC são marginais, sendo a sua contribuição para o balanço de carbono claramente inferior á contribuição do carbono parcialmente oxidado (CO).

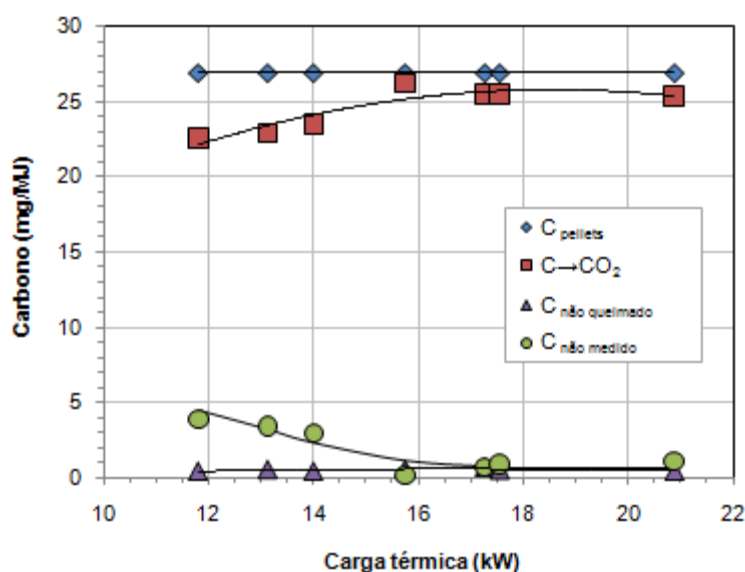


Figura 36 – Balanço de carbono em função da carga térmica.

Através do balanço de carbono é possível fazer uma estimativa do carbono presente na fuligem que é arrastada pelo escoamento. O valor calculado é bastante elevado, sendo comum neste tipo de caldeiras registarem-se quantidades de fuligem elevadas nas partículas recolhidas nos gases de exaustão. Este valor está dentro da gama de valores obtidos por Winnikka et al [25]. De acordo com os resultados publicados, as emissões de fuligem variam entre 0,3 e 11,8 mg/MJ, verificando-se que os valores máximos ocorrem quando a temperatura na câmara de combustão é reduzida e o excesso de ar é elevado. As condições que levam ao aumento de emissão de provenientes de combustão incompleta observadas por Winnikka et al. [25] são as mesmas identificadas neste trabalho.

A cargas térmicas baixas a combustão dá-se em condições pobres, tal como se constata pelas emissões de produtos de combustão incompleta (ver Figura 34) e pela quantidade de carbono não medido (ver Figura 36), indicando que a cargas térmicas reduzidas as perdas por

combustão incompleta são superiores. Para cargas térmicas elevadas, as perdas são possivelmente maioritariamente por transferência de calor para o ambiente.

#### Efeito do excesso de ar

Na Figura 37 pode-se observar a influência da concentração de  $O_2$  nos gases de exaustão nas emissões de  $NO_x$  e CO. As emissões de CO (ver Figura 34 e Figura 37) estão relacionadas com combustão incompleta. Johansson et al. [22] observaram um aumento de emissões de CO em função do aumento de excesso de ar, em contraste com os resultados de González et al. [18], [19] e [20], os quais concluíram que a emissão de CO se deve a uma progressiva diminuição do ar disponível. Os resultados obtidos neste trabalho, a par dos resultados obtidos por outros autores, revelam que o excesso de ar, dentro dos valores observados, não é o único parâmetro que condiciona a emissão de CO.

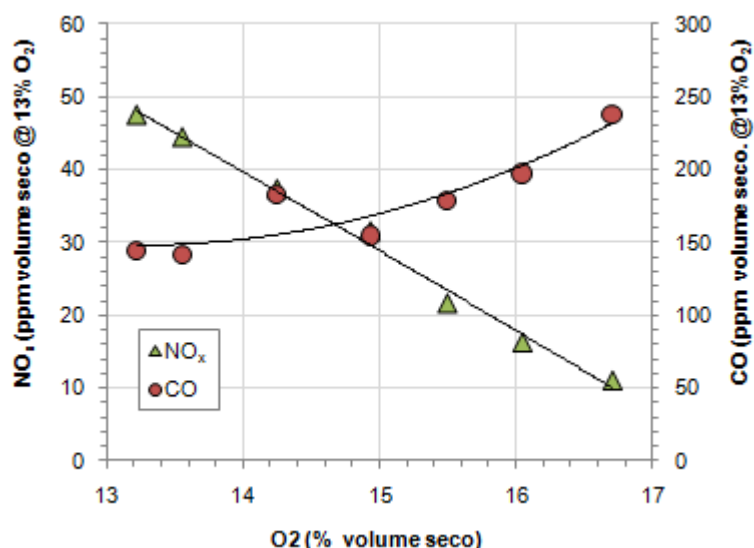


Figura 37 – Emissões de CO e  $NO_x$  em função da concentração de  $O_2$  nos gases de exaustão.

Um elevado excesso de ar pode afectar a temperatura na câmara de combustão de uma forma limitativa, conduzindo ao aumento da emissão de CO, mas um excesso de ar muito reduzido leva também ao aumento da emissão de CO, mesmo a temperaturas elevadas, devido à escassez de oxigénio disponível, tal como reportado por Dias et al. [15]. De facto, apesar da diminuição do excesso de ar que acompanha o aumento da carga térmica, verifica-se que as emissões de CO mínimas foram obtidas em condições em que a temperatura de exaustão é mais elevada. O aumento de temperatura acelera as taxas de reacção, justificando a melhoria das condições de combustão.

Analisando a curva de tendência das emissões de NO<sub>x</sub> verifica-se uma dependência linear indirecta com o excesso de ar. Verifica-se que as emissões de NO<sub>x</sub> e de CO são influenciadas de forma inversa pela carga térmica (ver Figura 34) e pelo excesso de ar. O valor máximo de NO<sub>x</sub> (≈ 48 ppm volume seco) ocorre a carga máxima, e a sua curva de tendência sugere que as emissões de NO<sub>x</sub> são afectadas pelo aumento de temperatura, podendo estar relacionadas com o mecanismo térmico de formação de NO. Klason e Bai [21] utilizaram *pellets* com um baixo teor em azoto (< 0,1% bs), tendo concluído que o mecanismo térmico de formação de NO tem um papel importante na emissão de NO<sub>x</sub>. Dias et al. [15] observaram que o aumento da disponibilidade de oxigénio conduz ao aumento das emissões de NO<sub>x</sub>, contrariando os dados apresentados na Figura 37. A relação directa entre as emissões de NO<sub>x</sub> e o excesso de ar aparenta estar relacionada com o teor em azoto do combustível. Esta tendência verificou-se para *pellets* cujo teor em azoto é 3 vezes superior ao conteúdo de azoto presente nas *pellets* de pinho, enquanto nos ensaios em que Dias et al. [15] usaram *pellets* com um teor baixo em azoto (< 0,3 % bs) não se observou emissões de NO<sub>x</sub> constantes, independentes das condições de operação. Winter et al. [23], num estudo sobre o mecanismo de formação de NO do combustível, concluíram que a temperatura, para além do excesso de ar, é um factor importante para este mecanismo, dado que acelera as taxas de reacção. As emissões de NO<sub>x</sub>, tal como as de CO, aparentam ser influenciadas por um compromisso entre o excesso de ar e a temperatura, sugerindo que a emissão de NO<sub>x</sub> deve-se a mais do que um mecanismo de formação.

