



**Liliana Mendes
Valente**

**Monitorização das condições de operação de uma
caldeira a biomassa**





**Liliana Mendes
Valente**

**Monitorização das condições de operação de uma
caldeira a biomassa**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob orientação científica do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

"If you hear a voice within you say, 'You cannot paint,' then by all means paint, and that voice will be silenced" - Vincent Van Gogh

"Creativity can solve almost any problem. The creative act, the defeat of habit by originality, overcomes everything." — George Lois

"Passion is one great force that unleashes creativity, because if you're passionate about something, then you're more willing to take risks." - Yo-Yo Ma

"Study without desire spoils the memory, and it retains nothing that it takes in." - Leonardo da Vinci

"Nothing can be loved or hated unless it is first understood." – Leonardo da Vinci

"Learning never exhausts the mind." – Leonardo da Vinci

"The knowledge of all things is possible" – Leonardo da Vinci

"Details make perfection, and perfection is not a detail." – Leonardo da Vinci

"If you find from your own experience that something is a fact and it contradicts what some authority has written down, then you must abandon the authority and base your reasoning on your own findings." – Leonardo da Vinci

"You can learn anything." – Anonymous

"The true sign of intelligence is not knowledge but imagination." – Albert Einstein

o júri

presidente

Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

Professora Catedrática, Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

vogal

Professor Doutor Mário Manuel Gonçalves da Costa

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto
Superior Técnico

vogal

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento da
Universidade de Aveiro

Dedico este relatório a duas pessoas maravilhosas que abdicaram de muito para tornarem isto possível, aos meus pais.

Ao meu supervisor Engenheiro José Almeida, Engenheiro do Ambiente na empresa Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda., pela ajuda, partilha de conhecimentos, disponibilidade, apoio, amizade e motivação que sempre me transmitiu.

Para todos aqueles que de alguma forma permitiram e contribuíram de forma direta ou indireta para que este trabalho fosse realizado, apresento o meu sincero agradecimento e o meu bem-haja pela boa vontade e disponibilidade em ajudar-me. Contudo, gostaria de salientar de forma especial a minha gratidão:

- ao meu orientador Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, pelo ensinamento, partilha de experiência, disponibilidade, orientação e acompanhamento ao longo deste trabalho;
- à Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda., pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e contribuição para a minha formação tanto académica como profissional. Agradecer aos sócios Cesário Tavares, César Tavares, Manuel Cunha e João Couto pela oportunidade. Ao Fernando Santos pela sua boa disposição, alegria contagiante e amizade. Não esquecendo os colaboradores desta empresa, em especial a Ângela Almeida, pela amabilidade e disponibilidade em ajudar-me, assim como, os momentos de convívio que se proporcionaram;
- aos meus pais, José e Manuela, pelo seu amor e apoio incondicional e à minha irmã Letícia por me mimar constantemente;
- à minha “irmã”, Sandra Sorte, por me aturar durante este percurso, apoiando e incentivando esta fase da minha vida, pela sua amizade, compreensão e companheirismo, sem ti não seria a mesma coisa;
- ao meu grande amigo, Nelson Sales, por me aturar durante estes últimos 20 anos, por ser a pessoa que é e nunca mas nunca me deixar de apoiar;
- às pessoas que conheci durante esta jornada académica, que por todos os momentos de boa disposição, convívio, diversão e momentos bem passados, fazem com que o meu coração seja constantemente trespassado por uma saudade boa;
- à cidade de Aveiro por ser uma cidade de magia, luz e cor que me fez e faz sentir em casa.

agradecimentos

palavras-chave

sistema de monitorização, biomassa, sistema de combustão, caldeira, fornalha, sem-fim de alimentação, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxigénio, óxido de azoto, excesso de ar, temperatura

resumo

A reduzida informação e o pouco trabalho científico desenvolvido na área de sistemas de combustão de biomassa de média potência, faz dos objectivos propostos neste trabalho elementos importantes. O trabalho científico a seguir apresentado, vai permitir obter as bases para o desenvolvimento de condições apropriadas de operação de sistemas de combustão a biomassa, aumentando a eficiência e a rentabilidade económica deste tipo de sistema energético.

O principal objetivo do presente trabalho consistiu na aplicação de metodologias de monitorização que permitam caracterizar e melhorar a eficiência do sistema de combustão, na implementação dos métodos escolhidos e na monitorização das condições de operação de uma caldeira industrial de combustão de biomassa, destacando-se: (i) monitorização dos caudais de alimentação de biomassa à caldeira realizada por sistemas de alimentação sem-fim; (ii) análise e monitorização de temperaturas e pressão; (iii) monitorização do caudal de ar de combustão; (iv) monitorização do caudal de gases de exaustão; (v) monitorização da potência térmica; (vi) monitorização da composição do efluente gasoso. A caracterização físicas de amostras de biomassa, o teste a diferentes tipos de biomassa com diferentes condições de operação e a recolha de amostras de cinzas de combustão para a caracterização físico-química são outros métodos de monitorização e caracterização aplicados. Também foi desenvolvido e aplicado um ensaio de controlo do sistema de alimentação em modo de operação manual e comparado com o sistema de controlo do sistema de alimentação em modo de operação automático.

