



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Pedro Emanuel Abreu Ribeiro

Aglomeração de Cinzas numa Caldeira a Pellets – Influência da Temperatura e do Fluxo de Ar

Tese de Mestrado

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efectuado sobre a orientação do

Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira

Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso Ferreira

DECLARAÇÃO

Nome: Pedro Emanuel Abreu Ribeiro

Endereço electrónico: pear_pedro@hotmail.com

Telefone: 00351 919838590

Número do cartão do cidadão: 13368241

Título dissertação: **Aglomeración de cinzas numa caldeira a pellets – Influência da temperatura e do fluxo de ar.**

Orientador(es): Professor Doutor José Carlos Fernandes Teixeira; Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso Ferreira

Ano de conclusão: 2012

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação, no todo ou em parte, em suporte digital.

Declaro que autorizo a Universidade do Minho a arquivar mais de uma cópia da dissertação e a, sem alterar o seu conteúdo, converter a dissertação entregue, para qualquer formato de ficheiro, meio ou suporte, para efeitos de preservação e acesso.

Retenho todos os direitos de autor relativos à dissertação, e o direito de a usar em trabalhos futuros (como artigos ou livros).

Concordo que a minha tese ou dissertação seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto:

- Disponibilização imediata do conjunto do trabalho para acesso mundial

Universidade do Minho, ___ / ___ / _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram de forma directa ou indirecta para a execução do presente projecto de dissertação de mestrado, pretendo aqui deixar um agradecimento e uma palavra de apreço. Entre eles, gostaria de destacar de forma especial:

- Os meus orientadores, Professor Doutor Manuel Eduardo Cardoso Ferreira e Professor Doutor José Carlos Teixeira, pela orientação, disponibilidade e ajuda prestada;
- O Professor Doutor Eurico Seabra pela preciosa ajuda na resolução de problemas relacionados com o sistema de aquisição e alteração ao programa em *LabView*;
- O Professor Doutor João Luiz Afonso e o Sr. Gabriel Pinto pela indispensável ajuda prestada na resolução de problemas no circuito eléctrico do Laboratório de Fluidos do DEM;
- O técnico das Oficinas de Mecânica, Vítor Neto, pelo célere fabrico e reparação de componentes da instalação que falharam;
- O companheiro Carlos Mendes pela ajuda prestada na montagem da instalação e disponibilidade para a discussão de problemas e aos restantes amigos, Ricardo Campos, Nelson Rodrigues, Amaro Castro, Júlio Cunha e Manuel Lopes pela motivação, apoio e companheirismo;
- Por último e não menos importante, gostava sobretudo de agradecer e dedicar o presente trabalho aos meus Pais, Francisco Ribeiro e Maria Abreu, pelo apoio, dedicação e suporte prestado em todos os momentos.

RESUMO

O mercado de equipamentos de queima de pellets residenciais está já bastante desenvolvido em alguns países da Europa como Alemanha, Áustria e Itália. Em Portugal, encontra-se ainda numa fase embrionária, tendo-se verificado um forte crescimento da procura nos últimos tempos. A produção de pellets tem também crescido, sendo essencialmente para exportação. A sua queima, devido à existência de elementos químicos como, por exemplo, Na, K e Si, pode dar origem a cinzas aglomeradas na grelha do queimador, que levantam problemas ao seu bom funcionamento.

O presente trabalho teve como objectivo o estudo da influência da temperatura e dos fluxos de ar na aglomeração de cinzas no leito. Para este fim, efectuou-se a montagem de uma instalação experimental constituída genericamente por: i) Caldeira, cujo queimador permite a regulação dos caudais de ar primário e secundário; ii) Sistema de extracção de gases de caudal variável; iii) Sistema de alimentação controlável; iv) Sistema de dissipação de calor; v) Sistema de aquisição de dados e controlo; vi) Sistema de análise de gases.

A investigação experimental incluiu ainda a monitorização da emissão de poluentes (nomeadamente CO e NO_x), a avaliação da eficiência da combustão (pelo teor de CO nos gases de exaustão) e o cálculo do rendimento global do equipamento através do método das entradas e saídas.

Os resultados apontam para um aumento da formação de cinzas aglomeradas com o aumento de temperatura. Para além disso, estes apontam também para a influência do excesso de ar e da fracção de ar primário na formação, e para a existência de um ponto óptimo para elevados excesso de ar e fracções de ar primário em torno dos 30%. Por outro lado, estes demonstram também a existência de outros factores que influenciam a aglomeração de cinzas, provavelmente relacionados com a alteração da proporção entre elementos químicos devido à vaporização dos mais voláteis.

Palavras-chave: caldeira, biomassa, pellets, combustão de pellets, fusão de cinzas, emissões gasosas, rendimento

ABSTRACT

The market for residential pellet burning equipments is well developed in some European countries like Germany, Austria and Italy. In Portugal, it's still in an early state, although it has experienced a strong growth in demand over the last years. The pellet production has also grown, mostly for exportation. Due to the existence of chemical elements such as Na, K and Si, the pellet combustion can lead to agglomerated ashes on the grate of the burner causing problems for its proper operation.

The present work aimed to study the influence of temperature and air flows in the ash agglomeration at the grate. For this purpose, it was assembled an experimental setup that in a brief description consists of: i) boiler, whose burner allows the regulation of the primary and secondary air flow, ii) variable flow exhaust gases extraction system, iii) controllable feeding system, iv) heat dissipation system, v) data acquisition and control system, vi) exhaust gases analysis system.

The experimental research has also included the monitoring the emission of pollutants (CO and NO_x), evaluation of the efficiency of combustion (by the CO content in the exhaust gases) and calculation of the overall efficiency of the equipment through the inputs and outputs method.

The results indicate an increased formation of agglomerated ash with increasing of temperature. In addition, they also suggest the influence of excess air and primary air fraction in that formation, and the existence of an optimum working condition for high excess air and a primary air fraction of around 30%. Moreover, they also show that there are other factors that influence the ash agglomeration, probably related to the changing of the chemical elements ratio due to vaporization of the more volatile species.

Key-words: Boiler; biomass; pellets; pellet combustion; ash fusion; ash agglomeration; gaseous emissions; efficiency

ÍNDICE

Declaração.....	iii
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objectivos.....	4
1.3 Organização	5
2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 Princípios da Combustão	9
2.1.1 Termoquímica	9
2.1.2 Combustão de Sólidos.....	16
2.1.3 Emissões de Poluentes.....	18
2.2 Combustão de Pellets de Madeira	25
2.2.1 Ar de Combustão	26
2.2.2 Temperatura de Combustão	28
2.2.3 Tempo de Residência na Câmara de Combustão	29
2.2.4 Principais Emissões Gasosas.....	30
2.3 Formação de Cinzas	31
2.3.1 Processos de Fusão e Aglomeração de Cinzas	33
2.3.2 Previsão da Fusão e Aglomeração das Cinzas	35
2.3.3 Controlo da Formação de Aglomerados de Cinzas.....	39
3 Instalação Experimental	43
3.1 Configuração da Instalação	43
3.2 Caldeira.....	44
3.2.1 Queimador	44

3.2.2	Câmara de Combustão	46
3.2.3	Permutador de Calor	47
3.3	Sistema de Alimentação	48
3.4	Sistema de Extracção de Gases	49
3.5	Sistema de Dissipação de Calor	49
3.6	Sistema de Aquisição de Dados e Controlo.....	50
3.6.1	LabVIEW	54
3.7	Melhorias à Instalação	55
3.7.1	Eliminação de Interferências.....	56
3.7.2	Minimização de Infiltrações de Ar	57
3.8	Funcionamento da Caldeira	59
4	Técnicas Experimentais.....	65
4.1	Medição do Caudal de Gases.....	65
4.1.1	Medição da Pressão	65
4.1.2	Determinação do Caudal de Gases	68
4.2	Medição da Temperatura	72
4.3	Pesagem de Combustível.....	74
4.4	Análise de Gases	75
4.4.1	Medição de CO, CO ₂ e O ₂	76
4.4.2	Medição de NO _x	77
4.4.3	Recolha e Pré-Tratamento de Gases de Exaustão	78
4.5	Avaliação do Rendimento de Caldeiras.....	81
5	Procedimento e Análise de Resultados	85
5.1	Procedimentos de Teste	85
5.2	Condições de Teste	88
5.3	Limitações ao Funcionamento	89
5.4	Emissões Gasosas.....	91
5.4.1	Ensaio para $\lambda=1,9$	91
5.4.2	Ensaio para $\lambda=2,3$	93
5.4.3	Ensaio para $\lambda=2,7$	95
5.5	Rendimento.....	99

5.6 Temperatura do Leito.....	101
5.7 Cinzas Aglomeradas	103
6 Conclusões e Trabalho Futuro	109
6.1 Conclusões.....	109
6.2 Trabalho futuro	112
Referências	117
Anexo A – Fontes, Características e Efeitos Nocivos dos Poluentes Atmosféricos Mais Comuns	123
Anexo B - Procedimento de Calibração dos Sensores de Pressão	127
Anexo C – Propriedades Físico-Químicas do Combustível	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Estimativa do uso da bioenergia por sector desde 2005 até às metas definidas para 2020 definidas pela Comissão Europeia [1].....	1
Figura 1.2 - Cinzas fundidas e agregadas formadas na instalação experimental.....	3
Figura 1.3 - Ciclo de funcionamento de 1h de uma caldeira a pellets doméstica. Em cima Caldeira limpa; Em baixo depois da queima de 140kg de pellets [4].....	3
Figura 2.1 - Combustão de uma partícula de madeira. Adaptada de [7].....	17
Figura 2.2 - Tipos de queimadores segundo o seu princípio: a) queimador de alimentação inferior; b) queimador de alimentação horizontal; c) queimador de alimentação superior. [4]	25
Figura 2.3 - Detalhe da combustão de carvão em grelha.[9].....	26
Figura 2.4 - Emissões de CO em função do coeficiente de excesso de ar, λ , para diferentes tipos de equipamentos de queima de pellets. a) salamandra de aquecimento, b) caldeira com câmara de inversão, c) caldeira automática, d) caldeira automática de controlo avançado. [11]	27
Figura 2.5 - Temperatura adiabática de chama em função de λ para diferentes teores de humidade no combustível [13]	28
Figura 2.6 - Teor de CO em função do tempo de residência para diferentes temperaturas e teores de O ₂ disponível para reacção. Adaptado de [13].....	29
Figura 2.7 - Emissões de CO (a) e NO _x (b) em função do excesso de ar e do tipo de pellets (A, B, C e D) [10].....	31
Figura 2.8 - Formação de cinzas durante a combustão de biomassa [18].....	32
Figura 2.9 - Localização onde ocorre usualmente o <i>slagging</i> e <i>fouling</i> [19].	33
Figura 2.10 - Diagrama de fase binário para óxidos de Na e K com SiO ₂ [20]	34
Figura 2.11 – Fases no processo de testes de fusibilidade de cinzas. (Altura original, H = Altura a 550 °C) [23]	37
Figura 2.12 - Diagrama de fases ternário do sistema K ₂ O - CaO - SiO ₂ [24].	38
Figura 2.13 - Sistemas mecânicos de remoção de cinzas. Da esquerda para a direita: a) Sistema de grelhas móveis [25]; b) Sistema de inclinação periódica de grelha a 90° [26].....	39
Figura 2.14 - Temperatura máxima em função do caudal de ar específico no leito [27]	40
Figura 3.1 - Configuração da instalação experimental.....	43
Figura 3.2 - Caldeira a pellets utilizada na instalação	44

Figura 3.3 - Admissão e tubeiras do queimador da caldeira utilizada na instalação.....	45
Figura 3.4 - Esquema do queimador da caldeira utilizada na instalação. 1) Câmara de combustão; 2) Condução de alimentação; 3) Entradas de ar secundário; 4) Entradas de ar primário; 5) Grelha	45
Figura 3.5 - Câmara de combustão da caldeira utilizada na instalação.	46
Figura 3.6 - Representação esquemática do permutador de calor da caldeira utilizada na instalação. 1) Câmara de inversão; 2) Tubos de fumo (primeira passagem); 3) Tubos de fumos (segunda passagem); 4) Água; 5)Câmara de combustão; 6) Colector de exaustão [15].	47
Figura 3.7 - Reservatório de pellets e sistema de alimentação.....	48
Figura 3.8 - Sistema de exaustão. a) Perspectiva da condução de exaustão; b) Ventilador; c) Placa de orifício	49
Figura 3.9 - Componentes do sistema de dissipação de calor. Da esquerda para a direita: Bomba de circulação; Rotâmetro; Ventiloinconvetor.....	50
Figura 3.10 - Sistema de aquisição de dados e controlo da <i>National Instruments</i>	52
Figura 3.11 - Bastidor de relés.	52
Figura 3.12 - Fonte de alimentação.	53
Figura 3.13 - Variador de frequência.	54
Figura 3.14 - Interface gráfica da aplicação em LabVIEW	55
Figura 3.15 - Circuito eléctrico para equipamentos sensíveis a interferências.	56
Figura 3.16 - Protecção metálica para o variador de frequência.	56
Figura 3.17 - Protecções metálicas para os elementos sensíveis. a) Placa de terminais CB-68 LP; b) Placa de sensores de pressão	57
Figura 3.18 - Tampo de vedação do reservatório de pellets.....	58
Figura 3.19 - Comparação de caudais para determinação de infiltrações. Esq.: Sem reservatório; Dir.: Com reservatório.....	59
Figura 3.20 - Picos na concentração de CO durante ensaio.	62
Figura 4.1 - Circuito equivalente dos sensores de pressão Honeywell. 1 – Tensão de excitação 5V DC, 2 – Terra, 3 – Tensão de saída, 4 – Conector para o fabricante	66
Figura 4.2 - Micromanómetro Betz da Van Essen Instruments [28]	66
Figura 4.3 - Curva de calibração do sensor da tubeira 1	67
Figura 4.4 - Curva de calibração do sensor da tubeira 2	67

Figura 4.5 - Curva de calibração do sensor da tubeira 3.....	67
Figura 4.6 - Curva de calibração do sensor da placa de orifício	68
Figura 4.7 - Vista em corte de uma tubeira com tomada de pressão estática.....	69
Figura 4.8 - Esquema da placa de orifício. [29].....	71
Figura 4.9 - Esquema exemplificativo do Efeito de Seebeck.....	73
Figura 4.10 - Termopar K de bainha metálica com bicone de vedação	74
Figura 4.11 - Mostrador digital da balança.....	75
Figura 4.12 - Analisador multi-gás 9000MGA da Signal Instruments.....	76
Figura 4.13 - Analisador de NO _x 4000VM da Signal Instruments.....	77
Figura 4.14 - Sonda de captação de gases elementares CO, CO ₂ e O ₂	79
Figura 4.15 - Diagrama esquemático do sistema de recolha, pré-tratamento e análise de gases para CO, CO ₂ e O ₂ [32].....	79
Figura 4.16 - Sistema de recolha e análise de gases na instalação.....	80
Figura 4.17 - Sonda de captação de gases para análise de NO _x	80
Figura 5.1 - Mudança abrupta da temperatura do leito com a variação do AP e AS no decorrer de um ensaio.....	87
Figura 5.2 – Esquema da obstrução de orifícios de AS para criação de <i>swirl</i> no queimador.	90
Figura 5.3 - Concentração de CO em função do AP com e sem efeito de <i>swirl</i> no queimador.....	90
Figura 5.4 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 1,9$ e AP = 10%. .	91
Figura 5.5 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 1,9$ e AP = 30%. .	92
Figura 5.6 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 1,9$ e AP = 50%. .	93
Figura 5.7 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 2,3$ e AP = 10%. .	94
Figura 5.8 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 2,3$ e AP = 10%. .	94
Figura 5.9 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 2,3$ e AP = 10%. .	95
Figura 5.10 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 2,7$ e AP = 30%. .	96
Figura 5.11 - Concentração de emissões gasosas de O ₂ CO ₂ CO e NO _x para $\lambda = 2,7$ e AP = 50%. .	96
Figura 5.12 - Concentração de CO nos gases de exaustão em função do AP para cada excesso de ar (λ).	98

Figura 5.13 - Concentração de NO_x nos gases de exaustão em função do AP para cada excesso de ar (λ). 98

Figura 5.14 - Rendimento da caldeira em função do ar primário para cada excesso de ar (λ). 99

Figura 5.15 - Temperatura dos gases à entrada do permutador de calor em função do AP. 100

Figura 5.16 – Temperatura dos gases de exaustão em função do AP..... 100

Figura 5.17 - Temperatura do leito em função do caudal de ar específico na grelha para cada excesso de ar. 101

Figura 5.18 - Variação da temperatura do leito em função de λ 102

Figura 5.19 - Variação da temperatura do leito em função da proporção de AP para cada λ 102

Figura 5.20 - Massa de cinzas aglomeradas em função do AP para cada λ 104

Figura 5.21 - Massa de cinzas aglomeradas em função da temperatura de grelha. 104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficiente de excesso de ar para vários equipamentos em função da carga, potência e tipo de queimador. Adaptado de [12].....	28
Tabela 2.2 – Temperaturas de combustão e exemplos. [14]	29
Tabela 2.3 - Emissões de CO e NO _x por nível de potência para três caldeiras a pellets distintas utilizando o mesmo combustível (A, B e C) [12] e na caldeira a ser utilizada na instalação (D) [15].	30
Tabela 3.1 - Tempos de alimentação previamente definidos em função da potência aproximada. [15]	61
Tabela 3.2 – Tempos de alimentação utilizados para colmatar fenómenos de abatimento de chama.	62
Tabela 4.1 - Tipos e características de termopares.....	74
Tabela 4.2 - Características técnicas do analisador de gases 9000MGA da Signal Instruments [30]	77
Tabela 4.3 - Concentração dos gases de calibração	77
Tabela 4.4 - Características técnicas do analisador 4000VM da Signal Instruments [31].....	78
Tabela 5.1 - Condições de EA e AP.....	88
Tabela 5.2 - Condições de EA e AP testadas para os ensaios de longa duração.....	89
Tabela 5.3 - Concentrações médias de O ₂ e CO ₂ nos gases de exaustão	97
Tabela 5.4 – Concentrações médias de CO em mg/Nm ³ corrigido para 13% de O ₂ nos gases de exaustão	97
Tabela 5.5 – Concentrações médias de NO _x em mg/Nm ³ corrigido para 13% de O ₂ nos gases de exaustão	98
Tabela 5.6 - Temperatura de grelha registada nos ensaios de longa duração.....	103
Tabela 5.7 – Massa de cinzas aglomeradas.....	103

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolos Romanos	Definição	Unidade
$%A$	Percentagem de cinzas no combustível	% (massa)
$%O_2$	Concentração volúmica de oxigénio nos gases de exaustão	% (vol)
$%W$	Humidade no combustível	% (massa)
A	Área	m^2
AFR	Relação estequiométrica ar/combustível	kg_{ar}/kg_{comb}
AP	Percentagem de ar primário de combustão	% (vol)
C	Coefficiente de descarga	(-)
CE	Caudal de ar específico na grelha	$kg/(s.m^2)$
C_p	Calor específico	$J/(kg.K)$
C_x	Número de moles de C presentes na molécula de combustível	Mol
d	Débito do alimentador	kg/h
D	Diâmetro	m
e	Excesso de ar	% (massa)
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
h	Entalpia	J/kg
H_v	Número de moles de H presentes na molécula de combustível	Mol
IE	Índice de emissão	kg/kg_{comb}
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
m	Massa	kg
M	Massa molar	$kg/kmol$
n	Número de moles	(-)
p	Pressão estática	Pa
PC	Poder calorífico	J/kg
PCI	Poder calorífico inferior	J/kg
PCS	Poder calorífico superior	J/kg
\dot{Q}	Caudal volumétrico	m^3/s
t	Tempo	s
U	Velocidade de escoamento	m/s
V	Volume	m^3
x	Fracção molar	(-)

X	Concentração molar	kmol/m ³
y	Fracção mássica	(-)
z	Cota	m

Símbolos Gregos	Definição	Unidade
λ	Coeficiente de excesso de ar	(-)
ρ	Massa volúmica	kg/m ³
ϕ	Razão de equivalência	(-)

Abreviaturas

<i>AP</i>	Ar primário
<i>daf</i>	<i>Dry and ash free</i>
<i>DEM</i>	Departamento de Engenharia Mecânica
<i>DT</i>	<i>Deformation temperature</i>
<i>FT</i>	<i>Flow temperature</i>
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos
<i>HT</i>	<i>Hemispherical Temperature</i>
<i>LDA</i>	<i>Laser Dropller Anemometry</i>
<i>PTN</i>	Pressão e temperatura normais
<i>PTP</i>	Pressão e temperatura padrão
<i>SST</i>	<i>Shrinkage starting temperature</i>

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A nível Europeu, a utilização de biomassa tem vindo a crescer ao longo dos últimos anos devido a fortes medidas e incentivos comunitários à utilização de combustíveis renováveis e devido à crescente procura de alternativas aos combustíveis fósseis. O plano de acção definido pela Comissão Europeia para 2020 define que a utilização destas fontes deve ultrapassar o dobro da utilizada em 2005 (Figura 1.1). Desta forma é expectável que o crescimento da utilização destas fontes que se tem verificado ao longo dos últimos anos se mantenha nos próximos tempos.

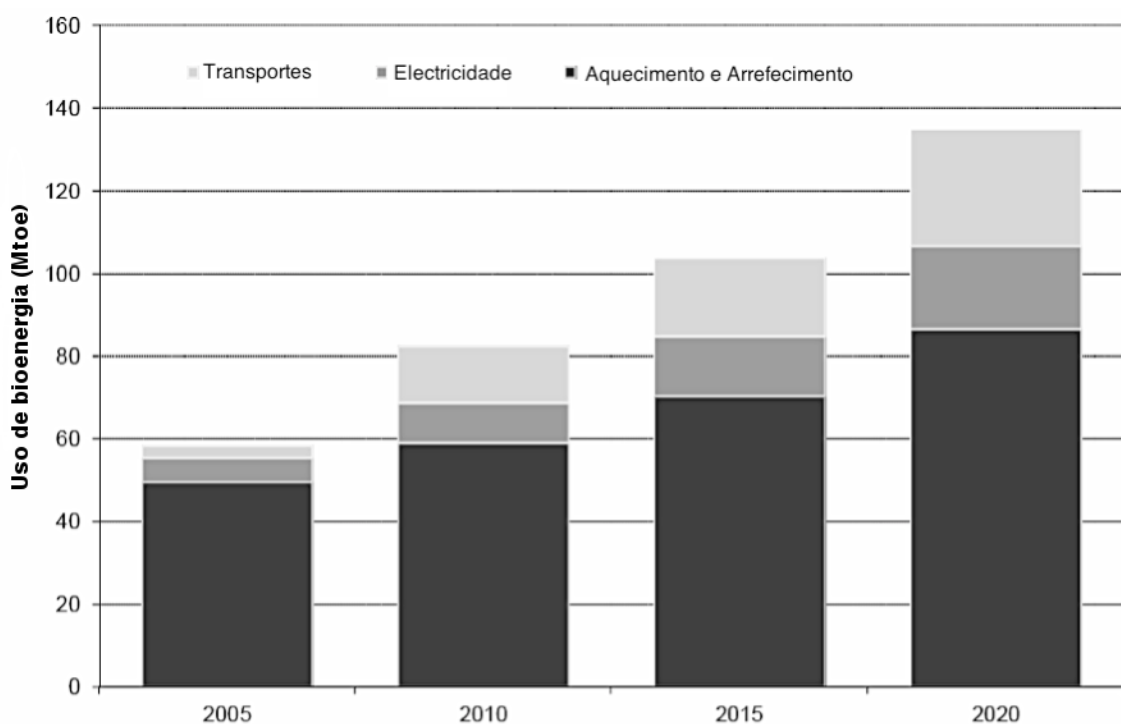


Figura 1.1 - Estimativa do uso da bioenergia por sector desde 2005 até às metas definidas para 2020 definidas pela Comissão Europeia [1]

Algumas das principais fontes de biomassa dizem respeito aos produtos florestais (abate de árvores, culturas energéticas florestais, aproveitamento de estilha), derivados da agricultura (palha, caroço de azeitona, casca de arroz) e resíduos derivados de indústrias de transformação de madeira (serrações, fábricas de mobiliário). A valorização energética destes materiais pode ser feita de diversas formas: *i)* por queima directa sem qualquer processamento da matéria prima (como, por exemplo, a queima de toros de madeira em fogões a lenha domésticos); *ii)* através de sistemas de queima de estilha em que a matéria prima é triturada previamente; *iii)* pelo fabrico e queima de pellets.

Os pellets consistem num combustível em que a matéria prima é triturada, prensada em forma cilíndrica e seca. A matéria prima que lhes dá origem vê a sua densidade aumentada devido ao processo de pelletização pelo que ocorre uma densificação energética do combustível. Este facto associado ao severo processo de secagem que sofrem e que lhes confere níveis de humidade bastante baixos (5-10%) atribui-lhes grandes benefícios ao nível de transporte e armazenamento. A sua forma cilíndrica possui dimensões normalizadas o que permite a sua utilização de forma cómoda em sistemas de combustão de carregamento automático. Este combustível é utilizado na Europa não só para a queima para produção de calor mas também como combustível em centrais de produção eléctrica.

Apesar de em 2010 ter ocorrido a produção de cerca de 2400 GWh de electricidade através da queima de biomassa com uma perspectiva de crescimento até cerca de 3500 GWh em 2020 em Portugal [2], o aproveitamento da referida fonte de energia é feito sob outras formas que não pellets, p.e. em forma de estilha de madeira, ao contrário do que acontece em vários países europeus. O recurso aos pellets como combustível é feito essencialmente com a finalidade de obtenção de calor em caldeiras e salamandras domésticas ou em alguns fornos de pequena e média escala. A produção nacional de pellets tem vindo a aumentar exponencialmente sendo produzidos já cerca de 650 kton por ano, dos quais cerca de 91% são exportados para países como o Noruega, Alemanha e Suécia [3]. Por isso, o mercado nacional de consumo de pellets encontra-se claramente sub-desenvolvido e espera-se um crescimento vigoroso nos próximos anos, como resposta à procura de uma alternativa aos cada vez mais caros combustíveis fósseis para aquecimento doméstico.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os equipamentos domésticos para aproveitamento de calor através da queima de pellets podem tomar a forma de salamandras que aquecem o ar ambiente ou de caldeiras de aquecimento de água, sendo também já existentes no mercado nacional os primeiros modelos de fogões de cozinha que recorrem a este tipo de combustível. Qualquer um deles é optimizado para um determinado tipo de combustível ou para determinadas condições de funcionamento. Esta especificidade leva à ocorrência de problemas durante a combustão sendo o mais grave, aquele que está relacionado com a fusão e aglomeração das cinzas produzidas na grelha. Este fenómeno, que está relacionado com a composição química da matéria prima utilizada no fabrico dos pellets

e com a temperatura atingida no leito da combustão, causa a formação de depósitos (Figura 1.2) que provocam a obstrução dos orifícios e das condutas de ar para combustão levando a perdas de eficiência ou até mesmo à paragem do sistema. A Figura 1.3 mostra a perda de eficiência, patente no aumento do nível médio de emissões de CO e no aumento da temperatura dos gases de escape, de uma caldeira a pellets doméstica depois da queima de 140 kg de combustível.



Figura 1.2 - Cinzas fundidas e agregadas formadas na instalação experimental

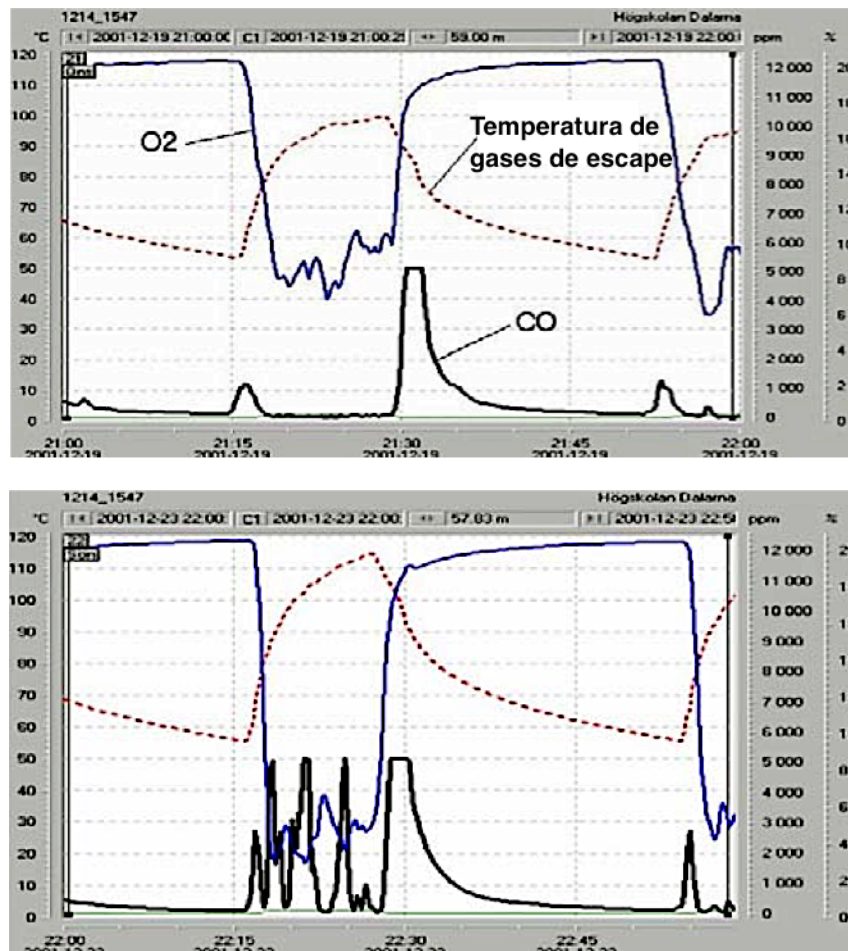


Figura 1.3 - Ciclo de funcionamento de 1h de uma caldeira a pellets doméstica. Em cima Caldeira limpa; Em baixo depois da queima de 140kg de pellets [4].

Existem actualmente estudos que visam prever a ocorrência destes fenómenos através da análise dos constituintes químicos dos pellets e/ou das suas cinzas associados à definição de índices que avaliam, segundo ensaios empíricos, a tendência para a formação de depósitos. A maioria destes estudos é, no entanto, extrapolada de conhecimentos adquiridos na queima de carvão em grelha ou de biomassa e carvão em leito fluidizado o que condiciona a sua aplicabilidade.

No entanto, visto que se trata de um fenómeno de fusão, este deverá estar associado à temperatura que se atinge no leito. Desta forma, a resolução deste problema passa também pelo controlo desta temperatura que depende de diversos factores como: desenho da grelha, câmara de combustão e distribuição e quantidade de ar. A motivação deste trabalho consiste, então, na procura das condições óptimas de funcionamento deste tipo de equipamentos de forma a controlar este problema.

1.2 OBJECTIVOS

Este projecto tem como objectivo a montagem e adaptação da instalação piloto existente no Laboratório de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho para realização de um estudo experimental. Este estudo visa melhorar e optimizar a instalação para a avaliação dos fenómenos que promovem a fusão das cinzas, nomeadamente a temperatura registada na zona da grelha e a distribuição e quantidade dos fluxos de ar.

A instalação experimental é constituída por uma caldeira doméstica a pellets com potência máxima de 20 kW que permite a regulação independente dos caudais de ar primário e secundário e por diversos equipamentos que permitem medir e registar as temperaturas de diversos pontos, caudais de ar para combustão e concentração de espécies químicas nos gases de exaustão com vista à avaliação da temperatura de grelha, formação de cinzas aglomeradas, eficiência da combustão, rendimento térmico e emissão de poluentes, nomeadamente óxidos de azoto e monóxido de carbono.

1.3 ORGANIZAÇÃO

De modo a enquadrar o trabalho realizado no âmbito desta tese para atribuição do grau de mestrado, é redigido o presente capítulo introdutório que aborda de forma sucinta a perspectiva de crescimento da utilização de biomassa na Europa nos próximos anos e o enquadramento dos pellets neste paradigma energético. Existe aqui um sub-capítulo que pretende clarificar a motivação do trabalho abordando de que modo a formação de cinzas na combustão de pellets acarreta problemas de funcionamento dos equipamentos de queima e outro que enumera os objectivos.

O segundo capítulo revê a literatura mais relevante para a compreensão e realização do trabalho. Primeiro abordam-se os princípios genéricos de combustão, especificamente a termoquímica, a combustão de sólidos e a formação e emissão de poluentes. De seguida tratam-se assuntos relacionados especificamente com a combustão de pellets de madeira, nomeadamente o ar de combustão, a temperatura de combustão, o tempo de residência dos gases na câmara de combustão e as principais emissões gasosas. Para terminar, descreve-se os fenómenos de formação de cinzas e os aspectos relacionados com a sua fusão e aglomeração, a previsão da ocorrência destes fenómenos e os métodos de controlo da sua formação.

No terceiro capítulo descreve-se a configuração da instalação experimental existente, detalham-se cada um dos componentes e equipamentos que dela fazem parte, são expostas as melhorias e correcções realizadas e termina-se explicando o funcionamento da caldeira.

O quarto capítulo surge no âmbito da exposição das técnicas experimentais às quais se recorreu para a realização dos ensaios, sendo detalhados os princípios de cada uma.

O quinto capítulo é o da análise de resultados. Aqui é descrito o procedimento experimental e realizada a apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, caracterizando-se as emissões, a eficiência da combustão e as temperaturas de grelha para cada relação de excesso de ar e ar primário.

O trabalho termina com as principais conclusões que se podem retirar da elaboração do presente trabalho e com a exposição de sugestões para trabalho futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreender os fenómenos em causa no presente trabalho torna-se necessário, não só dominar o processo de combustão, como também entender especificamente o processo de queima de pellets em especial no tipo de equipamentos que aqui se trata e os associados à fusão de cinzas.

Desta forma, este capítulo trata estes assuntos começando por uma abordagem aos princípios da combustão, seguindo-se uma revisão aos parâmetros típicos da combustão de pellets de madeira e terminando com uma síntese dos mecanismos de formação de cinzas e sua fusão originando aglomerados.

2.1 PRINCÍPIOS DA COMBUSTÃO

À combustão, por ser um fenómeno extramente comum, foram sendo atribuídas diversas definições. A adoptada por Turns [5] descreve o processo como sendo uma *oxidação rápida que gera calor ou simultaneamente luz e calor, ou uma oxidação lenta acompanhada por baixa libertação de calor e nenhuma luz*. No entanto, é utilizada no livro Combustão [6] uma definição que se refere a este processo como a *ciência das reacções químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa*.

No âmbito deste trabalho, devido à subjectividade dos termos *rápida* e *lenta* na primeira definição e apesar de permitir uma compreensão mais fácil e intuitiva de que fenómeno se trata como meio de transformar a energia química armazenada na matéria em calor através do processo de combustão, será adoptada a segunda pois é cientificamente mais correcta e abrangente.

2.1.1 Termoquímica

Para que ocorra uma combustão deve existir uma mistura com, pelo menos, duas espécies químicas conhecidas por *combustível* e *oxidante*. Ao combustível corresponde a matéria que possui acumulada energia química passível de ser convertida em calor e/ou luz e ao oxidante a matéria que possui na sua constituição o elemento Oxigénio (normalmente ar atmosférico) e que é responsável pela oxidação exoenergética.