### **Influência das características do combustível**

#### *Efeito do tipo de combustível no desempenho da caldeira*

Na Figura 38 observa-se a influência do combustível no desempenho da caldeira relativo à emissão de poluentes, onde o gráfico à esquerda se refere ao pinho e o gráfico à direita se refere aos resíduos lenhosos.

A queima de *pellets* com uma composição diferente altera o desempenho da caldeira, especialmente a emissão de produtos de combustão incompleta, observando-se uma tendência distinta. Analisando as emissões de CO e HC constata-se que no caso das *pellets* de resíduos lenhosos a emissão de produtos de combustão incompleta é mais influenciada pela escassez de oxigénio do que pela temperatura, dado que o aumento da carga térmica, sucedido pelo aumento da temperatura, é acompanhado pelo aumento de emissões de combustão incompleta. Estes resultados são consistentes com os resultados obtidos por González et al. [18], [19] e [20].

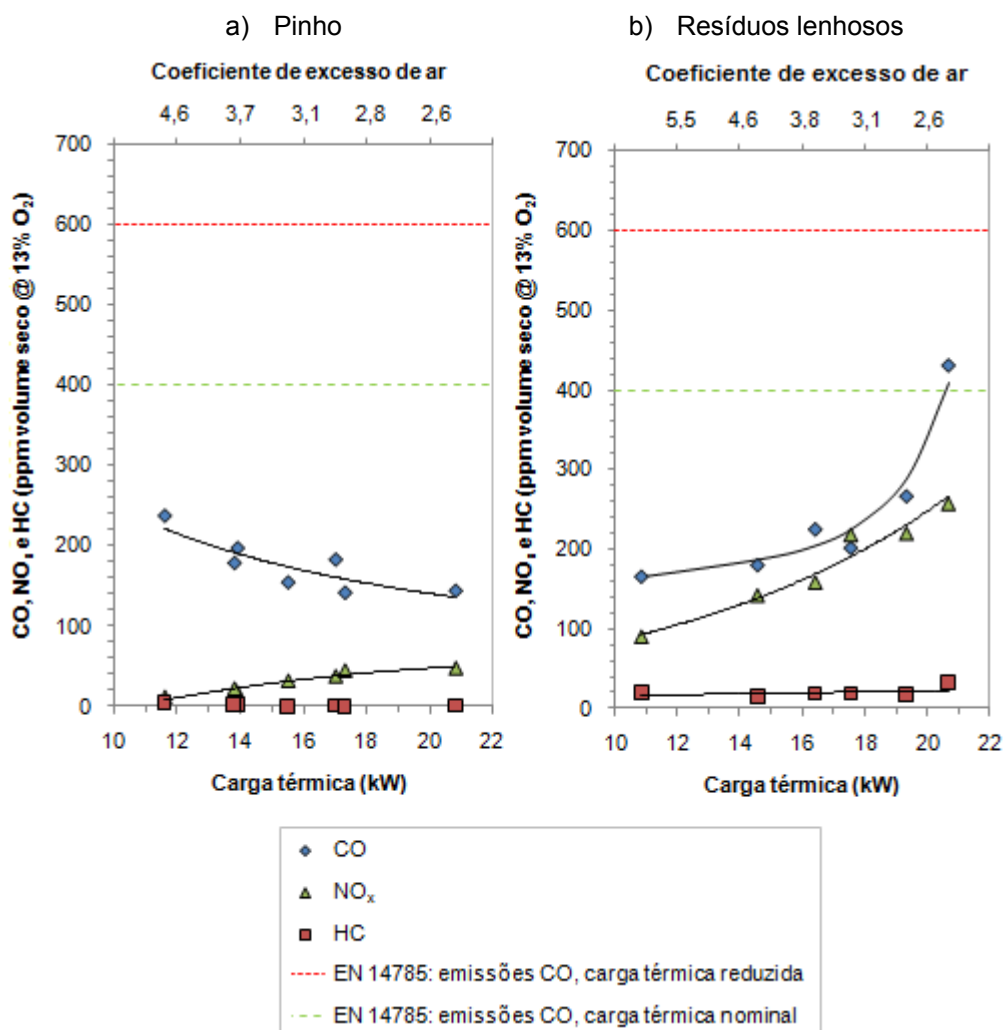


Figura 38 – Emissão de CO, HC e NO<sub>x</sub> em função da carga térmica; a) pinho; b) resíduos lenhosos

As emissões de NO<sub>x</sub>, por sua vez, aumentam de forma consistente com o aumento da carga térmica. No entanto, verifica-se que a curva de tendência das emissões de NO<sub>x</sub> provenientes de resíduos lenhosos apresenta um declive superior em comparação com o declive das emissões NO<sub>x</sub> provenientes do pinho, podendo tal dever-se ao aumento da temperatura na câmara de combustão (ver Tabela 19 e Tabela 20), levando à formação de NO pelo mecanismo térmico. A combustão ocorre com pouco oxidante disponível a cargas mais elevadas, aumentando a emissão de hidrocarbonetos o que poderá potenciar a formação de N<sub>2</sub>O através do mecanismo intermédio [23]. As *pellets* de resíduos lenhosos apresentam um baixo teor em humidade, o que explica o facto de a queima destas *pellets* resultar em temperaturas superiores, tal como evidenciado por Klason and Bai [21]. Por outro lado, o facto de as *pellets* de resíduos lenhosos fracturarem facilmente poderá facilitar os processos de transferência de calor que ocorrem no leito da combustão.

Na Tabela 22 compara-se a influência do combustível na operação da caldeira em condições nominais, constatando-se à partida que as condições nominais são distintas,

ocorrendo a uma carga térmica média no caso do pinho, enquanto no caso dos resíduos lenhosos ocorrem à carga máxima.