O estudo realizado permite concluir que deve ser desenvolvido e implementado um algoritmo de controlo e operação da fornalha que permita um doseamento mais adequado dos caudais de combustível e ar de combustão com vista a melhorar o desempenho do sistema combustão.

keywords

monitoring system, biomass, combustion system, boiler, furnace, screw-feeder, carbon monoxide, carbon dioxide, oxygen, nitrogen oxide, excess air, temperature

abstract

The lack of information and few scientific works developed in the area of medium scale biomass combustion systems, make the proposed objectives important elements. Scientific work presented below, will allow the development of appropriate operating conditions of combustion biomass systems, increasing efficiency and economic viability of this type of energy system.

The main objective of this work was to apply monitorization methodologies to characterize and improve the efficiency of the combustion system, the implementation of the chosen methods and the monitorization of the operating conditions of an industrial biomass boiler, highlighting: (i) monitorization of biomass flows by screw feeder systems; (ii) analysis and monitoring of temperature and pressure; (iii) monitorization of the supply air flow; (iv) monitorization of the flow rate of flue gases; (v) monitorization of the thermal power; (vi) monitorization of the composition of the gaseous effluent. Physical characterization of biomass samples, test of different types of biomass with different operating conditions and collection of samples of combustion ashes to physicochemical characterization are other methods of monitorization and characterization applied. It has also been developed and applied a feed control test in manual mode and compared with the feed control test in automatic operation mode.

The conducted study indicates that must be developed and implemented an operation and control algorithm of the furnace whereby a more proper dosing of fuel and combustion air flow rates to improve the performance of the combustion system.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e relevância do tema	1
1.2	Objectivos a desenvolver no estágio	2
2	Conversão térmica da biomassa	5
2.1	Biomassa	5
2.2	Utilização da biomassa como recurso energético	6
2.2.1	Utilização de biomassa versus combustíveis fósseis.....	6
2.3	Utilização da biomassa como recurso energético em Portugal	8
2.4	Ventil - Engenharia do Ambiente, Lda.	10
3	Sistema de combustão a biomassa.....	13
3.1	Características do combustível sólido – Biomassa.....	13
3.1.1	Composição química	13
3.1.2	Massa volúmica aparente	13
3.1.3	Análise próxima	14
3.1.4	Poder calorífico	16
3.2	Sistemas de alimentação de biomassa	17
3.2.1	Tipos de sistemas de alimentação	17
3.2.2	Sistema de alimentação por sem-fim	17
3.2.1	Problemas ao nível da alimentação por sem-fim	18
3.3	Processos de conversão térmica.....	19
3.3.1	Pirólise.....	19
3.3.2	Gasificação.....	20
3.1.3.	Combustão	20
3.4	Parâmetros de combustão	21

3.5	Formação de poluentes	22
3.6	Tecnologias de combustão	27
3.6.1	Tipos de sistemas de combustão	27
3.6.2	Tipos de grelhas nos sistemas de combustão	29
3.7	Fração inorgânica do combustível	29
3.7.1	Metais alcalinos	30
3.7.2	Efeito do cloro nos constituintes do sistema de combustão	30
3.7.3	Efeito do Cloreto de Potássio	31
3.7.4	Fenómeno de slagging	32
3.7.1	Redução dos efeitos de corrosão	33
3.8	Sistema de despoejamento	34
3.8.1	Separador de superfície – Ciclone	34
3.8.2	Configuração do ciclone	35
3.8.3	Eficiência de recolha do ciclone	36
3.9	Processo de controlo e optimização de um sistema de combustão	37
4	Descrição e sistematização dos componentes e sistemas a caracterizar no sistema caso-de-estudo	39
4.1	Lay-out do sistema caso-de-estudo	39
4.2	Caracterização de biomassa	39
4.3	Sistema de alimentação	41
4.3.1	Sistemas de segurança associados ao sistema de alimentação	42
4.4	Sistemas de introdução de ar de combustão	42
4.4.1	Instrumentos de medição de caudais	45
4.4.2	Quantificação de caudais	46
4.5	Sistema de combustão Ventil	48
4.5.1	Estrutura da caldeira	48
4.5.2	Transferência de energia térmica dos gases de combustão para a água	49

4.5.3	Caracterização das condições da fornalha	50
4.6	Sistema de despoejamento	51
4.7	Extração dos gases de combustão para a atmosfera.....	52
4.8	Sistemas de monitorização e controlo	53
4.8.1	Sistema de controlo e monitorização da caldeira.....	53
4.8.2	Sistema de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados de todos os componentes do sistema de combustão	54
4.8.3	Sistema de multiplexagem para as sondas de amostragem.....	55
4.8.4	Monitorização e controlo de temperatura	56
4.8.5	Monitorização e controlo de pressão	56
4.8.6	Monitorização de gases de combustão	58
4.8.7	Monitorização e controlo de humidade	60
4.8.8	Monitorização do caudal de água de aquecimento.....	62
5	Aplicação dos métodos de monitorização do sistema de combustão do caso de estudo.....	63
5.1	Caracterização física das diferentes biomassas utilizadas.....	63
5.1.1	Preparação das amostras	63
5.1.2	Determinação do teor de humidade	64
5.1.3	Determinação do teor de cinzas.....	65
5.1.4	Determinação do teor de matéria volátil.....	66
5.1.5	Determinação do teor de carbono fixo	66
5.1.6	Determinação do poder calorífico	67
5.2	Determinação da massa volúmica aparente das diferentes biomassas utilizadas	69
5.3	Calibração do sistema de alimentação sem-fim	70
5.4	Quantificação do caudal de ar de combustão.....	73
5.4.1	Método 1- Aplicação de uma conduta circular ao ventilador.....	74
5.4.2	Método 2 – Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão..	76