Para que seja possível realizar cálculos necessários à avaliação teórica da proporção de ambas as partes, a composição desta mistura deve ser caracterizada através de fracções mássicas e/ou molares das espécies químicas que a constituem.

Fracções mássicas e molares

A **fracção mássica** de uma determinada espécie química da mistura, y_i , é definida como o quociente entre a massa dessa mesma espécie, m_i , e a massa de todas as espécies presentes na mistura, m_{tot} :

$$y_i = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (2.1)$$

Da mesma forma, a **fracção molar** de determinada espécie química da mistura, x_i , é representada pelo quociente entre o número de moles dessa espécie, n_i , e o número de moles de todas as espécies presentes na mistura, n_{tot} :

$$x_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \quad (2.2)$$

Para a conversão de fracções molares em fracções mássicas e vice-versa é necessário associar a cada espécie química a sua correspondente massa molar, M_i :

$$m_i = n_i \cdot M_i \quad (2.3)$$

Se se aplicar o mesmo princípio ao total de todas as espécies constituintes de uma mistura N , obtém-se a conversão para a mistura global:

$$m_{tot} = \sum_{j=1}^N n_j \cdot M_j \quad (2.4)$$

Concentrações mássicas e molares

Para ser tida uma percepção real da composição de misturas, recorre-se à sua expressão através de concentrações. Assim, a concentração molar de uma espécie química, $[X_j]$ representa o número de moles que existem no volume total da mistura, V :

$$[X_i] = \frac{n_i}{V} \quad (2.5)$$

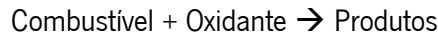
Pretendendo-se exprimir uma concentração mássica divide-se o valor da massa da espécie pelo volume que a mistura ocupa. Este valor é igual ao da massa volúmica da espécie, ρ_i :

$$\rho_i = \frac{m_i}{V} \quad (2.6)$$

Estequiometria

Num processo de combustão, a composição química da mistura varia ao longo do tempo. É possível, no entanto, fazer uma separação entre as espécies no estado inicial – reagentes – e as espécies no estado final – produtos, resultado do processo de oxidação. Neste processo, o número de átomos e, por conseguinte, de moles de cada elemento químico permanece inalterável.

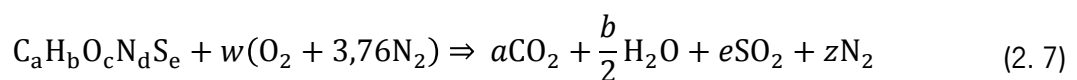
De forma genérica, pode definir-se um processo de combustão pela seguinte reacção:



O combustível é geralmente um hidrocarboneto que no presente trabalho é a madeira, considerando-se possuir na sua constituição Oxigénio, O, Azoto, N, e Enxofre, S, para além do Carbono, C, e Hidrogénio, H, comuns a todos os hidrocarbonetos. Representar-se-à genericamente este composto por $C_aH_bO_cN_dS_e$. O oxidante mais comum é o ar atmosférico cuja constituição se aproxima, em base volumétrica, de uma mistura com 21% de O_2 e 79% de N_2 . Sendo assim, diz-se que existem no ar $79/21 = 3,76$ moles de N_2 por cada mole de O_2 .

Quando numa mistura reactiva se dispõe da quantidade de ar estritamente necessária para queimar todo o combustível num processo ideal e teórico diz-se que a mistura é estequiométrica. Da combustão ideal e estequiométrica de um hidrocarboneto em oxigénio resultam espécies químicas completamente oxidadas que correspondem a moléculas de CO_2 e H_2O .

Posto isto, é possível escrever a reacção genérica de combustão da madeira em ar tendo em conta o O, N e S na sua constituição:



onde a , b , c , d e e dizem respeito à proporção, em moles, de cada constituinte do combustível passível de ser conhecida através de análises químicas elementares. O factor w corresponde à quantidade de ar envolvida na reacção, também em moles, e pode ser calculada para a estequiometria em função da composição química do combustível:

$$w = a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + e \quad (2.8)$$

O factor z depende directamente de w e diz respeito à quantidade de azoto que atravessa a reacção sem reagir:

$$z = w \cdot 3,76 \quad (2.9)$$

A massa de ar, m_{ar} , pode ser calculada multiplicando a quantidade w pelas massas molares de cada uma espécies que constituem o ar, da seguinte forma:

$$m_{ar} = w(M_{O_2} + 3,76M_{N_2}) \quad (2.10)$$

A razão estequiométrica ar/combustível, AFR (*Air and Fuel Ratio*), para um hidrocarboneto diz respeito à massa de ar necessária para queimar estequiometricamente uma unidade de massa de combustível. Esta razão é dada pelo quociente entre a massa de ar, m_{ar} , e a massa de combustível, m_{comb} , tida em conta no cálculo das proporções dos elementos químicos do combustível:

$$ARF = \left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}} \right)_{est} \quad (2.11)$$

Como referido, estas equações dizem respeito a processos ideais. No processo real, a queima de um hidrocarboneto forma outras espécies tais como o monóxido de carbono, CO. Assim sendo, estas considerações são tomadas como aproximações ao processo real. Para que a combustão seja completa, é normalmente necessário o fornecimento de ar em excesso de forma a garantir o contacto de todas as espécies químicas do combustível com as moléculas de oxigénio do comburente.

É usual relacionar-se a proporção de oxidante e combustível de uma mistura com a sua respectiva proporção estequiométrica por um indicador adimensional denominado razão de equivalência, ϕ :

$$\Phi = \frac{\frac{m_{comb}}{m_{ar}}}{\left(\frac{m_{comb}}{m_{ar}}\right)_{est}} \quad (2. 12)$$

Desta forma, para $\Phi=1$ corresponde a uma mistura estequiométrica. Se $\Phi<1$ estamos na presença de uma mistura com menor quantidade de combustível que a estequiometricamente necessária e diz-se que a mistura é pobre. Por outro lado, se $\Phi>1$ existe excesso de combustível relativamente a uma mistura estequiométrica e diz-se por isso que a mistura é rica.

Como dito, na maioria dos processos de combustão de hidrocarbonetos é utilizado ar em excesso para que ocorra uma combustão eficiente. Por isso, é vulgar relacionar-se a proporção dos reagentes da mistura, não em função do teor de combustível, mas em função do excesso de ar para uma percepção mais cómoda e real. Esta relação denomina-se coeficiente de excesso de ar, λ , e corresponde ao inverso da razão de equivalência:

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{est}} \quad (2. 13)$$

Se considerarmos a mesma massa de combustível para ambos os cenários, então é possível definir λ como o quociente entre a massa de ar da mistura em causa, $(m_{ar})_{real}$ e a massa de ar correspondente a uma mistura estequiométrica, $(m_{ar})_{est}$:

$$\lambda = \frac{(m_{ar})_{real}}{(m_{ar})_{est}} \quad (2. 14)$$

O excesso de ar, $e[\%]$, é outro indicador da proporção de ar na mistura e representa a percentagem de ar que excede a quantidade estequiométrica. Este define-se por:

$$e[\%] = (\lambda - 1) * 100 \quad (2. 15)$$

Entalpia de formação

Em qualquer reacção química ocorre a absorção ou libertação de energia – reacções endo e exotérmicas respectivamente. Esta variação de energia pode ser expressa em termos de variações

de entalpia. Sendo a combustão uma reacção química exoenergética, é possível quantificar a energia libertada no processo através destas variações de entalpia.

Por forma a definir-se a entalpia da espécie química, torna-se necessário introduzir o conceito de entalpia de formação, h_f , que consiste na energia necessária à formação dessa espécie a partir dos elementos químicos no seu estado natural. Se a temperatura e pressão forem definidas no estado em que ocorre esta reacção naturalmente diz-se, por convenção, que essa espécie química possui entalpia de formação igual a zero. Desta forma, torna-se necessária a definição de condições de temperatura e pressão de referência.

A entalpia de formação para um estado de referência designa-se entalpia de formação padrão. As condições de referência, para as quais existem tabelas, designam-se Pressão e Temperatura Padrão (PTP) e correspondem à temperatura, $T_{ref}=25\text{ °C}$ e à pressão atmosférica, $p_{ref}=1\text{ atm}$. Nestas condições, se a formação da espécie química em questão a partir dos elementos químicos no estado natural liberta energia, estamos perante uma espécie com entalpia de formação padrão negativa, $h_f^\circ(T_{ref}) < 0$. Se, pelo contrário, essa mesma reacção de formação absorve energia, diz-se que essa espécie tem entalpia de formação positiva, $h_f^\circ(T_{ref}) > 0$.

Os valores da entalpia de formação padrão de várias espécies químicas podem ser encontrados nas tabelas JANAF (1985), em Burcat (1984) e Kee et al. (1987) [6].

Entalpia de reacção, entalpia de combustão e entalpia absoluta

Se a reacção química se der em condições isobáricas e isocóricas, a variação de energia resulta apenas da diferença entre as condições do estado final e inicial do sistema. Desprezando as energias cinética e potencial, e sabendo que a combustão em caldeiras pode ser descrita por um processo isobárico onde não é realizado nem fornecido trabalho ao sistema [6], pela 1ª lei da termodinâmica conclui-se que a energia libertada ou absorvida pela reacção é igual à variação de entalpia da mistura.

No caso das reacções de combustão, aplica-se à variação de entalpia a designação de entalpia de combustão. Dado que estas reacções são exotérmicas, a entalpia de combustão toma sempre um valor negativo. Pretendendo-se exprimir a entalpia de combustão específica da mistura ou entalpia específica, $\Delta h_{R,i}$, esta é dada por:

$$\Delta h_R(T) = h_{prod}(T) - h_{reag}(T) \quad (2.16)$$

Onde $h_{prod}(T)$ e $h_{reag}(T)$ correspondem aos valores da entalpia absoluta dos produtos e reagentes, respectivamente, a uma dada temperatura e que são definidos pela soma da entalpia de formação padrão, $h_f^0(T_{ref})$, com a variação de entalpia sensível, Δh_s , entre a temperatura de referencia, T_{ref} e a temperatura T :

$$h(T) = h_f^0(T_{ref}) + \Delta h_s(T) \quad (2.17)$$

Por seu turno, a variação de entalpia sensível, Δh_s para um gás perfeito é dada por:

$$\Delta h_s(T) = \int_{T_{ref}}^T C_p \cdot (T^*) dT^* \quad (2.18)$$

sendo C_p o calor específico a pressão constante da espécie química em causa.

Poder calorífico

O poder calorífico, PC , é o indicador mais utilizado para definir a quantidade de energia que um combustível possui e é igual ao simétrico da energia interna ou entalpia de combustão sendo sempre positivo. Podem ser definidos vários tipos de poder calorífico conforme a combustão se dê a pressão ou volume constante. No presente trabalho, dada a combustão em caldeiras se aproximar a um processo isobárico, será utilizado o poder calorífico a pressão constante.

Ao calor recuperado na queima de um combustível por unidade de massa com a água resultante da combustão em estado de vapor dá-se o nome de Poder Calorífico Inferior (PCI). Se os produtos da combustão encontrarem condições que promovam a condensação do vapor de água, então é recuperado o calor latente de vaporização, h_{fg} . Neste caso, ao total do calor aproveitado dá-se o nome de Poder Calorífico Superior (PCS).

No mercado de pellets é usual encontrar-se referência à energia contida no combustível assumindo ausência de humidade e cinzas resultantes da queima, designada em inglês por *Heating Value on a Dry and Ash Free Basis (daf)* [7]. Este valor é falacioso pois não inclui o valor da massa de espécies que não contribuem com calor. Pode ser convertido para o valor corrente de

PCI conhecendo a percentagem mássica de água no combustível, $\%W$, e de cinzas que resultam da queima, $\%A$, através da expressão:

$$PCI = (PCI)_{daf} \cdot \frac{100 - \%W - \%A}{100} \quad (2.19)$$

2.1.2 Combustão de Sólidos

A combustão de sólidos pode ser dividida em dois eventos distintos: a) combustão homogénea, que diz respeito à reacção entre espécies no mesmo estado, neste caso gasoso-gasoso e que resulta na chama que é possível observar no decorrer do processo; b) combustão heterogénea que consiste na combustão de espécies em estado diferente, neste caso entre o ar no estado gasoso e o sólido resíduo carbonoso.

Estas reacções ocorrem simultaneamente segundo quatro processos que, apesar da sua complexidade, se encontram bem estabelecidos entre a comunidade científica. Tal como mostra a Figura 2.1 essas etapas consistem em:

- Secagem, evaporação da água e aquecimento até à temperatura de início da libertação dos componentes voláteis do combustível sólido;
- Pirólise ou volatilização das partículas libertando os compostos voláteis combustíveis e não combustíveis. Dá-se a ignição. Libertados os voláteis, ficam apenas as partículas de resíduo carbonoso;
- Oxidação homogénea da matéria volátil libertada na pirólise;
- Oxidação heterogénea do resíduo carbonoso

Na combustão de pellets de madeira, aproximadamente 80% da energia é libertada como gás enquanto que 20% da energia é libertada durante a combustão heterogénea do resíduo carbonoso [7].

Em seguida, são abordadas com maior detalhe cada uma das etapas referidas.

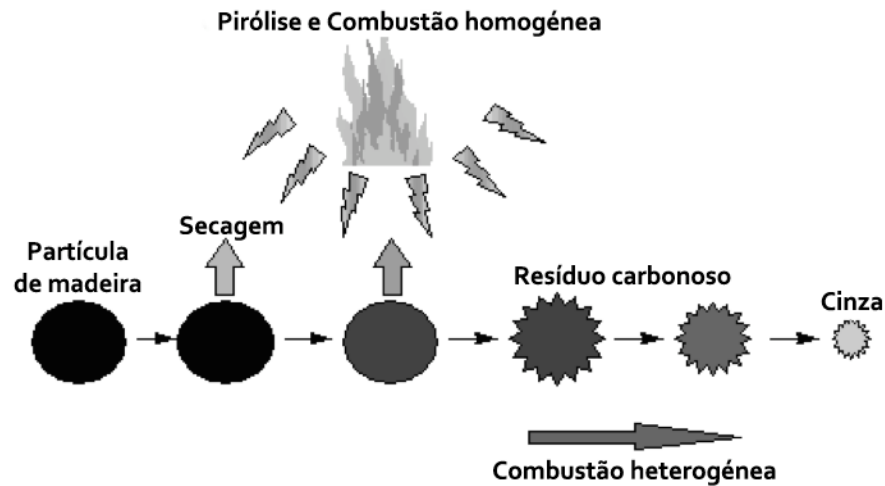


Figura 2.1 - Combustão de uma partícula de madeira. Adaptada de [7]

Secagem do combustível

Quando a temperatura ascende aos cerca de 105°C, inicia-se o processo de secagem do combustível com a água a evaporar e a mover-se através dos interstícios das partículas até à superfície. Este processo requer energia (endotérmico) e é controlado pela taxa de transferência de calor e de massa dependendo portanto de variáveis como a composição do combustível, temperatura da fonte de aquecimento e das dimensões e geometria das partículas de combustível. A quantidade de energia necessária é função da humidade presente, das dimensões das partículas de combustível e das suas propriedades como, por exemplo, a capacidade calorífica [6].

Pirólise

A pirólise ou volatilização consiste, como dito, na libertação da matéria volátil presente no combustível sólido. Para a biomassa constituída essencialmente por madeira, o processo produz calor suficiente para ser continuado aos cerca de 270 °C. São libertados, em quantidades que dependem das características físico-químicas do combustível, da taxa de aquecimento, da temperatura final e do respectivo tempo de permanência, monóxido de carbono, CO, algum dióxido de carbono, CO₂, hidrogénio, H₂, água, H₂O, e metano, CH₄, juntamente com outros hidrocarbonetos [6], [7].

Combustão homogénea

Existindo oxigénio suficiente em contacto com os gases emitidos na pirólise e atingida a temperatura de ignição, inicia-se o processo de combustão. O oxigénio do comburente oxida

simultaneamente o hidrogénio, o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos formando água e dióxido de carbono. Este processo pode ser visto como um processo de combustão de gases do tipo difusão, onde os reagentes se encontram inicialmente separados e se misturam na zona de combustão.

Se a temperatura atingida não for suficiente ou existir défice de oxigénio para alimentar a combustão, os gases serão vistos como fumo negro que eventualmente se transformará repentinamente em chama se a condição em falta for alterada.

Combustão heterogénea

Assim que a matéria volátil é libertada do combustível, após o processo de pirólise, permanecem algumas partículas de carbono no sólido final [7]. A combustão destas partículas ocorre em forma de reacção heterogénea em que o comburente se encontra no estado gasoso e o combustível no estado sólido. Esta reacção é controlada tanto pela cinética química como pelos fenómenos físicos de difusão, sendo muito mais lenta que a pirólise. Assim que termina a combustão desta porção restam cinzas constituídas por inertes e pequenas quantidades de carbono residual, hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre [6].

2.1.3 Emissões de Poluentes

A combustão de hidrocarbonetos, como a madeira, remove da atmosfera O_2 e liberta água e dióxido de carbono sempre acompanhados por um número de outros compostos, como sendo, hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono, óxidos de azoto, e outros compostos de azoto (NH_3 e HCN), gases sulfurosos, SO_2 , e partículas [8].

A par dos inúmeros benefícios que a combustão proporciona à humanidade, este processo promove também a degradação ambiental através da emissão dos compostos atrás referidos. Este processo é apontado por vários autores como um dos responsáveis pelo efeito estufa e o crescente aquecimento global verificado no planeta assim como por fenómenos de aparecimento de doenças respiratórias, chuvas ácidas e conseqüente destruição de habitats [5], [8]. Desta forma, torna-se importante perceber as fontes e substâncias envolvidas, os seus impactos biológicos e ambientais e os métodos de controlo e rectificação do problema. Uma abordagem a estes aspectos é feita em seguida.

2.1.3.1 Fontes e Efeitos Nocivos

É importante referir que para a mesma substância poluente existem geralmente várias fontes no planeta. Destas fontes podem diferenciar-se as que são devidas a acções do Homem (antropogénicas) das que resultam de processos naturais. Neste trabalho, serão abordadas apenas as fontes que resultam de actividades antropogénicas e, em específico, as que resultam da queima de combustíveis.

No que diz respeito a poluentes atmosféricos, as instalações de combustão são as principais fontes antropogénicas de emissão. Destacam-se as centrais termoeléctricas, caldeiras industriais, incineradoras, processos industriais de queima e os veículos de transporte [6].

Por outro lado, é possível diferenciar os poluentes emitidos directamente pela fonte (primários) daqueles que resultam de reacções que ocorrem sobre as substâncias emitidas já na atmosfera por acção, por exemplo, da radiação solar (secundários).

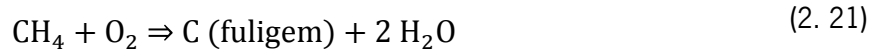
Apesar de difícil a quantificação dos efeitos que os poluentes provocam na saúde humana e ambiente, estes são conhecidos e encontram-se sumariados no Anexo A, Tabela A..

2.1.3.2 Mecanismos de Formação

O mecanismo de formação de poluentes atmosféricos nos equipamentos de queima está intrinsecamente relacionado com o tipo de chama. No âmbito do presente trabalho, consideraram-se apenas os mecanismos de formação de poluentes que ocorrem em equipamentos que operam com chamas de difusão, como é o caso das caldeiras que queimam combustíveis sólidos.

Hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO)

A emissão de HC não queimados e CO durante a combustão deve-se à ocorrência de reacções de oxidação incompletas. Este fenómeno pode dever-se a vários motivos, como a falta de oxigénio disponível ou o tempo necessário para que se complete a reacção e resulta na formação de espécies químicas compostas por carbono por oxidar (fuligem) ou parcialmente oxidado (CO). As equações (2. 20) e (2. 21) representam a combustão incompleta de um hidrocarboneto, neste caso metano, originando as espécies químicas em causa:



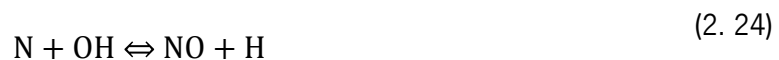
Óxidos de azoto (NO_x)

Os óxidos de azoto designados, genericamente por NO_x, englobam, na verdade, dois compostos oxigenados de azoto: o monóxido de azoto, NO, e o dióxido de azoto, NO₂. O último, apesar de poder ser encontrado nas emissões de alguns sistemas de queima é, normalmente, um poluente secundário que resulta da reacção do NO já no meio ambiente. Desta forma, a abordagem aos óxidos de azoto neste trabalho será centrada no estudo dos mecanismos de formação do NO.

A formação de NO durante a combustão pode ser devida à oxidação de azoto proveniente de duas fontes distintas: a) átomos de azoto presentes no ar de combustão; b) compostos azotados existentes no combustível.

No que diz respeito à formação de NO devido ao azoto presente no ar de combustão são conhecidos três mecanismos principais, que se passam a detalhar [6]:

- **Mecanismo térmico**, que é dominante a temperaturas muito elevadas (acima de 1800 K) e para uma vasta gama de Φ , envolvendo as reacções:



Ao conjunto destas três reacções é dado o nome de *mecanismo de Zeldovich estendido*. A energia de dissociação da molécula de N₂ é extremamente elevada sendo apenas possível para elevadas temperaturas, como referido. Desta forma, é usual ignorar-se a formação de NO por este mecanismo para temperaturas abaixo de 1800 K.

- **Mecanismo imediato**, também conhecido por *mecanismo de Fenimore*, onde o azoto reage com radicais de hidrocarbonetos formando HCN e CN,



Estes, por sua vez, conduzem à formação de NO pelo seguinte conjunto sequencial de reacções:



Este mecanismo tem expressão para combustões a baixas temperaturas e é particularmente importante para misturas ricas, $\Phi > 1$.

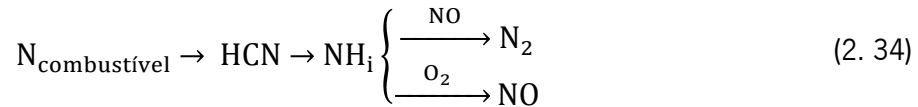
- **Mecanismo de óxido nitroso (N_2O)**, onde este participa como um composto intermédio na produção de NO através das seguintes reacções:



Esta mecânica é importante para chamas de pré-mistura pobres, $\Phi < 1$, caracterizadas por baixas temperaturas.

Quanto ao processo de produção NO através dos compostos azotados constituintes do combustível, existe apenas um mecanismo conhecido, que se passa a abordar:

- **Mecanismo do combustível**, onde o azoto presente emerge em forma de radicais de HCN que rapidamente originam radicais NH_i ($i = 0, 1, 2, 3$). Por sua vez, estes reagem competitivamente com o O_2 e NO segundo a equação seguinte:



Como esperado, a formação de NO por este mecanismo depende fortemente da fracção de azoto presente no combustível e também do oxigénio disponível para reacção. Por outro lado, a temperatura parece não possuir grande influência na prossecução destas reacções.

Óxidos de enxofre

Nos processos de combustão, todo o enxofre presente no combustível facilmente sofre oxidação e aparece nos gases de exaustão como SO₂ ou SO₃, podendo referir-se ao conjunto dos dois como SO_x. A importância da emissão destes poluentes centra-se nos carvões e óleos residuais, dado que são estes os que possuem enxofre em quantidades significativas.

Partículas

As formação de partículas depende de vários factores como as características do combustível, tipo de chama e das diversas condições de operação do equipamento. Existem essencialmente dois tipos de partículas: a fuligem e as cenosferas.

A fuligem é formada nas regiões ricas da chama, caracterizadas por baixas temperaturas e excesso de combustível. Nestas condições, as partículas esféricas de dimensão muito reduzida (cerca de 0,1µm) contidas na fase gasosa agregam-se de forma irregular por um processo conhecido por cracking formando compostos essencialmente constituídos por carbono (C₄H₂ e C₈H₂, por exemplo). Este fenómeno ocorre predominantemente em chamas de difusão de hidrocarbonetos, como é o caso do equipamento em questão. Nos equipamentos industriais de queima, o processo de oxidação destes compostos de carbono é suficientemente intenso para os queimar antes de abandonarem a câmara de combustão.

Quanto às cenosferas, e no caso dos combustíveis sólidos, estas correspondem a partes do resíduo carbonoso, constituído por carbono e cinzas, que abandonam a câmara de combustão. Devido ao teor de cinzas que todos os combustíveis sólidos apresentam inicialmente, a emissão mínima de partículas está sempre limitada por este, mesmo no caso de uma combustão completa.

2.1.3.3 Quantificação das Emissões

Os níveis de emissões são frequentemente expressos de diversas formas de acordo com as necessidades da aplicação em questão, o que pode levar à dificuldade de comparações sendo mesmo, por vezes, ambíguas.

As principais formas de relacionar os valores das concentrações dos gases de exustão com uma referência que permita comparações entre aplicações são descritas em seguida.

Índice de emissão

O índice de emissão, IE, que relaciona a massa emitida de determinada espécie, m_i , com a massa de combustível queimado, m_{comb} , expressa-se da seguinte forma:

$$IE_i = \frac{m_i}{m_{comb}} \quad (2.35)$$

Esta grandeza é especialmente útil na medida em que permite comparar inequivocamente a quantidade emitida de um dado poluente por cada unidade de massa de combustível, independentemente do grau de diluição dessa espécie nos gases de exustão ou da eficiência da combustão.

Para a queima de um hidrocarboneto do tipo C_xH_y em ar e conhecendo a concentração (em fracção molar) da espécie em interesse, X_i , é possível determinar também o IE relacionando essa fracção à massa molar da espécie e à fracção molar e massa molar dos compostos de carbono presentes nos gases de exaustão segundo:

$$IE_i = \left(\frac{X_i}{X_{CO} + X_{CO_2}} \right) \left(\frac{C_x \cdot M_i}{M_{comb}} \right) \quad (2.36)$$

onde o índice X corresponde a fracções molares e C_x corresponde ao número de átomos de carbono presente na molécula de combustível C_xH_y . Os índices M correspondem às massas molares das respectivas espécies [5].

Concentrações corrigidas

São frequentemente utilizadas na literatura e até mesmo em normas e portarias governamentais, correções da concentração de um determinado poluente para um certo valor de

O₂ nos gases de exaustão. O propósito destas correções é anular a influência dos vários graus de diluição destas espécies de forma a ser possível uma comparação inequívoca das emissões entre diferentes equipamentos operando com diferentes excessos de ar.

Para corrigir a concentração de uma dada espécie, X_i , diluída em determinada concentração de oxigénio nos gases de exaustão, %O₂, para um nível de oxigénio de referência, %O_{2 ref}, é aplicada a equação:

$$X_i @ \%O_{2 \text{ ref}} = X_i @ \%O_2 \frac{n_{mix} @ \%O_2}{n_{mix} @ \%O_{2 \text{ ref}}} \quad (2.37)$$

onde n_{mix} representa o somatório do número de moles de todas as espécies nos gases de exaustão, consideradas aqui em *gás seco*, ou seja, ausente de água e considerando que o H₂, CO e outros poluentes presentes nos gases de exaustão se encontram em quantidade desprezável. Assim sendo, é possível aproximar este valor utilizando a seguinte equação:

$$n_{mix} @ \%O_{2,i} = 4,76 \left[\frac{C_x + (1 - \%O_{2,i}) \frac{H_y}{4}}{1 - 4,76 \cdot \%O_{2,i}} \right] - \frac{H_y}{4} \quad (2.38)$$

em que os valores C_x e H_y , em moles, são mais uma vez dados pela composição molar do hidrocarboneto em questão segundo a fórmula C_xH_y .

Emissões específicas

São frequentemente utilizadas medidas de emissões específicas que variam de acordo com a finalidade da queima do combustível e relacionam, normalmente, a massa de poluente com a quantidade de energia produzida pelo processo de combustão em causa ou com a energia contida no combustível antes da queima.

No caso das caldeiras que utilizam biomassa, é frequentemente empregue um índice que relaciona a massa de poluente emitida por unidade de energia do combustível da seguinte forma:

$$\frac{\text{Massa do poluente } i}{\text{Energia do combustível}} = \frac{EI_i}{PC} \quad (2.39)$$

Concentrações mássicas

O teor de O_2 e CO_2 , devido à sua elevada quantidade nos gases de exaustão, é vulgarmente expresso em percentagens volúmicas $\left[\frac{\text{Unidades Volume}_{cont}}{\text{Unidades Volume}_{ar}}\right]$. No caso dos poluentes, que são emitidos em quantidades bastante inferiores, é necessária a utilização de unidades de grandezas inferiores. Assim, os aparelhos de medida apresentam normalmente os valores destes em concentrações volúmicas de partes por milhão, ppm_V , ou mg/Nm^3 , onde N significa que os gases se encontram em condições de pressão e temperatura normais, PTN (1 atm, 0 °C).

A forma de interconverter estas unidades é utilizando a seguinte expressão, válida para condições PTN:

$$mg/Nm^3 = ppm_V \times 4,462 \times 10^{-2} \times M_{poluente} \quad (2.40)$$

onde $M_{poluente}$ corresponde ao valor da massa molar do poluente em questão.

2.2 COMBUSTÃO DE PELLETS DE MADEIRA

Existe uma grande variedade de equipamentos de queima de pellets, distinguindo-se pela potência (desde pequenos aquecedores ambiente com $P < 10$ kW até grandes caldeiras de aquecimento de água com $P > 50$ kW), pelo nível de automatização, pela finalidade e até mesmo pelo tipo de queimador (Figura 2.2).

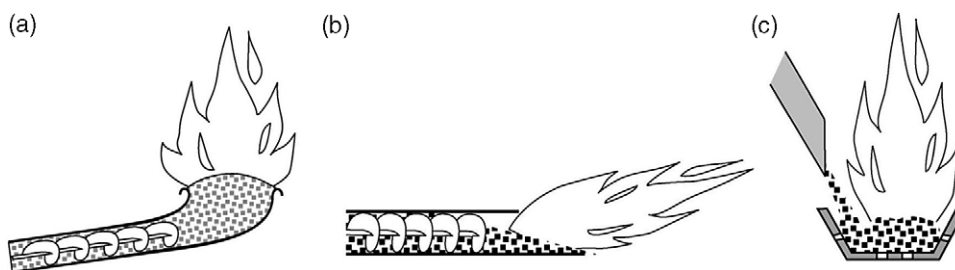


Figura 2.2 - Tipos de queimadores segundo o seu princípio: a) queimador de alimentação inferior; b) queimador de alimentação horizontal; c) queimador de alimentação superior. [4]

Devido à estrutura homogénea, elevada área superficial e humidade uniforme dos pellets, é mais fácil obter uma combustão eficiente que no caso da queima de madeira ou aparas de madeira. No entanto, para que ocorra uma combustão completa e eficaz, são necessárias algumas precauções sendo de especial importância o método de insuflação de ar, a respectiva quantidade, a temperatura a que ocorre o processo e o tempo de retenção dos produtos na câmara de

combustão. Devido à inerente dificuldade de previsão das condições de combustão e sendo os equipamentos existentes no mercado bastante distintos entre si, é calculável que se proporcionem condições de combustão muito particulares que conduzem a diferentes níveis de emissões. Os valores destas podem, no entanto, ser entendidos como uma referência para comparação. Estes aspectos são abordados em seguida.

2.2.1 Ar de Combustão

Para que este processo seja otimizado, é necessária a divisão do ar de combustão em primário e secundário na câmara de combustão, como mostra a Figura 2.3.

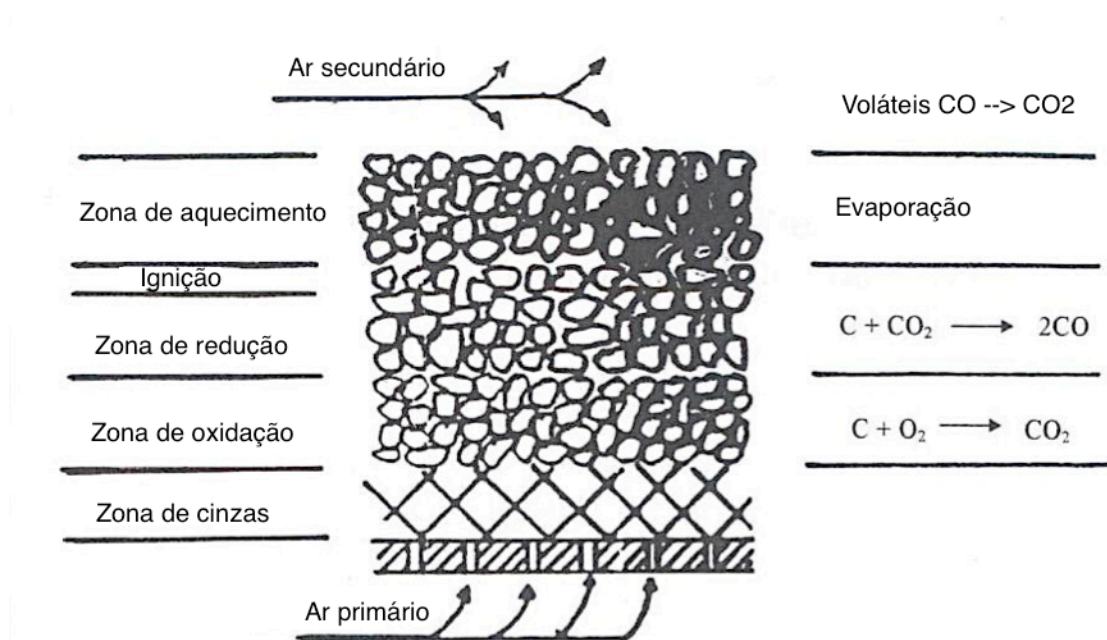


Figura 2.3 - Detalhe da combustão de carvão em grelha.[9]

A zona de combustão primária corresponde ao local onde ocorrem os processos de secagem, pirólise e oxidação heterogénea do resíduo carbonoso atrás abordados. A quantidade de ar aqui introduzida deve ser inferior à estequiométrica, i.e., $\lambda < 1$ para manter a temperatura do leito controlada e reduzir a formação de NO_x [4].

Acima da grelha completa-se a combustão criando uma zona de combustão secundária. Aqui ocorre a combustão homogénea, sendo queimados os gases voláteis libertados na primeira, desta vez com excesso de ar, $\lambda > 1$ [4]. O excesso de ar nesta zona prende-se com a necessidade de fazer chegar a todas as espécies químicas presentes nos gases o oxigénio do comburente. Desta forma, é também um factor de extrema relevância uma mistura perfeita destes gases, que pode

ser conseguida através da geometria e desenho da câmara de combustão e/ou por efeitos aerodinâmicos provocados pela desenho e disposição dos injectores de ar secundário.

Uma vez que os pellets são constituídos por 70 a 80% de matéria volátil [10], apesar dos requisitos de déficit e excesso de ar nas diferentes zonas de combustão, a massa de ar introduzido conduz globalmente a valores de $\lambda > 1$. Este coeficiente varia, no entanto, de equipamento para equipamento devido às diferenças de construção, nível de automatização, potência e tipo de queimador.

A Figura 2.4 representa a variação das emissões de CO em função do λ típico para diferentes equipamentos de combustão domésticos de biomassa. Nela é possível verificar que as condições normais de funcionamento para equipamentos desta natureza incluem a utilização de excessos de ar superiores a 1,5 à excepção de equipamentos com um controlo avançado de combustão que possuem sondas para medição de oxigénio nos gases de exaustão permitindo um controlo em malha fechada da distribuição e quantidade de ar a ser introduzido na câmara de combustão.