**Tabela 22 – Condições nominais de operação da caldeira**

<b>Condições nominais</b>	<b>Pinho</b>	<b>Resíduos lenhosos</b>
<b>Carga térmica (kW)</b>	15,7	20,6
<b>Rendimento térmico (%)</b>	81%	73%
<b>Coefficiente de excesso de ar</b>	3,3	2,7
<b>O<sub>2</sub> (% volume seco)</b>	14,93	13,53
<b>CO (ppm volume seco@13% O<sub>2</sub>)</b>	154,77	431,44
<b>HC (ppm volume seco@13% O<sub>2</sub>)</b>	0,65	32,20
<b>NO<sub>x</sub> (ppm volume seco@13% O<sub>2</sub>)</b>	31,63	257,59

É interessante notar que o aumento do rendimento térmico é acompanhado pelo aumento de emissões de produtos de combustão incompleta, indicando que ocorre uma diminuição da percentagem de perdas por transferência de calor para o ambiente (tendo em conta que, tal como se sucede na queima das *pellets* de pinho, a percentagem de perdas de calor sensível é aproximadamente constante). Este resultado é inesperado, visto que seria expectável que o aumento da chama visível e aumento da temperatura na câmara de combustão resultasse em maiores perdas por radiação e condução. González et al. [18], [19] e [20] obtiveram o mesmo desempenho energético da caldeira em função das condições de operação, para todos os combustíveis utilizados, incluindo *pellets* comerciais de origem florestal.

Verifica-se que a queima de *pellets* de resíduos lenhosos em condições nominais não cumpre o limite mínimo de rendimento térmico e limite máximo de emissão de CO impostos pela norma EN14785.

#### Efeito do tipo de combustível no rendimento térmico e na emissão de poluentes

As Figuras 39 e 40 mostram as emissões de CO, HC e NO<sub>x</sub> provenientes da queima dos três tipos de *pellets* estudados para carga térmica reduzida e carga térmica elevada, respectivamente. Na figura incluem-se a carga térmica, a concentração de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão e a eficiência térmica da caldeira.

A Figura 39 revela que, a carga térmica elevada, as *pellets* de pinho apresentam um desempenho superior ao desempenho das *pellets* de resíduos lenhosos e de caroço de pêssego, tanto ao nível do rendimento térmico como ao nível de emissões de poluentes. Note-se que o poder calorífico inferior das *pellets* de pinho é o mais baixo (ver Tabela 17), mas o seu elevado teor em voláteis deverá contribuir para o seu elevado desempenho energético e ambiental.

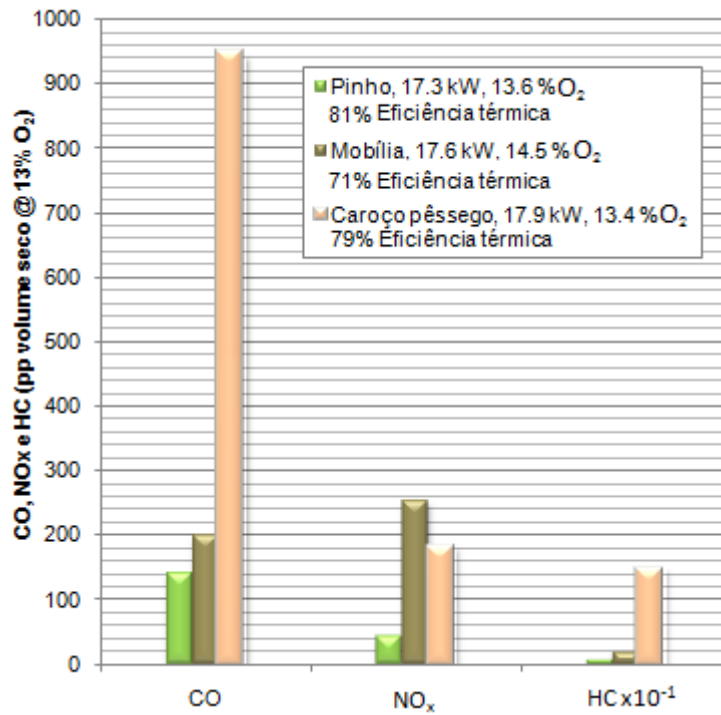


Figura 39 – Emissão de poluentes provenientes de *pellets* de pinho, resíduos lenhosos e caroço de pêssego a carga térmica elevada.

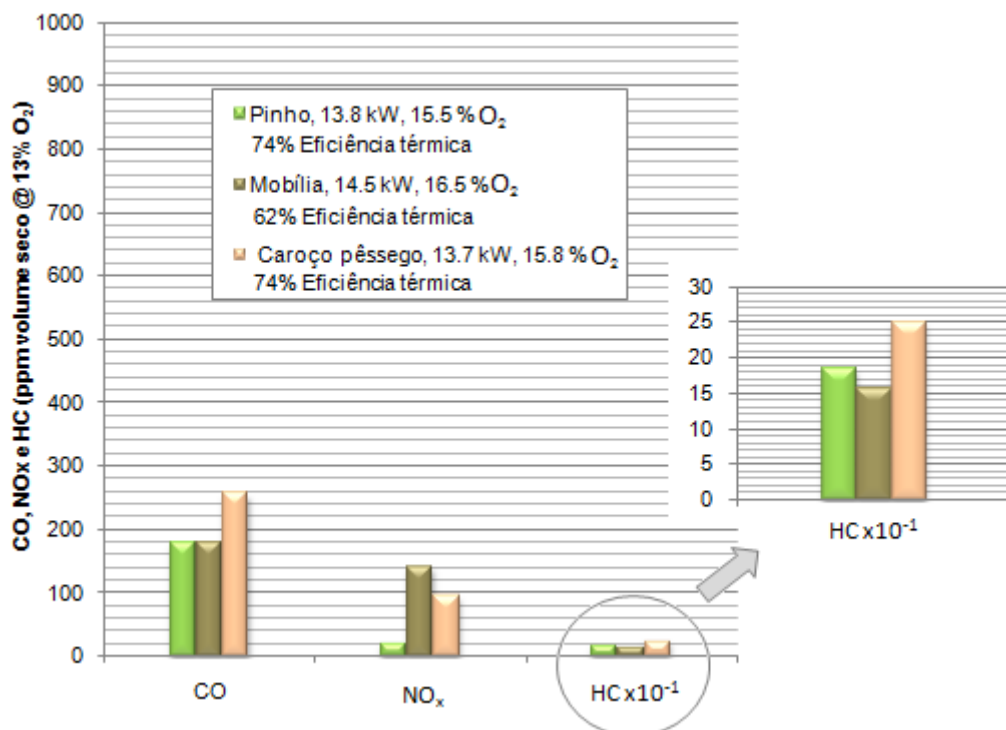


Figura 40 – Emissão de poluentes provenientes de *pellets* de pinho, resíduos lenhosos e caroço de pêssego a carga térmica reduzida.

A carga reduzida (Figura 40) verifica-se, mais uma vez, o desempenho superior das *pellets* de pinho, mas as diferenças são agora inferiores, indicando melhores condições de combustão. Note-se que as *pellets* de caroço de pêssego apresentam um rendimento térmico próximo do rendimento térmico das *pellets* de pinho, revelando um elevado potencial de utilização futura. No entanto, as elevadas emissões de produtos de combustão incompleta revelam que as condições de combustão a carga máxima são inadequadas, tal como se verificou para os resíduos lenhosos. Sendo assim, ao contrário do que se sucede com as *pellets* de pinho, tanto no caso dos resíduos lenhosos como no caso do caroço de pêssego, as emissões de produtos de combustão incompleta estão fortemente relacionadas com a escassez de oxigénio.