5.5	Desenvolvimento de sondas de amostragem de temperatura e gases de combustão	77
5.5.1	Construção de sondas de amostragem	77
5.5.2	Processo de arrefecimento das sondas de amostragem	79
5.6	Quantificação do caudal do gás de combustão	79
5.7	Amostragem de cinzas	80
6	Resultados.....	83
6.1	Caracterização de biomassa	83
6.1.1	Análise próxima.....	83
6.1.2	Análise elementar.....	84
6.1.3	Poder Calorífico Superior e Inferior.....	85
6.2	Aplicação dos vários métodos de monitorização e controlo do sistema de combustão	85
6.2.1	Calibração do sem-fim de alimentação	86
6.2.1	Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim.....	87
6.2.2	Perfil de temperatura registada na fornalha	89
6.2.3	Perfil de temperatura registada na zona de permuta de calor e saída da caldeira.....	90
6.2.4	Caracterização do gás de combustão quanto à emissão de CO, O ₂ , NO e CO ₂ 92	
6.2.5	Perfil de pressão diferencial medida em contínuo no centro da fornalha	95
6.2.6	Perfil de Oxigénio, em base tal e qual, medido em contínuo antes do ventilador de extração de gases de combustão.....	96
6.2.7	Perfil de temperatura dos gases de exaustão, medido em contínuo à saída da caldeira.....	97
6.2.8	Perfil de potência térmica do sistema de combustão.....	98
6.3	Conclusão	99
7	Trabalhos desenvolvidos para outras tecnologias Ventil	103
7.1	Caracterização de depósitos na superfície das paredes do pirolisador	103

7.2	Características do combustível utilizado no sistema em estudo	103
7.3	Caracterização de amostras de material depositado nas superfícies expostas aos gases de pirólise e combustão, utilizando Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM - EDS)	106
7.3.1	Amostra 1	107
7.3.2	Amostra 2	109
7.3.3	Amostra 3	110
7.4	Discussão	113
7.5	Material aplicado na construção dos reatores de pirólise	115
7.6	Conclusão	116
8	Conclusão	117
A	Anexos	129
A.1	Anexo A – Caracterização da biomassa	129
A.1.1	Métodos de preparação de amostras	129
A.1.2	Determinação do teor de humidade de uma amostra	130
A.1.3	Determinação do teor de cinzas	132
A.1.4	Determinação do teor de matéria volátil	134

Índice de Figuras

Figura 1 – Captação de CO ₂ na formação de biomassa	5
Figura 2 – Total de potência instalada renovável em Portugal (Fonte: INEGI/APREN (http://e2p.inegi.up.pt/#Tec2 (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014)))	9
Figura 3 – Total de potência instalada de biomassa por distrito (Adaptado de INEGI/APREN (http://e2p.inegi.up.pt/index.asp#Tec2 (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014)))	9
Figura 4 – Potência instalada em Portugal (http://e2p.inegi.up.pt/#Tec2 (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014))	10
Figura 5 – Formação de NO _x durante o processo de combustão (adaptado de Miller & Tillman 2008)	25
Figura 6 – Representação esquemática de três estágios de libertação de N-combustível (adaptado de Yin et al. 2008)	25
Figura 7 – Processos de combustão de biomassa (adaptado de Van Loo & Koopejan J., 2008)	27
Figura 8 – Representação esquemática de sistema de combustão com alimentação inferior (Van Loo & Koopejan J., 2008)	28
Figura 9 – Representação esquemática dos diferentes destinos da cinza na fornalha (adaptado de Niu et al. 2014)	32
Figura 10 – Representação esquemática de um ciclone de fluxo invertido (Adaptado de Shin et al. 2005)	36
Figura 11 – Representação esquemática dos componentes do sistema de combustão a biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.)	39
Figura 12 – Casca de Pinheiro	40
Figura 13 – Mistura de pellets	40
Figura 14 – Pellets de Palha	40
Figura 15 – Pellets de Madeira	40
Figura 16 – Carvão de Acácia (Produzido por tecnologia Ventil)	40
Figura 17 – Sistema de alimentação sem-fim com passos variáveis (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.)	41
Figura 18 – Sem-fim de alimentação inferior acoplado à fornalha (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.)	41

Figura 19 - Sistema de detecção e extinção de incêndio. Sistema elétrico (esquerda). Sistema mecânico (direita) (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	42
Figura 20 – Ventilador centrífugo RM 280 (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	43
Figura 21 – Condução seccionada para a introdução de ar primário, secundário e terciário na caldeira do caso de estudo (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	43
Figura 22 – Curva de funcionamento do ventilador centrífugo RM 280 usado na introdução de ar na fornalha (adaptado do catálogo de ventiladores centrífugos modelos RM da MZ Aspiratori, Budrio Bologna).	44
Figura 23 – Entradas de ar de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	44
Figura 24 – Constituição de um tubo de Pitot normalizado (adaptado da Ficha Técnica da <i>KIMO Instruments</i>).	45
Figura 25 – Ilustração da secção de amostragem em condutas circulares. a) Definições de condução circular; b) e c) Localização da secção de amostragem (adaptado da Norma NP 2167:2007).	47
Figura 26 – Representação esquemática da estrutura genérica de uma caldeira Ventil modelo CVT (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	48
Figura 27 – Representação esquemática da transferência de calor dos gases de combustão para a água de aquecimento (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	49
Figura 28 – Representação esquemática dos pontos de monitorização/medição e respetivas variáveis a obter com recurso a sondas de amostragem e termopares (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	50
Figura 29 – Sistema de despoeiramento – mult ciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	51
Figura 30 – Balde de recolha de cinzas volantes recolhidas nos ciclones individuais do mult ciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	51
Figura 31 – Ventilador de extração dos gases de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	52
Figura 32 – Sensor de pressão CP110 da <i>Kimo instruments</i> instalado num ponto fixo da caldeira para medição em contínuo da depressão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	53
Figura 33 – Sistema de aquisição de dados, controlo e monitorização do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	53