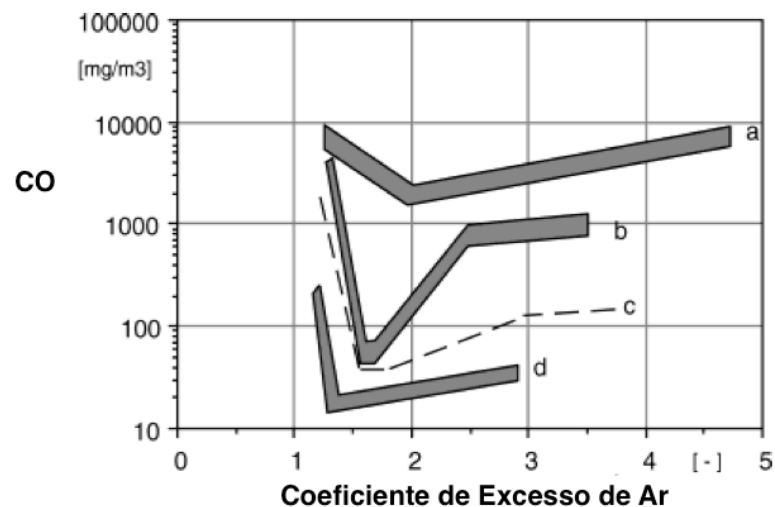


Figura 2.4 - Emissões de CO em função do coeficiente de excesso de ar, λ , para diferentes tipos de equipamentos de queima de pellets. a) salamandra de aquecimento, b) caldeira com câmara de inversão, c) caldeira automática, d) caldeira automática de controlo avançado. [11]

É vulgar acontecer também que, para o mesmo equipamento, o coeficiente de excesso de ar varie com a carga (nominal, máxima ou reduzida). Na Tabela 2.1 são apresentados valores de λ medidos em vários tipos de caldeiras domésticas para dois níveis de carga diferentes – nominal e reduzida – utilizando o mesmo tipo de pellets.

Tabela 2.1 - Coeficiente de excesso de ar para vários equipamentos em função da carga, potência e tipo de queimador. Adaptado de [12]

Tipo de queimador	Potência nominal [kW]	Nível de carga	Potência térmica [kW]	Coef. de excesso de ar λ
Alimentação inferior	15	Nominal	14,9	2,2
		Reduzida	4,4	1,6
	20	Nominal	20,2	1,9
		Reduzida	6,0	1,9
Alimentação superior	30	Nominal	30,2	1,9
		Reduzida	9,7	10,8
Alimentação horizontal	35	Nominal	35,1	1,3
		Reduzida	10,8	2,1

2.2.2 Temperatura de Combustão

Para assegurar a combustão completa de todos os voláteis, evitando a emissão de CO e HC não queimados, são necessários, para além de um adequado excesso de ar, uma correcta e elevada temperatura de chama, da ordem dos 900°C [7]. Esta temperatura é assegurada, por um lado, pelo apropriado dimensionamento da câmara de combustão face à quantidade de combustível a queimar e, por outro lado, pela quantidade de ar introduzida na câmara de combustão, como se pode verificar pela Figura 2.5. Para assegurar as temperaturas elevadas são, por vezes, utilizados materiais cerâmicos refractários no revestimento da câmara de combustão.

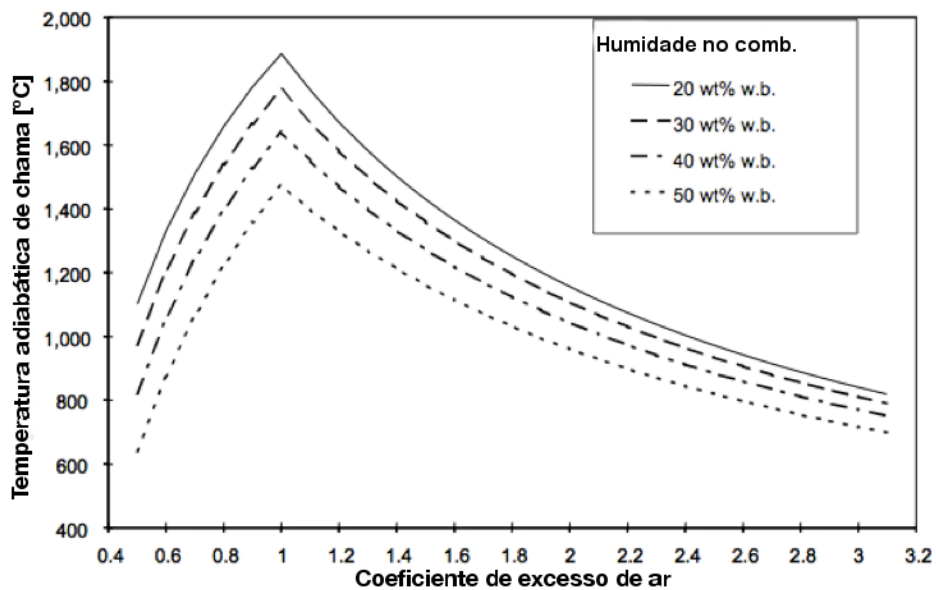


Figura 2.5 - Temperatura adiabática de chama em função de λ para diferentes teores de humidade no combustível [13]

Na Tabela 2.2 encontram-se exemplos de aplicações comuns e respectivas temperaturas de combustão típicas segundo um carácter indicativo.

Tabela 2.2 – Temperaturas de combustão e exemplos. [14]

Combustão	Temperatura (°C)	Exemplo
Incompleta	< 700	Grelhadores de carne convencionais Fogos florestais lentos Lareiras e fogões de sala
Razoável	700 – 900	Caldeiras convencionais
Eficiente	> 900	Queimadores de pellets Caldeiras ecológicas

2.2.3 Tempo de Residência na Câmara de Combustão

Para que exista uma completa conversão do monóxido em dióxido de carbono é necessário que o primeiro se submeta tempo suficiente às temperaturas elevadas da câmara de combustão. Pela análise da Figura 2.6 é possível observar que o tempo necessário para uma completa combustão depende, por sua vez, da temperatura de chama e do O₂ disponível para reacção diminuindo com o aumento destes.

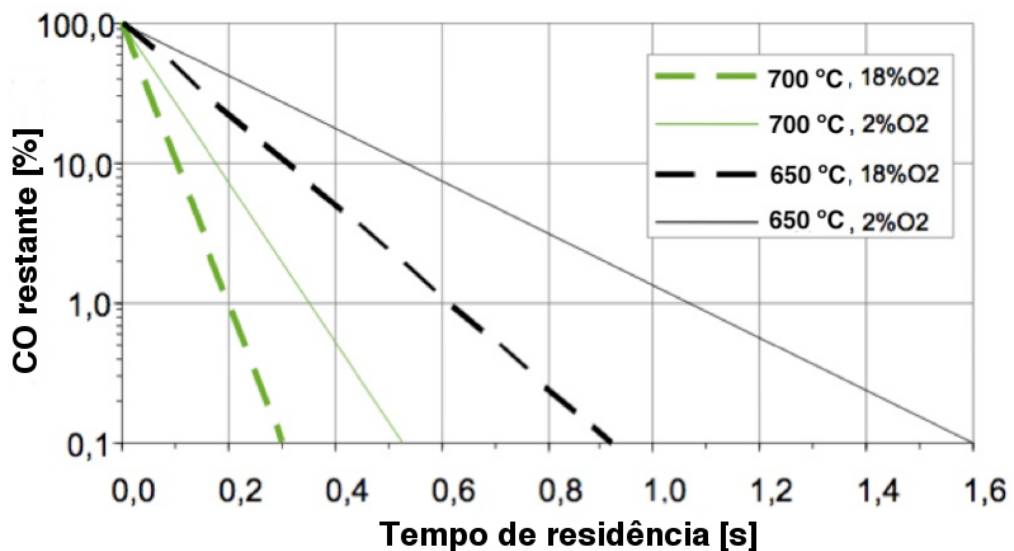


Figura 2.6 - Teor de CO em função do tempo de residência para diferentes temperaturas e teores de O₂ disponível para reacção. Adaptado de [13]

2.2.4 Principais Emissões Gasosas

Os níveis de emissões típicos na combustão de pellets em equipamentos de grelha fixa variam de equipamento para equipamento, com as condições de funcionamento e com o tipo de pellets.

Na Tabela 2.3 é possível comparar as emissões médias medidas em três caldeiras diferentes utilizando o mesmo combustível e as emissões registadas outrora na caldeira que será usada na instalação experimental do presente trabalho. O equipamento A é de 32 kW e possui alimentação inferior, o equipamento B tem uma potência de 30 kW e possui alimentação superior, enquanto que o C diz respeito a um equipamento com 35 kW e alimentação horizontal. A caldeira que será usada na instalação corresponde ao equipamento D, com 20 kW de potência nominal e alimentação superior.

Tabela 2.3 - Emissões de CO e NO_x por nível de potência para três caldeiras a pellets distintas utilizando o mesmo combustível (A, B e C) [12] e na caldeira a ser utilizada na instalação (D) [15].

	Nível de potência	CO [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]
Equipamento A	Reduzido	70	110
	Nominal	60	120
Equipamento B	Reduzido	5200	120
	Nominal	1600	110
Equipamento C	Reduzido	70	450
	Nominal	270	260
Equipamento D	Reduzido	70	100
	Nominal	67	120

Pela sua análise, é possível confirmar que existem, efectivamente, diferenças na emissão de poluentes para diferentes equipamentos utilizando o mesmo combustível. Essas diferenças observam-se também com a variação da carga dos equipamentos. De uma forma geral, verifica-se que as emissões de CO podem variar entre valores da ordem dos 60 até mais de 5000 mg/m³ e que as emissões de NO_x se encontram num intervalo da ordem dos 100 até 450 mg/m³.

Como já referido anteriormente, a constituição do combustível e o excesso de ar influenciam também o teor de poluentes nos gases de exaustão. Existem testes utilizando numa caldeira doméstica diferentes tipos de pellets, cujo funcionamento intrínseco do equipamento ditava que o excesso de ar diminuía com o aumento da carga. Os resultados das emissões de CO e NO_x podem ser vistos na Figura 2.7 e mostram que existe, efectivamente, influência destes dois factores na sua emissão (o excesso de ar está patente na variação de O₂ nos gases de exaustão) [10].

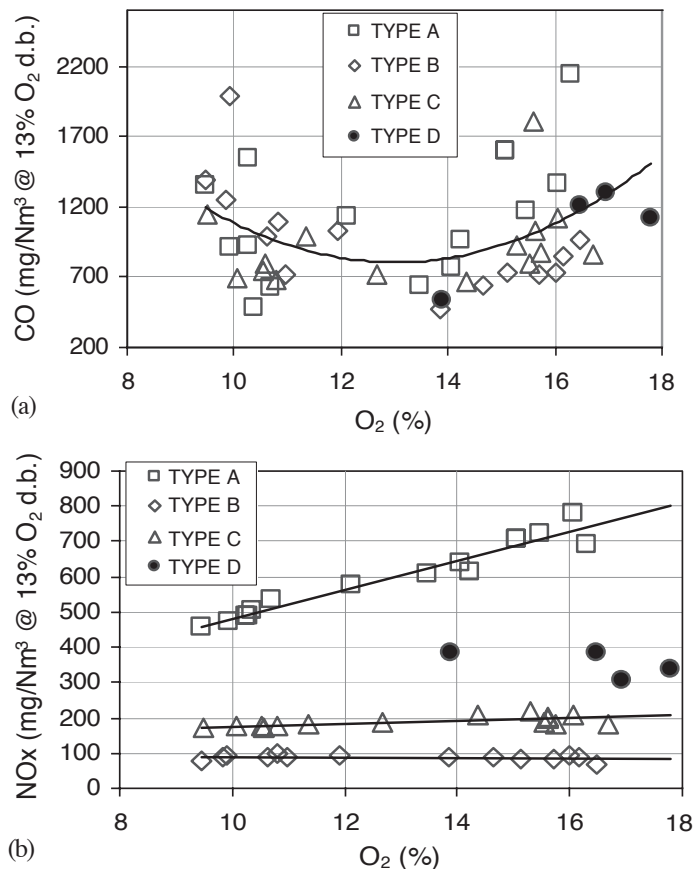


Figura 2.7 - Emissões de CO (a) e NO_x (b) em função do excesso de ar e do tipo de pellets (A, B, C e D) [10]

2.3 FORMAÇÃO DE CINZAS

O conceito dos pellets faz com que exista neles uma vasta gama de concentrações de elementos que dão origem a cinzas, devido ao tipo de matéria prima utilizada no fabrico bem como a sua origem, modo de transporte, método de produção, entre outros.

Os constituintes inorgânicos encontrados na biomassa que dão origem a cinzas incluem metais e não metais. São eles Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe, Mn, N, Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V e Hg em quantidades extremamente variáveis. A maioria destes elementos são utilizados como nutrientes pela planta e/ou possuem funções biológicas essenciais para o ser vivo, podendo alguns ser derivados de contaminações externas decorrentes do transporte, armazenamento e produção dos pellets, como o caso do Al. [16]

Os constituintes inorgânicos que mais contribuem para a formação de cinzas são o Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe e Mn assim como por vezes Pb, Cd e Zn pois são os vulgarmente

encontrados em maiores quantidades nas análises elementares às cinzas cuja totalidade é considerada baixa, sendo normalmente desde <1% até cerca de 3% [16], [17].

Durante a combustão dos sólidos de biomassa, o comportamento dos elementos que formam cinzas seguem um esquema geral, representado na Figura 2.8. Durante as etapas normais da combustão de sólidos revistas no subcapítulo anterior, os elementos que originam cinzas têm dois comportamentos distintos, dependendo da sua volatilidade. Os compostos não voláteis tais como Si, Ca, Mg, Fe e Al ficam retidos nas cinzas do leito provocando a sua fusão e coagulação (*slagging*). As espécies mais voláteis, tais como K, Na, S, Cl, Zn e Pb comportam-se normalmente de maneira diferente, dependendo da temperatura e se são libertadas durante a fase de volatilização ou durante a combustão do resíduo carbonoso. Por um lado, se as condições de temperatura forem baixas, estas podem agregar-se aos elementos não voláteis das cinzas formando novos compostos. Por outro lado, uma proporção considerável destes elementos pode ser vaporizada devido às elevadas temperaturas de combustão, acabando por se agregar com a diminuição da temperatura ao longo do trajecto dos gases formando partículas de dimensões entre $0,01\mu\text{m}$ e $1,0\mu\text{m}$. Estas partículas denominam-se aerossóis e constituem uma fracção importante das cinzas volantes. A restante parte das últimas, é formada por pequenas partículas de cinzas ($1\mu\text{m}$ a $250\mu\text{m}$) acumuladas no leito de combustão que são arrastadas pelo ar primário que o atravessa [17], [18].

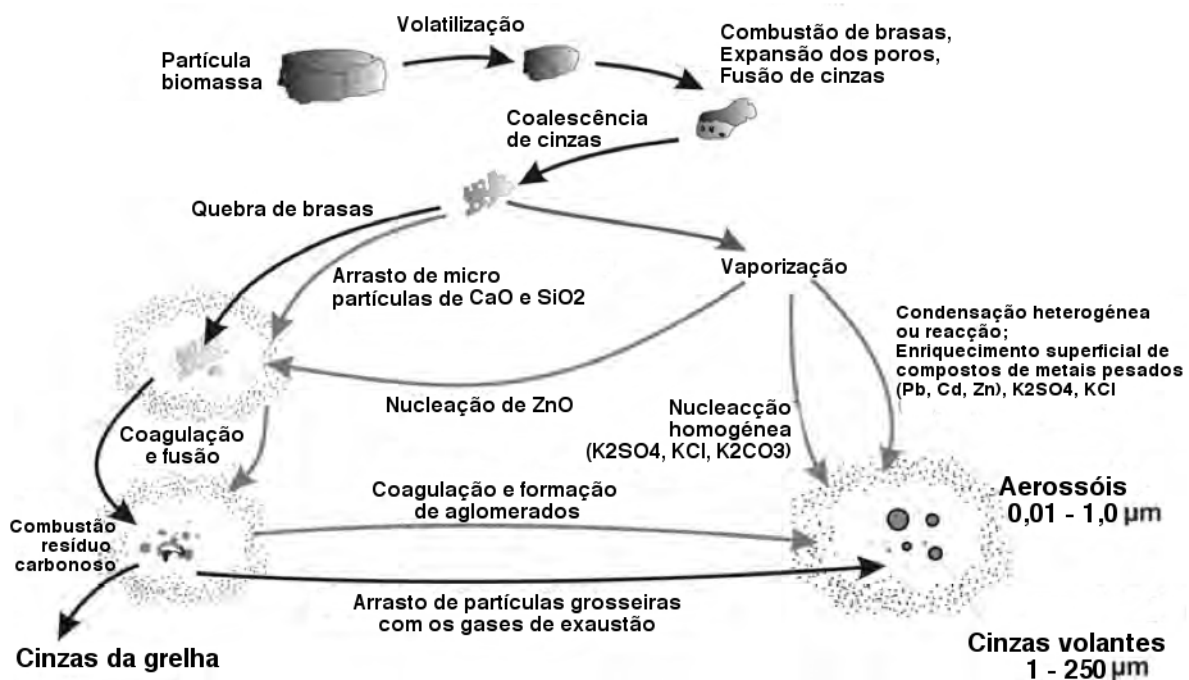


Figura 2.8 - Formação de cinzas durante a combustão de biomassa [18]

Nos equipamentos de queima de pellets de pequena escala, a principal fracção de cinzas é a que fica acumulada no leito, sendo emitidas apenas cerca de 5% do total mássico de cinzas para a atmosfera em forma de cinzas volantes [18].

2.3.1 Processos de Fusão e Aglomeração de Cinzas

Durante a combustão pode ocorrer a formação de compostos fundidos que resultam da acumulação, fusão e coalescência das cinzas resultantes. Quando os depósitos se formam ao nível dos elementos que recebem calor por radiação denomina-se o fenómeno de *slagging*. Se esses depósitos se produzem ao nível dos elementos que recebem calor por convecção, por exemplo, ao nível dos tubos de fumo do permutador, pode denominar-se este mecanismo por *fouling*.

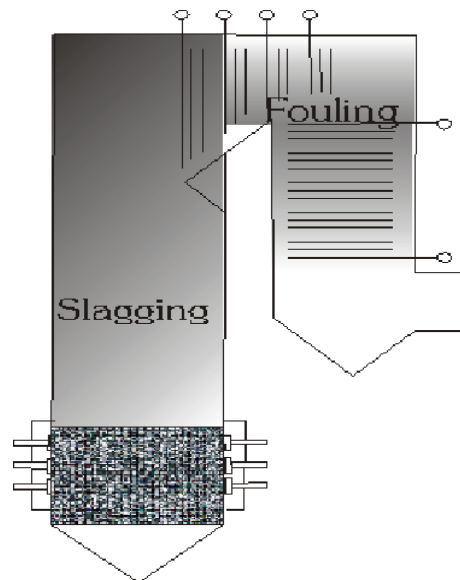


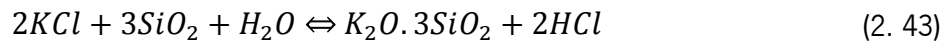
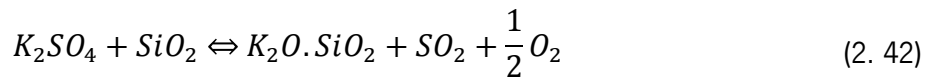
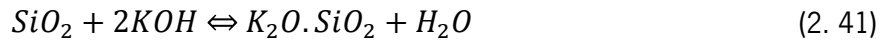
Figura 2.9 - Localização onde ocorre usualmente o *slagging* e *fouling* [19].

Neste trabalho será abordado apenas o *slagging* visto ser este, associado a mecanismos de fusão e coalescência de cinzas, o que provoca obstrução dos canais de ar primário do tipo de equipamentos em estudo e que, portanto, se pretende evitar.

A principal diferença entre pellets “sem problemas” e pellets “com problemas” de fusão de cinzas reside nas características inorgânicas das cinzas, tendo os segundos consideravelmente maiores proporções de Si, Al e Fe. A fracção de Si crítica nas cinzas, dada pelo teor de SiO_2 , a partir da qual é provável a formação de *slag*, situava-se ordem dos 20-25% e é apontada como a mais relevante [16].

O Si no seu estado puro não pode ser apontado como responsável pela produção de cinzas fundidas visto o seu ponto de fusão se situar na ordem dos 1700 °C. Porém, existindo disponíveis para reacção óxidos alcalinos ou alcalino-terrosos ou mesmo sais destes (Na_2CO_3 e K_2CO_3), ocorre a produção de compostos eutéticos com regiões de baixo ponto de fusão.

O elemento K é o mais susceptível de reagir com o Si [16]. Existindo este elemento disponível, podem ocorrer as seguintes reacções:



O silicato de potássio possui temperaturas eutéticas abaixo de 800 °C, como é possível verificar na Figura 2.10. O mesmo acontece com os silicatos de Na, apesar deste ser considerado de menor relevância. O combustível queimado contrai, aproximando as partículas de cinza entre si e aumentando a possibilidade de contacto. Eventualmente, os compostos de K amolecidos unem-se formando aglomerações que podem iniciar a formação de cinzas sinterizadas. Estas aglomerações podem contactar eventualmente com óxidos alcalinos que reagem e são dissolvidos no aglomerado inicial levando à ocorrência de *slagging* [16].

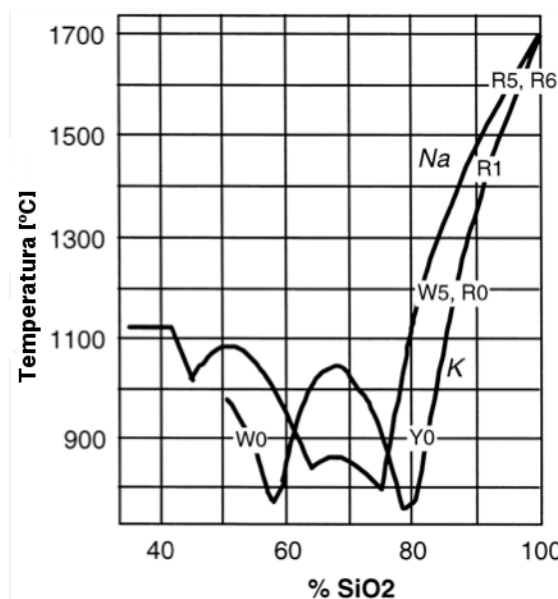


Figura 2.10 - Diagrama de fase binário para óxidos de Na e K com SiO_2 [20]

O Ca e Mg são dois dos elementos constituintes das cinzas que contrariam, no entanto, esta tendência. Os seus silicatos são relativamente refractários, possuem elevada temperatura de fusão e competem com a reação do Si com o Na e K. São observados frequentemente em cinzas resultantes da queima de biomassa sob a forma de precipitados [16]. Este fenómeno explica a adição de calcário ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ao combustível em equipamentos de queima de grande escala como forma de evitar a ocorrência de *slagging*.

2.3.2 Previsão da Fusão e Aglomeração das Cinzas

O problema de fusão de cinzas tem acompanhado os processos de combustão desde há vários anos nomeadamente na queima de carvão. Ao longo do tempo, estes fenómenos levaram ao desenvolvimento de alguns métodos que tentam prever a formação dos compostos fundidos. Alguns deles consistem em índices teóricos baseados na composição química do combustível mas os mais eficazes baseiam-se na composição química das cinzas: i) índice bases/ácidos; ii) índice de alcalinos; iii) índice de *slagging* e iv) índice de *fouling*. Para cada um destes índices existem intervalos de valores conhecidos que permitem retirar elações acerca do comportamento das cinzas e aparecimento de problemas. Outros baseiam-se na análise empírica do teor de elementos presentes no combustível considerados problemáticos (teor de Cl). Por vezes, são também utilizados diagramas de fases ternários que indicam a temperatura de fusão das cinzas em função da composição química dos elementos presentes nestas, dando uma indicação genérica sobre a propensão à ocorrência destes fenómenos.

No entanto, para além do facto de nenhuma das ferramentas conhecidas proporcionarem uma previsão fiável do comportamento das cinzas para todos os combustíveis, estas foram desenvolvidas para a queima de carvão pelo que a sua aplicação à biomassa é restrita.

Existem estudos da aplicação dos índices utilizados para carvão enunciados anteriormente na combustão de biomassa que concluem que a sua aplicação é limitada. No entanto, existem dois menos usuais que possuem aplicabilidade interessante à queima de biomassa: i) índice de % de Bases e um ii) índice de alcalinos simplificado [21]. O primeiro, baseado no índice de bases/ácidos, é usado como um indicador de *slagging* na literatura desde há vários anos mas não se encontrava com intervalos definidos:

$$\% \text{ Bases} = \frac{[B]}{[B + A]} \quad (2.44)$$

onde,

$$[B] = [\text{bases}] = [Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O] \quad (2.45)$$

$$[A] = [\text{ácidos}] = [SiO_2 + Al_2O_3 + TiO] \quad (2.46)$$

Após a realização de testes com biomassas, determinou-se que para % Bases > 0.75 se verificava a formação de cinzas fundidas [21].

O segundo índice resultou da simplificação do índice de alcalinos utilizado para carvões. A simplificação resultou da necessidade de o tornar mais sensível a combustíveis com baixa formação de cinza e elevado teor de K, que é o que se verifica na madeira quando comparada com o carvão. Assim, este novo índice é dado por:

$$Alk_{\text{simplificado}} = \frac{[Na_2O + K_2O]}{[B]} \quad (2.47)$$

Neste caso, ocorre *slagging* para valores que excedem 0.3 [21].

Outros métodos frequentemente utilizados para conhecer o comportamento das cinzas na queima de biomassa em equipamentos de grande escala passam por testes laboratoriais de fusibilidade. Existem vários testes normalizados (AFT, ISO 540, BS 1016.15 – 970, GOST2057 – 1982, SABS 932, ASTM D1857, DIN 517 30, AS 1038.15, GE 219-74). O método da norma ISO 540 é o utilizado em normas de pellets (SS 18 71 20) como aquele capaz de prever a fusibilidade das cinzas.

Para além disso são também realizados testes laboratoriais de fusão e análise térmica dos depósitos fundidos encontrados nos equipamentos de combustão de grande escala. A aplicabilidade destes testes a equipamentos de queima de pequena escala é restrita e os métodos devem ser ainda desenvolvidos para que possam fornecer informação credível acerca da ocorrência de *slagging* para diferentes combustíveis, nomeadamente os mais ricos em Si. Para além disso, o mesmo acontece com os testes de análise térmica dos fundidos. Apesar de tudo, os testes de fusão de cinzas segundo a norma ISO 540 possuem aplicabilidade bastante aceitável

quando se pretender prever a formação dos depósitos nos equipamentos de pequena escala. A informação colhida neste teste é comparada com as temperaturas típicas do leito do equipamento em questão considerando que a temperatura de deformação inicial, SST, em seguida explicada, é a temperatura a partir da qual se verifica a ocorrência grave de *slagging*. [22]

Para os testes de fusibilidade, são compactadas as cinzas a analisar em cilindros com alturas de 3 mm a 5 mm com diâmetro igual à altura. Estes cilindros são aquecidos a um ritmo de aumento de temperatura constante e contínuo. Com o aquecimento da partícula inicia-se a sua deformação sendo registadas as alterações à forma do cilindro através de uma observação contínua (Figura 2.11).

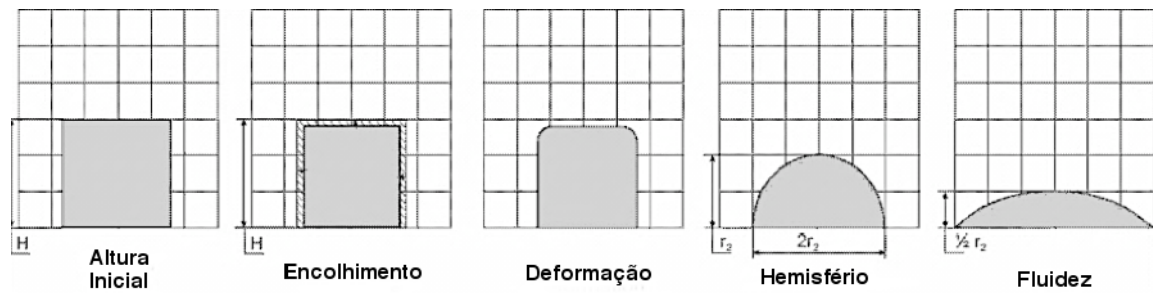


Figura 2.11 – Fases no processo de testes de fusibilidade de cinzas. (Altura original, H = Altura a 550 °C) [23]

Nestes testes são registadas, normalmente, quatro temperaturas:

- **Temperatura de início de encolhimento** (*Shrinkage Starting Temperature, SST*): corresponde à temperatura para a qual a altura do cilindro passa a cerca de 95% da altura do cilindro original (altura à temperatura de 550°C);
- **Temperatura de deformação inicial** (*Deformation Temperature, DT*): diz respeito à temperatura em que ocorre o arredondamento das arestas do cilindro;
- **Temperatura de hemisfério** (*Hemispherical Temperature, HT*): é assinalada quando a peça de teste forma aproximadamente uma hemiesfera, i.e., quando a altura se torna igual a metade do diâmetro da base;
- **Temperatura de fluides** (*Flow Temperature, FT*): ocorre quando a amostra fica fluida sobre a placa de teste com metade da altura registada aquando da temperatura de hemisfério.

Conhecida a composição das cinzas é também possível prever o seu comportamento em termos de fusibilidade, através do recurso a diagramas de fase ternários dos elementos com maior responsabilidade na ocorrência deste fenómeno. Para que sejam tidos em conta o máximo número de elementos responsáveis pela alteração do ponto de fusão das cinzas, normalmente agrupam-se os elementos que, ligados ao Si, elevam ou diminuem o ponto de fusão das moléculas. Desta forma, nos diagramas encontram-se agrupados os teores de $K_2O + Na_2O$ e os teores de $CaO + MgO$ que são responsáveis, respectivamente, pela diminuição e aumento do ponto de fusão quando ligados ao Si, por vezes também associado por alguns autores ao P. Representadas nestes diagramas encontram-se linhas isotérmicas de *liquidus*. É possível, dessa forma, determinar a temperatura a que ocorre a fusão das cinzas, permitindo retirar elações acerca da sua propensão para a ocorrência de aglomeração no leito e *slagging*.

Na Figura 2.12, que representa o diagrama de fases ternário para o sistema $K_2O - CaO - SiO_2$, é possível observar que a região em que ocorre a fusão de cinzas para temperaturas inferiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (delimitada pela linha a vermelho), diz respeito a matéria constituída por baixas percentagens de CaO e SiO_2 , associadas a uma elevada percentagem de K_2O .

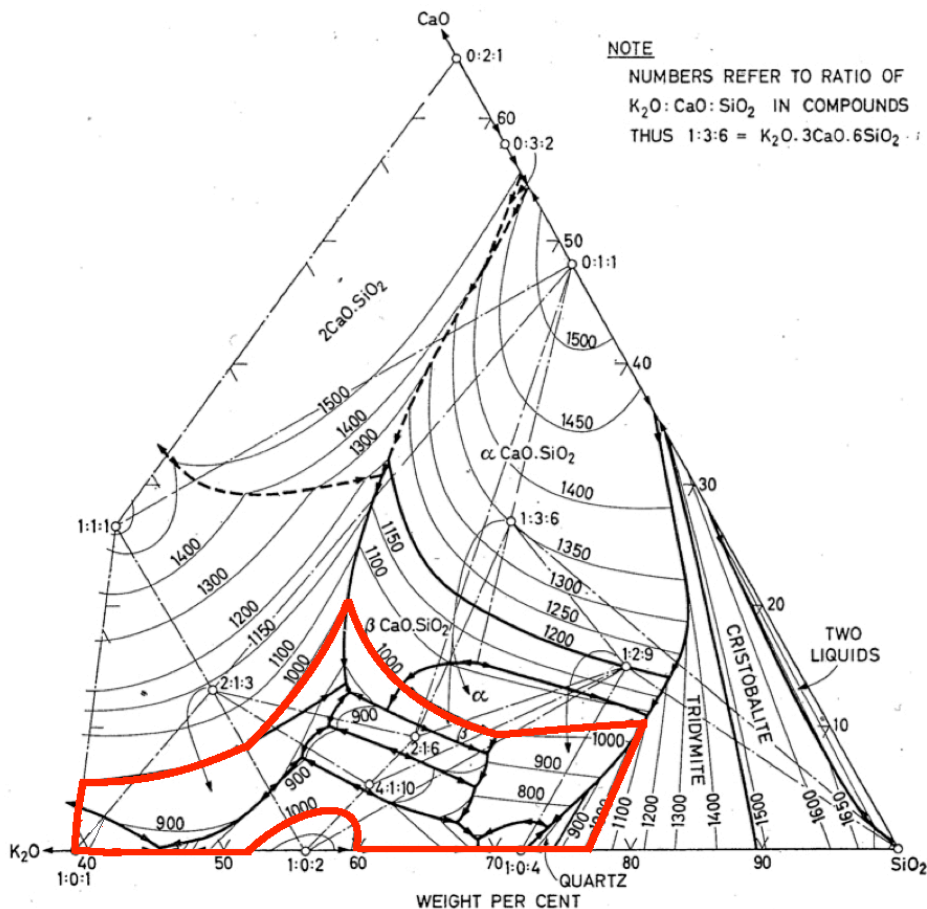


Figura 2.12 - Diagrama de fases ternário do sistema $K_2O - CaO - SiO_2$ [24].

2.3.3 Controlo da Formação de Aglomerados de Cinzas

O problema de aglomeração de cinzas é, por vezes, resolvido através da inclinação da grelha ou da forma de alimentação. Em sistemas de queima com alimentação inferior, por exemplo, este problema não se coloca, pois à medida que se dá a combustão, as cinzas são impelidas pelos pellets que as antecedem caindo por gravidade para o recipiente das cinzas sem nunca obstruir os canais de ar.

Outros sistemas incluem mecanismos de grelhas móveis (Figura 2.13 – a) ou de limpeza periódica da grelha (Figura 2.13 – b) que são accionados automaticamente. Estes sistemas tornam o equipamento mais dispendioso pelo que são geralmente utilizados apenas em sistemas de combustão de potências elevadas e para os quais é previsto um elevado período de funcionamento anual que permita a sua rápida amortização.