Analisando os trabalhos de González et al. [18], [19] e [20] verifica-se que, tipicamente, em condições nominais os combustíveis com um teor em voláteis superior conduzem a emissões de CO inferiores, dado que a mistura combustível/ar se dá mais facilmente. De forma coerente, neste trabalho as emissões de CO são tanto maiores quanto menor é o teor em voláteis das *pellets*.

As Figuras 39 e 40 confirmam que as emissões de NO<sub>x</sub> estão relacionadas com o conteúdo de azoto nas *pellets* (Tabela 17), em adição à formação de NO térmico, tal como indicado pelos trabalhos [15], [17], [21], [23] e [26].

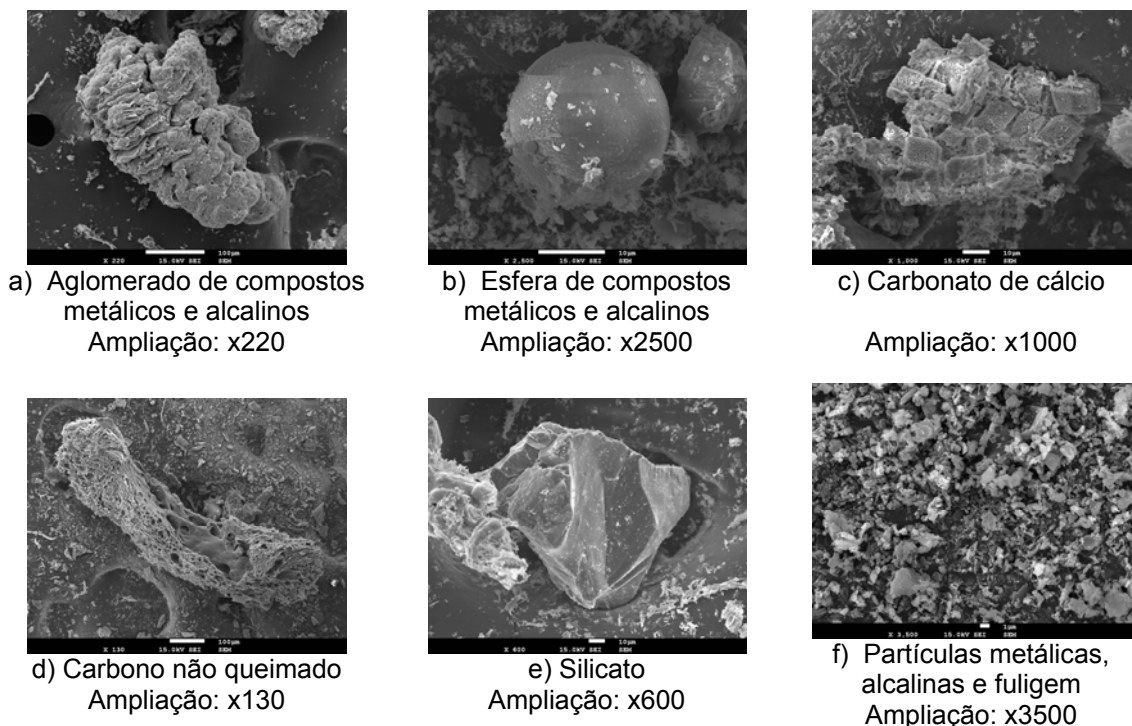
As *pellets* de resíduos lenhosos, para além de não cumprirem os requisitos da norma EN14785 a carga nominal (ver Tabela 22), não cumprem o limite de rendimento térmico mínimo a carga reduzida. As *pellets* de caroço de pêssego, por sua vez, não cumprem o limite de emissões máximas de CO a carga elevada, no entanto revelam um grande potencial por cumprirem os requisitos a carga reduzida e ainda apresentarem um rendimento térmico elevado a carga elevada. Um ajuste das condições de operação, em particular do caudal de ar de combustão, poderá reduzir as emissões de CO de forma a tornar as *pellets* de caroço de pêssego adequadas para o uso em caldeiras domésticas.

## **Cinzas residuais**

Na Figura 41 podem-se observar micrografias de partículas obtidas com recurso ao microscópio electrónico de varrimento. As análises atómicas não permitem identificar o tipo de moléculas presentes, apenas a distribuição percentual dos vários tipos de átomos presentes nas partículas. Em determinados casos é possível identificar o tipo de moléculas presentes, quando as partículas apresentam uma composição e configuração molecular específica, mas na maioria dos casos as partículas apresentam-se como um aglomerado de vários compostos moleculares não identificáveis.

As partículas presentes nas cinzas residuais apresentam dimensão, composição e configuração variável, podendo-se dividir em dois grupos principais de acordo com a dimensão:

partículas grosseiras (Figura 41a-e), com uma dimensão superior a 10 µm, e partículas finas (Figura 41f), com uma dimensão inferior a 10 µm. A Tabela 23 apresenta a caracterização das partículas presentes nas cinzas residuais de acordo com a dimensão, composição e configuração, efectuada com base numa análise detalhada dos dados obtidos no MEV, tendo sido identificados 4 tipos de partículas.



**Figura 41 – Micrografias de partículas presentes nas cinzas residuais obtidas com o auxílio do microscópio de varrimento electrónico.**

**Tabela 23 – Morfologia e composição das partículas presentes nas cinzas residuais.**

<b>Tipo de partícula</b>	<b>Dimensão (µm)</b>	<b>Composição</b>	<b>Configuração</b>
<b>Fuligem e partículas metálicas e alcalinas</b>	≤ 10	K,Na Ca,Mg Al, Mn, Fe, Nb, Cu Si P, C, O	Partículas dispersas
<b>Aglomerados de partículas alcalinas e metálicas</b>	10-300	K,Na Ca,Mg Al, Mn, Fe, Cu Si P, C, O	Aglomerados Esferas
<b>Cristais de silicatos amorfos e sais</b>	100-350	Si C, O	Cristalina
<b>Partículas de carbono não queimado</b>	200-900	C, O	Fibras porosas