Figura 34 – Sistema de controlo da caldeira (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	54
Figura 35 – Sistema de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados de todos os componentes do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	55
Figura 36 – Sistema de multiplexagem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	56
Figura 37 – Termopar tipo N (0...1250°C) para leitura de temperaturas ao longo do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	56
Figura 38 – Tomas de amostragem para medição de perdas de carga com recurso a um manómetro em U coluna de água (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	57
Figura 39 – Transmissor de pressão diferencial, tipo 404304 da <i>Jumo Instrument Co. Ltd</i> (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	58
Figura 40 – Sistema de monitorização de gases de combustão. Analisador de gases ABB no canto superior direito. Condicionador de gases em baixo do lado direito (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	59
Figura 41 – Representação esquemática do condicionador de gás CSS-V1 (adaptado do manual de operação do condicionador de gás da M&C®, série CSS, versão CSS-V1).....	59
Figura 42 – Sistemas de monitorização do caudal de água de aquecimento. Sistemas estáticos e compactos de ultrassons para medição de energia – <i>SonometerTM 1100 da Danfoss</i> (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	62
Figura 43 – Representação esquemática para aplicação das sondas de temperatura numa rede de distribuição de água para aquecimento.	62
Figura 44 – Esquartejamento de amostras para obtenção de uma amostra teste representativa.....	63
Figura 45 – Redução de tamanho da biomassa usando um almofariz de Ágata.....	63
Figura 46 – Moinho de corte e acessórios.	64
Figura 47 – Amostras de biomassa usadas na determinação do teor de humidade.	64
Figura 48 – Cadinhos com a amostra de biomassa após mufla na determinação do teor de cinzas. a) Carvão de Acácia; b) Casca de pinheiro; c) Mistura de Pellets; d) Pellets de Palha; e) Pellets de madeira.	65
Figura 49 – Mufla para determinação do teor de matéria volátil; suporte e respetivos cadinhos.....	66

Figura 50 – Recipiente usado para a determinação da massa da biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	70
Figura 51 – Balança dinamométrica Cachapuz (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	70
Figura 52 – Configuração do sistema de alimentação de sem-fim do caso de estudo (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	70
Figura 53 – Prolongamento da estrutura do sem-fim para simular as condições de combustão dentro do cadinho da fornalha (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	71
Figura 54 – Aspecto do cadinho da estrutura de prolongamento do sistema sem-fim preenchido com biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	71
Figure 55 – Recolha de biomassa com recurso a um big-bag (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	72
Figura 56 – Monitorização do sistema de alimentação sem-fim pelo sistema de controlo da caldeira (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).	72
Figura 57 – Guilhotina de fecho da base da tremonha de alimentação do sistema de alimentação sem-fim (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).....	73
Figura 58 – Definição da toma e secção de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	74
Figura 59 – Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão na fornalha (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	76
Figura 60 - Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão na fornalha com secção de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	77
Figura 61 – Sonda de amostragem em aço inox (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	77
Figura 62 – Vista da posição das sondas de amostragem no interior das câmaras de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	78
Figura 63 – Entrada e saída de água. fixação do termopar tipo N e extração de gases de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	78
Figura 64 – Copo de condensados (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	78
Figura 65 – Termopar tipo N (0...1250 °C) a introduzir na sonda de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	78
Figura 66 – Coletores de recirculação de água para o arrefecimento das sondas de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	79

Figura 67 – Medição da velocidade de escoamento dos gases de combustão, aplicação do tubo de Pitot na conduta de ligação da caldeira ao multiciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	80
Figura 68 – Zona junto à porta caldeira (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).	81
Figura 69 – Zona de inversão de gases do permutador (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).....	81
Figura 70 – Zona de combustão de biomassa; 1 – Cadinho da fornalha; 2 – zona de introdução de ar primário; 3 – Ponto de amostragem sobre as grelhas de combustão.	81
Figura 71 – Análise próxima a diferentes tipos de biomassa.....	84
Figura 72 – Estimativa da composição elementar com base nas correlações da literatura (Parikh et al. 2007).....	84
Figura 73 – Estimativa do Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior de diferentes tipos de biomassa obtida com base na correlação de Channiwala & Parikh 2002d.....	85
Figura 74 – Reta de calibração do sem-fim de alimentação aplicado ao sistema de combustão em estudo (lado direito) para pellets de madeira. Relação entre o caudal mássico e a potência térmica (lado esquerdo).....	87
Figura 75 – Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim, para uma operação em modo automático. P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.....	88
Figura 76 – Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim, para uma operação em modo manual.....	89
Figura 77 – Perfil de temperatura referente ao interior das câmaras de combustão, obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.....	90
Figura 78 - Perfil de temperaturas referente à entrada dos gases de combustão no primeiro conjunto de tubulares (sonda 7), no segundo conjunto de tubulares (sonda 8), à saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9) e saída da caldeira para o multiciclone (sonda 10), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da	

caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.....	91
Figura 79 – Perfil de CO vs perfil O ₂ do gás de combustão, em base seca, extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	92
Figura 80 – Perfil de CO vs temperatura no interior da câmara de combustão secundária (sonda 5), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	93
Figura 81 – Perfil de NO vs perfil CO ₂ do gás de combustão, em base seca, extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	94
Figura 82 – Perfil de CO ₂ e NO (extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9)) vs temperatura no interior da câmara de combustão (sonda 5), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	95
Figura 83 – Perfil de pressão diferencial, medida em contínuo no centro da fornalha e com recurso a um transmissor de pressão <i>Kimo</i> , para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	96
Figura 84 – Perfil de oxigénio, em base tal e qual, medido em contínuo antes do ventilador de extração de gases de combustão, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo	

reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	97
Figura 85 – Perfil de temperatura dos gases de exaustão, medido em contínuo à saída da caldeira, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	97
Figura 86 – Perfil de potência térmica obtido com a dissipação de energia para o exterior da unidade fabril, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.	99
Figura 87 – Amostra recolhida no ventilador de um sistema de pirólise, com alimentação a pellets de bagaço de azeitona.....	107
Figura 88 – Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 1.	107
Figura 89 – Espectros EDS obtidos num ponto da superfície da Amostra 1.	108
Figura 90 – Amostra recolhida nas paredes exteriores, localização na parte central inferior, de um pirolisador.....	109
Figura 91 – Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 2.	109
Figura 92 – Espectro EDS obtido num ponto na superfície da Amostra 2.	110
Figura 93 – Amostra recolhida nas paredes exteriores, localização na parte inferior, de um pirolisador.....	111
Figura 94 - Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 3.	111
Figura 95 – Espectros EDS obtidos num ponto na superfície da Amostra 3.	112

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Intervalos de tempo (alimentação e repouso) impostos pelo sistema de controlo da caldeira e quantidade total de material introduzido na fornalha durante o período de alimentação, para uma operação em modo automático.....	88
Tabela 2 – Intervalos de tempo (alimentação e repouso) impostos pelo operador e quantidade total de material introduzido na fornalha durante o período de alimentação, para uma operação em modo manual.....	89
Tabela 3 – Temperatura média registada pelos termopares das quatro sondas, para a operação em modo automático.....	91
Tabela 4 – Temperatura média registada pelos termopares das quatro sondas, para a operação em modo manual.....	91
Tabela 5 – Caudal de água que atravessa a bomba 1 e bomba 2 (para uma pressão máxima de 3 bar).	98
Tabela 6 – Composição elementar do aço P265GH usado para construção dos reatores.	103
Tabela 7: Caracterização física e obtenção do Poder Calorífico Superior dos pellets de bagaço de azeitona.....	104
Tabela 8: Estimativa da composição elementar, em termos de CHO de pellets de bagaço de azeitona com base nas Eq.(27) a Eq.(29) (Parikh et al. 2007).	105
Tabela 9: Composição elementar, em termos de CHO dos pellets de bagaço de azeitona (Şensöz et al. 2006).....	105
Tabela 10 : Comparação entre o valor do Poder Calorífico teórico e estimado.....	106
Tabela 11 – Principais elementos químicos identificados num ponto da superfície da Amostra 1.....	108
Tabela 12 – Principais elementos químicos detectados num ponto da superfície da Amostra 2.....	110
Tabela 13 - Principais elementos químicos observados num ponto na superfície da Amostra 3.....	112
Tabela 14 – Razões atómicas entre os elementos obtidos por análise EDS	114

Lista de Abreviaturas

ACV – avaliação ciclo de vida

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

Batch – reator agitado descontínuo

CVT – modelos de caldeiras verticais

COV – compostos orgânicos voláteis

I&DT – investigação e desenvolvimento tecnológico

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

IPVC – Instituto Politécnico de Viana do Castelo

NDIR – tecnologia de infravermelho não dispersivo

PAH – hidrocarboneto aromático policíclico

SCT – sistema científico e tecnológico

UA – Universidade de Aveiro

Nomenclatura

A – área da conduta da secção de amostragem [m^2]

a – altura da secção de entrada (ciclone) [m]

a_0 – coeficiente angular [-]

a_1 – ponto onde a reta intercepta o eixo y [-]

Al – alumínio [-]

b – largura da secção de entrada (ciclone) [m]

B – diâmetro da saída de partículas (ciclone) [m]

C – carbono [-]

Ca – cálcio [-]

CF – carbono fixo [-]

$C_6H_{12}O_6$ – glucose [-]

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

CH₄ – metano [-]

CO – monóxido de carbono [-]

CO₂ – dióxido de carbono [-]

Cl – cloro [-]

cp – calor específico a pressão constante [J·kg⁻¹·K⁻¹]

Cr – crómio [-]

Cr₂O₃ – óxido de cromo [-]

Dc – diâmetro do corpo (ciclone) [m]

De – diâmetro da conduta de para a saída de gás [m]