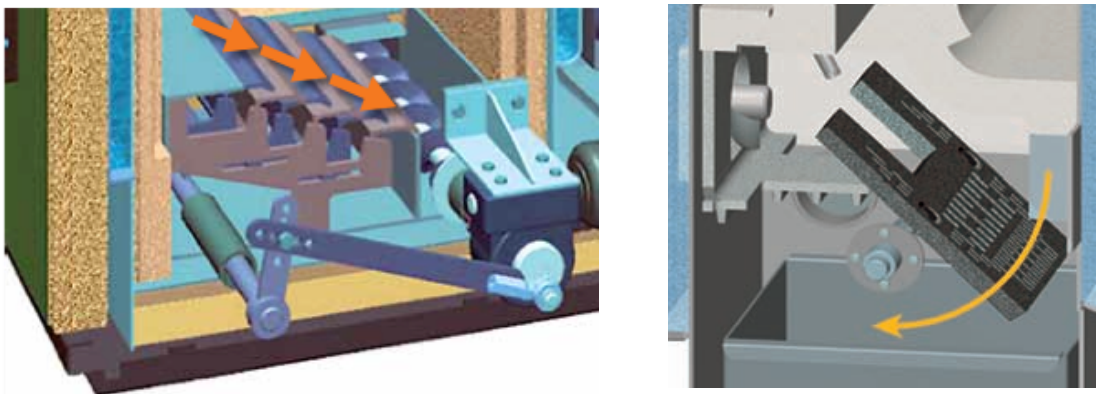


Figura 2.13 - Sistemas mecânicos de remoção de cinzas. Da esquerda para a direita: a) Sistema de grelhas móveis [25]; b) Sistema de inclinação periódica de grelha a 90° [26]

Nos sistemas mais económicos de alimentação superior e potências reduzidas o problema é contrariado em parte através do recurso a ciclos de limpeza. Estes ciclos consistem na paragem da alimentação de combustível e aumento da velocidade do ventilador até que a chama se extinga e o nível de combustível em queima na grelha baixe. Findo um tempo pré-definido, o sistema recupera a normalidade e inicia novamente a alimentação de combustível.

Sempre que este processo ocorre provoca uma grande variação de chama devido à iniciação e estabilização de uma nova combustão. Desta forma, como quase nunca é conseguida uma queima desenvolvida e estável, o nível médio de emissões aumenta e a eficiência da combustão é penalizada. Para além disso, este método não garante que todas as cinzas sejam expelidas pelo

que o fenómeno de formação de aglomerados e entupimento dos canais de ar não é, por vezes, contornado.

Para além dos ciclos de limpeza, vários equipamentos de queima dispõem de uma regulação que permite variar, em certo grau, o caudal de ar global pré-definido para cada nível de potência. Sempre que, ainda assim, ocorre a formação de aglomerados, os fabricantes destes equipamentos recomendam a regulação deste parâmetro para um maior caudal como forma de evitar a sua formação. Foram já realizados estudos de combustão onde se verificou uma diminuição tendencial de temperatura para elevados caudais de ar que atravessam o leito [27]. Na Figura 2.14 pode ser observada essa tendência para combustíveis com diferentes teores de humidade. Este fenómeno pode justificar o decréscimo da formação dos aglomerados que se verifica com o aumento do caudal de ar devido à diminuição da temperatura que se atinge no leito.

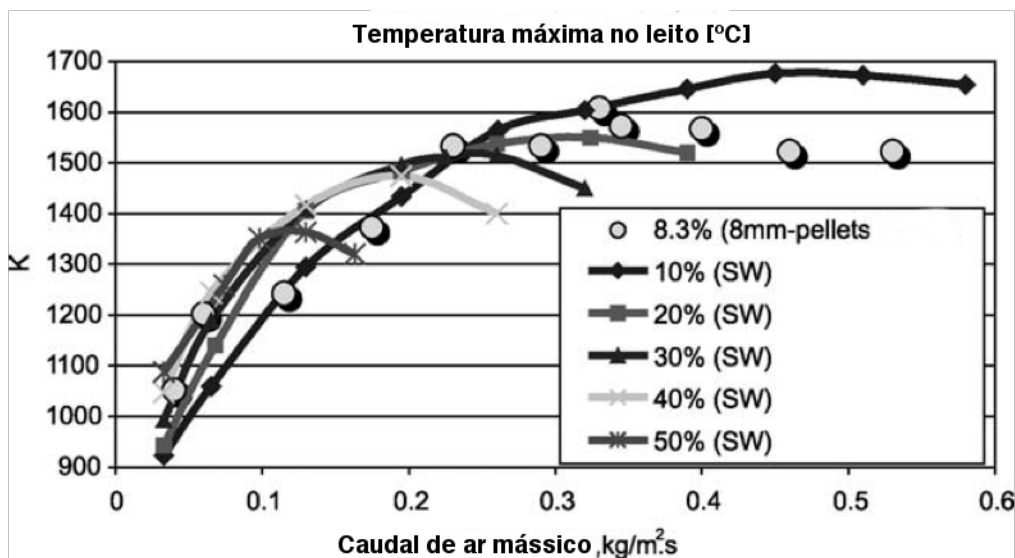


Figura 2.14 - Temperatura máxima em função do caudal de ar específico no leito [27]

3 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a execução dos ensaios experimentais procedeu-se à montagem e adaptação de uma instalação já existente. Neste capítulo é descrita a configuração da instalação, são detalhados cada um dos equipamentos e componentes que dela fazem parte, enumeradas e justificadas as alterações e melhorias e explicado o funcionamento da caldeira.

3.1 CONFIGURAÇÃO DA INSTALAÇÃO

A instalação experimental utilizada foi montada no Laboratório de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e integra os seguintes componentes (Figura 3.1):

- Caldeira (1), que inclui o sistema de ignição, o queimador, a câmara de combustão e o permutador de calor;
- Sistema de alimentação (2), composto por um depósito e um parafuso sem fim de transporte de pellets, colocados sobre uma balança.
- Sistema de exaustão (3), correspondente a um ventilador e uma conduta de exaustão que passa por uma placa de orifício;
- Sistema de dissipação de calor (4), formado por um circuito de água circulada por uma bomba e arrefecida através de um ventiloconvector;
- Sistema de aquisição de dados e controlo da caldeira (5);
- Sistema de análise de gases (6), detalhado em pormenor na secção “Técnicas Experimentais”.

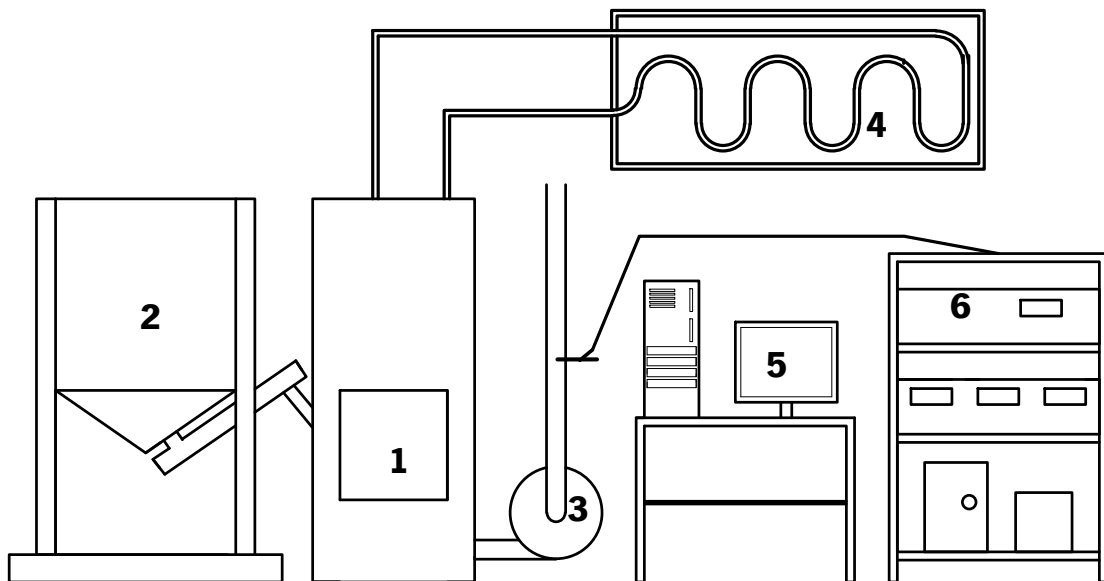


Figura 3.1 - Configuração da instalação experimental

3.2 CALDEIRA

A caldeira utilizada foi construída no DEM no âmbito de um projecto passado. Trata-se de uma caldeira de tubos de fumo em que os três principais constituintes – permutador de calor, câmara de combustão e queimador – estão agregados. Foi construída integralmente em chapa de aço e é desprovida de qualquer tipo de isolamento térmico. Na face frontal a caldeira foi provida de uma porta de acesso com um vidro translúcido que permite aceder à câmara de combustão e visualizar o processo de queima.



Figura 3.2 - Caldeira a pellets utilizada na instalação

3.2.1 Queimador

O queimador da caldeira é constituído por uma grelha fixa inclinada alimentada superiormente. O ar para combustão é dividido em primário e secundário. Por sua vez, o ar

primário é dividido em duas regiões de forma a possibilitar, juntamente com a inclinação da grelha, duas regiões de combustão.

A admissão é feita por tubagens com 21, 27mm para o ar primário e por uma tubagem com 39mm para o ar secundário. Em cada uma das tubagens estão acopladas tubeiras com tomadas de pressão estática que permitem medir o caudal de ar admitido e válvulas de acionamento manual que o permitem regular (Figura 3.3). Enquanto que o ar secundário é conduzido para uma zona acima da grelha através de um plenum, o primário circula em duas distintas cavidades que se encontram por baixo desta, sendo forçado a atravessar os orifícios existentes na grelha propositadamente realizados para o efeito (Figura 3.4).



Figura 3.3 - Admissão e tubeiras do queimador da caldeira utilizada na instalação.

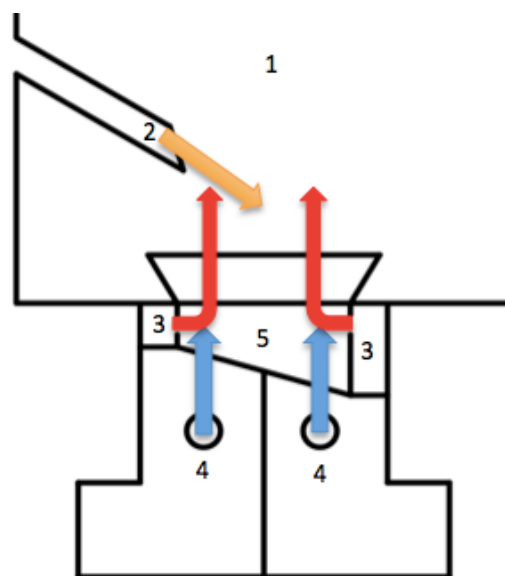


Figura 3.4 - Esquema do queimador da caldeira utilizada na instalação. 1) Câmara de combustão; 2) Condução de alimentação; 3) Entradas de ar secundário; 4) Entradas de ar primário; 5) Grelha

O queimador dispõe ainda de uma quarta entrada de ar, onde se encontra a resistência de ignição. Neste orifício circula ar que é aquecido pela resistência até cerca de 300 a 400°C provocando a ignição dos pellets. A quantidade de ar que o atravessa é considerável e não possui dispositivo que permita a sua leitura continuamente. Desta forma, assim que são atingidas condições de combustão estáveis, a resistência é desligada e este orifício é fechado para que sejam minimizadas as infiltrações não contabilizadas de ar.

3.2.2 Câmara de Combustão

A câmara de combustão (Figura 3.5) não se encontra fisicamente separada do queimador. A combustão dá-se desde o nível do queimador, na grelha, pelo que se pode considerar que parte deste faz também parte da câmara de combustão.



Figura 3.5 - Câmara de combustão da caldeira utilizada na instalação.

A sua geometria aproxima-se à de um paralelepípedo quadrangular com 280 mm de lado e 380 mm de altura. Na parte superior da câmara de combustão, à entrada dos tubos de fumo, estão localizados deflectores cujo objectivo é encaminhar os gases de forma mais homogénea para

os tubos do permutador e estabilizar a chama aumentando o tempo de residência dos gases na câmara de combustão.

A grelha da câmara de combustão possui uma secção transversal equivalente a um quadrado com 120mm de lado e é inclinada. As entradas de ar primário são feitas através de vários furos com 5mm de diâmetro na base enquanto que, o ar secundário é introduzido a cerca de 80mm acima da grelha através de 3 furos de 8mm em cada uma das 4 faces.

À excepção da zona frontal da câmara de combustão, onde se localiza a porta de acesso, todas as paredes da câmara de combustão estão banhadas por água funcionando, por isso, também como permutador de calor.

3.2.3 Permutador de Calor

O permutador de calor da caldeira em questão é do tipo tubos de fumo com duas passagens. A primeira passagem é realizada no sentido ascendente, a jusante da câmara de combustão, através de 10 tubagens de 40mm de diâmetro e a segunda no sentido descendente através de 6 tubagens com 45mm de diâmetro. A câmara de inversão localiza-se, por isso, no topo da caldeira. À saída, os gases são conduzidos a um colector de exaustão que é atravessado pelas condutas de admissão de ar permitindo o seu pré-aquecimento.

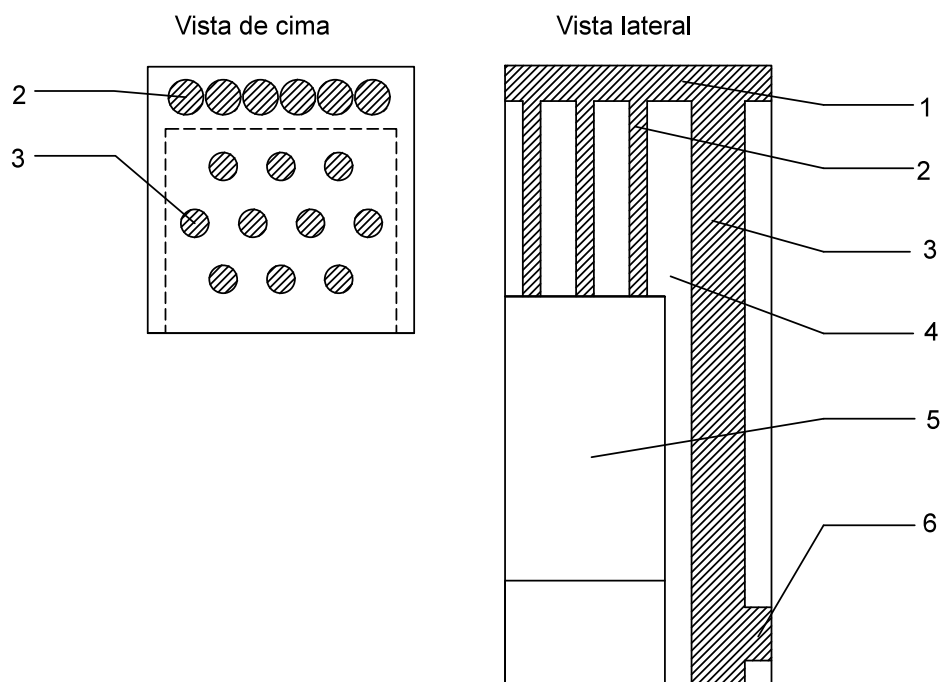


Figura 3.6 - Representação esquemática do permutador de calor da caldeira utilizada na instalação. 1) Câmara de inversão; 2) Tubos de fumo (primeira passagem); 3) Tubos de fumos (segunda passagem); 4) Água; 5)Câmara de combustão; 6) Colector de exaustão [15].

3.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação da caldeira é independente desta e é controlado pelo sistema de controlo e aquisição de dados. Este sistema, para além do reservatório de pellets construído em chapa e com cerca de 170 litros, possui um alimentador e uma balança digital que permite conhecer a massa de combustível. Os pellets abandonam o reservatório para o alimentador através de um orifício rectangular localizado na sua base.

O alimentador, disposto a 45°, é formado por um parafuso sem-fim de transporte envolto por uma conduta com 70 mm de diâmetro e accionado por um moto-reductor eléctrico através de uma união de veios. O débito médio do alimentador quando ligado continuamente é de cerca de 6,6 kg/h podendo assim alimentar caldeiras até cerca de 30 kW de potência. A balança digital e o seu funcionamento são descritos mais adiante.

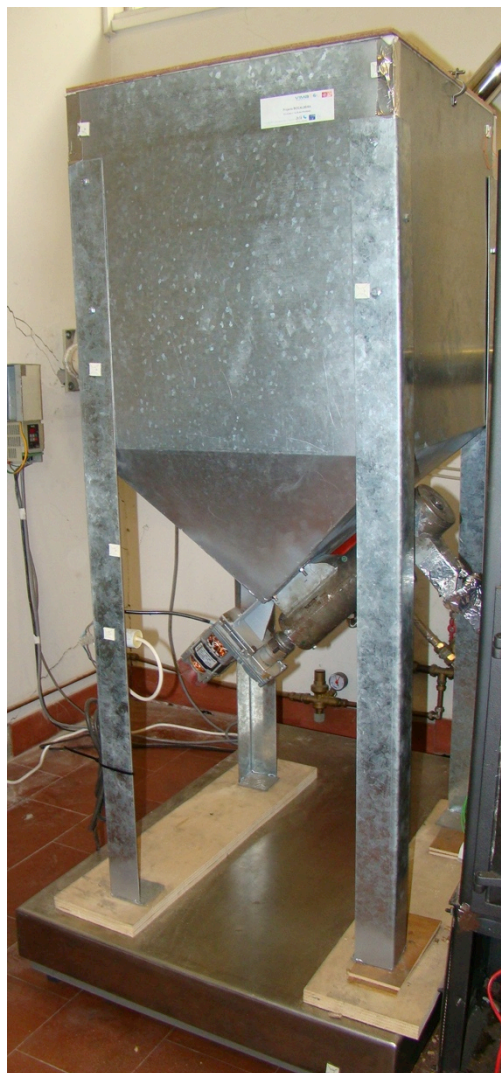


Figura 3.7 - Reservatório de pellets e sistema de alimentação

3.4 SISTEMA DE EXTRACÇÃO DE GASES

O sistema de extracção de gases é composto por uma conduta de 80 mm de diâmetro acoplada a um ventilador de 250W de potência (SODECA CMA-325-2T/R) localizado a jusante da caldeira e controlado por um variador de frequência que permite o controlo da sua velocidade. Deste modo, a extracção é feita em depressão na caldeira o que permite não só a exaustão dos gases de combustão como promove a entrada de ar para a câmara de combustão. A jusante do ventilador, esta extracção é feita em sobrepressão.

Existe ainda, na região em depressão na conduta, uma placa de orifício, dimensionada segundo a norma BS 1042, que permite conhecer o caudal de gases de exaustão.

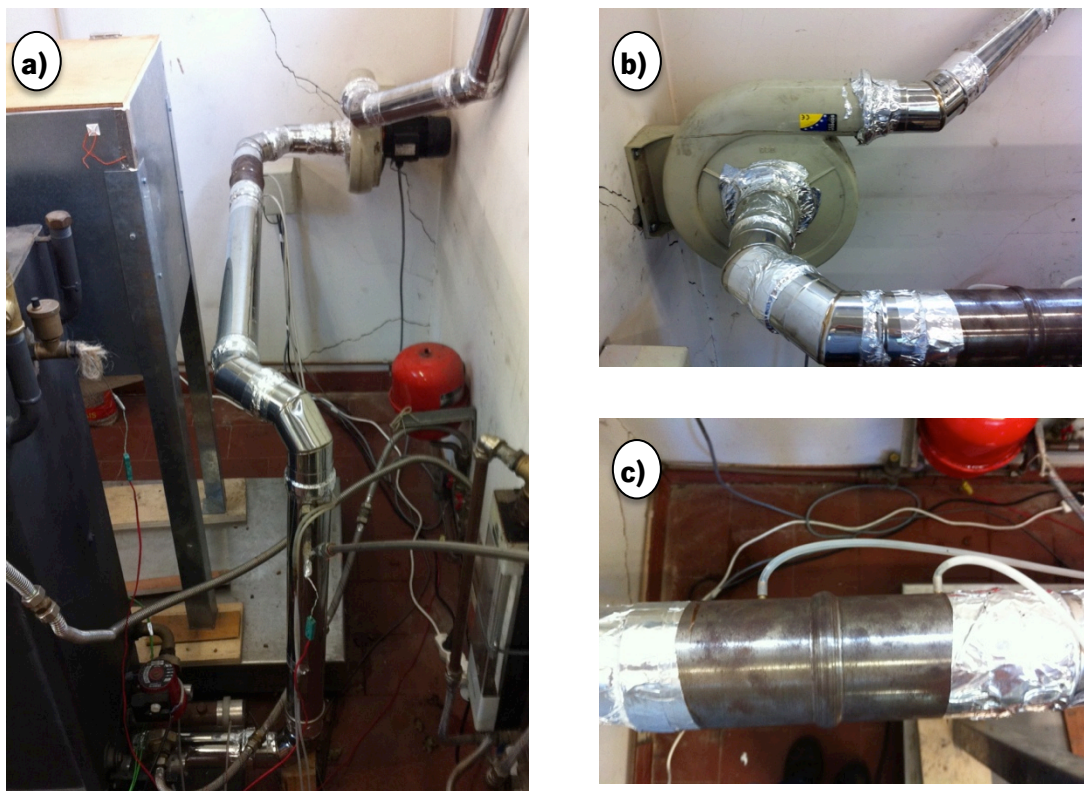


Figura 3.8 - Sistema de exaustão. a) Perspectiva da conduta de exaustão; b) Ventilador; c) Placa de orifício

3.5 SISTEMA DE DISSIPAÇÃO DE CALOR

Para dissipar o calor produzido pela caldeira, é utilizado um sistema de dissipação de calor composto por um circuito de água circulada por uma bomba, um ventiloconvector e um rotâmetro, conectados por uma tubagem em cobre com 18 mm de diâmetro.

A bomba de circulação permite que o fluido seja circulado pelo circuito da caldeira até ao ventiloconvector. O fabricante é a Roca e modelo da bomba é o PC-1025 debitando um caudal fixo de 450 l/h.

O ventiloconvector que permite a dissipação do calor gerado na caldeira é da marca Troia e é constituído por um permutador de calor ar/água de fluxos cruzados e por um ventilador que assegura que um caudal de ar constante atravessa o permutador.

O rotâmetro é utilizado com a finalidade de medir o caudal de água que circula na instalação através de uma leitura directa. A marca é a Fisher Controls e o modelo 200 permitindo medir caudais de água num intervalo de 200 a 1800 l/h (a 50°C).



Figura 3.9 - Componentes do sistema de dissipação de calor. Da esquerda para a direita: Bomba de circulação; Rotâmetro; Ventiloconvector

3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLO

O sistema de aquisição de dados e controlo da caldeira é composto por um controlador da *National Instruments*, um bastidor de relés e uma fonte de alimentação. A programação da caldeira foi realizada utilizando a linguagem LabVIEW.

O equipamento de controlo da *National Instruments* (Figura 3.10) é composto pelos vários elementos abaixo descritos:

- **Chassis:** De modelo PXI-1052, este funciona como placa mãe, onde todos os restantes módulos são conectados. Permite ligar até 4 módulos PXI e 8 módulos SCXI.

- **Controlador:** Funciona como um computador no sistema utilizando o sistema operativo Windows XP. O seu modelo é o PCI-8105 e é baseado num processador Intel Core Duo com 512 MB de RAM e um disco rígido de 60 GB.
- **Placa de aquisição:** Consiste numa placa de modelo PXI-6259 que permite a ligação de outras placas mais específicas: PCI, PCI Express, PXI, PXI Express e USB. Esta possui 32 entradas e 4 saídas analógicas a 16 bits e possui ainda 48 entradas/saídas digitais. Esta placa permite ainda ser desmultiplexada em vários módulos mais específicos, descritos abaixo. Após a desmultiplexação, esta placa permite ainda diversas funções, entre as quais emitir sinais de outputs de tensão variável 0-10V DC. Para que fosse possível a sua utilização directa foi conectada uma placa de terminais CB-68LP.
- **Módulo de termopares:** Consiste num módulo de modelo SCXI-1102 específico para leitura de termopares incorporando uma leitura de junta fria. Possui 32 canais de aquisição, um filtro passa baixo de 2 Hz por canal e uma protecção contra picos de tensão superiores a +/- 42 V. Este módulo é emparelhado com uma caixa de terminais apropriada, de modelo SCXI-1303.
- **Módulo de inputs analógicos:** Consiste numa placa de modelo SCXI-1100 que permite a entrada de 32 canais analógicos de +/- 10 V. As ligações são feitas numa placa de terminais específica que a esta é emparelhada, de modelo SCXI-1300.
- **Módulo de inputs digitais:** Este módulo é composto por uma placa de modelo SCXI-1162, permite a aquisição de 32 canais digitais e deve também ser emparelhada com a respectiva caixa de terminais de modelo SCXI-1326.
- **Módulo de outputs digitais:** De modelo SCXI-1163, esta placa permite a saída de 32 canais digitais com tensões entre 0 e 5V dependendo da alimentação que tem de ser proveniente de uma fonte exterior. Para serem feitas as ligações é mais uma vez necessária uma placa de terminais de modelo SCXI-1326.

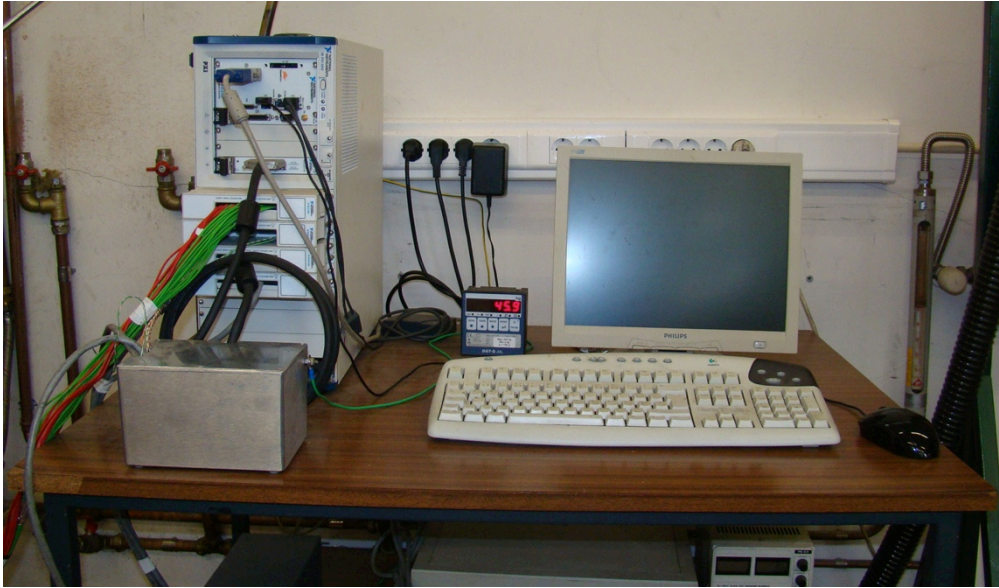


Figura 3.10 - Sistema de aquisição de dados e controlo da *National Instruments*

O bastidor de relés (Figura 3.11) permite alimentar separadamente os vários dispositivos eléctricos que funcionam com uma tensão de 230V AC dos dispositivos de controlo que funcionam com uma tensão de 5V DC. Dado que, os relés são activados através de uma tensão de 24V DC e o sistema de controlo da *National Instruments* funciona com tensões de 5V DC, a caixa de relés inclui também incorporado um circuito de transformação de tensão de 5V DC para 24V DC.



Figura 3.11 - Bastidor de relés.

A programação do sistema define que um dispositivo eléctrico se deve ligar quando deixa de ser estabelecida uma tensão de 5V DC no módulo de output digital que é exteriormente alimentado por uma fonte eléctrica com a mesma tensão. Quando isto ocorre, deixa de ser estabelecida a tensão de 5V DC à caixa de relés e, conseqüentemente, deixa de ser estabelecida uma tensão de 24V DC, também alimentada pela mesma fonte, ao respectivo relé a controlar. Nesta altura, o relé fecha o circuito permitindo a passagem de 230V DC para o dispositivo eléctrico a accionar.

A fonte de alimentação utilizada no sistema (Figura 3.12) possui duas saídas directas de 5 e 12V DC e uma saída ajustável, neste caso regulada para 24V DC. Esta fonte alimenta não só a placa de output digital com 5V DC e a caixa de relés com 24V DC, mas também os sensores de pressão utilizados nas tubeiras e na placa de orifício que necessitam de 5V DC de alimentação.

O controlo da velocidade do ventilador foi feito com recurso a um variador de frequência programável (Figura 3.13). Este variador, de marca NAIS, possui uma entrada digital 0/5V DC que corresponde à ordem de ON-OFF e foi conectada à placa de output digital SCXI-1163. Para além disso, possui uma entrada variável de 0 a 10V DC que permite a regulação da frequência do motor. Por sua vez, esta entrada foi conectada à saída variável 0-10V DC disponibilizada na placa de aquisição PXI-6259 através da placa de terminais CB-68LP.



Figura 3.12 - Fonte de alimentação.



Figura 3.13 - Variador de frequência.

3.6.1 LabVIEW

O LabVIEW é uma linguagem de programação criada pela *National Instruments* que difere das comuns por ser representada graficamente através de ícones e não por linhas de código para a criação de aplicações. Este facto permite uma melhor compreensão e facilidade de trabalho para aqueles que não dispõem de conhecimentos profundos no campo da programação.

Para além disso, a sua lógica baseia-se num princípio de fluxo de dados que são tratados e manipulados através de blocos pré-definidos de funções primárias, que podem ser editadas, em simultâneo com ordens de saída. Esta lógica confere a esta linguagem aptidões óptimas para efeitos de aquisição e tratamento de dados bem como controlo e automação.

A aplicação desenvolvida para a instalação experimental permite adquirir, manipular, registar e exportar os dados recebidos dos diversos transdutores e dos analisadores. Por outro lado, a aplicação permite também controlar a caldeira de uma forma completamente definida pelo utilizador – modo manual – ou através de sinais recebidos pelos transdutores, nomeadamente os de temperatura – modo automático – como será abordado mais adiante.

A interface para com o utilizador é simples e permite definir os vários parâmetros de funcionamento da caldeira, assim como, definir o início e fim dos ensaios, taxas de aquisição, tipos de termopares e respectivos canais e seleccionar os canais analógicos a adquirir, entre outros. Esta permite ainda, de uma forma muito útil, visualizar e monitorizar graficamente e em tempo real as

concentrações de espécies químicas nos gases de exaustão e temperaturas, assim como, os caudais de gases medidos ao nível das tubeiras e placa de orifício. A Figura 3.14 mostra o aspecto da interface com o utilizador.

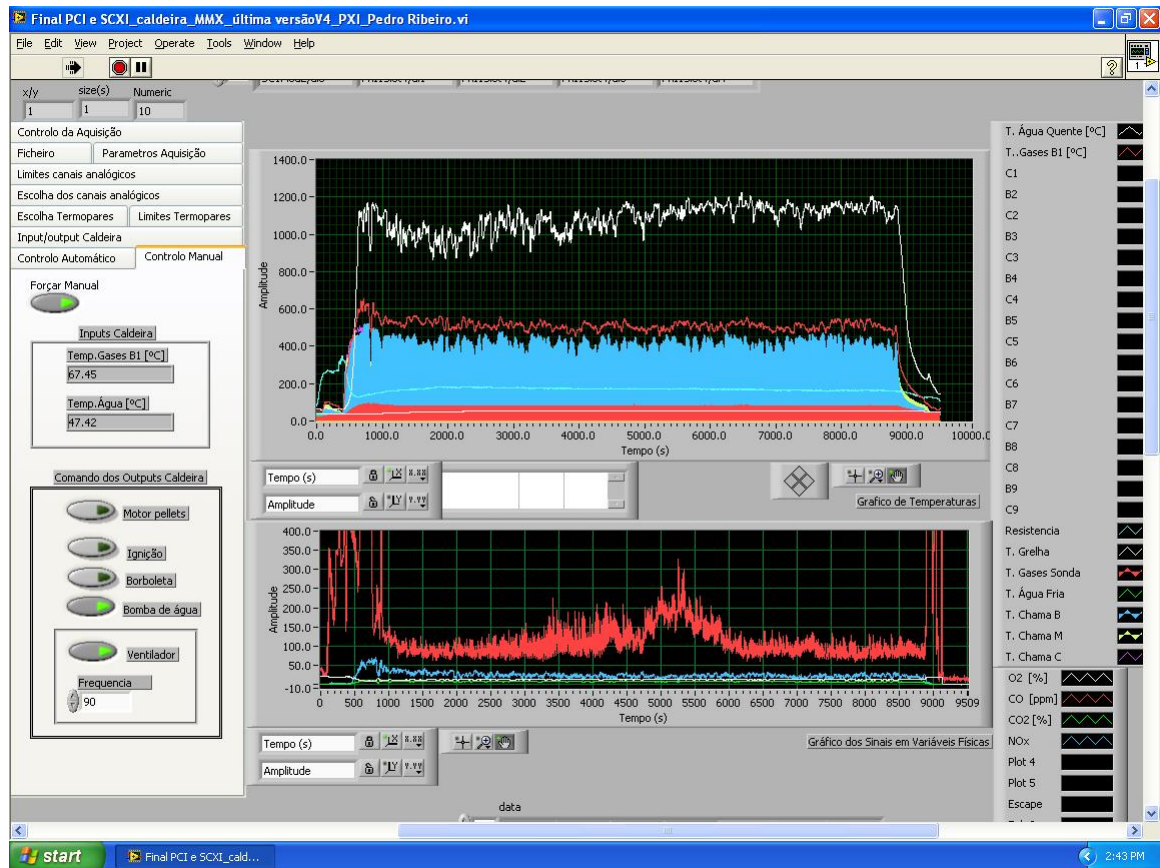


Figura 3.14 - Interface gráfica da aplicação em LabVIEW

3.7 MELHORIAS À INSTALAÇÃO

A ligação simultânea dos elementos de potência, controlo e medida no circuito eléctrico do laboratório criou problemas de ruído e interferências electro-magnéticas no sistema de controlo. Foram também detectadas bruscas variações da tensão de saída nos sensores de pressão e analisador de gases, sempre que era accionado o ventilador. Deste modo, tornaram-se necessárias alterações à forma como se fez a distribuição eléctrica.

Outro problema encontrado foi que o caudal de gases de exaustão medido ao nível da placa de orifício, já depois da caldeira, era sempre superior ao caudal medido à entrada pelas tubeiras. Este facto sugeria a existência de infiltrações para a câmara de combustão que funcionavam como ar secundário na combustão. Foram, por isso, tomadas precauções para que fossem minimizadas estas infiltrações e para que a sua contabilização fosse possível.

3.7.1 Eliminação de Interferências

Devido às interferências anteriormente descritas, foi necessária a criação de duas linhas eléctricas distintas. Os elementos de potência foram ligados normalmente à rede e foi criado um novo circuito com disjuntor independente no quadro eléctrico e com uma tomada de terra com a finalidade de ligar todos os elementos sensíveis a interferências (Figura 3.15).

Nesta nova linha eléctrica conectou-se a fonte de alimentação, o sistema de aquisição e controlo e o analisador de gases. A caixa de relés, bombas de vácuo e o ventilador de exaustão, este último o causador maioritário das interferências na rede, foram ligados fora desta linha. Os condutores de intercomunicação entre os sensores de pressão e o sistema de aquisição foram também substituídos por condutores isolados com malha metálica que foi ligada à terra.

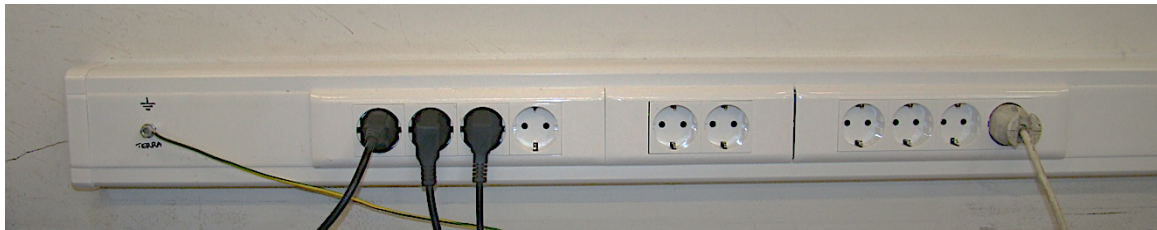


Figura 3.15 - Circuito eléctrico para equipamentos sensíveis a interferências.