As partículas finas (ver Figura 41f) possuem uma composição variada, apresentando metais, alcalinos e fuligem. As partículas metálicas e alcalinas são uma fracção das partículas



originadas por nucleação e condensação na vizinhança do leito de combustão, que se precipitam no tabuleiro das cinzas. A fuligem é um produto de combustão incompleta. As partículas grosseiras são formadas no próprio leito de combustão, sendo depois ejetadas pelo efeito de arrastamento do escoamento. As partículas que se observam na Figura 41a-c apresentam um largo espectro de dimensão (10-300  $\mu\text{m}$ ) e de composição, onde se incluem metais e alcalinos. São originadas pela coagulação e fusão das cinzas presentes no combustível. Os silicatos cristalinos (ver Figura 41 e) partilham a mesma origem que as partículas anteriores, apresentando dimensões entre 100 e 300  $\mu\text{m}$  e uma configuração ordenada sobre a forma de cristais. A presença de aglomerados cuja composição inclui silicatos e metais originados por fusão indica que no leito de combustão podem-se atingir localmente temperaturas superiores a 1200 °C [1]. Na Figura 41d observa-se uma partícula porosa de carbono não queimado, sendo que este tipo de partículas possui a maior dimensão observada (200 a 900  $\mu\text{m}$ ). Estas partículas são arrastadas do leito de combustão pelo escoamento precipitando-se no tabuleiro das cinzas, onde a temperatura é inferior e a atmosfera é pobre em oxigénio. A combustão prossegue de uma forma heterogénea, tendo sido possível observar durante os testes a presença de partículas incandescentes no tabuleiro das cinzas, produzindo emissões de CO e HC. Verificou-se que a ejeção destas partículas se dá frequentemente durante o funcionamento da caldeira, em quantidades reduzidas. No entanto, durante a fase de limpeza, a ejeção de partículas é proeminente, tendo-se verificado que após o período de limpeza as emissões de CO e HC atingem máximos instantâneos. É possível identificar na Figura 32 uma fase de limpeza que ocorre aproximadamente aos 1200 s, onde se observa um aumento súbito e substancial de CO e HC, devido à ejeção de partículas incandescentes.

### **4.3 Recomendações para a melhoria do desempenho energético de caldeiras e controlo das suas emissões de poluentes**

#### ***Especificações de projecto para otimizar a combustão***

- 1) Projecto da câmara de combustão – distribuição de ar primário e secundário apropriada, garantindo uma boa mistura entre o combustível e o oxidante. Na zona de combustão primária a quantidade de ar deve ser mínima, de forma a garantir a volatilização e minimizar a formação de NO através do mecanismo do combustível. Na zona de combustão secundária a quantidade de ar deve ser elevada, garantindo a oxidação dos produtos da combustão primária.
- 2) Tecnologia de controlo de ar de combustão – uso de um sensor lambda para a regulação da quantidade de ar de combustão, que garanta um correcto excesso de ar. Um excesso de ar demasiado elevado provoca uma diminuição de temperatura e um excesso de ar muito reduzido leva a uma baixa disponibilidade de oxidante.

### ***Características do combustível***

- 1) Elevado teor em voláteis – maior quantidade de carbono oxidado em condições homogêneas na zona de combustão secundária, e menores emissões de produtos de combustão incompleta relacionados com combustão em condições heterogêneas.
- 2) Teor em azoto reduzido – minimizando as emissões de NO pelo mecanismo de formação a partir do combustível.
- 3) Ter em cinzas reduzido – um elevado teor em cinzas dificulta a ejeção de partículas da grelha, por efeito de aglomeração, provocando a obstrução da passagem de ar, e tornando a combustão insustentável. Um elevado teor em cinzas poderá ainda levar a uma elevada formação de depósitos e emissão de partículas.
- 4) Não obstante a importância da influência das características do combustível no desempenho de uma caldeira, um ajuste de condições de operação às características do combustível permite utilizar *pellets* cujas características possuam alguma variabilidade, desde que possuam um poder calorífico adequado.

## 5. Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

O presente estudo incidiu na avaliação da influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de uma caldeira doméstica. Foram testados três tipos de *pellets*, dois dos quais comerciais (pinho e resíduos lenhosos) e outro produzido especificamente para este estudo (caroço de pêssego), numa instalação experimental preparada no início do trabalho. A instalação experimental incluiu, para além da caldeira doméstica, termopares para a monitorização das temperaturas, um rotâmetro, uma sonda para recolha de amostras dos gases de exaustão, condicionamento da amostra e analisadores de concentração de espécies gasosas, tendo-se igualmente procedido a análises das cinzas residuais produzidas durante o funcionamento da caldeira. Foram realizadas 3 séries de ensaios experimentais, dos quais se obtiveram os dados que permitiram a caracterização do regime de arranque, a caracterização das condições de operação da caldeira e uma análise paramétrica da influência das características do combustível no desempenho energético da caldeira e nas suas emissões de poluentes.

As maiores dificuldades encontradas ocorreram durante a preparação das condições necessárias para a realização dos ensaios. A produção de *pellets* a partir de resíduos agrícolas para comercialização é escassa, se não nula, em Portugal. Idealmente teriam sido utilizados mais tipos de *pellets*, no entanto a obtenção de *pellets* cuja composição difira consideravelmente das *pellets* comuns de pinho revelou-se morosa e difícil. As características específicas dos resíduos exigem condições de densificação adequadas, tendo-se verificado dificuldades na densificação do caroço de pêssego pulverizado numa linha de densificação otimizada para a densificação de resíduos de lenhosos em fim de vida. A outra dificuldade prendeu-se com o controlo dos parâmetros de controlo da caldeira doméstica. O facto de o seu funcionamento ser totalmente automático implicou limitações na tentativa de ajustar parâmetros como o caudal de ar de combustão, tendo sido possível apenas a regulação da escala de potência.

Os resultados obtidos permitiram caracterizar o arranque de caldeira, o desempenho energético e ambiental em condições estacionárias em função das condições de operação e do tipo de combustível. Adicionalmente foram feitas obtidas micrografias e realizadas análises de resíduo carbono às cinzas residuais.

A alimentação de ar de combustão é constante. Consequentemente, com o aumento do caudal de *pellets*, o coeficiente de excesso de ar diminuiu afectando significativamente a combustão, em particular, as emissões e o rendimento térmico em toda a gama de cargas térmicas estudadas.

Durante a fase de arranque foram observadas emissões elevadas de poluentes, em particular de CO. As emissões de NO<sub>x</sub> diminuíram depois da ignição, a carga térmica reduzida, e aumentaram depois da ignição a carga térmica elevada. As emissões de CO apresentaram

uma diminuição após a ignição, apesar de terem sido observadas algumas flutuações. As emissões de HC são essencialmente afectadas pela combustão heterogénea durante a ignição, diminuindo consideravelmente posteriormente.

Durante o regime estacionário, as emissões de produtos de combustão incompleta, CO e HC, diminuíram com o aumento da carga térmica, indicando uma melhoria das condições de combustão. As emissões de NO<sub>x</sub>, por sua vez, aumentaram, indicando uma contribuição de formação de NO pelo mecanismo térmico, para além do mecanismo de formação de NO do combustível. O rendimento térmico nominal ocorreu à carga térmica média ( $\approx 16$  kW), sendo que a cargas térmicas reduzidas e cargas térmicas elevadas as perdas devem-se a combustão incompleta e a perdas por transferência de calor para a envolvente, respectivamente.