Dh – diâmetro hidráulico [m]

f(%) – frequência de funcionamento do sem-fim [%]

Fe₂O₃ – óxido de ferro [-]

g – aceleração da gravidade [m.s⁻²]

H – hidrogénio [-]

H – altura total (ciclone) [m]

h_{fg,T} – entalpia de vaporização da água à temperatura de referência especificada [MJ·kg⁻¹]

H₂O – água [-]

H₂ – hidrogénio [-]

HCN – cianeto de hidrogénio [-]

HCl – ácido clorídrico [-]

HNCO – ácido cianúrico [-]

K – potássio [-]

KCl – cloreto de potássio [-]

kp – o fator de correção do tubo de Pitot [-]

KOH – hidróxido de potássio [-]

K₂SO₄ – sulfato de potássio [-]

MV – matéria volátil [% bs]

m – massa [kg]

N – azoto [-]

Na – sódio [-]

NaCl – cloreto de sódio [-]

Na₂SO₄ – sulfato de sódio [-]

NO_x – óxidos de azoto [-]

NO₂ – dióxido de azoto [-]

NH₃ – amoníaco [-]

O – oxigénio [-]

P – fósforo [-]

PCI – poder calorífico inferior [kJ·kg⁻¹]

PCS – poder calorífico superior [kJ·kg⁻¹]

PM – matéria particulada [-]

ppm – parte por milhão [-]

S – enxofre [-]

S – comprimento do tubo de saída dos gases (ciclone) [m]

SO_x – óxidos de enxofre [-]

SO₂ – dióxido de enxofre [-]

Si – silício [-]

SiO₂ – dióxido de silício [-]

TC – teor de cinzas [% bs]

TH – teor de humidade [% bs]

u – velocidade de escoamento do efluente gasoso [m·h⁻¹]

V – volume [m³]

w_{HR} – fração mássica de hidrogénio no combustível [bs]

W_{WH} – teor de humidade numa amostra [bs]

W_{WR} – razão mássica de humidade no combustível [bs]

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

x_1 – distância a montante da toma de amostragem [m]

x_2 – distância a jusante da toma de amostragem [m]

Δz_d – diferença de altura do líquido manométrico nos dois ramos de tubo em U [m]

Δp_d – diferença entre a pressão dinâmica e a pressão diferencial [m]

Letras Gregas

λ – Coeficiente de excesso de ar [-]

η – Rendimento [%]

ρ – Massa volúmica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Subscritos

Btq – base tal e qual

bs – base seca

1 Introdução

1.1 Motivação e relevância do tema

A biomassa, devido à sua grande disponibilidade, permite que seja olhada como uma estratégia global de fuga aos tradicionais combustíveis (petróleo, carvão e gás natural), permitindo ir ao encontro das metas de redução das emissões de poluentes atmosféricos, levando à redução de custos associados ao consumo de combustíveis fósseis e ao mesmo tempo fazer face à cada vez mais evidente escassez destes combustíveis.

Usando tecnologias de conversão adequadas, a biomassa, devido às suas propriedades, pode ser convertida a combustível por diferentes processos. As tecnologias de conversão utilizadas devem ser eficientes e a sua escolha relaciona-se com o tipo e quantidade de biomassa disponível, quantidade de energia desejada, *standards* ambientais, condições económicas, tamanho do equipamento e a sua configuração óptima, capacidade de produção óptima, tamanho e escala das instalações entre outros fatores. A conversão energética pode ser feita a partir de processos termoquímicos (combustão, pirólise, gasificação e liquefação), bioquímicos/biológicos (digestão e fermentação) e por extração mecânica. O principal processo utilizado é a conversão termoquímica onde a combustão, gasificação e pirólise são usados para recuperar a energia contida na biomassa. (Saidur et al. 2011; Yılmaz & Selim 2013; Steer et al. 2013).

Devido à pouca informação disponível e trabalho científico desenvolvido nesta área, o desenvolvimento dos objectivos propostos é de grande importância. O trabalho científico a seguir apresentado, vai permitir desenvolver condições apropriadas de operação de sistemas de combustão a biomassa, aumentando a eficiência energética e financeira deste tipo de sistema.

Destaca-se a importância deste trabalho pela forma constante com que a sociedade pressiona a comunidade científica para melhoramento e desenvolvimento de tecnologia capaz de melhorar o dia-a-dia, proporcionando um crescente bem-estar e conforto.

1.2 Objectivos a desenvolver no estágio

No âmbito do cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, foi desenvolvido um estágio na empresa Ventil – Engenharia do Ambiente, fabricante português de caldeiras a biomassa. O plano de trabalhos vai ter como base um projeto de I&DT Empresas em Co-promoção intitulado “*Plug&Heat – Sistema compacto de média potência para a produção de energia térmica a partir de biomassa.*”, o qual se insere na modalidade “Projetos em Co-Promoção” inscrita na tipologia “I&DT empresas”. O projeto é liderado pela Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda em co-promoção com duas entidades do Sistema Científico e Tecnológico (SCT), a Universidade de Aveiro (UA) (competências no domínio da Engenharia do Ambiente e Engenharia Mecânica) e o Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC) (Estratégia e plano de marketing).