Para além disto, foram construídas protecções para os elementos sensíveis e para os causadores de interferências. Para os últimos, foram criadas protecções que consistiram no enclausuramento destes elementos através de estruturas metálicas ligadas à terra. Deste modo, foi construída uma caixa em chapa com ligação à terra que foi colocada sobre o variador de frequência do ventilador (Figura 3.16). O invólucro do ventilador é construído em metal evitando, por isso, demais precauções.

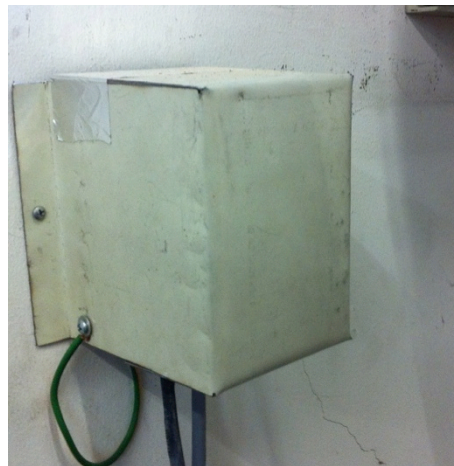


Figura 3.16 - Protecção metálica para o variador de frequência.

No que diz respeito aos elementos sensíveis, foram adaptadas caixas metálicas para alojar os sensores de pressão e a placa de terminais CB-68 LP, sendo cada uma delas ligada à terra por meio de um terminal disponibilizado na linha de alimentação sensível (Figura 3.17).

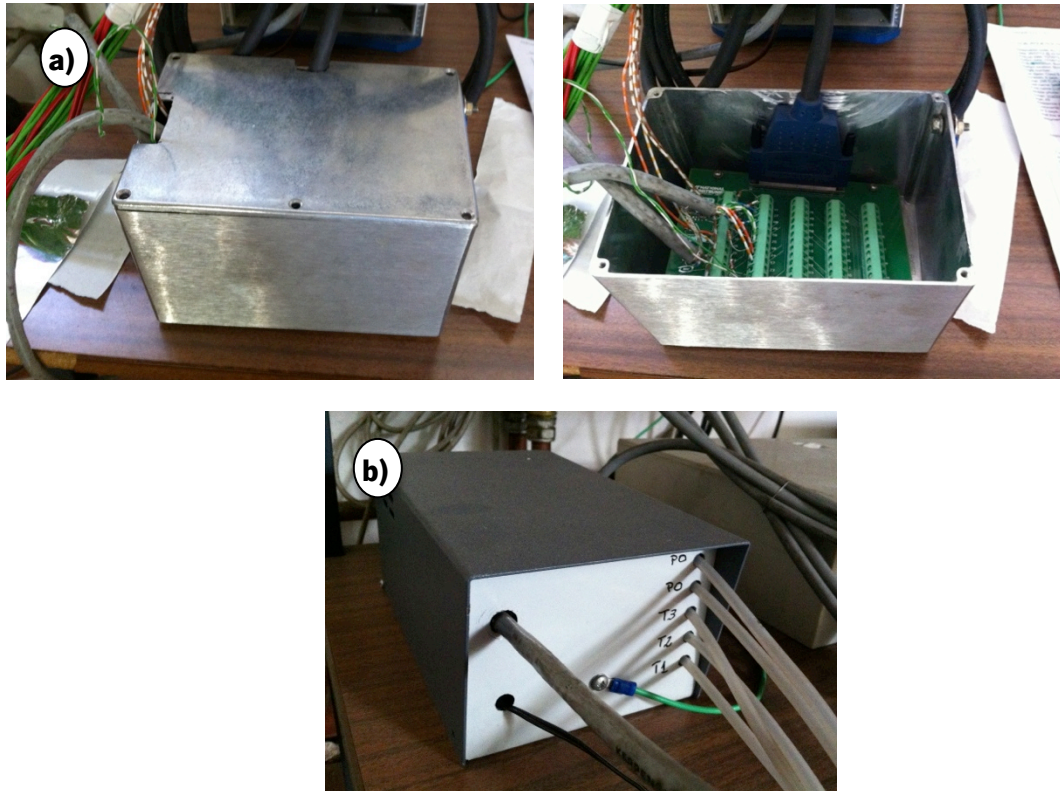


Figura 3.17 - Protecções metálicas para os elementos sensíveis. a) Placa de terminais CB-68 LP; b) Placa de sensores de pressão

3.7.2 Minimização de Infiltrações de Ar

A principal fonte de infiltrações, detectada à vista pelo deslocamento da chama na caldeira que se podia observar pela porta de acesso, correspondia ao orifício através do qual é realizada a alimentação de pellets para a câmara de combustão. Para minimizar as infiltrações desta fonte foi selada a junção do reservatório de pellets com a caldeira e construído um tampo para o reservatório com a finalidade de impedir uma forte circulação de ar através deste (Figura 3.18). Foram ainda vedadas todas as juntas e orifícios pelos quais se podia suspeitar a entrada de ar.

Outra fonte de infiltrações detectada foi o orifício no qual se encontra a resistência de ignição. Este era, até então, obstruído com uma chapa que ainda assim pouca influência tinha na estanquicidade da caldeira. Por isso, logo após ter ocorrido ignição e ter sido desligada a resistência, optou-se por tapar este orifício com fita cola de alumínio.



Figura 3.18 - Tampo de vedação do reservatório de pellets

Verificou-se que a porta de acesso possuía também pouca estanquicidade pelo que se vedaram as juntas desta com o vidro com massa refractária minimizando as entradas de ar. Ainda assim, após ser atingida uma combustão estável, a porta de acesso foi vedada com fita de alumínio.

Nas tampas do colector de gases de exaustão ocorriam também infiltrações de ar que, embora não afectassem o processo de combustão por estarem localizadas após a câmara de combustão, condicionavam a leitura correcta dos teores de oxigénio na conduta de exaustão, pelo que foram, também, alvo de vedação com silicone.

Ligada a instalação com as infiltrações colmatadas, retirou-se o reservatório de pellets e vedou-se a entrada para alimentação da caldeira. Foram então medidos os caudais de ar à entrada e à saída, tendo sido registado um valor médio aproximado entre ambos com um desvio de apenas 1% (Figura 3.19). Com o reservatório já alterado para a minimização de infiltrações, este foi colocado na instalação tendo sido realizadas novas medições. Foi ainda assim apurada a existência de infiltrações num valor médio de cerca de 10% relativamente ao caudal de ar medido na placa de orifício (Figura 3.19). Estas infiltrações verificaram-se ao nível dos elementos mecânicos do parafuso de transporte de pellets do reservatório não tendo sido possível a sua eliminação.

Deve ainda ser notado que a tensão de saída dos sensores de pressão oscila para condições estáveis de caudal de ar nas tubeiras, o que leva à perda de precisão da medição do caudal, que será abordada adiante. Essas diferenças estão também representadas na Figura 3.19.

Para f=30Hz Sem Reservatório				
	Delta V	Delta P	Q teorico	Diferenças
Inferior	2,46	29,87	8,45	
Medio	2,47	31,17	8,63	0,53
Superior	2,49	33,76	8,98	
Inferior	2,63	48,50	17,79	
Medio	2,65	50,99	18,24	0,89
Superior	2,67	53,48	18,68	
Inferior	2,47	28,56	27,59	
Medio	2,49	31,05	28,77	1,75
Superior	2,5	32,30	29,34	
Inferior	2,41	47,55	54,86	
Medio	2,42	50,13	56,33	2,89
Superior	2,43	52,70	57,76	
	Q in	Med	55,64	
		Delta max	3,17	5,7%
	Q out	Delta max	2,89	5,1%
		Min	-2,14	-4%
Diferença Qout-Qin		Med	0,69	1%
		Max	3,93	7%

Para f=30Hz Com Reservatório				
	Delta V	Delta P	Q teorico	Diferenças
Inferior	2,42	24,59	7,66	
Medio	2,44	27,25	8,07	0,78
Superior	2,46	29,87	8,45	
Inferior	2,56	39,78	16,11	
Medio	2,59	43,51	16,85	0,98
Superior	2,6	44,76	17,09	
Inferior	2,43	23,58	25,07	
Medio	2,44	24,82	25,72	1,91
Superior	2,46	27,32	26,99	
Inferior	2,41	47,55	54,86	
Medio	2,42	50,13	56,33	2,89
Superior	2,43	52,70	57,76	
	Q in	Med	50,64	
		Delta max	3,68	7,3%
	Q out	Delta max	2,89	5,1%
		Min	2,34	4%
Diferença Qout-Qin		Med	5,69	10%
		Max	8,91	16%

Figura 3.19 - Comparação de caudais para determinação de infiltrações. Esq.: Sem reservatório; Dir.: Com reservatório.

3.8 FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA

A aplicação em LabVIEW disponível para controlo da caldeira permite a selecção de dois modos de funcionamento: manual e automático.

O modo de controlo manual está disponível essencialmente para testes que se entendam necessários efectuar ou para definir de uma forma prévia as condições de funcionamento a serem aplicadas no modo automático. Este permite o acionamento manual do ventilador e o controlo da sua velocidade (através da variação da frequência, de 0 a 60 Hz), o acionamento da bomba de circulação da água de arrefecimento, do motor do alimentador e da resistência de ignição. Neste modo é também feita a aquisição de todos os canais que se pretenda.

Ocorrida alguma falha no normal funcionamento da caldeira, é possível passar do modo automático para o manual e ligar ou desligar qualquer um dos equipamentos controlados pela aplicação. Desta forma, o modo manual funciona também como modo de emergência.

O funcionamento normal da caldeira é definido através do modo de controlo automático. Neste, todos os equipamentos são accionados de forma automática em função de parâmetros definidos pelo utilizador e das condições de funcionamento que se verificam, à excepção das válvulas de regulação de ar primário e secundário, localizadas ao nível das condutas de admissão, pois são de accionamento manual.

O modo de funcionamento automático pode ser dividido em duas etapas distintas: a fase de arranque e a fase estacionária. Assim que a caldeira é posta em funcionamento, a primeira fase é, como o nome indica, a fase de arranque. Esta envolve um conjunto de eventos, pela seguinte ordem:

1. Abertura manual das tomadas de ar primário e secundário;
2. Ligação do alimentador durante o tempo que corresponde à massa de combustível necessária na grelha para iniciar a combustão. O tempo foi definido experimentalmente e corresponde a 95 s;
3. Ligação da resistência de ignição e ventilador a uma velocidade definida pelo utilizador, que deve ser baixa para que o ar que atravessa a grelha possua temperatura suficiente para promover a ignição;
4. Iniciada a combustão, a temperatura nos tubos de fumo aumenta até uma temperatura tal ($T_{\text{alimentação}}$, definida pelo utilizador e determinada experimentalmente) que se dá início aos ciclos de alimentação de combustível;
5. Assim que os gases atinjam a temperatura $T_{\text{ignição}}$, também definida pelo utilizador e determinada experimentalmente, é desligada a resistência de ignição e o ventilador passa a rodar à velocidade definida pelo utilizador correspondente ao nível de potência pretendido. Este evento marca a passagem para a fase de controlo estacionária.

Os parâmetros de controlo correspondentes à fase de arranque que devem ser definidos pelo utilizador são então:

- Tempo de alimentação inicial;
- A temperatura para iniciar o ciclo normal de alimentação, $T_{\text{alimentação}}$;
- A temperatura para desligar a ignição, $T_{\text{ignição}}$;
- Velocidade do ventilador na fase de arranque.

Já na fase estacionária, o utilizador regula as tomadas de ar primário e secundário para o pretendido e cobre o orifício da resistência, o ventilador toma a velocidade definida pelo utilizador, é iniciado o ciclo de alimentação e é ligada a bomba de circulação.

A velocidade do ventilador é definida em função da potência e excesso de ar e mantém-se constante ao longo do teste. Esta velocidade foi encontrada através da variação da frequência do ventilador até que nas tubeiras se registassem os caudais de ar primário (tubeiras 1 e 3) e secundário (tubeira 2) pretendidos. A definição destes caudais foi feita da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{Tubeira\ 2} = \left(\frac{AFR \cdot \dot{m}_{comb} \cdot \lambda}{\rho_{ar}} \right) (1 - \%AP) \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_{Tubeira\ 1} = \dot{Q}_{Tubeira\ 3} = \left(\frac{AFR \cdot \dot{m}_{comb} \cdot \lambda}{\rho_{ar}} \right) \cdot \frac{\%AP}{2} \quad (3.2)$$

Os ciclos de alimentação correspondem aos tempos de funcionamento e paragem do alimentador que equivalem ao caudal de combustível pretendido. O cálculo dos tempos de paragem é feito conhecendo previamente o débito do alimentador, d , e o caudal de combustível (função da potência), para um determinado tempo de funcionamento, através da expressão:

$$T_{OFF} = T_{ON} \cdot \left(1 + \frac{d}{\dot{m}_{comb}} \right) \quad (3.3)$$

Foram testados os ciclos que já haviam sido previamente estudados para a instalação experimental, indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tempos de alimentação previamente definidos em função da potência aproximada. [15]

Potência [kW]	Tempo [s]	
	Ligado	Desligado
10	13	19,5
12	13	14,1
16	13	7,3
20	13	5,3

No entanto, para níveis de potência baixos, verificaram-se fenómenos de extinção de chama e combustão instável, nomeadamente à potência ensaiada de 12 kW. Esses fenómenos estão patentes na Figura 3.20 onde podem ser observados picos na concentração de CO, que correspondem aos períodos de alimentação em que a chama já se encontrava ténue, levando à sua quase extinção e conseqüente estabelecimento de uma nova combustão caracterizada por

elevadas emissões e baixa eficiência. Desta forma, optou-se por definir tempos de paragem e funcionamento mais curtos, enunciados na Tabela 3.2, de forma a contrariar o abatimento de chama que se verificava.

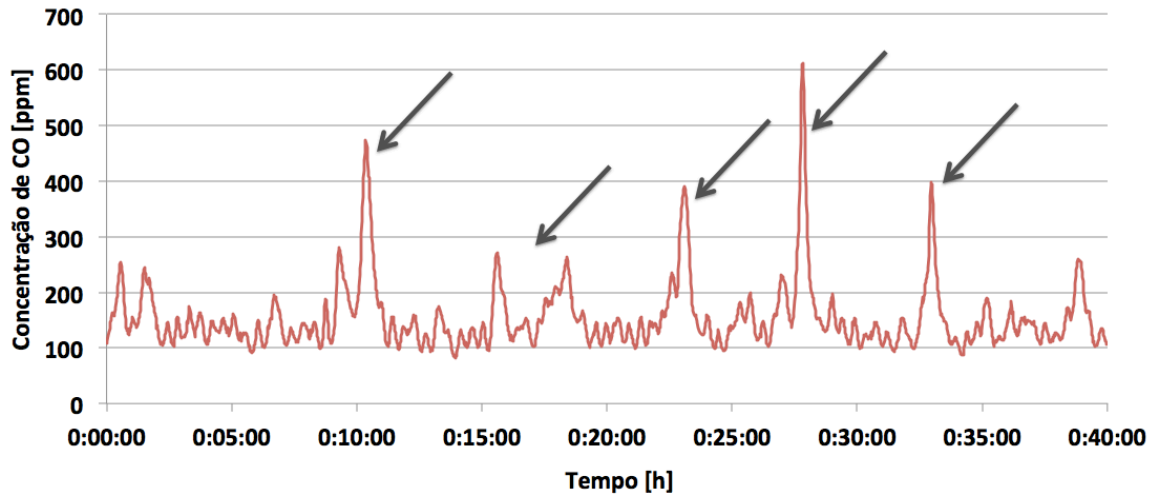


Figura 3.20 - Picos na concentração de CO durante ensaio.

Tabela 3.2 – Tempos de alimentação utilizados para colmatar fenómenos de abatimento de chama.

Potência [kW]	Tempo [s]	
	Ligado	Desligado
12	9	17

Sintetizando, os parâmetros de funcionamento a ser introduzidos no programa e que devem ser definidos pelo utilizador na fase estacionária são:

- Velocidade do ventilador;
- Tempos de funcionamento e paragem do alimentador.

Em qualquer um dos modos podem ser alterados os parâmetros de funcionamento com o programa a decorrer e é disponibilizada a leitura das várias variáveis em tempo real.

4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Para avaliar e monitorizar o funcionamento da caldeira foram utilizadas diversas técnicas experimentais, como sendo: i) medição do caudal de gases; ii) medição de temperatura; iii) pesagem de combustível e iv) análise de gases. Este capítulo surge assim com o propósito de descrever os princípios inerentes a cada técnica experimental e explicar de que forma foram aplicados na instalação.

4.1 MEDIÇÃO DO CAUDAL DE GASES

A medição do caudal de gases tornou-se necessária para quantificar os excessos de ar e estabelecer as relações pretendidas de ar primário/secundário na caldeira. Desta forma, como descrito anteriormente, a instalação foi dotada de três tubeiras na admissão e uma placa de orifício no exaustão, todos possuindo tomadas de pressão estática. O conhecimento da pressão estática nestes elementos permite determinar o caudal de gases que as atravessa, como explicado mais adiante.

4.1.1 Medição da Pressão

Para medição da pressão foram usados transdutores de pressão piezorresistivos da marca Honeywell. Estes sensores possuem diafragmas revestidos por uma camada muito fina de silício em forma de ponte de Wheatstone (Figura 4.1). O silício permite variar a sua resistência eléctrica à medida que lhe é aplicado um esforço mecânico que provoca uma deformação no domínio elástico. Alimentando o sensor com uma determinada tensão eléctrica e aplicando uma determinada pressão no diafragma, a resistência eléctrica variável do silício provoca uma queda de tensão que é proporcional à pressão aplicada.

Estes sensores medem pressões diferenciais, o que significa que possuem duas tomadas de pressão, uma em cada face do diafragma. Por isso, e sabendo que a tensão de excitação destes sensores é de 5V DC, se ambas as tomadas de pressão se encontrarem à pressão atmosférica a tensão de saída dos sensores é de 2,25V DC. A pressão máxima admissível corresponde a uma tensão de 4,25V DC e a mínima de 0,25V DC. Por isso, existem vários modelos de sensores com diferentes resoluções que devem ser seleccionados adequadamente para a grandeza de pressões que se pretende medir.

Para as tubeiras, onde foram registadas pressões estáticas máximas entre 140 e 190 Pa, foram utilizados sensores de modelo DC001NDC4 adequados para pressões até 1''H₂O, ou seja, cerca de 250 Pa. No caso da placa de orifício, o diferencial de pressões ascendeu a 430 Pa pelo que excedeu a pressão máxima admissível pelos sensores atrás referidos. Desta forma, foi usado um sensor de modelo DC005NDC4 cuja pressão máxima corresponde a 5''H₂O, ou seja, cerca de 1245 Pa.

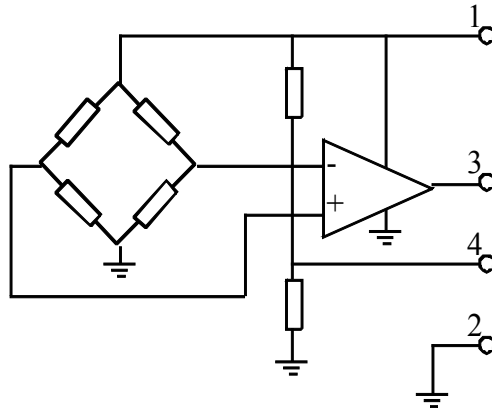


Figura 4.1 - Circuito equivalente dos sensores de pressão Honeywell. 1 – Tensão de excitação 5V DC, 2 – Terra, 3 – Tensão de saída, 4 – Conector para o fabricante

Como a informação dos sensores se encontra em termos de tensão, foi necessária a determinação de uma curva de calibração que relacionasse a tensão de saída com a pressão medida. Para tal, utilizou-se um micromanómetro da Van Essen (Figura 4.2) de forma a conhecer a pressão, e seguiu-se o procedimento descrito no Anexo B obtendo-se as curvas de calibração à frente apresentadas.

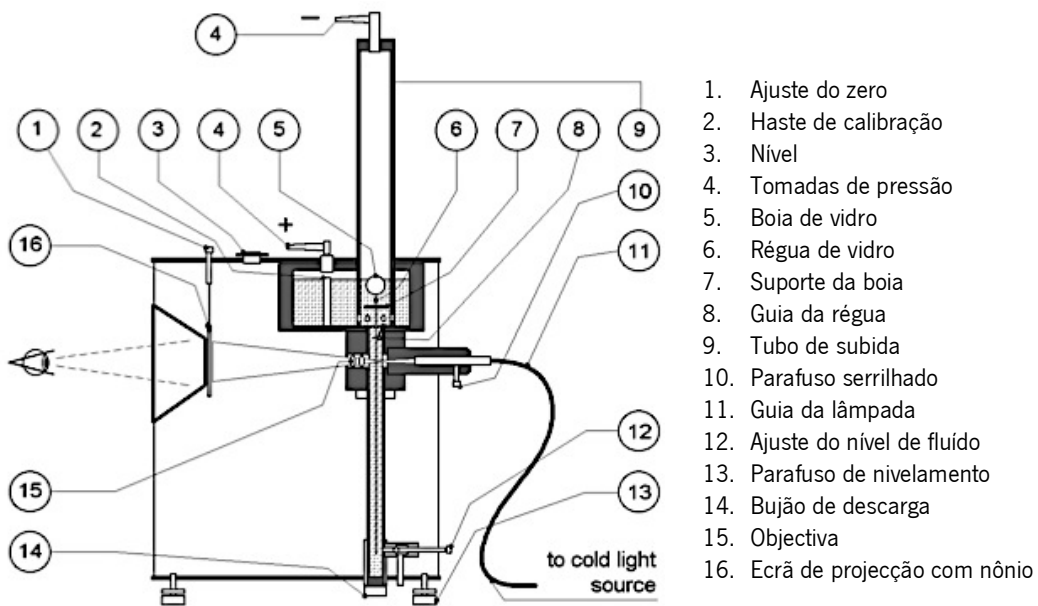


Figura 4.2 - Micromanómetro Betz da Van Essen Instruments [28]

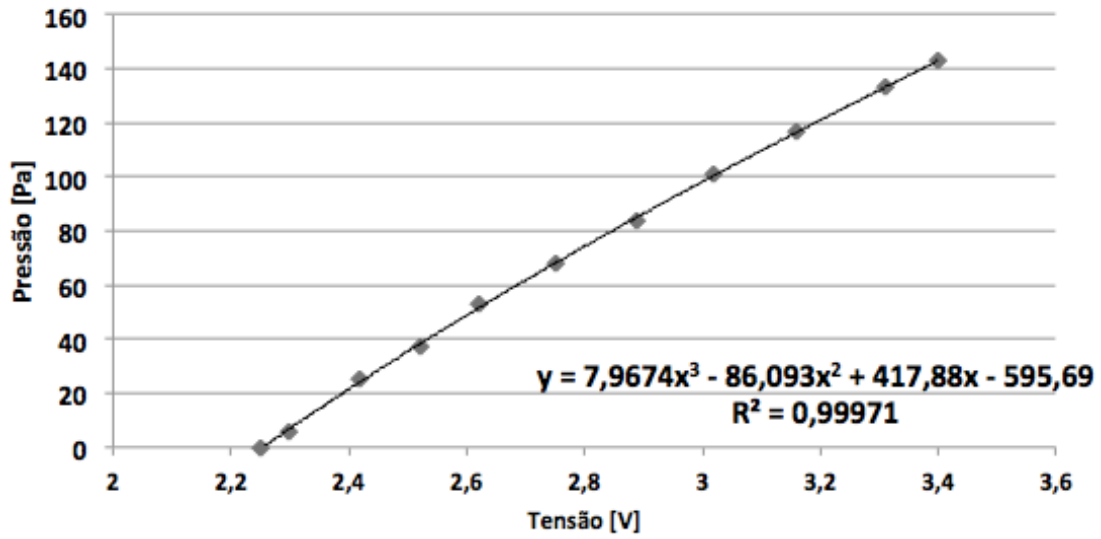


Figura 4.3 - Curva de calibração do sensor da tubeira 1

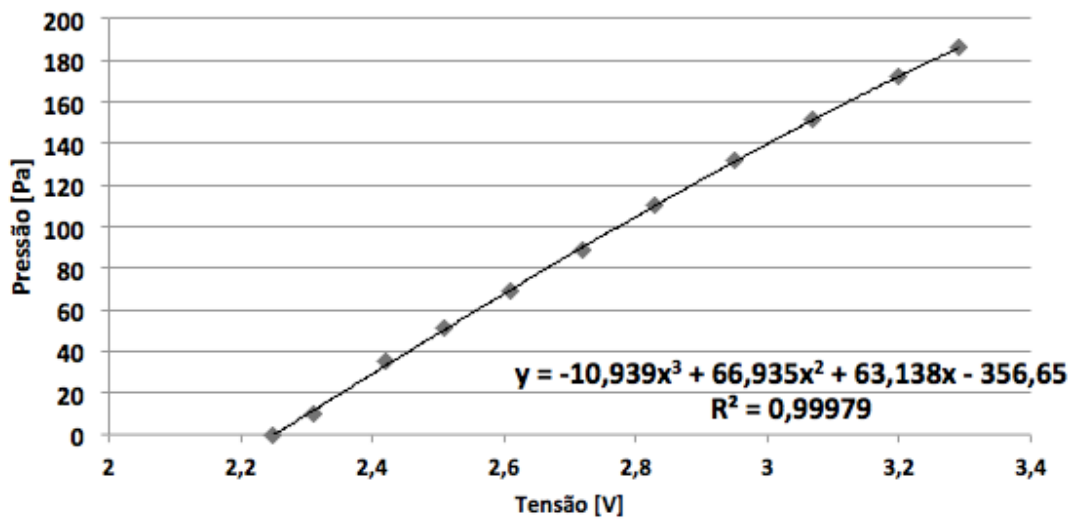


Figura 4.4 - Curva de calibração do sensor da tubeira 2

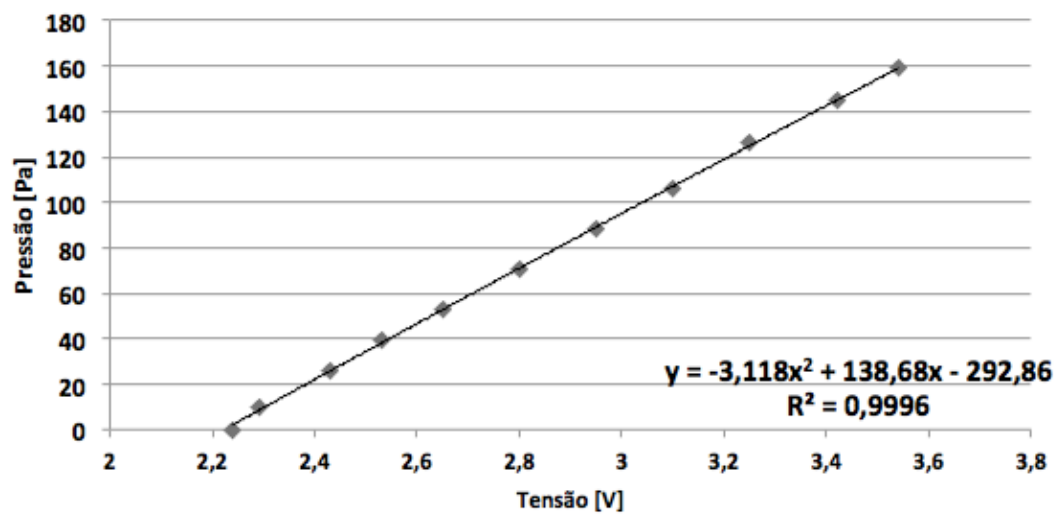


Figura 4.5 - Curva de calibração do sensor da tubeira 3

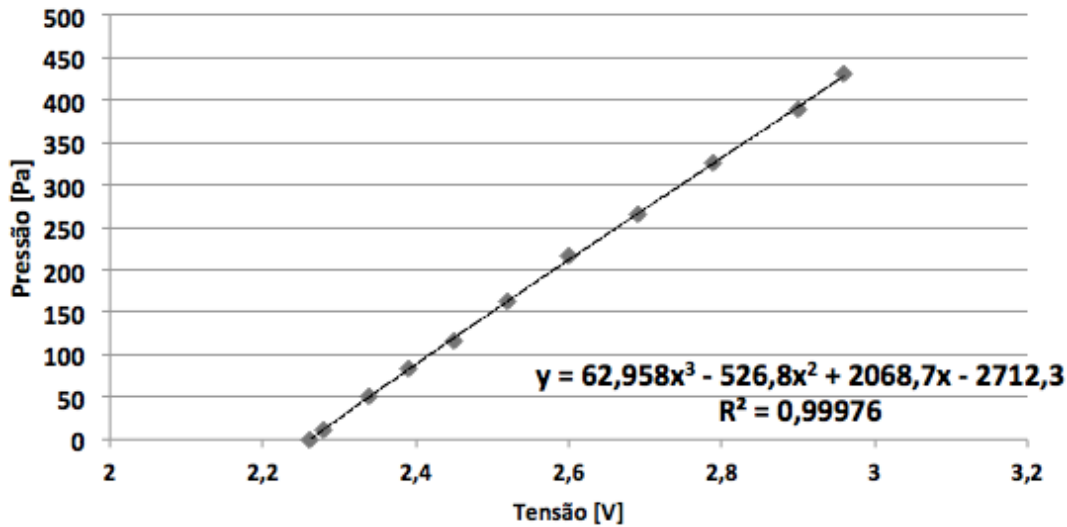


Figura 4.6 - Curva de calibração do sensor da placa de orifício

4.1.2 Determinação do Caudal de Gases

Como já referido, para ser conhecido o caudal de ar admitido pela caldeira recorreu-se ao uso de tubeiras nas entradas de ar. Uma tubeira consiste numa conduta com secção variável de tal modo que o seu perfil, neste caso elíptico, permite o aumento da velocidade do fluido de forma gradual minimizando o crescimento da camada limite no escoamento. O diâmetro interior adoptado para as tubeiras corresponde ao diâmetro interior de cada conduta onde foram aplicadas. Nestas é medida a pressão estática numa zona bem definida e, com essa, é calculado o caudal de ar que a atravessa.

O controlo de caudal de gases na chaminé foi feito com recurso a uma placa de orifício, que consiste num disco com um furo central de diâmetro conhecido, concêntrico com a conduta e saída em ângulo que provoca uma perda de carga passível de ser medida através de duas tomadas de pressão disponibilizadas antes e depois do orifício. Com essas, pode assim ser determinado o caudal de gases que nela circula.

4.1.2.1 Determinação do Caudal nas Tubeiras

A equação de Bernoulli, que relaciona variações de pressão com variações de velocidade e elevação de um escoamento ao longo de uma tubagem, exprime que:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} + g \cdot z = \text{constante} \quad (4.1)$$

A aplicação desta equação a uma tubeira (Figura 4.7) para conhecer a velocidade do fluido faz-se igualando as condições após a sua contracção (condições interiores, com índice i) às condições à entrada da tubeira que correspondem às do ambiente exterior (condições exteriores, com índice e):

$$\frac{p_e}{\rho} + \frac{U_e^2}{2} + g \cdot z_e = \frac{p_i}{\rho} + \frac{U_i^2}{2} + g \cdot z_i \quad (4.2)$$

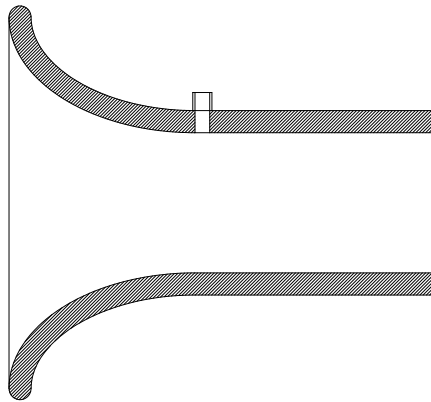


Figura 4.7 - Vista em corte de uma tubeira com tomada de pressão estática.

A cota mantém-se pelo que:

$$z_e = z_i \quad (4.3)$$

Por outro lado, a velocidade e pressão do ar no exterior da tubeira são nulas, fazendo desaparecer os termos da pressão estática e dinâmica da equação. Desta forma, temos que:

$$\frac{U_i^2}{2} = -\frac{p_i}{\rho} z_e = z_i \quad (4.4)$$

Assim sendo, temos que a velocidade no ponto de tomada de pressão estática na tubeira é dado por:

$$U_i = \sqrt{\frac{-2p_i}{\rho}} \quad (4.5)$$

Tendo em conta que a pressão estática na tubeira é, na verdade, uma depressão, assume-se o seu valor como uma variação em relação à pressão atmosférica, Δp . Desta forma, é determinada a velocidade do fluido pela expressão:

$$U_i = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.6)$$

Conhecendo a velocidade do escoamento e as dimensões da tubeira, é possível calcular o caudal volúmico de ar pela expressão:

$$\dot{Q}_T = U_i \cdot A_i \quad (4.7)$$

O caudal mássico pode ser expresso multiplicando o anterior pela massa volúmica do gás à respectiva temperatura:

$$\dot{m}_T = \rho \cdot U_i \cdot A_i \quad (4.8)$$

Apesar das tubeiras minimizarem o aparecimento da camada limite no escoamento, a sua eficácia não é total pelo que se torna necessário aplicar um coeficiente para o corrigir, conhecido como coeficiente de descarga, C , dependente do número de Reynolds. Este coeficiente havia já sido previamente determinado utilizando a tecnologia LDA (*Laser Doppler Anemometry*) para cada tubeira. Sendo assim, o caudal mássico de ar ao nível das tubeiras determinou-se pela expressão:

$$\dot{m}_T = C \cdot \rho \cdot U_i \cdot A \quad (4.9)$$

Substituindo o termo U_i na equação (4.9):

$$\dot{m}_T = C \cdot \rho \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} A \quad (4.10)$$

4.1.2.2 Determinação do Caudal na Placa de Orifício

À semelhança das tubeiras, é também possível calcular a velocidade do escoamento numa placa de orifício pela aplicação da equação Bernoulli. A variação de cota é desprezável e desaparece também da equação. Existe, no entanto, velocidade de escoamento em ambos os pontos de medida. Então, considerando 1) o ponto a montante e 2) o ponto localizado a determinada distância a jusante do orifício que possui condições de velocidade e pressão

equivalentes às encontradas no ponto exacto do orifício (Figura 4.8), a equação toma a seguinte forma:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{U_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{U_2^2}{2} \quad (4.11)$$

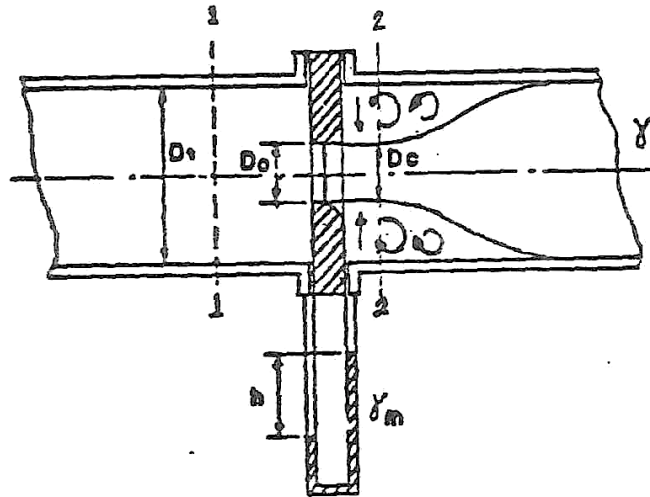


Figura 4.8 - Esquema da placa de orifício. [29]

Pelo que se pode reescrever em ordem à velocidade em qualquer um dos pontos. Se escolhermos o ponto a montante, a equação transforma-se em:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{U_2^2}{U_1^2} - 1 \right)}} \quad (4.12)$$

Conservada a massa, o caudal em ambos os pontos mantém-se:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Leftrightarrow \rho \cdot U_1 \cdot A = \rho \cdot U_2 \cdot A \quad (4.13)$$

Sendo a massa volúmica a mesma, e a área das secções $\pi \frac{D_1^2}{4}$ e $\pi \frac{D_2^2}{4}$ para a região 1 e para o orifício, respectivamente, é possível concluir que:

$$\frac{U_2^2}{U_1^2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \quad (4.14)$$

Assim sendo, a velocidade a montante pode ser definida por:

$$U_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right]}} \quad (4.15)$$

Conhecendo a velocidade no ponto, é possível então determinar o caudal pela expressão:

$$Q_p = U_1 \cdot A_1 \quad (4.16)$$

O caudal mássico é obtido também pela multiplicação do anterior pela massa volúmica do gás à respectiva temperatura:

$$\dot{m}_p = \rho \cdot U_1 \cdot A_1 \quad (4.17)$$

Da mesma forma que para as tubeiras e pelos mesmos motivos, a placa de orifício tinha sido previamente submetida ao LDA para ser determinado o coeficiente de descarga, sendo então dado o caudal por:

$$\dot{m}_p = C_p \cdot \rho \cdot U_1 \cdot A_1 = C_p \cdot \rho \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right]}} A_1 \quad (4.18)$$

Posto isto, é possível concluir que a medição de pressão através dos transdutores Honeywell está relacionada com a determinação do caudal de gases. O processo de determinação do caudal passou, então, pela medição da pressão estática nas tubeiras e placa de orifício cuja informação se encontrava em termos de tensão, que foi convertida em valores de pressão pela curva de calibração dos sensores e, em seguida, transformada em caudal através da curva de calibração das tubeiras e placa de orifício.