A presença de aglomerados cuja composição inclui silicatos e metais originados por fusão nas cinzas indica que no leito de combustão podem-se atingir localmente temperaturas superiores a 1200 °C.

Comparando o desempenho da caldeira em função da carga térmica utilizando *pellets* de pinho e de resíduos lenhosos, verificou-se que o tipo de *pellets* afecta o modo como as condições de operação afectam o desempenho energético. Ao utilizar *pellets* de resíduos lenhosos as condições de combustão pioraram com o aumento da carga térmica, ao invés do que se verificou com o uso de *pellets* de pinho, indicando que a taxa da reacção de oxidação de matéria não queimada é mais afectada pela reduzida disponibilidade de oxigénio do que pela temperatura na câmara de combustão. As emissões de NO<sub>x</sub>, mais uma vez, aumentaram com o aumento da carga térmica, tendo sido observado um declive acentuado. O rendimento térmico apresentou uma dependência monótona crescente da carga térmica, sendo que a carga nominal, neste caso, correspondeu à carga máxima.

Comparando o desempenho energético e ambiental da caldeira em carga térmica reduzida e elevada, usando três tipos de *pellets*, constatou-se que o tipo de *pellets* afecta significativamente as emissões de CO, NO<sub>x</sub> e HC, assim como o rendimento térmico, sendo que as *pellets* de pinho conduziram a um desempenho superior, tanto ao nível da emissão de poluentes como ao nível do rendimento térmico. O uso de *pellets* de caroço de pêssago, no entanto, não afectou significativamente o rendimento térmico, revelando um potencial atractivo para a utilização em caldeiras domésticas. Tal como se verificou ao usar *pellets* de resíduos lenhosos, a emissão de produtos de combustão incompleta está relacionado com a reduzida disponibilidade de oxigénio.

A norma EN 14785 não é cumprida no caso do uso de *pellets* de resíduos lenhosos, devido a um rendimento térmico consistentemente inferior ao limite mínimo a carga térmica reduzida e elevada (70% e 75% respectivamente). O uso de *pellets* de caroço de pêssago não garante o cumprimento da norma a carga elevada devido a uma emissão de CO superior ao limite máximo (400 ppm @ 13%O<sub>2</sub>).

Os resultados obtidos permitem concluir que as características do combustível afectam significativamente o desempenho energético e ambiental da caldeira. As condições de

operação afectam o desempenho da caldeira de forma distinta quando se utilizam *pellets* diferentes. As emissões de produtos de combustão incompleta derivam de um compromisso entre a temperatura na câmara de combustão e o ar disponível que não se reproduz variando o tipo de *pellets*, sendo que o compromisso é portanto dependente das características do combustível, em particular do teor em voláteis. As emissões de NO<sub>x</sub> são resultado de contribuição de diversos mecanismos de formação, verificando-se uma forte influência do mecanismo de formação de NO a partir do azoto presente no combustível. O aumento do rendimento térmico não é necessariamente uma consequência da melhoria das condições de combustão. Dadas as características das *pellets* de caroço de pêssego (teor em cinzas reduzido, tendência de formação de depósito reduzida, poder calorífico elevado) e dado que o desempenho energético da caldeira quando alimentada a *pellets* de caroço de pêssego é comparável ao desempenho energético da caldeira quando alimentada a *pellets* de pinho, conclui-se que as *pellets* de caroço de pêssego apresentam um potencial atractivo para a utilização em caldeiras domesticas. No entanto, o seu baixo teor em voláteis implica um correcto ajuste das condições de operação, em particular do caudal de ar de combustão, de modo a minimizar as emissões de CO e cumprir a norma EN 14785.

Com base nos resultados foram sugeridas recomendações relativas às condições de operação e às características do combustível, visando uma melhoria global do desempenho energético e ambiental da caldeira. Em relação às condições de operação sugere-se uma melhoria da configuração da distribuição de ar no interior da câmara de combustão e de um ajuste automático do caudal de ar de combustão. Em relação às características dos combustíveis dá-se preferência a *pellets* que possuam um elevado teor em voláteis e um reduzido teor em cinzas e azoto.

Como trabalhos futuros sugerem-se a avaliação do ajuste de caudal de ar às condições de operação, avaliação da influência das características do combustível na emissão de partículas e um estudo de métodos secundários de redução de partículas. Um ajuste de caudal de ar às condições de desempenho poderá levar a uma extensão da gama de carga térmica em condições nominais permitindo uma maior flexibilidade de operação da caldeira, não comprometendo o seu desempenho. O facto de a alimentação da caldeira utilizada ser automatizada torna o ajuste de caudal de ar uma tarefa difícil. A aplicação de uma perda de carga conduz a uma alteração na distribuição de pressão no tubo de alimentação de ar, levando a uma correcção da velocidade do ventilador, ou mesmo accionamento do alarme. Os trabalhos prévios indicam claramente que existe uma influência das características do combustível na emissão de partículas. A emissão de partículas de fuligem, por sua vez está associada à combustão incompleta, existindo alguns trabalhos onde se sugere uma correlação entre a emissão de partículas de fuligem e emissão de partículas inerente ao teor e composição das cinzas do combustível. Os testes podem ser realizados na instalação experimental utilizada para este trabalho, exigindo apenas a inclusão de um método de amostragem e análise de partículas e ainda um túnel de diluição que simule as reacções que

ocorrem resultantes do contacto dos gases de exaustão com o ar atmosférico. Dado que as partículas possuem diferentes dimensões, a amostragem deve ser isocinética, de modo a evitar desvios das linhas de corrente. Deve ser dada particular atenção a partículas com um diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ , por serem inaláveis e potencialmente perigosas para a saúde humana. Por último, sugere-se ainda o estudo de métodos secundários de redução de emissões. A recirculação dos gases de exaustão permite regular a temperatura e a razão de ar/combustível potenciando a redução de emissão de  $\text{NO}_x$ . A captura de partículas pode ser efectuada através de separação mecânica, por arrastamento induzido pelo escoamento, de forma semelhante aos métodos de captura de partículas para caracterização das emissões de partículas. Este método apresenta a vantagem de ser económico, por não requerer o uso de filtros ou electricidade, e de baixa manutenção.