O estágio a ser desenvolvido na VENTIL – Engenharia do Ambiente LDA, tem como objectivo desenvolver competências ao nível da monitorização e caracterização das condições de operação de uma caldeira industrial de combustão de biomassa para a produção de água quente, assim como a implementação de uma metodologia de caracterização em conjunto com a empresa e a Universidade de Aveiro para servir de base à subsequente melhoria da eficiência das caldeiras. A aplicação de uma metodologia para uma monitorização e caracterização mais eficaz vai ser aplicada a uma caldeira industrial a biomassa com uma potência nominal de 581 kW_{th}.

Assim, este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Aplicar metodologias de monitorização que possam ser adaptadas a sistemas de combustão, no sentido de permitir melhorar a sua eficiência;
 - i. Seleção de equipamentos, materiais e métodos que possam ser aplicados em ambientes industriais e que permitam uma monitorização fiável e rigorosa das variáveis de operação de uma caldeira;
 - ii. Definição das características construtivas de instrumentos que permitam monitorizar e medir as variáveis de operação de uma caldeira a biomassa;
 - iii. Seleção dos pontos de amostragem no sistema de combustão a monitorizar;
 - iv. Desenvolvimento de infraestruturas que permitam a aplicação dos métodos idealizados.

- b) Implementar os métodos desenvolvidos e torná-los operacionais de acordo com as condições de operação do sistema de combustão e das variáveis que se pretendem obter;
- c) Monitorizar as condições de operação de uma caldeira industrial de combustão de biomassa aplicando diferentes combustíveis sólidos;
 - i. Monitorização dos caudais de alimentação de biomassa à caldeira realizada por sistemas de alimentação sem-fim;
 - ii. Monitorização de temperatura e pressão;
 - iii. Monitorização da humidade;
 - iv. Monitorização do caudal de ar de combustão;
 - v. Monitorização do caudal de gases de exaustão;
 - vi. Monitorização do caudal de água de aquecimento;
 - vii. Monitorização da potência térmica;
 - viii. Monitorização da composição do efluente gasoso.
- d) Caracterização física de amostras de biomassa;
- e) Testar diferentes tipos de biomassa com diferentes condições de operação;
- f) Recolher amostras de cinzas de combustão para caracterização físico-química.

2 Conversão térmica da biomassa

O quadro comum para a promoção de energia proveniente das fontes renováveis (Diretiva 2009/28/CE) define biomassa como “a fracção biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.”

2.1 Biomassa

O termo biomassa pode ser definido como qualquer material biológico. Através dos processos de fotossíntese a energia da radiação solar é convertida em energia química e armazenada nas plantas. Nos processos de fotossíntese (Eq.(1) e Eq.(2)), o Dióxido de Carbono contido na atmosfera é transformado em moléculas contendo Carbono (i.e. açúcares), os quais são armazenados nas plantas (Figura 1). Estes processos são também a principal fonte de Oxigénio atmosférico, essencial para a respiração das plantas e animais e para as reações de combustão que impulsionam o desenvolvimento da sociedade moderna (Saidur et al. 2011; Jenkins et al. 1998).

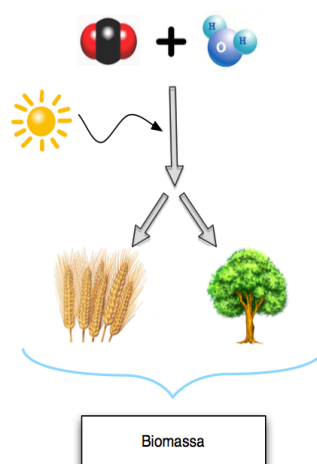
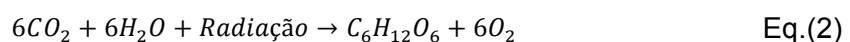
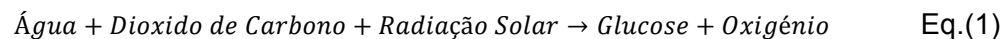


Figura 1 – Captação de CO₂ na formação de biomassa

A utilização do Dióxido de Carbono existente na atmosfera pelas plantas, durante os processos de fotossíntese, pode ser descrito como um ciclo, pois no fim de vida das plantas o Dióxido de Carbono armazenado volta à atmosfera (o Carbono das plantas reage com o Oxigénio do ar para formar Dióxido de Carbono) (Ed. James H. Clack, Fabien E. I. Deswarte, 2009; Saidur et al. 2011). Este ciclo é também conhecido como o Ciclo do Carbono (Saidur et al. 2011; Abbasi & Abbasi 2010; Demirbas 2004; Demirbas 2005).

2.2 Utilização da biomassa como recurso energético

Os combustíveis fósseis continuam a liderar o mundo como principal fonte de energia (Carpio et al. 2013; Saidur et al. 2011). No entanto, o aumento das emissões de gases com efeito de estufa, i.e. CO₂, CH₄ e N₂O, leva a problemas ambientais como o aquecimento global, chuvas ácidas, *smog* urbano, entre outros (Saidur et al. 2011; Carpio et al. 2013). Uma das principais fontes de CO₂, principal gás com contribuição para o efeito de estufa, é a queima de combustíveis fósseis (Saidur et al. 2011).

O uso de biomassa é uma alternativa economicamente favorável e uma possível contribuição para a redução das emissões de CO₂ (Carpio et al. 2013). Assim, na tentativa de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e fazer face ao aumento do preço dos combustíveis fósseis, muitas comunidades optam por trocar o uso destes combustíveis por biomassa (Sippula et al. 2009b).