4.2 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

No presente trabalho experimental foram medidas temperaturas com recurso a termopares em diversos locais da instalação com diferentes finalidades, como sendo:

- Temperatura da água do circuito de dissipação de calor, à entrada e à saída da caldeira;
- Temperatura dos gases nos vários tubos de fumo da caldeira, junto à câmara de inversão e junto à câmara de combustão;

- Temperatura de exaustão dos gases ao nível da chaminé, na sonda de captação de gases para análise;
- Temperatura de grelha;
- Temperatura de chama em três pontos distintos;
- Temperatura da resistência de ignição.

O princípio de funcionamento dos termopares assenta no *Efeito Seebeck* que consiste na produção de uma tensão eléctrica quando se submetem duas junções de materiais condutores diferentes, A e B, em circuito fechado a diferentes temperaturas, T_1 e T_2 (Figura 4.9). A diferença de potencial que ocorre é proporcional à diferença de temperatura entre as junções. Conhecendo uma das temperaturas – a junta fria – é possível determinar a temperatura a que está submetida a outra junção.

A placa SCXI-1102 usada no sistema de aquisição de dados, específica para termopares, inclui já um termistor que permite ler a temperatura da junta fria e fazer automaticamente a compensação.

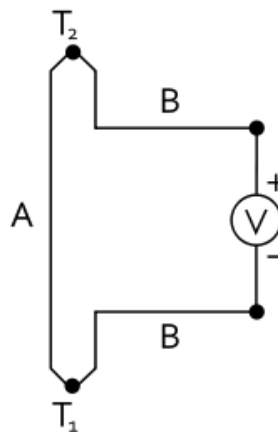


Figura 4.9 - Esquema exemplificativo do Efeito de Seebeck

O par de materiais com que são construídos os termopares é normalmente normalizado e é bem conhecida a relação entre a temperatura e a tensão produzida. Existem várias combinações de pares, denominados de *tipos*, de acordo com a gama de temperaturas a ser lida e outros aspectos como sensibilidade ou resistência à corrosão. Na Tabela 4.1 encontram-se os tipos de termopares existentes, a sua sensibilidade, gama de temperaturas e os limites de erro.

Para além do tipo, os termopares existentes no mercado estão disponíveis em forma de junções meramente soldadas ou com junções envoltas numa enorme variedade de materiais (bainhas). Os utilizados na instalação são do tipo K devido a possuírem uma gama de medida adequada ao presente trabalho, serem baratos e facilmente encontrados no mercado. Para além disso, os utilizados possuem bainhas construídas em aço inoxidável de forma a serem mais facilmente colocados no local a medir, com recurso a bicones de vedação, como se pode verificar na Figura 4.10.

Tabela 4.1 - Tipos e características de termopares

Tipo	Par metálico		Sensibilidade [$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$]	Gama de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Limites de erro [$^{\circ}\text{C}$]
	Positivo (+)	Negativo (-)			
K	Cromel, Ni-Cr	Alumel, Ni-Al	41	-200 a 1370	2,5
E	Cromel, Ni-Cr	Constantan, Cu-Ni	68	-270 a 1000	2,5
J	Ferro, Fe	Constantan, Cu-Ni	55	-210 a 760	2,5
N	Nicrosil, Ni-Cr-Si	Nisil, Ni-Cr-Mg	39	0 a 1100	2,5
B	Platina Ródio, Pt- 30%Rh	Platina Ródio, Pt- 6%Rh	10	0 a 1820	1,5
R	Platina Ródio, Pt- 13%Rh	Platina, Pt	10	-50 a 1768	1,5
S	Platina Ródio, Pt- 10%Rh	Platina, Pt	10	-50 a 1768	1,5
T	Cobre, Cu	Constantan, Cu, Ni	43	-270 a 400	1,0



Figura 4.10 - Termopar K de bainha metálica com bicone de vedação

4.3 PESAGEM DE COMBUSTÍVEL

A pesagem de combustível foi feita colocando o reservatório de pellets sobre uma balança digital (DiniArgeo) cujo princípio de funcionamento se baseia na variação da resistência eléctrica devido à deformação de um extensómetro colocado em cada uma das 4 células de carga. Um extensómetro é um filamento condutor que vê a sua resistência eléctrica variar à medida que se

deforma no seu domínio elástico devido à sujeição a esforços mecânicos. Estas células de carga correspondem aos apoios da balança no solo e estão dispostos segundo uma *ponte de Wheatstone*.

Este equipamento permite medir massas entre 2 e 300kg e a informação é lida de forma directa no display mostrador de modelo DGT-Q (Figura 4.11) que arredonda o valor da massa medido às décimas de kg sendo tida, portanto, uma precisão de +/- 0,1kg.

A pesagem dos pellets tornou-se necessária para a correcta medição do consumo de combustível durante o ensaio, uma vez que, o débito do alimentador é um valor médio. Desta forma, registou-se a variação de massa entre o período em que se deu inicio ao teste e o final do ensaio. Simultaneamente, registou-se o tempo decorrido nesse período. O caudal de mássico de combustível foi então dado pela seguinte equação:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m_{comb\ inicial} - m_{comb\ final}}{\Delta t} \quad (4.19)$$



Figura 4.11 - Mostrador digital da balança

4.4 ANÁLISE DE GASES

No âmbito do presente trabalho foram medidos os teores de várias espécies químicas nos gases de exaustão, sendo elas o CO, CO₂, O₂ e NO_x. A medição destas espécies é importante, na medida em que permite tirar ilações quanto à eficiência da combustão, excessos de ar e emissão de poluentes, nomeadamente CO e NO_x. São apresentadas adiante as técnicas de medição subjacentes a cada uma delas.

Para efectuar a medição foi necessária a recolha dos gases na chaminé e, devido à natureza dos equipamentos de medição utilizados, foi necessário um pré-tratamento destes. O sistema de pré-tratamento é descrito também mais adiante neste sub-capítulo.

4.4.1 Medição de CO, CO₂ e O₂

Para conhecer a concentração do CO, CO₂, O₂ nos gases de exaustão, foi utilizado um analisador de gases de bancada da *Signal Instruments*, modelo 9000MGA (Figura 4.12), que possui entradas independentes para cada um dos gases. O equipamento dispõe de três ecrãs que permitem visualizar directamente e em tempo real as concentrações que estão a ser medidas de cada uma das espécies. Para além disso, o equipamento possui ainda saídas analógicas por uma porta RS232, que variam entre 0 e 10V DC e que tornam possível o envio e conversão A/D para registo das concentrações no sistema de aquisição de dados.

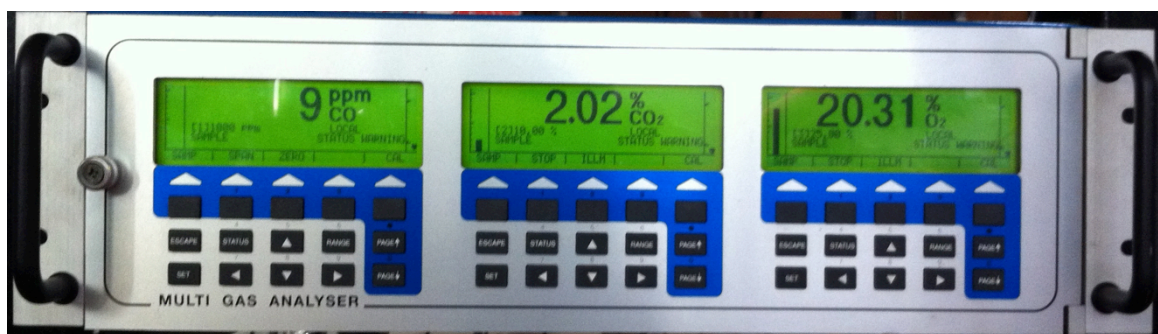


Figura 4.12 - Analisador multi-gás 9000MGA da Signal Instruments

Para análise do CO e CO₂, o equipamento utiliza um princípio baseado na absorção de infravermelhos utilizando filtros ópticos gasosos para obter a máxima selectividade. No que diz respeito ao O₂, são aproveitadas as suas elevadas propriedades paramagnéticas quando comparadas com outros gases para a medição da sua concentração, recorrendo a um sensor paramagnético de duas esferas que é, para tal, aquecido de forma a evitar condensações [30].

A concentração de O₂ e de CO₂ é apresentada em percentagens volumétricas. O CO, dado que, quando a combustão é bastante eficiente, se encontra em quantidades inferiores a 1%, o seu resultado é mostrado em partes por milhão (ppm). Na Tabela 4.2 são mostradas algumas características técnicas importantes do equipamento.

Tabela 4.2 - Características técnicas do analisador de gases 9000MGA da Signal Instruments [30]

Gás Analisado	CO	CO ₂	O ₂
Princípio	Infravermelho	Infravermelho	Paramagnético
Escala de medida	1000, 5000 e 10000 ppm	5, 10 e 20%	5, 10 e 25%
Tempo de resposta	<15 s	<15 s	5s
Linearidade	<0,5% da gama		
Desvio de zero e da amplitude	<0,1% da gama em 1h a temperatura e pressão constantes		
Saídas	0.10V; 4-10mA; RS232		

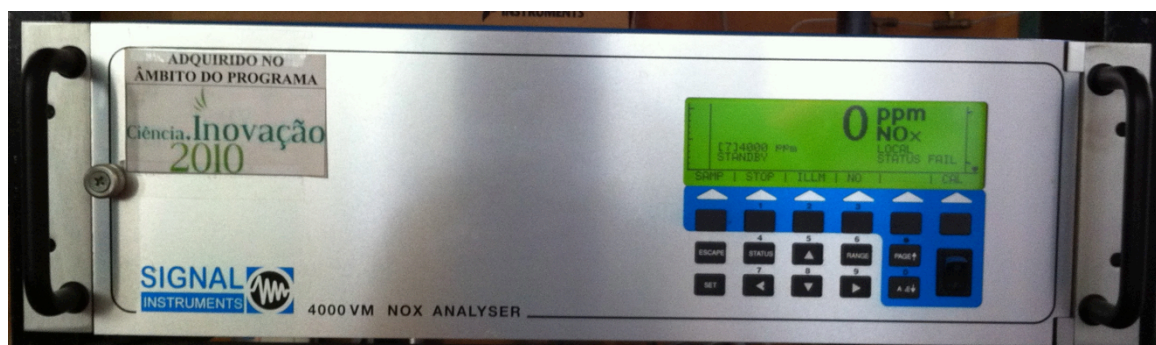
Antes de cada medição foi verificado o zero e o valor de escala que deveria corresponder ao valor da concentração dos gases padrão. Sempre que se verificou necessário, promoveu-se a calibração do equipamento para serem garantidas leituras correctas. Na Tabela 4.3 é apresentado o valor da concentração de cada um dos gases de calibração.

Tabela 4.3 - Concentração dos gases de calibração

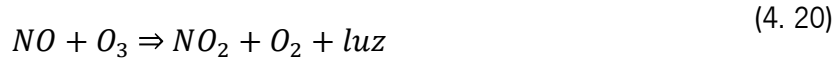
Gás	CO	CO ₂	O ₂
Composição do gás de calibração	5000 ppm de CO em N ₂	10% de CO ₂ em N ₂	20% de O ₂ em N ₂

4.4.2 Medição de NO_x

Para medição de NO_x foi utilizado um analisador de NO_x da *Signal Instruments* com modelo 4000VM, (Figura 4.13) que possui apenas uma entrada de amostra para análise. À semelhança do equipamento 9000MGA, este permite a visualização directa do valor da concentração de óxidos de azoto e possui também uma saída analógica 0-10V DC que foi conectada ao sistema de aquisição de dados para registo.

**Figura 4.13** - Analisador de NO_x 4000VM da Signal Instruments

A análise destas espécies químicas é feita segundo um princípio de quimioluminescência, ou seja, na libertação de luz quando ocorre a transformação da molécula de NO para NO₂ especialmente na presença de ozono, segundo a reacção [31]:



Cada molécula oxidada liberta uma determinada quantidade de luz, que é medida utilizando um fotomultiplicador. Essa quantidade é, então, proporcional á concentração de NO presente nos gases de exaustão. Para a oxidação das moléculas de NO_x a NO, o analisador possui acoplado um catalisador.

Na Tabela 4.4 são mostradas as características técnicas mais importantes do referido equipamento.

Tabela 4.4 - Características técnicas do analisador 4000VM da Signal Instruments [31]

Gás Analisado	NO	NO ₂	NO _x
Princípio	Quimioluminescência		
Escala de medida	0-4; 0-10; 0-40; 0-100; 0-1000; 0-4000; 0-10000 ppm		
Tempo de resposta	1,5 s		
Linearidade	<0,2% da gama		
Desvio de zero e da amplitude	<0,1% da gama em 1h a temperatura e pressão constantes		
Saídas	0.10V; 4-20mA; RS232		

A calibração do equipamento foi realizado da mesma forma que para o 9000MGA, utilizando neste caso um gás padrão com a concentração de 3000 ppm de NO em azoto.

4.4.3 Recolha e Pré-Tratamento de Gases de Exaustão

Para recolher a amostra de gases e para garantir a integridade dos equipamentos de análise bem como para assegurar uma medição correcta da concentração de espécies químicas foi necessária a utilização de um sistema de recolha e pré-tratamento.

No que diz respeito ao CO, CO₂ e O₂, a recolha da amostra foi realizada com recurso a uma sonda de captação colocada na chaminé logo após a saída da caldeira (Figura 4.14). Esta sonda é conectada ao circuito de pré-tratamento de gases captando-os por intermédio de uma depressão criada por uma bomba de vácuo. Depois da recolha, os gases são arrefecidos em dois condensadores e atravessam filtros de partículas e de humidade, de forma a conseguir-se uma

amostra seca, com uma temperatura inferior a 40°C e isenta de impurezas. Após este tratamento, a amostra é encaminhada para o equipamento de análise e é, em seguida, expelida para o exterior. Pode ser visto um diagrama esquemático do sistema em questão na Figura 4.15 e uma imagem na instalação experimental na Figura 4.16.



Figura 4.14 - Sonda de captação de gases elementares CO, CO₂ e O₂

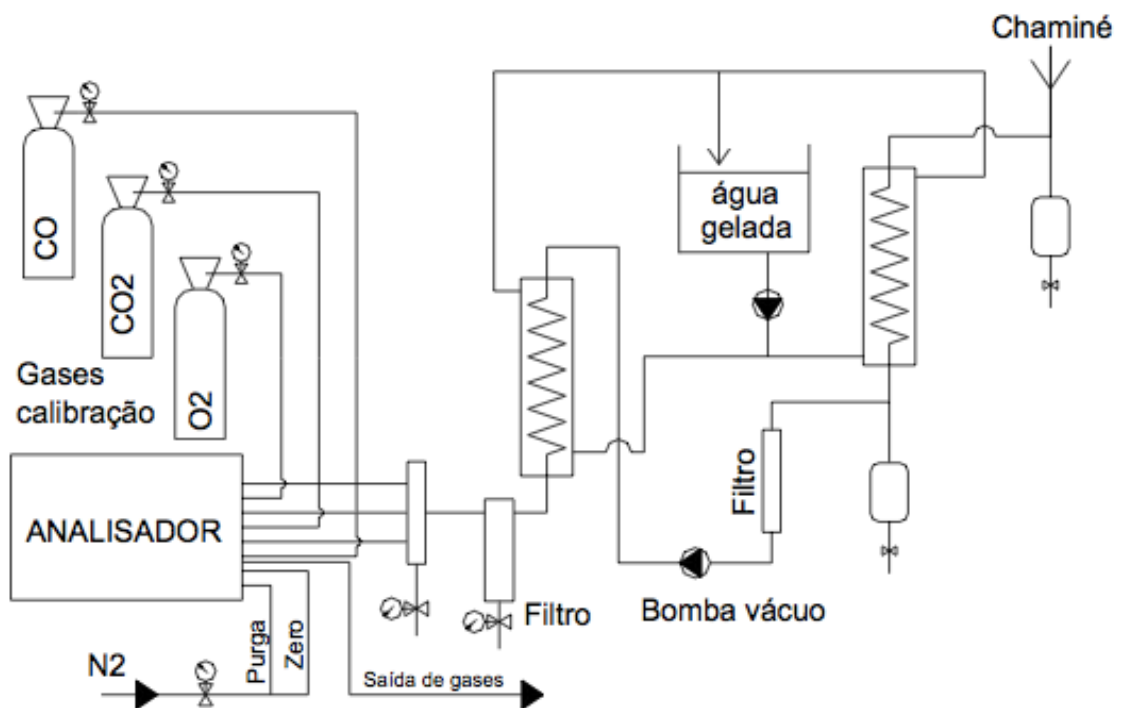


Figura 4.15 - Diagrama esquemático do sistema de recolha, pré-tratamento e análise de gases para CO, CO₂ e O₂ [32].



Figura 4.16 - Sistema de recolha e análise de gases na instalação.

O equipamento de análise de NO_x requer condições de amostragem diferentes. Nesta caso, a recolha é realizada no topo da chaminé (Figura 4.17) e a amostra deve ser mantida a uma temperatura elevada de forma a serem evitadas condensações. Para isso, a tubagem que conecta a sonda de captação ao equipamento é aquecida em toda a sua extensão através de uma resistência eléctrica. A recolha é feita também em depressão através de uma bomba de vácuo independente do circuito atrás referido.



Figura 4.17 - Sonda de captação de gases para análise de NO_x .

O sistema de recolha e pré-tratamento engloba ainda as botijas de calibração de ambos equipamentos (CO, CO₂, O₂ e NO_x) e uma outra que contém apenas azoto e é utilizada para a limpeza e purga do circuito interno dos equipamentos de análise após cada ensaio. Para cada botija, o sistema dispõe de manómetros que permitem visualizar a pressão interna e a de alimentação.

4.5 AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE CALDEIRAS

Existem genericamente dois métodos de avaliação do desempenho de caldeiras: o método das perdas e o método das entradas e saídas. A maioria dos procedimentos normalizados para avaliação do rendimento destes equipamentos baseia-se no primeiro método, como é o caso da norma EN 12809, que consiste em subtrair à energia contida no combustível as perdas decorrentes do funcionamento, como sendo, as perdas pelos gases de exaustão, as perdas associadas a evaporação de água presente no combustível e no ar de combustão, as perdas por combustível não queimado e também as perdas por troca de calor não útil com o espaço por radiação, condução e convecção [33]. O segundo método é bastante mais expedito e relaciona apenas a energia útil que se recupera em forma de água quente com a energia contida no combustível.

Para efeitos deste trabalho, foi utilizado o método das entradas e saídas, traduzido pela Equação 4. 21, por ser mais expedito e porque o método das perdas implica o conhecimento de dados de difícil obtenção como, por exemplo, a quantidade de carbono perdido pelas cinzas.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{comb}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Água}}}{\dot{Q}_{\text{Comb}}} = \frac{(\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T)_{\text{Água}}}{(\dot{m} \cdot PCI)_{\text{Comb}}} \quad (4. 21)$$

5 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5 PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os ensaios realizados seguiram dois procedimentos diferentes: um com o objectivo de determinar a temperatura no leito para o maior número possível de regimes de excesso de ar e AP e outro com o objectivo de avaliar o desempenho do equipamento, a emissão de poluentes e a formação de cinzas aglomeradas no leito.

Neste capítulo abordam-se os procedimentos de teste utilizados, as condições de teste e enumeram-se as limitações ao funcionamento do equipamento. Para além disso, mostram-se e discutem-se os resultados obtidos, nomeadamente quanto a emissões gasosas, rendimento, temperatura do leito e formação de cinzas aglomeradas.

5.1 PROCEDIMENTOS DE TESTE

Para efeitos do presente trabalho experimental, foram realizados dois tipos de testes. Numa fase inicial, realizaram-se ensaios de forma contínua apenas com o objectivo de conhecer rapidamente a temperatura no leito para um grande número de condições de funcionamento. Para tal, seguiu-se o seguinte protocolo:

1. Calibrou-se o equipamento de análise de gases;
2. Mediu-se e registou-se a massa inicial do reservatório de combustível;
3. Desobstruiu-se o orifício da resistência de ignição e abriram-se as tomadas de ar do queimador;
4. Ligou-se a bomba de vácuo do sistema de tratamento de gases e activou-se o modo de amostragem do analisador
5. Iniciou-se o funcionamento da caldeira no modo automático do LabView;
6. Após a ignição e logo que se iniciou o ciclo de alimentação de combustível registou-se o tempo e tapou-se o orifício da resistência de ignição;

7. Variou-se a velocidade do ventilador e as válvulas da admissão para AP=10% e aguardou-se até que a combustão se tornasse estável, que demorou em média cerca de 1500s;
8. Assim que a variação de emissões de CO estabilizou durante 10 minutos, foi dado por iniciado o teste e registou-se o tempo;
9. Observou-se em tempo real a temperatura do leito e, assim que esta estabilizou, variaram-se as regulações de AP e AS para corresponder a uma nova condição de funcionamento;
10. Repetiu-se o passo 9 o número de vezes possível durante o período de testes de forma a obter uma vasta quantidade de condições de funcionamento;
11. Assim que se pretendeu terminar o ciclo de ensaios, activou-se o modo manual do programa, que corta a alimentação de combustível, e foi registado o tempo;
12. Logo que a chama se extinguiu, desligou-se o equipamento de análise de gases.

Assim que se variavam as proporções de AP e AS, verificou-se a ocorrência de uma abrupta mudança de temperatura no leito (assinaladas na Figura 5.1), que sugeria a influência das condições de funcionamento anteriores. Desta forma, para se obterem condições estáveis e partindo do mesmo ponto inicial, foi elaborado um novo procedimento. Este surge também, para tornar possível a formação de cinzas aglomeradas para cada condição de funcionamento e permitir a sua recolha para análise.

De todo o modo, esperou-se que a temperatura, em cada um destes breves ensaios, estabilizasse e foi registada para posterior comparação.

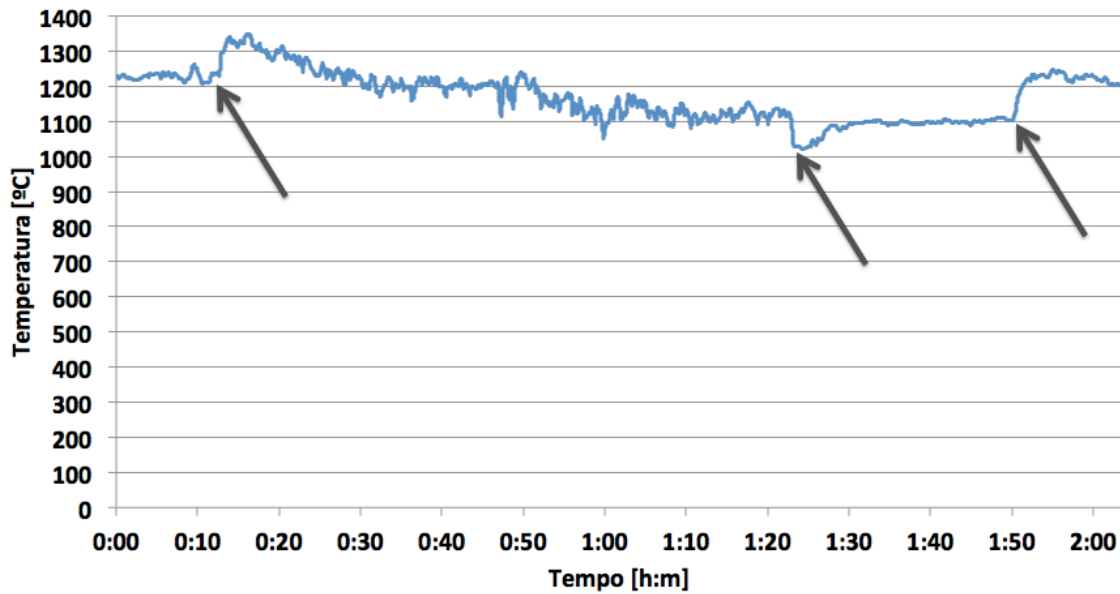


Figura 5.1 - Mudança abrupta da temperatura do leito com a variação do AP e AS no decorrer de um ensaio.

Os testes de longa duração para avaliação da formação de cinzas decorreram durante, pelo menos, duas horas, a partir do momento que se considerou a combustão estável (emissões de CO aproximadamente constantes durante mais de 10 minutos). O procedimento, para cada um destes ensaios, foi o seguinte:

1. Para cada λ e %AP, em função do caudal de combustível dado pelos ciclos de paragem e funcionamento do alimentador, foi calculado o caudal volúmico de ar a ser admitido pelo queimador em cada uma das tubeiras;
2. Calibrou-se o equipamento de análise de gases;
3. Mediu-se e registou-se a massa inicial do reservatório de combustível;
4. Desobstruiu-se o orifício da resistência de ignição e abriram-se as tomadas de ar do queimador;
5. Ligou-se a bomba de vácuo do sistema de tratamento de gases e activou-se o modo de amostragem do analisador
6. Iniciou-se o funcionamento da caldeira no modo automático do LabView;
7. Após a ignição e logo que se iniciou o ciclo de alimentação de combustível registou-se o tempo e tapou-se o orifício da resistência de ignição;

8. Aguardou-se até que a combustão se tornasse estável, que demorou em média cerca de 1500s, e regulou-se as tomadas de ar primário, secundário e velocidade do ventilador para corresponder aos caudais de ar calculados inicialmente;
9. Assim que a variação de emissões de CO estabilizou durante 10 minutos, foi dado por iniciado o teste e registou-se o tempo;
10. Assim que foram ultrapassadas duas horas de ensaio e se verificou a estabilização da temperatura no leito terminou-se o teste, activando o modo manual do programa que corta a alimentação de combustível e foi registado o tempo;
11. Aguardou-se até que todo o combustível na grelha fosse queimado e desligou-se o equipamento de análise de gases;
12. Assim que foi possível, recolheram-se e guardaram-se as cinzas fundidas.

5.2 CONDIÇÕES DE TESTE

O tipo de combustível utilizado foi o mesmo em todos os testes realizados. As suas propriedades físico-químicas podem ser vistas no Anexo C.

A carga da caldeira foi definida para uma potência intermédia, correspondente a 12 kW. Antes do início da série de ensaios, foi ensaiado o valor do excesso de ar que permitia uma combustão estável e com baixas emissões de CO (em torno de 100 ppm), para as três combinações de AP a testar (10%, 30% e 50%).

A partir desta condição, variou-se 0,4 no valor de λ para cada um dos AP, de forma a serem conseguidos regimes entre o limite mínimo de ar para uma boa combustão e o limite máximo definido pelas capacidades do equipamento de exaustão. Assim foram definidas as condições de funcionamento expostas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Condições de EA e AP.

	Ar primário		
$\lambda = 1,9$	10%	30%	50%
$\lambda = 2,3$	10%	30%	50%
$\lambda = 2,7$	10%	30%	50%

5.3 LIMITAÇÕES AO FUNCIONAMENTO

O caudal de ar que atravessa cada tubeira, depende da depressão criada pelo extractor de gases na câmara de combustão e do equilíbrio de perdas de carga, associadas ao escoamento de ar nessas tubagens. Para determinada velocidade do ventilador (e correspondente depressão criada ao nível da câmara de combustão), o caudal máximo que atravessa cada tubeira ocorre quando nela se verifica a perda de carga mínima – válvula aberta – e nas restantes a perda de carga máxima – válvula fechada.

Tendo em conta a potência pretendida, para $\lambda=2,7$ e AP=10%, a perda de carga induzida na tubeira de AS era tal que, mesmo para a velocidade máxima do exaustor e a válvula totalmente aberta, o valor do caudal de ar secundário requerido não era alcançado. Por isso, não foi possível a realização do ensaio de longa duração para estas condições e, desta forma, os ensaios realmente efectuados encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Condições de EA e AP testadas para os ensaios de longa duração.

	Ar primário		
$\lambda = 1,9$	10%	30%	50%
$\lambda = 2,3$	10%	30%	50%
$\lambda = 2,7$	(-)	30%	50%

Por outro lado, para grandes potências e/ou proporções de AP muito elevadas, verificou-se que a chama atingia os deflectores à entrada do permutador de calor, arrefecendo os gases e causando uma combustão incompleta, com o conseqüente aumento das emissões de CO. Para colmatar este problema, foi realizado um ensaio onde foram obstruídos 4 orifícios de passagem de ar secundário para a grelha, de forma a criar um efeito de turbulência do tipo *swirl* no queimador (Figura 5.2). Como se pode verificar pela Figura 5.3, o valor da concentração de CO nos gases de exaustão aumentou com a aplicação desta medida. No entanto, é possível verificar que o valor da concentração tende a manter-se constante com o AP, ao contrário do que acontece sem o efeito de *swirl* no queimador.

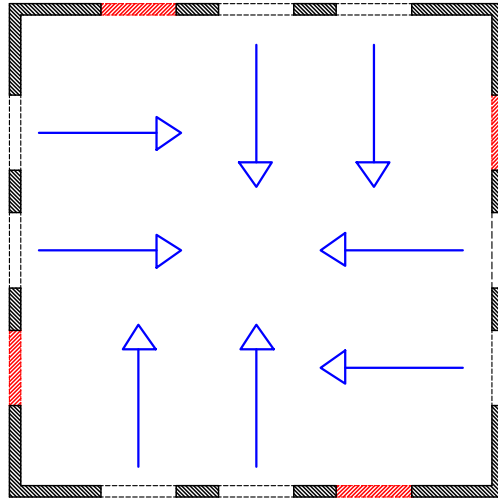


Figura 5.2 – Esquema da obstrução de orifícios de AS para criação de *swirl* no queimador.

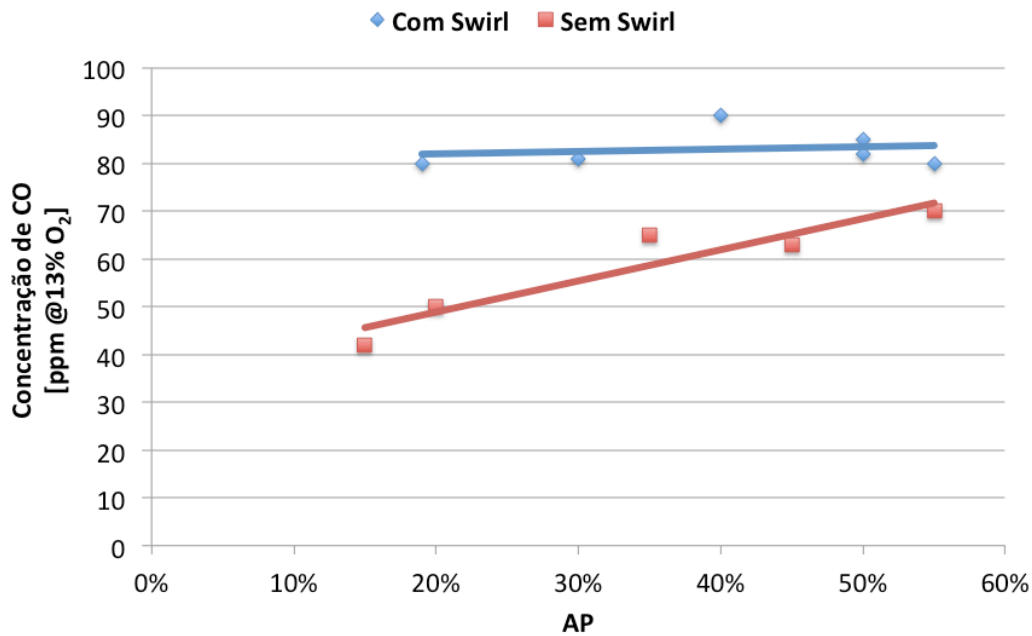


Figura 5.3 - Concentração de CO em função do AP com e sem efeito de *swirl* no queimador.

Durante estes ensaios verificou-se que, com o efeito de turbulência, a chama se desalinhou da zona imediatamente sobre o queimador, fazendo com que os gases se encaminhassem para regiões da câmara de combustão com menor temperatura e arrefecessem antes de completarem a combustão, o que justifica a primeira observação ao gráfico. No entanto, foi notado que a chama ficou mais baixa e não atingiu o permutador de calor com o aumento do AP, o que explica a segunda observação.

Desta forma, é possível concluir que este efeito aerodinâmico pode tornar possível a queima com regimes de AP mais elevado sem penalizar a eficiência da combustão, se forem aplicados

deflectores à saída do queimador que evitem que os gases quentes se dispersem na câmara de combustão.

5.4 EMISSÕES GASOSAS

As emissões gasosas aqui apresentas resumem-se às registadas no período considerado de teste, tendo sido excluídos o período de arranque e estabilização e o período de finalização. Os resultados são agrupados por regime de excesso de ar e em cada gráfico são representados os valores das quatro espécies químicas em análise: O_2 , CO_2 , CO e NO_x .