## 6. Referências

- [1] Dias, J., “*Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas*”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (2002).
- [2] Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T. e Siagi, Z., “*Combustion of agricultural residues*”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp 1-27 (2000).
- [3] Mateus, T., “*O potencial energético da floresta portuguesa: análise do potencial energético disponível para as centras termoeléctricas a biomassa florestal lançadas a concurso*”, Mestrado de Energias Renováveis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [4] Fernandes, U. e Costa, M., “*Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal*”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34, pp 661-666 (2010).
- [5] Buddekker, F., “*Experimental evaluation of the performance domestic a pellets-fired boiler*”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (2009).
- [6] Van Loo, S. e Koppejan J., “*The handbook of biomass and co-firing*”, Earthscan (2008). ISBN: 978-1-84407-249-1.
- [7] Vivarelli, F., “*Pellet market country report: Portugal*”, ETA Renewable Energies (2009).
- [8] Almeida, T., “*WP2 – Biomass fuel trade in Europe. Country report: Portugal*”, EUBIONET (2009).
- [9] Fiedler, F. e Persson, T., “*Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems*”, *Applied Energy*, Vol. 86, pp 135-143 (2009).
- [10] Erald, A., Rakos, C., Mendes, C., Lagergren, F., Bjerg J. e Almeida, T., “*Aquecimento a biomassa em grandes edifícios – aspectos técnicos essenciais*”, CBE (2002).
- [11] Biomass Panel - Issue Group 2: Residential Technologies Vision, European Technology Platform - Renewable Heating and Cooling, (2009).
- [12] <http://www.planetenergy.co.uk/bioenergy.html>
- [13] Fiedler, F., “*The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany*”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, pp 201-221 (2004).
- [14] Verma, V. K., Bram S. e De Ruyck J., “*Small scale biomass heating systems: standards, quality labeling and market driving factors – an EU outlook*”. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 33, pp 1393-1402 (2009).

- [15] Dias, J., Costa, M. e Azevedo, J.L.T., “*Test of a small domestic boiler using different pellets*”, Biomass & Bioenergy, Vol. 27, pp 531-539 (2004).
- [16] Sippula, O., Hytönen, K., Tissari, J., Raunemaa, T. e Jokiniemi, J., “*Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove*”, Energy and Fuels, Vol. 21, pp 1151-1160 (2007).
- [17] Díaz, M., Rezeau, A., Sebastián, F. e Royo, J., “*Envrionmental performance of a novel small-scalle biomass boiler fuelled with native spanish resources*”, Proceeding of the 16<sup>th</sup> Biomass Conference & Exhibition, 2 a 6 de Junho, Valencia, Espanha (2008).
- [18] González, J. F., González-Garcia, C. M., Ramiro, A., González, J., Sabio, E., Gañan, J. e Rodriguez, M.A., “*Combustion optimization of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler*”, Biomass and Bioenergy, Vol. 27, pp 145-154 (2004).
- [19] González, J. F. González-Garcia, C. M., Ramiro, A., Gañan, J., González, J., Sabio, E., Omann, S. e Turegano, J., “*Use of almond residues for domestic heating. Study of the combustion parameters in mural boiler*”, Fuel Processing Technology, Vol. 86, pp 1351-1368 (2005).
- [20] González, J. F., González-Garcia, C. M., Ramiro, A., Gañan, J., Ayuso, A. e Turegano, J., “*Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler*”, Fuel Processing Technology, Vol. 87, pp 717-726 (2006).
- [21] Klason T. e Bai, X. S., “*Computational study of the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace*”, Fuel, Vol. 86, pp 1465-1474 (2007).
- [22] Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. e Potter, A., “*Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets*”, Atmospheric Environment, Vol. 38, pp 4183-4195 (2004).
- [23] Winter, F., Wartha, C. e Hofbauer, H., “*NO and N<sub>2</sub>O formation during the combustion of wood, straw, malt, waste and peat*”, Bioresource Technology, Vol. 70, pp. 39-49 (1999).
- [24] Winnikka, H. e Gebart, R., “*Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor*”, Biomass and Bioenergy, Vol. 27, pp 645-653 (2004).
- [25] Winnikka, H. e Gebart, R., “*Critical parameters for particle emissions in small-scale fixed-bed combustion of wood pellets*”, Energy and Fuels, Vol. 18, pp 897-907 (2004).
- [26] Winnika, H., Gerbart, R., Boman, C., Boström, D. e Öman, M., “*Influence of ash composition on high temperature aerosol formation in fixed bed combustion of woody biomass pellets*”, Fuel, Vol. 86, pp 181-193 (2007).
- [27] <http://www.ieabcc.nl/>
- [28] <http://www.vt.tuwien.ac.at/Biobib/biobib.html>



- [29] <http://www.ecn.nl/phyllis/>
- [30] Coelho, P. e Costa, M., “*Combustão*”, Edições Orion (2007). ISBN: 9789728620103.
- [31] Demirbas, A., “*Combustion characteristics of different biomass fuels*”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, pp 219-230 (2004).
- [32] Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates, N. E., Sharifi, V. N. e Swithenbank, J., “*Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments – fuel types, equivalence ratio and particle size*”, Fuel, Vol. 85, pp 1039-1046 (2006).
- [33] Jeguirim, M., Dorge, S. e Trouvé, G., “*Thermogravimetric analysis and emission characteristics of two energy crops in air atmosphere: Arundo donax and Miscanthus giganteus*”, Biouresource Technology, Vol. 191, pp 788-793 (2010).
- [34] Jenkins, B., Baxter, L., Miles Jr., T. e Miles, T., “*Combustion properties of biomass*”, Biomass Usage for Utility and Industrial Power, 28 de Abril a 3 de Maio, Utah, Ed. Engineering Foundation Conferences (1996).
- [35] Demirbas, A., “*An overview on biomass pyrolysis*”, Energy Sources, Vol. 24, pp 471-482 (2002).
- [36] Jalan, R. K. e Srivastava, V. K., “*Studies on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet – kinetic and heat transfer effects*”, Energy Conversion and Management, Vol. 40, pp 467-494 (1999).
- [37] Azevedo, J.L.T., “*Modelação Física e Simulação Numérica de Sistemas de Queima de Combustíveis Sólidos*”, Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (1994).
- [38] Brunner, T., Obernberger, I., Brouwers J. J. H. e Preveden, Z., “*Efficient and economic dust separation from flue gas by the rotational particle separator as an innovative technology for biomass combustion and gasification plants*”, Proceedings of the 10th European Bioenergy Conference, June 1998, Würzburg, Germany, CARMEN, Rimplar, Germany (1998).
- [39] Christensen, K. A., “*The formation of submicron particles from the combustion of straw*”, Tese de Doutoramento, Technical University of Denmark (1995).
- [40] Dahl, J., “*Chemistry and behavior of environmentally relevant heavy metals in biomass combustion*”, Tese de Doutoramento, Graz University of Technology, Austria (1999).
- [41] Kauppinen, E., Lind, T., Kurkela, J., Latva-Somppi, J. e Jokinen, J. “*Ash particle formation mechanisms during pulverised and fluidised bed combustion of solid fuels*”, Ashes and Particulate Emissions from Biomass Combustion, Vol. 3 of Thermal Biomass Utilization series, BIOS, Graz, Austria, Verlag (1998)
- [42] Lind, T., Valmari, T., Kauppinen, E., Maenhaut, W. e Huggins, F., “*Ash formation and heavy metal transformations during fluidized bed combustion of biomass*”, Ashes and Particulate Emissions from Biomass Combustion, Vol. 3 of Thermal Biomass Utilization Series , BIOS, Graz, Austria, Verlag (1998).