5.4.1 Ensaio para $\lambda=1,9$

Neste regime de excesso de ar verificou-se uma combustão estável e eficiente, caracterizada por baixas emissões de CO , para $AP=10\%$ e $AP=30\%$ (Figura 5.4 e Figura 5.5) verificando-se, no entanto, emissões médias mais baixas para $AP=10\%$. Este facto vai de encontro à proporção típica de voláteis e resíduo carbonoso presentes na madeira. Para este valor de AP , existe maior quantidade de ar secundário disponível para a reacção o que facilita a oxidação dos voláteis que estão presentes em maior quantidade neste combustível e permite uma combustão mais eficiente. Os teores médios de O_2 e CO_2 variaram, tal como seria de esperar, inversamente e situaram-se aproximadamente nos 11% e 9% respectivamente.

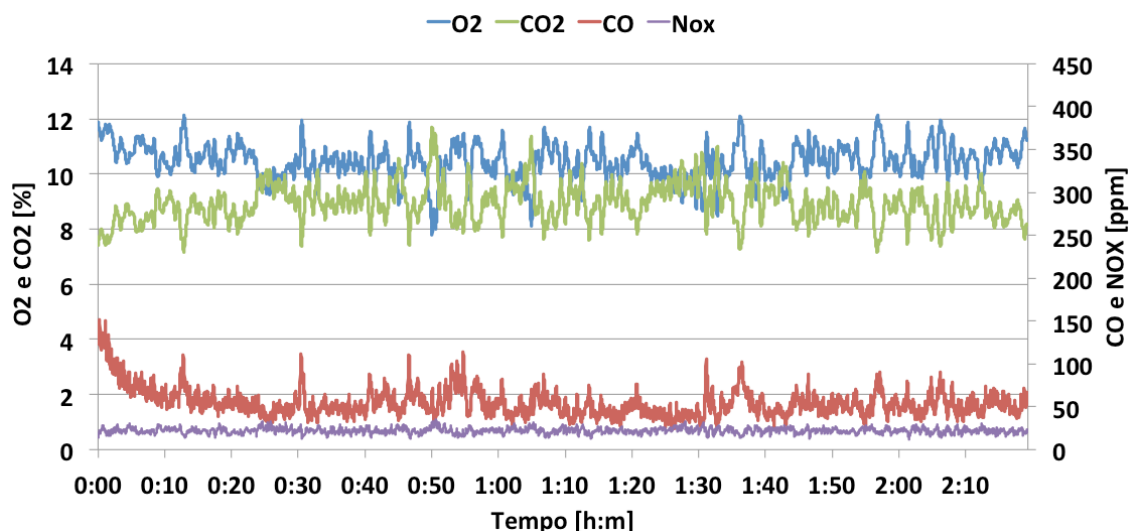


Figura 5.4 - Concentração de emissões gasosas de O_2 , CO_2 , CO e NO_x para $\lambda = 1,9$ e $AP = 10\%$.

O pico de concentração máxima de O_2 que se observa na Figura 5.5 no momento 0,6h e o pico imediato de concentração máxima de CO devem-se a uma falha do alimentador. Esta falha fez com que o queimador deixasse de ser alimentado durante uns momentos levando à diminuição da matéria volátil a ser libertada e ao abaixamento da chama elevando o nível de O_2 (o que traduz um aumento do excesso de ar momentâneo). Assim que foi retomada a alimentação, o calor libertado pela pouca matéria que se encontrava no leito deu origem a uma ignição e volatilização lenta do novo combustível com a conseqüente má queima reflectida no elevado pico de CO. Após esta ocorrência, verificou-se que tudo voltou à normalidade e a combustão prosseguiu sem problemas.

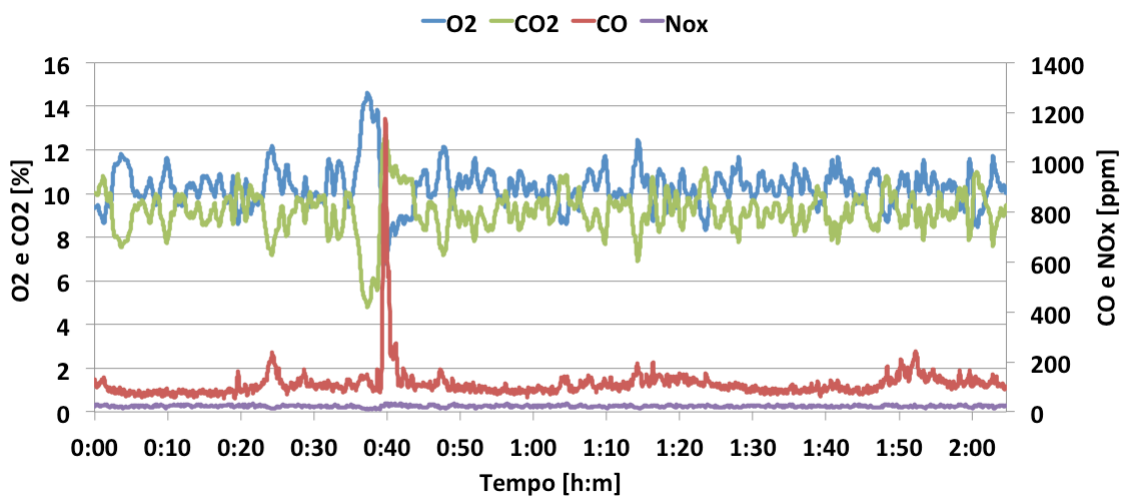


Figura 5.5 - Concentração de emissões gasosas de O_2 , CO_2 , CO e NO_x para $\lambda = 1,9$ e AP = 30%.

Para AP=50% verificou-se uma má combustão com emissões de CO que excederam a escala do analisador de gases (5250ppm), como se pode ver na Figura 5.6. O elevado caudal de gases a serem volatilizados devido ao elevado AP, mantendo o caudal total de ar constante, levou à ocorrência de um déficit de ar secundário para completar a combustão, o que justifica este fenómeno. As concentrações médias de O_2 verificaram-se muito baixas, na ordem dos 4% e as de CO_2 bastante elevadas, da ordem dos 15%.

Às 1,3h de teste para este regime de λ e AP é possível verificar a existência de um pico máximo da concentração de O_2 e um mínimo na de CO que se justifica, mais uma vez, por uma falha do alimentador. A combustão prosseguiu com um claro déficit de ar secundário e, assim que ocorreu a falha, o caudal de combustível a entrar no leito diminuiu e conseqüentemente a quantidade de matéria volátil a ser libertada. Este fenómeno levou a um aumento momentâneo do

excesso de ar e conduziu a uma combustão mais eficiente que se reflecte na diminuição da concentração de CO.

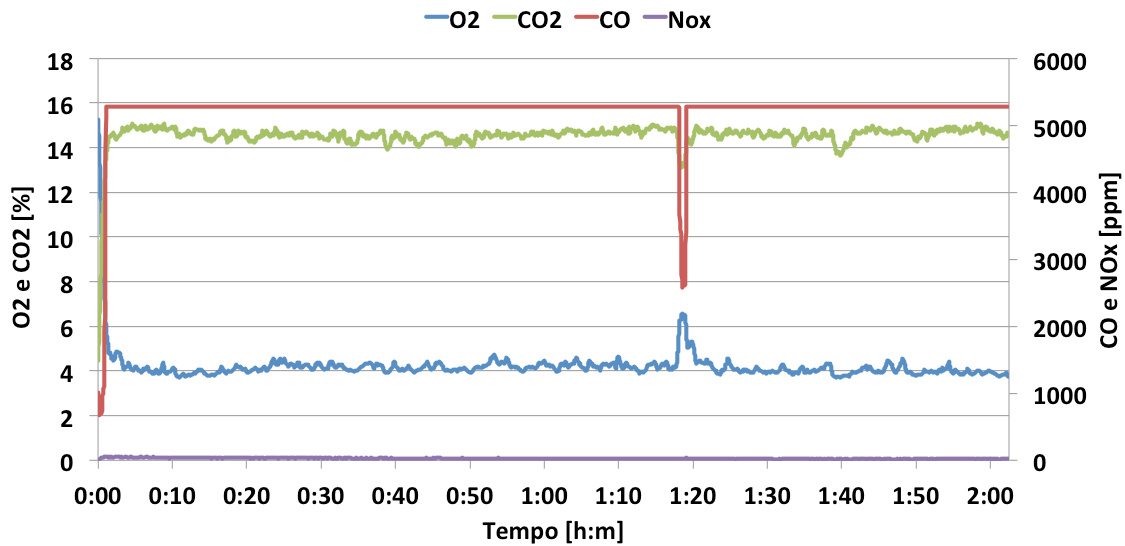


Figura 5.6 - Concentração de emissões gasosas de O₂, CO₂, CO e NO_x para $\lambda = 1,9$ e AP = 50%.

As concentrações médias de NO_x nos gases de exaustão foram semelhantes para os três ensaios deste regime de λ e mantiveram-se na ordem das 20ppm.

5.4.2 Ensaios para $\lambda=2,3$

Para o presente regime de excesso de ar pode verificar-se que a combustão ocorreu de forma eficiente para os três diferentes caudais de AP. Os teores de O₂ e CO₂, variaram mais uma vez, assim como nos ensaios anteriores e nos ensaios que se abordarão mais adiante, de forma inversamente proporcional, como aliás foi já referido.

No que diz respeito ao regime com AP=10%, pode ver-se pela análise da Figura 5.7 que o teor médio de O₂ e CO₂ emitido pelos gases de exaustão rondou os 13% e 7% respectivamente. O teor médio de CO, neste caso, manteve-se baixo rondando os 75ppm à excepção do período final em que se verificou um aumento devido a problemas relacionados, mais uma vez, com consecutivas e inesperadas paragens do alimentador.

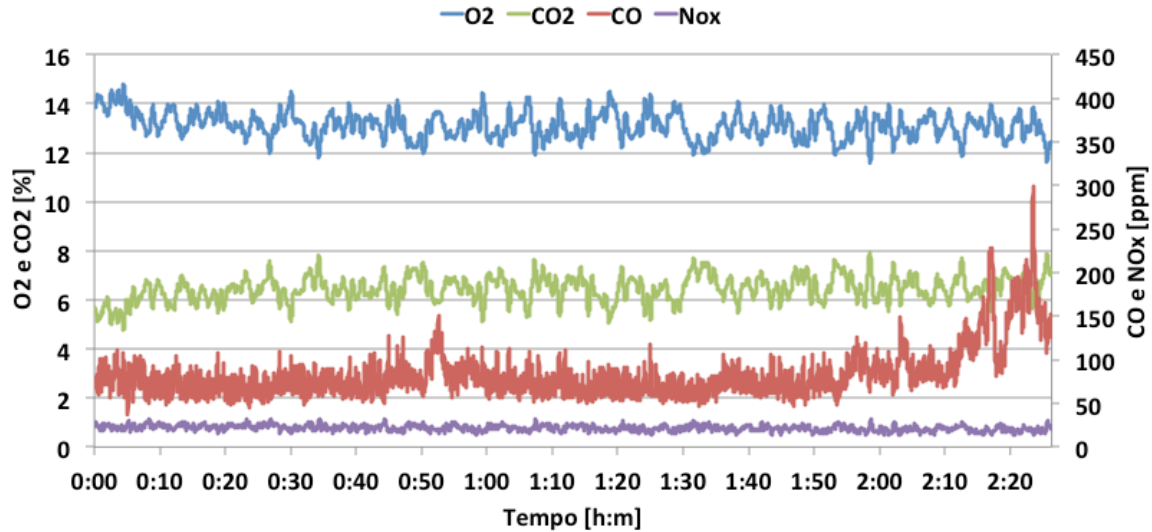


Figura 5.7 - Concentração de emissões gasosas de O₂, CO₂, CO e NO_x para $\lambda = 2,3$ e AP = 10%.

Para o ensaio neste regime com AP=30%, pode ver-se que o excesso de ar real inerente ao processo de combustão, patente na concentração de O₂ nos gases de exaustão, diminuiu. O teor médio desta espécie rondou, agora, os 11% enquanto que, o CO₂ aproximou-se de 9%, como se pode verificar na Figura 5.8. Este fenómeno justifica-se pelo maior caudal de matéria volátil que foi libertada do leito fruto do aumento do caudal de ar que o atravessou. Dessa forma, mais átomos de Carbono reagiram com o Oxigénio do ar diminuindo a concentração do primeiro e aumentando a do segundo.

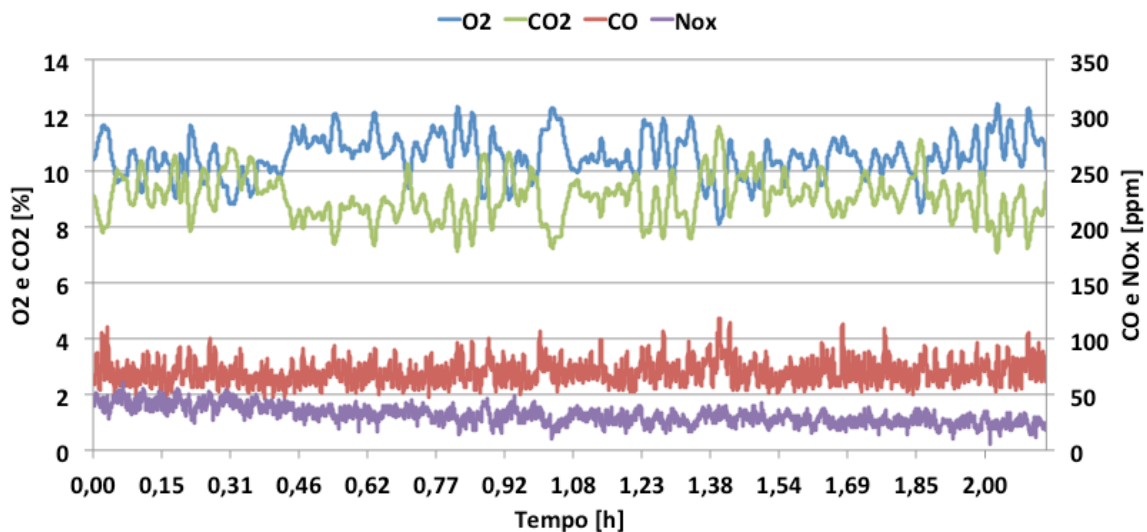


Figura 5.8 - Concentração de emissões gasosas de O₂, CO₂, CO e NO_x para $\lambda = 2,3$ e AP = 10%.

O teor médio de CO para AP=30% manteve-se em valores semelhantes aos do ensaio anterior – cerca de 75ppm – mas, neste caso, com um efeito de diluição em O₂ menor. Desta forma,

corrigindo a concentração para valores normalizados de O_2 , como será feito mais adiante, é possível prever que a emissão deste poluente será menor que a registada no ensaio com $AP=10\%$.

As emissões médias de CO aumentaram, rondando neste teste a concentração de 150ppm. Verifica-se também a existência de um maior número de picos que se justificam pelo facto da elevada taxa de volatilização no leito, associada a um débito de combustível reduzido, ter conduzido várias vezes a uma chama débil que quase se extinguia quando o leito era alimentado com uma nova quantidade de pellets, originando uma nova combustão lenta e pouco eficiente.

O valor da concentração média das emissões de NO_x é semelhante em todos os ensaios para este regime de excesso de ar e idênticos aos registados para $\lambda=1,9$, situando-se em média entre as 20 e 40ppm que variam ligeiramente, como se verá mais adiante, com a eliminação do efeito de diluição nos gases de exaustão.

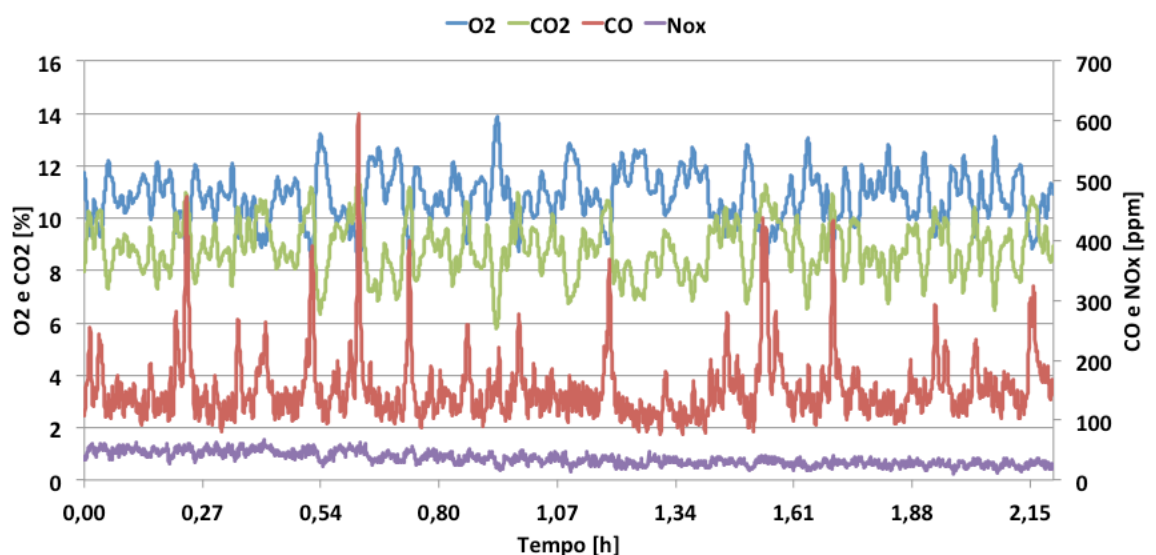


Figura 5.9 - Concentração de emissões gasosas de O_2 , CO_2 , CO e NO_x para $\lambda = 2,3$ e $AP = 10\%$.

5.4.3 Ensaio para $\lambda=2,7$

Para este regime de excesso de ar, como referido já neste sub-capítulo, foi apenas possível a realização de testes para valores de AP de 30% e 50%.

Para $AP=30\%$ e no presente regime, registou-se cerca de 13% em média para a concentração de O_2 e 8% para o CO_2 (Figura 5.10). O teor médio de CO situou-se ligeiramente abaixo de 100ppm tendo, no entanto, ocorrido um aumento no período entre 1,0h e 1,4h devido novamente a falhas de alimentação que alteraram a estabilidade da combustão.

No que diz respeito ao ensaio com AP=50%, é possível verificar pela Figura 5.11 que ocorreu uma diminuição da concentração média de O₂ para cerca de 11% e um aumento da de CO₂ para valores ligeiramente acima de 8%, comportamento que aliás está patente nos restantes regimes de excesso de ar sempre que se aumenta a relação de AP. A concentração média de CO aumentou pelos mesmo motivos que nos restantes regimes de excesso de ar, verificando-se também aqui dois picos máximos devido, mais uma vez, a problemas com a alimentação.

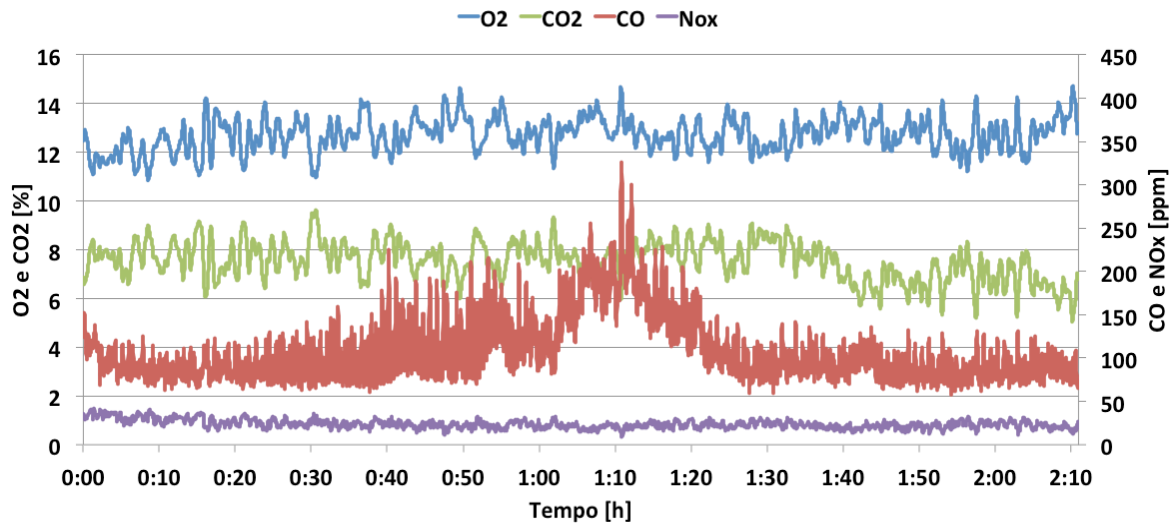


Figura 5.10 - Concentração de emissões gasosas de O₂ CO₂ CO e NO_x para $\lambda = 2,7$ e AP = 30%.

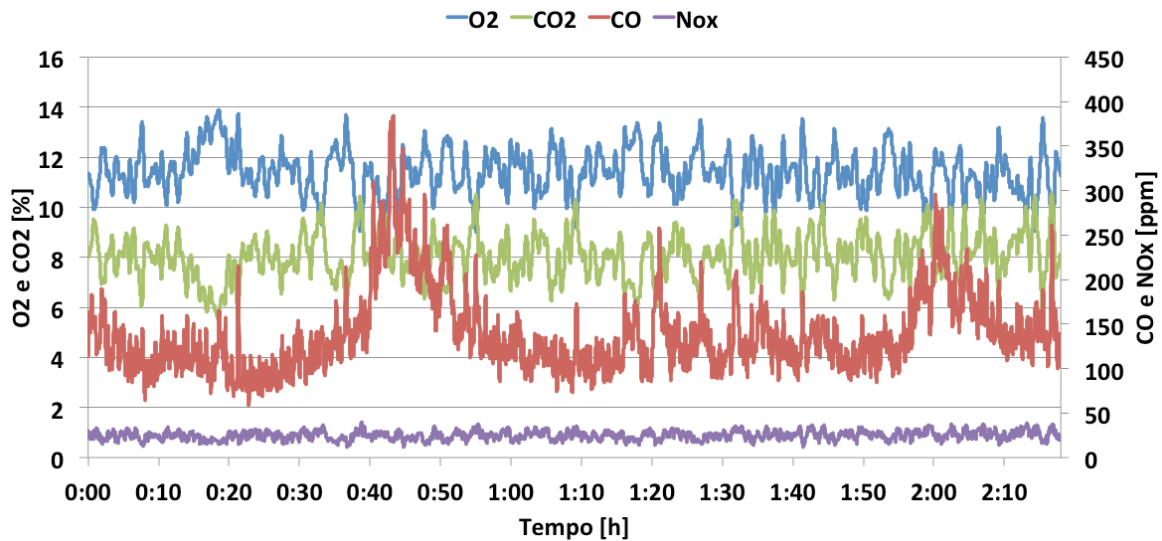


Figura 5.11 - Concentração de emissões gasosas de O₂ CO₂ CO e NO_x para $\lambda = 2,7$ e AP = 50%.

Verifica-se também uma maior amplitude na variação dos valores de concentração de todas as espécies pelos mesmos motivos enunciados anteriormente, ou seja, devido ao aumento da turbulência criada pela passagem de ar no leito. É também válida a mesma comparação entre os

diferentes regimes de excesso de ar pelos mesmos motivos, já que o aumento do excesso de ar para a mesma relação de AP implica, necessariamente, maiores velocidades de ar no leito.

Na Tabela 5.3 estão resumidas as concentrações médias de O_2 e CO_2 presentes nos gases de exaustão para cada um dos testes. As emissões médias de CO e NO_x viram a sua concentração convertida para mg/Nm^3 e corrigida para 13% de O_2 de forma a tornar inequívoca a comparação entre os diferentes ensaios. Os resultados encontram-se na Tabela 5.4 para o CO e na Tabela 5.5 para os NO_x . Para tornar a comparação mais perceptível, os mesmos dados foram agrupados graficamente nas Figura 5.12 e Figura 5.13 para o CO e NO_x , respectivamente.

Em forma de resumo, pode ver-se que o teor de O_2 tende genericamente a diminuir com o aumento do AP e a aumentar, como seria de esperar, com o aumento de λ . É possível verificar, no entanto, que para $\lambda=2,3$, o valor da concentração de O_2 possui um mínimo para AP=30%.

Tabela 5.3 - Concentrações médias de O_2 e CO_2 nos gases de exaustão.

Ar primário	10%		30%		50%	
Espécie Química	[%] O_2	[%] CO_2	[%] O_2	[%] CO_2	[%] O_2	[%] CO_2
$\lambda = 1,9$	10,43	8,90	10,23	9,19	4,10	14,62
$\lambda = 2,3$	13,11	6,44	10,53	9,06	10,80	8,79
$\lambda = 2,7$	(-)	(-)	12,74	7,59	11,35	8,07

No que concerne ao CO, para $\lambda=1,9$ o mínimo ocorre para AP=10%. Já para $\lambda=2,3$ verifica-se que o mínimo ocorre para AP=30% enquanto que para $\lambda=2,7$, devido à falta de dados para AP=10%, apenas se pode verificar que a concentração de CO aumentou com o aumento do AP.

Tabela 5.4 – Concentrações médias de CO em mg/Nm^3 corrigido para 13% de O_2 nos gases de exaustão.

Ar primário	Concentração de CO em mg/Nm^3 @13% de O_2		
	10%	30%	50%
$\lambda = 1,9$	48	94	+3125
$\lambda = 2,3$	96	65	136
$\lambda = 2,7$	(-)	117	132

No que diz respeito à emissão de NO_x pode constatar-se que diminui ligeiramente com o aumento do AP e que o máximo ocorre para λ intermédio. O valor da concentração medida é uma grandeza abaixo do que se esperava, pela análise de testes realizados anteriormente em equipamentos semelhantes, como abordado no capítulo de revisão bibliográfica. Este facto pode ser justificado pela localização da sonda de captação de gases para análise de NO_x que, por se

encontrar a jusante do ventilador, se situa numa região com fortes infiltrações de ar por parte deste. Se o seu valor for corrigido para teores de oxigénio superiores aos que foram medidos logo à saída da caldeira, este vai de encontro ao esperado. Portanto, suspeita-se que exista um efeito de diluição nos gases de exaustão superior ao esperado e, por isso, o seu valor absoluto não corresponda à realidade e deve ser tomado, apenas, como relativo.

Tabela 5.5 – Concentrações médias de NO_x em mg/Nm³ corrigido para 13% de O₂ nos gases de exaustão

Ar primário	Concentração de NO _x em mg/Nm ³ @13% de O ₂		
	10%	30%	50%
$\lambda = 1,9$	30	30	21
$\lambda = 2,3$	48	42	40
$\lambda = 2,7$	(-)	40	37

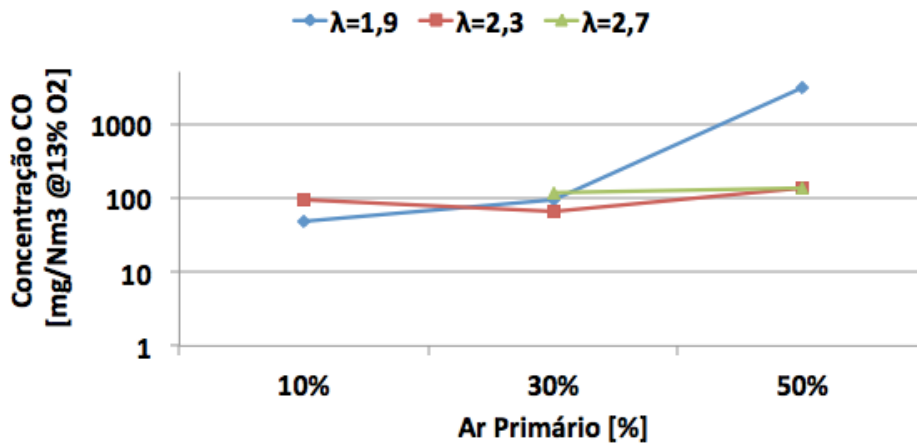


Figura 5.12 - Concentração de CO nos gases de exaustão em função do AP para cada excesso de ar (λ).

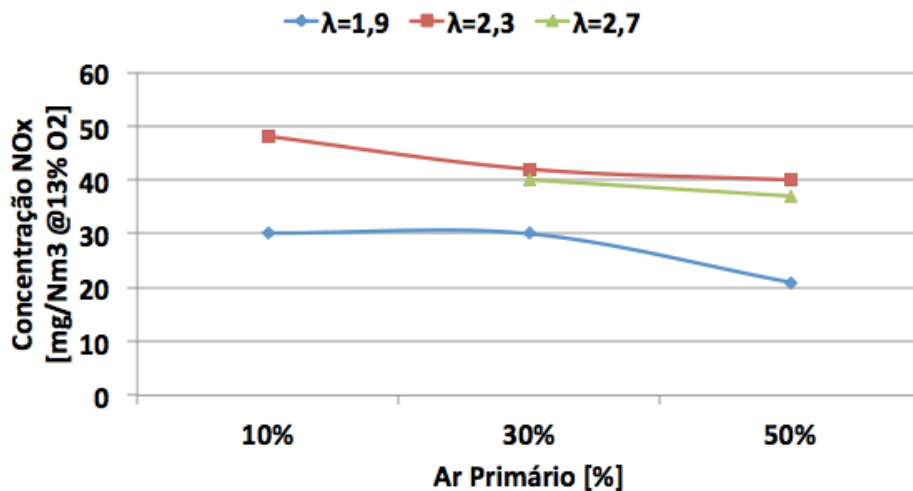


Figura 5.13 - Concentração de NO_x nos gases de exaustão em função do AP para cada excesso de ar (λ).

5.5 RENDIMENTO

O resultado da avaliação do rendimento de cada um dos ensaios encontra-se registado na Figura 5.14. Deve ser tido em conta que, para o seu cálculo, foi utilizado o PCI e os gases de escape encontraram-se a uma temperatura abaixo de 100 °C, ocorrendo assim a recuperação do calor latente de condensação. Pela sua análise é possível visualizar que, de uma forma genérica, o rendimento baixa com o aumento do excesso de ar. Este fenómeno pode explicar-se pela diminuição da temperatura de chama. Na Figura 5.15, está representada a temperatura dos gases à entrada do permutador e pode ser verificado que esta baixa com o aumento do excesso de ar, o que reflecte a diminuição de temperatura de chama atrás referida.

Existe, no entanto, uma excepção que se verifica para AP=50% onde ocorre aumento de rendimento com o incremento de λ de 1,9 para 2,3. Esta excepção pode dever-se à pobre combustão que se verificou no primeiro.

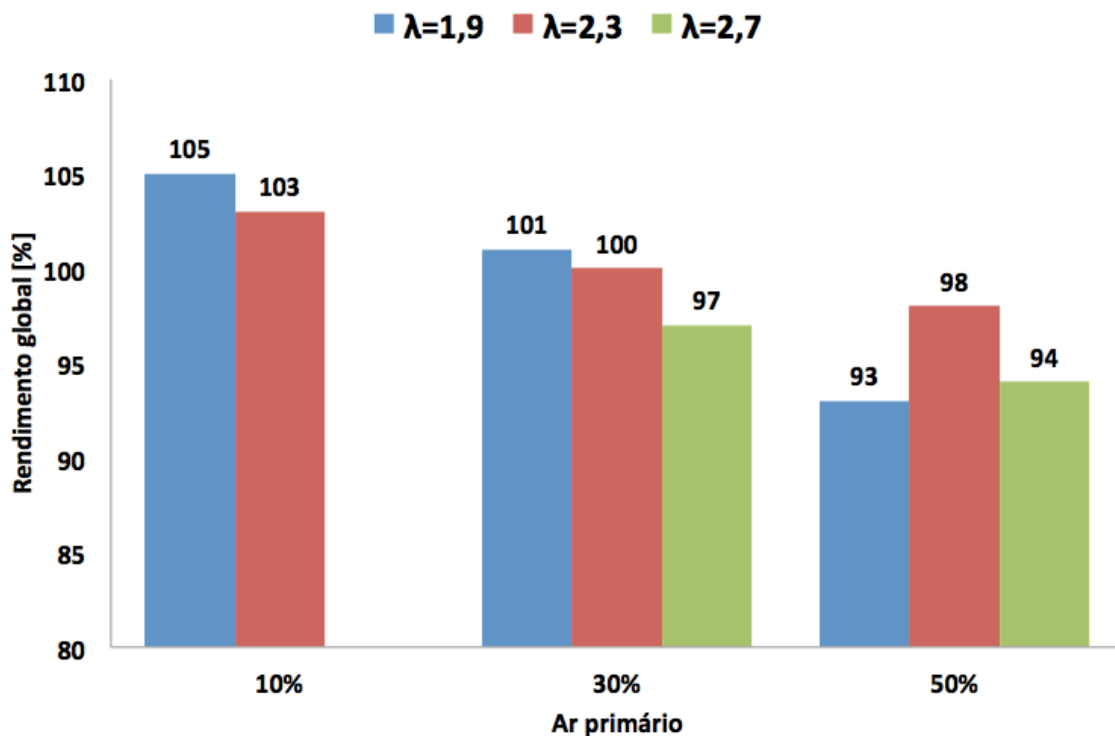


Figura 5.14 - Rendimento da caldeira em função do ar primário para cada excesso de ar (λ).

Analisando ainda a Figura 5.14, é possível observar uma quebra de rendimento com o aumento do AP. Durante a combustão, à medida que se aumenta este parâmetro, os gases são expelidos da grelha a maior velocidade fazendo com que a sua temperatura à entrada do permutador de calor seja tendencialmente superior, como se pode constatar pela análise da Figura

5.15. Desta forma, a temperatura dos gases de exaustão aumenta (Figura 5.16) e, consequentemente, a quantidade de energia não aproveitada.

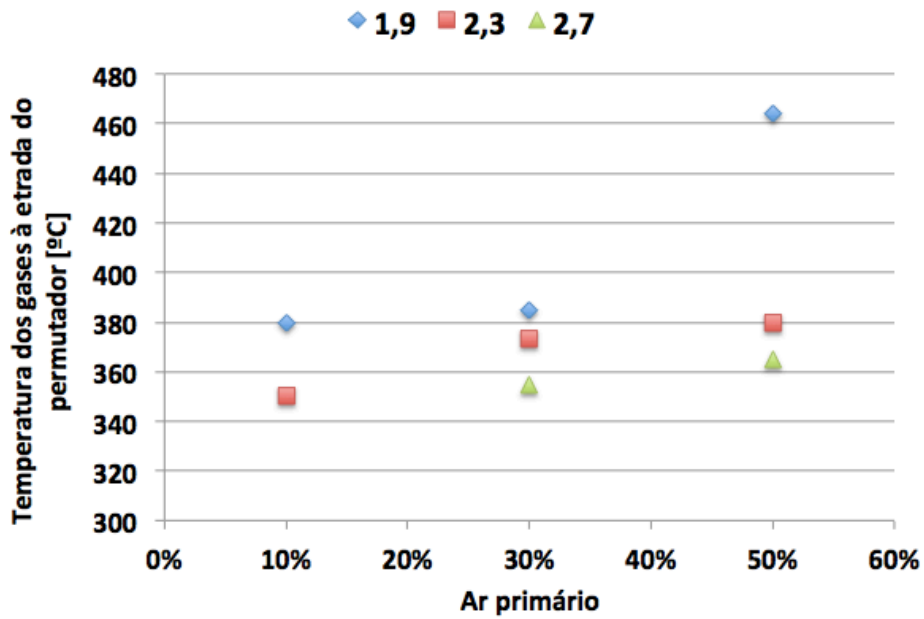


Figura 5.15 - Temperatura dos gases à entrada do permutador de calor em função do AP.

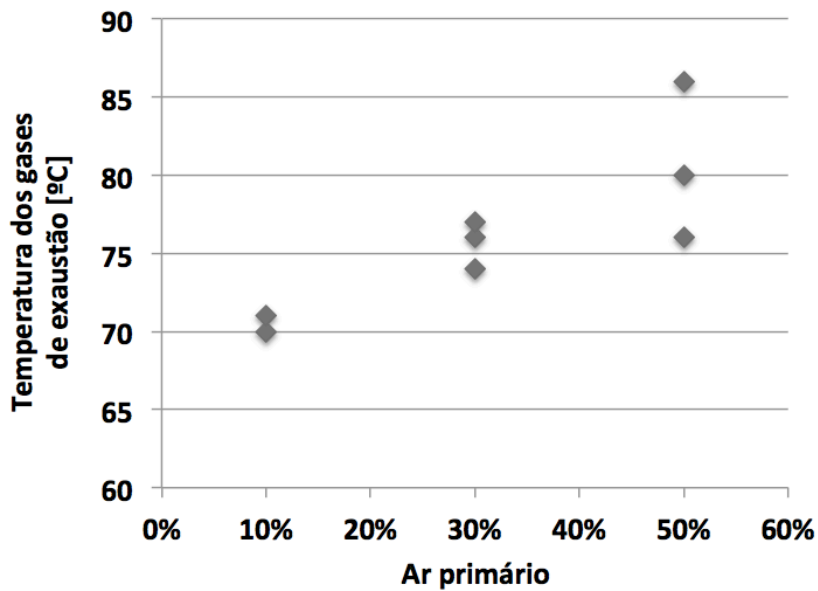


Figura 5.16 – Temperatura dos gases de exaustão em função do AP.

5.6 TEMPERATURA DO LEITO

A temperatura média atingida no leito, depois de estabilizada a combustão, encontra-se representada na Figura 5.18, em função do caudal específico de ar na grelha, CE , que é determinado segundo a expressão (5. 1), para vários regimes de excesso de ar. O valor desta variável traduz o efeito combinado do excesso de ar e do ar primário, na quantidade de ar que atravessa a grelha.

$$CE = \frac{\dot{m}_{ar} \times AP}{A_{seção\ grelha}} \quad (5. 1)$$

Pela análise da mesma figura, é possível verificar que a temperatura na grelha tende a diminuir com o aumento do caudal absoluto de ar primário (linha de tendência a traço interrompido).

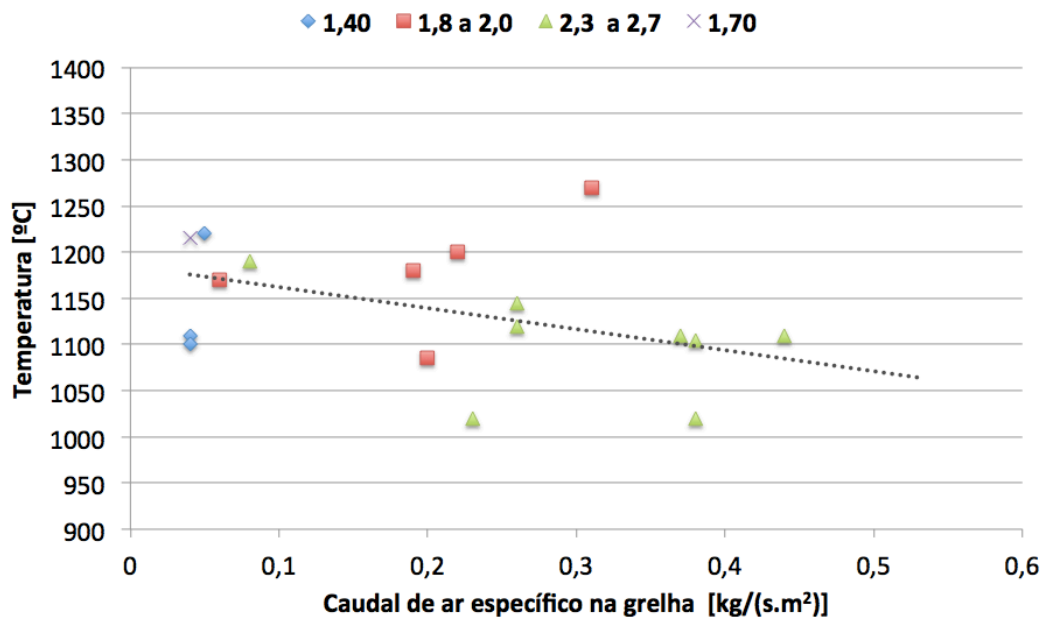


Figura 5.17 - Temperatura do leito em função do caudal de ar específico na grelha para cada excesso de ar.

Durante a análise de resultados, foi notado que a o excesso de ar possui maior influência na temperatura que a fracção de AP. Analisando a Figura 5.18, é possível verificar que existe uma tendência para a diminuição da temperatura com o aumento do excesso de ar (linha de tendência a traço interrompido).

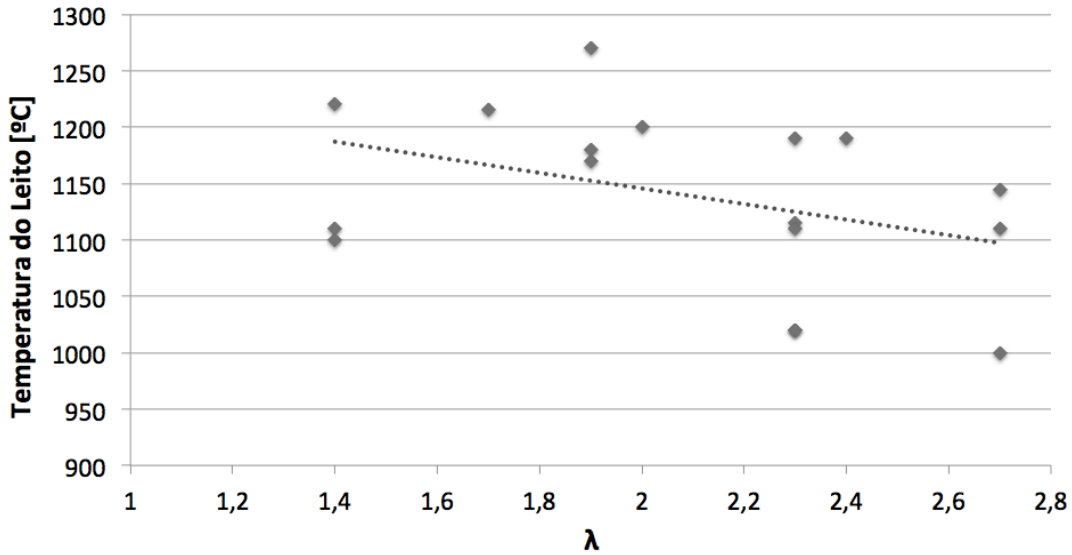


Figura 5.18 - Variação da temperatura do leito em função de λ .

A influência da proporção de AP nesta temperatura, encontra-se representada graficamente na Figura 5.19. Pela sua observação, é possível verificar que existe uma variação de temperatura com a fracção de AP, para cada regime de excesso de ar. No entanto, globalmente pra todos os regimes de excesso de ar e considerando a linha de tendência a traço interrompido, pode ser notado que a temperatura possui a tendência para se manter constante com o aumento do AP.

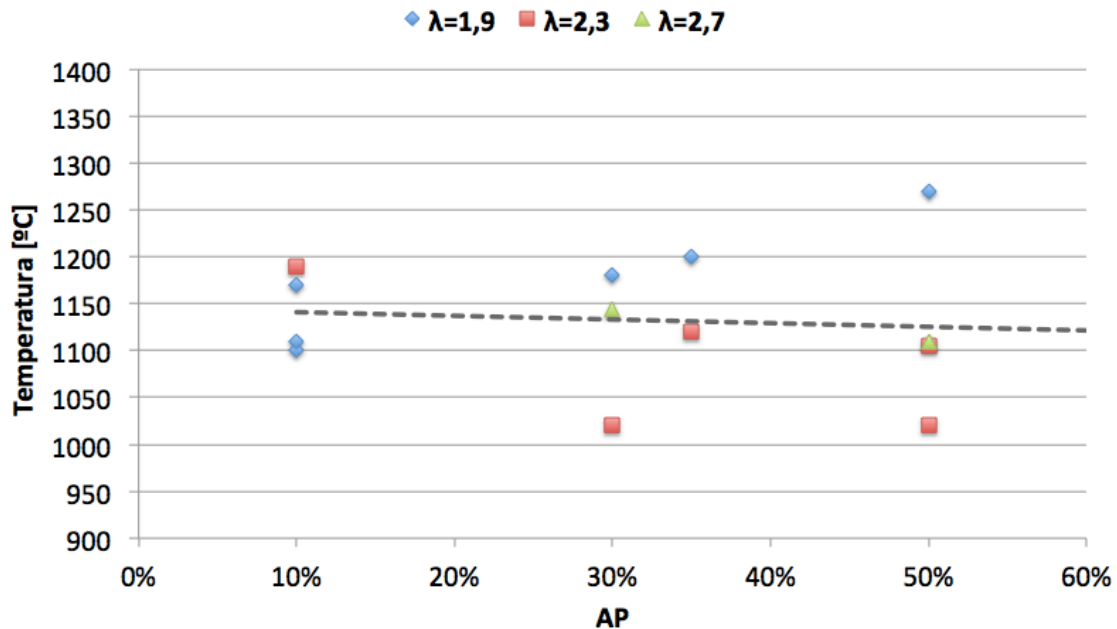


Figura 5.19 - Variação da temperatura do leito em função da proporção de AP para cada λ .

No que respeita aos ensaios de longa duração para avaliação da massa de cinzas fundidas, a temperatura atingida encontra-se exposta na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Temperatura de grelha registada nos ensaios de longa duração.

Ar primário	Temperatura de Grelha [°C]		
	10%	30%	50%
$\lambda = 1,9$	1170	1180	1270
$\lambda = 2,3$	1190	1020	1020
$\lambda = 2,7$	(-)	1145	1110

5.7 CINZAS AGLOMERADAS

O valor da massa de cinzas aglomeradas que se acumularam no leito no final de cada ensaio encontra-se na Tabela 5.7. Na Figura 5.20 é possível observar a variação dessa massa com o AP para cada λ , representando um mapa onde, para $\lambda=1,9$ e AP=50%, se encontra o limite definido pela eficiência da combustão e, para $\lambda=2,7$ e AP=30%, o limite definido pelas características do equipamento. Pela sua análise, verifica-se que a formação de cinzas aglomeradas diminui com o aumento do excesso de ar, fenómeno que deverá estar associado à diminuição de temperatura do leito que se verifica com a alteração desse parâmetro.

Tabela 5.7 – Massa de cinzas aglomeradas.

Ar primário	Massa de cinzas aglomeradas		
	10%	30%	50%
$\lambda = 1,9$	13 g	11 g	27 g
$\lambda = 2,3$	8 g	2 g	12 g
$\lambda = 2,7$	(-)	1 g	7 g

Para além disso, independentemente do excesso de ar utilizado, a formação mínima ocorre para AP=30%. Tendo em conta que a temperatura mínima registada na grelha não ocorre para o este valor de AP, prevê-se a existência de outros factores que influenciem a formação de cinzas aglomeradas. É possível observar na Figura 5.21, que o aumento da formação de cinzas está relacionado com o aumento da temperatura. No entanto, é também possível verificar que as duas condições de funcionamento que dão origem a uma formação mínima destes compostos, ocorre para duas temperaturas bastante distintas, o que sugere a influência de outros parâmetros.

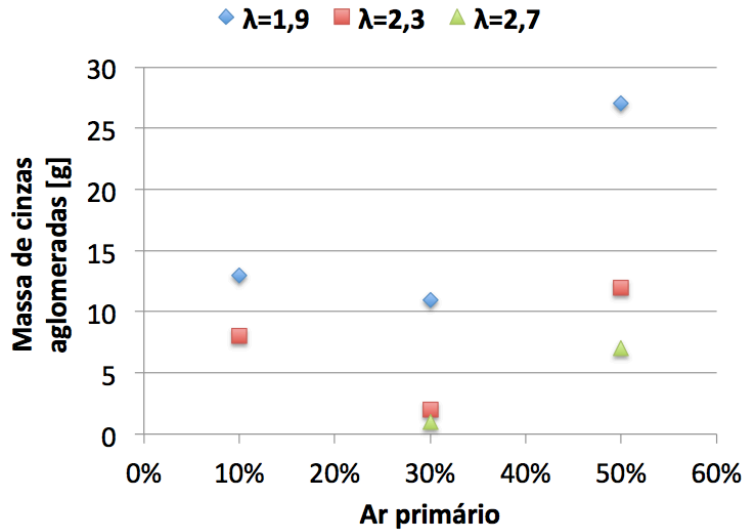


Figura 5.20 - Massa de cinzas aglomeradas em função do AP para cada λ .

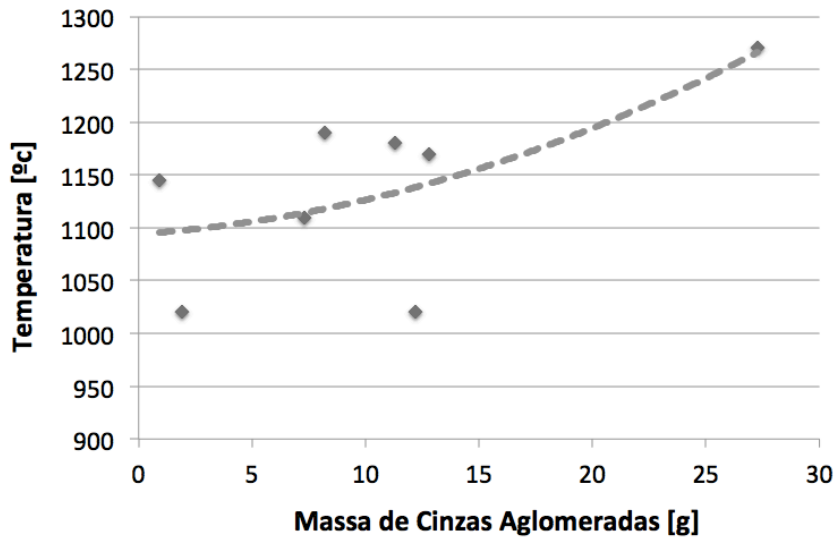


Figura 5.21 - Massa de cinzas aglomeradas em função da temperatura de grelha.

Para além da temperatura, a formação de cinzas aglomeradas parece estar também associada ao escoamento de AP. O seu aumento pode, por um lado, promover a remoção das cinzas da zona da grelha, arrastando-as e evitando que permaneçam tempo suficiente na grelha para que ocorra a agregação. Por outro lado, fracções de AP muito elevadas parecem ter um efeito negativo.

Os dois ensaios com formação mínima de cinzas, possuem temperaturas muito díspares. Uma temperatura elevada, pode levar à formação de cinzas aglomeradas, por ultrapassar o ponto de fusão do composto. No entanto, uma temperatura mais baixa pode não promover a volatilização de determinadas espécies químicas, mas tomar um valor que leve à volatilização de outras

espécies químicas, com ponto de fusão mais baixo, alterando a proporção química entre elementos. Assim sendo, esta proporção pode dar origem a compostos eutéticos de baixo ponto de fusão, levando à aglomeração das cinzas que residam na grelha.

Assim sendo, o processo de aglomeração de cinzas parece ser um fenómeno que depende de outras variáveis, para além da temperatura atingida e do caudal de ar que atravessa o leito.

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste capítulo abordam-se sucintamente os instrumentos utilizados na instalação experimental, as suas alterações, os objectivos do trabalho e são retiradas conclusões com base nos ensaios efectuados. Por fim, são sugeridos assuntos que possam integrar trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho partiu da montagem de toda a instalação experimental existente no DEM, utilizada para a realização de ensaios de combustão de pellets, com condições óptimas de funcionamento já conhecidas. Esta instalação é composta essencialmente por: *i)* uma caldeira protótipo doméstica com queimador que permite a regulação das fracções de AP e AS; *ii)* sistema de alimentação controlável; *iii)* sistema de extracção de gases de caudal variável; *iv)* sistema de dissipação de calor; *v)* analisador de gases de exaustão (CO, CO₂, O₂ e NO_x) e; *vi)* avançado sistema de controlo e aquisição de dados da *National Instruments*.

Após a montagem, foram realizadas melhorias à instalação. Parte das melhorias passaram pela eliminação de interferências eléctricas que ocorriam nos sensores de pressão e equipamento de controlo. Foram também colmatadas infiltrações de ar existentes na caldeira e reservatório de pellets.

Os objectivos dos testes realizados foram, principalmente, a avaliação da influência dos fluxos de ar (excesso de ar e fracção de AP) na: *i)* temperatura do leito; *ii)* formação de cinzas aglomeradas; *iii)* emissão de poluentes; *iv)* rendimento global.

Sendo assim, após realizados os ensaios, o trabalho permitiu retirar as seguintes conclusões:

- Os sensores de pressão possuem uma variação constante, de cerca de $\pm 0,02$ V, na sua tensão de saída, para pressões constantes. Esta diferença, por ser fixa, é especialmente significativa para gamas reduzidas de caudal de ar nas tubeiras. Desta forma, torna-se difícil a realização de ensaios com intervalos de AP muito estreitos, pois o seu valor é apenas conhecido, com rigor, através do cálculo da média dos valores registados durante cada ensaio, aquando do tratamento de dados.

- Ficou provada que a regulação dos tempos de paragem e funcionamento do sistema de alimentação, é um factor crucial na eficiência e estabilidade do processo de combustão.
- Um tempo de funcionamento de 13 s, inicialmente definido, provoca a debilitação da chama devido à introdução de uma grande quantidade de combustível numa altura em que a chama se encontra amortiçada, levando à alternância contínua entre um período de excesso de combustível e outro de défice de combustível. Este fenómeno leva à ocorrência de uma combustão pouco eficiente, caracterizada por um aumento da emissão de CO.
- Um bom compromisso, para o nível de potência testada, parece ser o de 9 s de funcionamento. Um tempo inferior conduz à ocorrência de períodos em que é introduzida uma quantidade de combustível menor que a ideal na câmara de combustão (perda de precisão do alimentador).
- À medida que aumenta, tanto o excesso de ar, como o AP, a taxa de reacção no leito cresce e o combustível é consumido a maior velocidade. Se a cadência de alimentação não acompanhar esta mudança, ocorrem períodos de excesso e défice de combustível que conduzem à situação de instabilidade da combustão e aumento das emissões de CO. Este facto sugere que um alimentador com precisão suficiente para funcionar entre intervalos de tempo mais curtos seria vantajoso.
- A temperatura registada ao nível da grelha diminui com o excesso de ar. No que diz respeito à fracção de ar primário, esta parece não possuir influência ou a sua tendência não é clara.
- A emissão média mínima de CO foi de 48 mg/Nm³ e ocorreu para $\lambda=1,9$ e AP=10%. Neste mesmo regime de excesso de ar, a combustão tornou-se ineficiente para fracções de AP em torno de 50%, onde se registaram as mais elevadas emissões de CO (mais de 3000 mg/Nm³).
- Para qualquer regime de excesso de ar e para o tipo de queimador testado, o aumento do AP conduz, normalmente, ao aumento das emissões de CO.

- A criação de um efeito de *swirl* no queimador, leva a que o nível de emissões de CO tenda a manter-se constante com o aumento do AP. Com a aplicação desta medida, as emissões são sempre maiores devido ao desalinhamento da chama em relação ao eixo do queimador, conduzindo os gases para regiões da câmara de combustão mais frias impedindo a sua combustão completa. No entanto, prevê-se que, se forem aplicados deflectores à saída do queimador que alinhem a chama, esta técnica pode permitir a queima com fracções de AP mais elevadas e com emissões de CO tão baixas quanto fracções de AP mais baixas.
- O aumento do excesso de ar conduziu, para determinadas fracções de AP, ao aumento ou diminuição das emissões de CO, o que sugere a influência combinada de outros factores como a fracção de AP, tempos da alimentação e o desenho do queimador.
- As concentrações de NO_x nos gases de exaustão registaram valores abaixo dos esperados para este tipo de equipamentos, que são normalmente da ordem das centenas. Este facto deve-se a infiltrações de ar na conduta de exaustão provocadas pelo funcionamento do ventilador. Estas infiltrações causam um efeito de diluição em O_2 superior ao utilizado para efeitos de correcção, medido ao nível da sonda de captação, à saída da caldeira. Sendo assim, os valores são tomados apenas como uma indicação do comportamento em função dos fluxos de ar testados.
- As emissões de NO_x aumentam com o excesso de ar. Tendo em conta as baixas temperaturas atingidas, este facto indica que o mecanismo preponderante na formação deste poluente deverá ser o mecanismo do combustível. Com o aumento do excesso de ar, ocorre um aumento global do oxigénio disponível, conduzindo à sua reacção com o NH_i no sentido da formação de NO. Pela mesma análise, com o aumento do AP, ocorre uma diminuição do oxigénio disponível para reacção na zona de chama, o que explica a ligeira redução da emissão de NO_x que se verifica com o aumento desta fracção.
- Numa aplicação doméstica, o permutador de calor teria de ser revisto pois encontra-se sobredimensionado. Para todos os ensaios realizados à potência de 12 kW, a temperatura dos gases de exaustão tomou valores inferiores a 100 °C, levando ao

aparecimento de água condensada no colector de gases de exaustão da caldeira e nas respectivas condutas.

- De uma forma genérica, o rendimento da caldeira diminui com o excesso de ar e com o AP. O máximo registado foi de 105% sendo, no entanto, calculado a partir do PCI, valor que excluiu o calor de condensação da água presente nos gases de exaustão.
- A formação de cinzas aglomeradas na grelha diminui com o aumento do excesso de ar, facto que parece estar associado à diminuição de temperatura da grelha que se verifica com essa alteração. Por outro lado, o mínimo ocorre para uma fracção de AP em torno dos 30%, que não corresponde, necessariamente, à menor temperatura. Desta forma, prevê-se a influência de outros fenómenos no processo de aglomeração das cinzas, nomeadamente os que dizem respeito à cinética química.
- No que diz respeito ao contorno do fenómeno de formação de cinzas, a combinação óptima ocorre para $\lambda=2,7$ e AP=30%. No entanto, a formação de cinzas aglomeradas foi também muito pequena para $\lambda=2,3$ e AP=30%, tendo sido registado neste regime 100% de rendimento, contra 98% do primeiro, bem como uma menor emissão de CO (65 contra 117 mg/Nm³ @13% O₂). A emissão de CO poderá ainda ser, eventualmente, reduzida com a criação do eleito de *swirl* e aplicação de deflectores de chama no queimador, aproximando-a da registada nas fracções de AP=10%.

6.2 TRABALHO FUTURO

A realização do presente trabalho, permitiu conhecer a influência dos fluxos de ar na temperatura e no fenómeno de aglomeração de cinzas ao nível da grelha. Contudo, ficaram por analisar alguns aspectos que poderiam ser úteis no sentido de perceber melhor o fenómeno que ocorre. Para além disso, os ensaios possibilitaram o conhecimento de algumas possíveis melhorias à instalação experimental e à caldeira/queimador, que poderão ainda ser estudadas. Estas melhorias, assim como os aspectos que ficaram por analisar, encontram-se sumariados em seguida sob forma de sugestões para trabalho futuro:

- Estudo de um sistema de alimentação mais fiável e que permita o carregamento de combustível com precisão, durante intervalos de tempo mais curtos.

- Idealização de um sistema que modele o número de tubos de fumo do permutador a ser utilizado, em função da potência, de forma a evitar o escape de gases a uma temperatura inferior a 100 °C e as conseqüentes condensações.
- Simulação e criação de um queimador que, através de efeitos aerodinâmicos (nomeadamente, o *swirl*), permita uma mistura mais eficaz entre os gases voláteis e o AS, sem que promova o desalinhamento da chama em relação ao eixo da grelha, no sentido de diminuir o nível de emissões de CO para a fracção de AP que se revelou mais interessante em termos de formação de cinzas aglomeradas.
- Estudo das condições óptimas para evitar a formação de cinzas aglomeradas para outros níveis de potência.
- Realização de uma análise química elementar à porção de cinzas recolhidas em cada um dos testes, para perceber se as condições de funcionamento levam à formação de cinzas com composições químicas diferentes e qual a sua influência na formação de aglomerados.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- [1] J. Bjerg, “Biomass 2020 : Opportunities, Challenges and Solutions,” 2011.
- [2] Eubionet, “National incentives and other framework promoting the use of bioenergy: National renewable energy plans, Portugal,” pp. 2010–2012, 2010.
- [3] J. Ferreira and M. E. Ferreira, “Portugal Pellet Report,” 2011.
- [4] F. Fiedler, “The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, no. 3, pp. 201–221, Jun. 2004.
- [5] S. R. Turns, *An Introduction To Combustion*, 2^a Edição. McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [6] M. Costa and P. Coelho, *Combustão*, 1^o Edição. Edições Orion, 2007.
- [7] M. Hansen, A. Jein, S. Hayes, and P. Bateman, *English Handbook for Wood Pellet Combustion*. EUBIA - European Biomass Industry Association, 2002.
- [8] F. El-Mahallawy and S. El-Din Habik, *Fundamentals and Technology of Combustion*. Elsevier, 2002.
- [9] E. C. D. T. Bio Intelligence Service, “Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs (II); Solid fuel small combustion installations,” vol. 33, no. December. pp. 1–100, 2009.
- [10] J. Dias, M. Costa, and J. L. T. Azevedo, “Test of a small domestic boiler using different pellets,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 531–539, Dec. 2004.
- [11] T. Nussbaumer, “Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction,” *Energy & Fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1510–1521, Nov. 2003.
- [12] V. K. Verma, S. Bram, F. Delattin, C. Schmidl, W. Haslinger, M. Worgetter, and J. De Ruyck, “Real life performance of domestic pellet boiler technologies as a function of operational loads: A case study of Belgium,” *Applied Energy*, May 2012.
- [13] B. Musil-Schlaffer, A. McCarry, C. Schmidl, and W. Haslinger, “European Wood-Heating Technology Survey: An overview of combustion principles and the energy and emissions performance characteristics of commercially available systems in Austria, Germany, Denmark, Norway, and Sweden.” New York State Energy Research And Development Authority, 2010.

- [14] J. Kjällstrand and M. Olsson, "Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 6, pp. 557–561, Dec. 2004.
- [15] R. Ferreira, "Parametrização das condições de combustão numa caldeira de biomassa," Universidade do Minho, 2009.
- [16] D. Bostr, N. Skoglund, A. Grimm, C. Boman, M. Ohman, M. Brostr, and R. Backman, "Ash Transformation Chemistry during Combustion of Biomass," pp. 85–93, 2012.
- [17] R. W. Bryers, "Fireside Slagging, Fouling, and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surface Due to Impurities in Steam-Raising Fuels," vol. 72, 1995.
- [18] I. Obernberger and G. Thek, *The Pellet Handbook*. Earthscan, 2010.
- [19] P. Alexandra and L. Teixeira, "Estudo da formação de depósitos e aglomeração de cinzas durante a combustão de biomassa em leito fluidizado e co-combustão com carvão para minimizar a sua ocorrência," 2012.
- [20] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. M. Jr, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass," 1998.
- [21] D. Vega, "ENERGY CROPS: VARIETY SELECTION AND DEFINITION OF BIOMASS PROPERTIES FOR COMBUSTION ON SMALL AND MEDIUM SCALE," pp. 1–31.
- [22] C. Gilbe, E. Lindstro, R. Backman, R. Samuelsson, J. Burvall, and O. Marcus, "Predicting Slagging Tendencies for Biomass Pellets Fired in Residential Appliances : A Comparison of Different Prediction Methods," no. 7, pp. 3680–3686, 2008.
- [23] M. Fernandez, *Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards Report on ash melting behaviour*, no. 038644. 2007.
- [24] E. Roedder, "Silicate Melt Systems," in *Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 3*, Pergamon Press.
- [25] HDG, "Wood chip, shaving and pellet boilers 100 / 105."
- [26] HDG, "Wood chip, shaving and pellet boilers, 25/30/35 kW."
- [27] Y. . Yang, V. . Sharifi, and J. Swithenbank, "Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds," *Fuel*, vol. 83, no. 11–12, pp. 1553–1562, Aug. 2004.
- [28] A. bv Instrumenten, "Betz micromanometer."
- [29] M. Trielli, "Medidoes de Vazão, Parte B - Mecânica dos Fluidos I."
- [30] (2003)S. G. L., "9000MGA Multy Gas Analyser Operating Manual." .

- [31] (2003)S. G. L., “4000VM Heated Vacuum NOx Analyser Operating Manual.”
- [32] M. E. Cardoso Ferreira, “Atomização Efervescente na Combustão de Óleos Usados,” Universidade do Minho, 2008.
- [33] E. C. for S. CEN, “European Standard EN 12809: Residential Independent Boilers Fired by Solid Fuel - Nominal Heat Output up to 50kW - Requirements and Test Methods.” 2001.

ANEXO A

FONTES, CARACTERÍSTICAS E EFEITOS NOCIVOS DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS MAIS COMUNS

ANEXO A – FONTES, CARACTERÍSTICAS E EFEITOS NOCIVOS DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS MAIS COMUNS

Na Tabela A.1 encontra-se uma descrição breve das características dos poluentes em questão, a sua origem como resultado de actividades antropogénicas bem como, os seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente.

Tabela A.1 - Fontes, características e efeitos nocivos dos poluentes atmosféricos mais comuns. Adaptada de [6] e [8].

Poluente	Características	Fontes antropogénicas	Efeitos
Monóxido de Carbono (CO)	Poluente primário. Gás incolor, inodoro com forte afinidade com a hemoglobina sanguínea.	Fogos florestais; queima incompleta de combustíveis e outros materiais contendo carbono e oxidação de poluentes orgânicos como o metano.	Absorção pelos pulmões. Possui capacidade de ligação à hemoglobina sanguínea muito superior ao oxigénio causando dificuldades respiratórias, asfixia e morte. Diminui a percepção visual e capacidade mental e afecta o desenvolvimento fetal.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Poluente primário. Gás incolor, odor pungente.	Queima de combustíveis fósseis contendo enxofre na sua composição. Processos industriais. Mineração de metais com enxofre.	Irritante para as mucosas dos olhos e vias respiratórias. Agravante de problemas cardiovasculares. Causa acidificação das águas e solos pela provocação de chuvas ácidas. Provoca corrosão de edifícios e materiais de construção.
Óxidos de Azoto (NO _x)	Poluente primário (NO) e secundário (normalmente NO ₂) Consiste numa mistura de gases com cor a variar entre incolor e vermelho-acastanhada.	Queima de combustíveis a altas temperaturas tanto em instalações industriais como em veículos automóveis. O NO emitido para a atmosfera é transformado posteriormente em NO ₂ por oxidação fotoquímica.	Provoca lesões nos brônquios e alvéolos pulmonares e levanta problemas de ordem cardiovascular. Provoca efeitos negativos na vegetação e provoca danos em materiais como os polímeros. É o principal responsável pela ocorrência de nevoeiro fotoquímico (smog).
Hidrocarbonetos (HC)	Poluente primário. Compostos orgânicos em forma gasosa ou partículas.	Queima incompleta de combustíveis que contêm carbono na sua constituição.	Exposição prolongada provoca irritação ocular, nasal e ao nível da garganta. Exposição crónica suspeita-se suscitar o aparecimento de cancro.
Partículas em	Poluente primário ou	Queima de combustíveis	Quanto menor o tamanho das

suspensão	secundário. São partículas dispersas na atmosfera constituídas por poeiras, cinzas, fuligem, metais e outros químicos.	sólidos em centrais termoeléctricas e outros equipamentos de combustão industriais e queima de combustíveis líquidos, especialmente em tráfego rodoviário. Alguns processos industriais como, por exemplo, as indústrias cimenteira e metalúrgica.	partículas, maior o perigo para a saúde. As partículas mais finas podem transportar substâncias tóxicas para as vias respiratórias inferiores acentuando os efeitos dos poluentes. Estão associados os problemas de tosse, irritação nasal, bronquite e asma. As partículas mais finas alojam-se profundamente nos alvéolos pulmonares causando graves problemas respiratórios e suspeita-se que possam mesmo conduzir ao aparecimento de cancro.
Ozono troposférico (O ₃)	Poluente secundário. Gás incolor ou azul pálido. Odor irritante em concentrações elevadas.	Resulta de um conjunto de reacções fotoquímicas complexas já ao nível da atmosfera, envolvendo compostos orgânicos voláteis, óxidos de azoto, oxigénio e radiação solar.	Provoca irritações oculares, nasais e ao nível da garganta conduzindo a tosse e dores de cabeça. Penetra profundamente no aparelho respiratório afectando-o, mesmo em exposições de curta duração e concentração, principalmente em crianças. Provoca efeitos nocivos na vegetação podendo em causa culturas de alimentos. Constituinte e também responsável pela ocorrência de nevoeiro fotoquímico.

ANEXO B

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO

ANEXO B - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO

Para a calibração dos sensores de pressão foi seguido o seguinte procedimento:

1. Iniciou-se o programa em LabView no modo Manual;
2. Abriram-se todas as válvulas de admissão de ar do queimador;
3. Conectou-se através de tubos de silicone a tubeira a calibrar em paralelo com o respectivo sensor de pressão e o micromanómetro Betz;
4. Registou-se a tensão medida, sendo esta o “zero” da equação;
5. Ligou-se o ventilador com a frequência de 10Hz e registou-se a tensão de saída do sensor e a pressão (na verdade uma depressão) medida no micromanómetro;
6. Aumentou-se a frequência do ventilador em 5Hz e registou-se a tensão de saída do sensor e a pressão medida no micromanómetro;
7. Repetiu-se o passo 6 até completar 60Hz;
8. Elaborou-se um gráfico de pontos utilizando o Excel e calculou-se uma regressão de 2º ou 3º grau conforme melhor se ajustou;
9. Repetiu-se os passos 4 a 8 para cada um dos restantes sensores das tubeiras e da placa de orifício.

ANEXO C

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO COMBUSTÍVEL

ANEXO C – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO COMBUSTÍVEL

São aqui expostas, na Tabela C.1, as principais propriedades do combustível utilizado. Apenas se apresentam os elementos químicos que estão presentes numa proporção igual ou superior a 0,001%.

Tabela C.1 – Propriedades físico-químicas do combustível

Teor em Humidade (%)	8,0
Teor em Cinzas a 800°C (%)	0,6
Matéria Volátil a 550°C (%)	91,7
PCI (kJ/kg)	17,1
Azoto, N (% base seca)	1,55
Carbono, C (% base seca)	50,8
Hidrogénio, H (% base seca)	5,39
Enxofre, S (% base seca)	0,037
Densidade a granel (g/cm³)	0,598
CL (%)	0,001
Cr (%)	0,004
Cu (%)	0,002
Mn (%)	0,011
Ni (%)	0,004
Al (%)	0,033
Fe (%)	0,023
K (%)	0,067
Na (%)	0,010
Si (%)	0,043
P (%)	0,014
Ti (%)	0,002

Mg (%)	0,058
Ca (%)	0,097
Zn (%)	0,001