- [43] Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W. e Riedl, R., “*Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions*”, Biomass and Bioenergy, Vol 12, pp 221–224 (1996).
- [44] Obernberger, I. e Bierdermann, F. “*Fractionated heavy metal separation in Austrian biomass grate-fired combustion plants approach, experiences, results*”, Ashes and Particulate Emissions from Biomass Combustion, Vol. 3 of Thermal Biomass Utilization series, BIOS, Graz, Austria, Verlag (1998).
- [45] Heitor, M. V., “*Técnicas instrumentais para análise de escoamentos com combustão*”, AEIST, Lisboa. (1991).
- [46] Pitts, W. M., Braun, E., Peacock, R. D., Milter, H. E., Johnsson, E. L., Reneke, P. A., e Belvins, L. G., “*Temperature uncertainties for bear-bed and aspirated thermocouple measurements in fire environments*”, Annual Conference on Fire Research: Book of Abstracts, 2 a 5 Novembro, 1998, Gaithersburg, M. D, Beall, K. A., Editores, pp 15-16, 1998, 1999.

## 7. Bibliografia

Alkangas, E., e Paju, P., “*Wood pellets in Finland – technology, economy and market. OPET Report 5*”, VTT Processes (2002).

Bohman, C., Nordim, A. e Thaning, L., “*Effects of increased biomass pellets combustion on ambient air quality in residential areas – a parametric dispersion modeling study*”, Biomass and Bioenergy, Vol. 24, pp 465-474 (2003).

Bohman, C., “*Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion*”, Tese de Doutorado, Umeå University, Sweden (2005).

Dahl, J. e Obernberger, I., “*Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (Arundo Donax, Cynara Cardunculus, Miscanthus Giganteus and Panicum Virgatum)*” Proceeding of the 2nd World Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10 a 14 de Maio, Itália (2004).

Incropera, F. P. e DeWitt, D. P., “*Fundamentals of heat and mass transfer*”. John Wiley and Sons, 5ª Edição (2001). ISBN: 9780471457282

Han, J., Kim, H., Minami, W., Shimizu, R. e Wang, G., “*The effect of particle size of alumina sand on the combustion and emission behavior of cedar pellets in a fluidized bed combustor*”, Bioresource Technology, Vol. 99, pp 3782-3786 (2008).

<http://www.afn.min-agricultura.pt/portal>

<http://www.iea.org/>

<http://www.cebio.ccg.pt/pub/home.php?menu=0&lang=pt>

Moran, M.J. e Shapiro, H. N., “*Fundamentals of engineering thermodynamics*”, Wiley (2004). ISBN: 9780471274711.

Persson, T., Fielder, F., Nordlander, S., Bales, C. e Paavilainen, J., “*Validation of a dynamic model of wood pellet boilers and stoves*”, Applied Energy, Vol. 86, pp 645-656 (2009).

Pronobis, M., “*Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlation*”, Biomass and Bioenergy, Vol. 28, pp 375-383 (2004).

Ragland, K., W., e Aerst, D., J., "*Properties of wood for combustion analysis*", Bioresource Technology, Vol. 31, pp 161-168 (1991).

Sultana, A., Kumar, A. e Harfield, D., "*Development of agri-pellet production cost and optimum size*", Bioresource Technology, Vol. 101, pp 5609-5621 (2010).

Wierzbicka, A., Lillieblad, L., Pagels, J., Strand, M., Gudmundsson, A., Gharibi, A., Swietlicki, E. e Sanati, M., "*Particle emissions from district heating units operating on three commonly used biofuels*" Atmospheric Environment, Vol. 39, pp 129-150 (2005).

Zarnescu, V. e Pisupati, S. V., "*An integrative approach for combustion design using CFD methods*", Energy and Fuels, Vol. 16, pp 622-633 (2002).

## Anexo

### Caudal volumétrico de água

$$\dot{Q}_{H_2O} = \frac{qv}{\sqrt{\frac{(\rho_f - 1)\rho_1}{(\rho_{f1} - 1)\rho_1}}} \left( \frac{m^3}{h} \right) \quad (8)$$

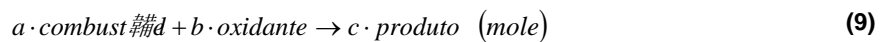
$qv$  : valor medido na escala do rotâmetro (0-100%)

$\rho_f$  : valor tabelado de densidade do flutuador  $\left( \frac{g}{cm^3} \right)$

$\rho_{f1}$  : densidade do flutuador utilizado  $\left( \frac{g}{cm^3} \right)$

$\rho_1$  : densidade do fluido nas condições de operação  $\left( \frac{g}{cm^3} \right)$

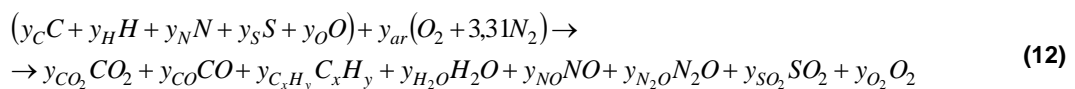
### Cinética química



$$\frac{d(\text{produto})}{dt} = k \cdot [\text{combustível}]^a \cdot [\text{oxidante}]^b \left( \frac{\text{mole}}{m^3 s} \right) \quad (10)$$

$$k = A \cdot T^\beta \cdot \exp\left(-\frac{E}{R_u \cdot T}\right) \quad (11)$$

### Combustão com excesso de ar



$$y_C, y_H, y_N, y_S, y_O, y_{ar} \left( \frac{kg_i}{kg_{reagentes}} \right)$$

$$y_{CO_2}, y_{CO}, y_{C_xH_y}, y_{H_2O}, y_{NO}, y_{N_2O}, y_{SO_2}, y_{O_2} \left( \frac{kg_i}{kg_{produtos}} \right)$$

$$\lambda = \frac{y_{ar}}{y_{ar,est}} \quad (13)$$

Balanço de massa e de energia à caldeira

$$\dot{m}_{ar} + \dot{m}_{pellets} = \dot{m}_{ge} \left( \frac{kg}{s} \right) \quad (14)$$

$$\dot{m}_{ar} = \lambda \cdot \left( \frac{A}{F} \right)_{est} \cdot \dot{m}_{pellets} \quad (15)$$

$$P = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{ge} + \dot{Q}_p \quad (kW) \quad (16)$$

$$P = \dot{m}_{pellets} \cdot PCI \quad (17)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_s - T_e) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{ge} = \dot{m}_{ge} \times \sum \frac{X_i \cdot (\bar{h}_i(T_{ge}) - \bar{h}_i(T_o))}{M_i} \quad (19)$$

Conversão de unidades de poluentes

ppm@O <sub>2</sub>	ppm@13%	mg/Nm <sup>3</sup>
A	$A \cdot \frac{21 - O_2}{21 - 13}$	$A \cdot 10^{-6} \cdot \frac{M_A P}{R_0 T}$