Numa situação ideal, o processo de combustão completa de biomassa, pode considerar-se como um processo “neutro” (no balanço) de carbono (Esteban et al. 2014) Ou seja, a aplicação de processos de conversão térmica à biomassa permite a redução das emissões de CO₂ (Saidur et al. 2011). Ao invés, a queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis, num curto espaço de tempo, leva à libertação de CO₂ em quantidades elevadas, implicando uma adição deste composto químico na atmosfera (Saidur et al. 2011).

2.2.1 Utilização de biomassa versus combustíveis fósseis

Carpio *et al.* 2013 realizaram estudos a três tipos de sistemas de combustão (gasóleo, gás natural e biomassa) com características similares para aquecimento e produção de água quente em dois tipos habitações. Os estudos foram realizados em seis cidades da Península Ibérica com diferentes condições climáticas (Carpio et al.

2013). Os dados obtidos pelos autores (Carpio et al. 2013), mostram que durante o processo de combustão as emissões de CO₂ são superiores para o gasóleo e menores para a biomassa. Carpio *et al.* 2013 apresentam ainda neste estudo conclusões de outros autores que referem que a substituição do gasóleo por biomassa leva à redução das emissões de CO₂.

Comparações de impactos ambientais provenientes da utilização de biomassa e combustíveis fósseis em caldeiras de média potência foram feitas por Díaz *et al.* 2008 através da aplicação da metodologia de Avaliação Ciclo de Vida (ACV). Os autores concluíram que o uso de biomassa apresenta menor impacto em oito das dez categorias consideradas (depleção abiótica, aquecimento global, depleção da camada de Ozono, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade de água salgada, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização), apresentando-se assim um processo mais sustentável (Díaz et al. 2008). O resultado da ACV das caldeiras a *diesel* mostra que a combustão deste combustível tem elevado impacto em oito das dez categorias consideradas, destacando-se o aquecimento global, a depleção da camada de Ozono e a oxidação fotoquímica. Desde modo, o uso de biomassa para produção de energia pode ser visto como um sistema viável de baixo impacto ambiental (Díaz et al. 2008).

A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida foi também aplicada por Esteban *et al.* 2014 na comparação do comportamento de uma caldeira a derivados de petróleo e de uma caldeira a estilha, ambas para aquecimento doméstico. A ACV permite avaliar os impactos dos dois combustíveis usados e os comportamentos do ponto de vista ambiental. A análise dos resultados mostrou que a caldeira a estilha é melhor que a caldeira a derivados de petróleo em quase todas as categorias analisadas (Não tóxicas: potencial de acidificação, potencial de eutrofização, aquecimento global, depleção da camada de Ozono e potencial de formação de Ozono fotoquímico. Toxicológicas: água, solo, humana).

Durante o processo de combustão de biomassa existem emissões de partículas para a atmosfera. A emissão de partículas com granulometrias finas (PM1 e PM2,5) deve ter especial atenção devido ao elevado potencial de risco e efeitos adversos que as partículas exercem sobre a saúde humana (doenças respiratórias e cardiovasculares) (Sippula et al. 2009).

Estudos desenvolvidos por Sippula *et al.* 2009b caracterizaram a emissão de partículas provenientes de uma caldeira a biomassa de pequena escala para

aquecimento urbano ("*District Heating*") (Sippula et al. 2009b). Esta investigação concluiu que a aplicação de tecnologias de limpeza aos gases de combustão permite obter um elevado potencial de redução na emissão de partículas. Ainda com base nestes estudos, foi feita uma comparação entre a emissão de partículas provenientes da caldeira a biomassa anteriormente estudada e uma caldeira a derivados de petróleo (*Heavy Fuel Oil*) (Sippula et al. 2009a). Da nova comparação, os autores concluíram que a aplicação de uma tecnologia de limpeza na caldeira a biomassa reduz a emissão de partículas para o mesmo nível ou para um nível inferior relativamente à emissão de partículas de uma caldeira a derivados de petróleo. Destacaram também que as partículas libertadas pela caldeira a derivados de petróleo são de menor diâmetro, com uma elevada concentração em número e que existe uma emissão de SO₂ considerável, a qual contribui para a formação secundária de partículas na atmosfera (Sippula et al. 2009a).

As propriedades toxicológicas das partículas de granulometria fina foram comparadas em conjunto com as suas emissões por Kaivosoja *et al.* 2013. Esta comparação foi realizada tanto para caldeiras a biomassa como para caldeiras a derivados de petróleo. A análise foi feita a sistemas de pequena (20-25 kW) e média (5-10MW) escala em sistemas de produção de energia descentralizada para pequenas zonas urbanas ("*District Heating*"). Kaivosoja *et al.* 2013 concluíram que do ponto de vista toxicológico a pior opção para produção de energia seria a combustão de derivados de petróleo (*Heavy Fuel Oil*). Os PAH e PM1 emitidos por esta combustão possuem metais perigosos tais como, o Vanádio e o Níquel (potencial citotóxico), sendo também produzidas grandes quantidades de SO₂. Observaram também, que as amostras da combustão de petróleo possuem um efeito toxicológico superior quando comparadas às amostras da combustão de biomassa (Kaivosoja et al. 2013).

2.3 Utilização da biomassa como recurso energético em Portugal

A compilação de todos os centros electroprodutores com recurso a fontes renováveis é feita em conjunto pela Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) e pelo Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). A compilação desta informação é apresentada no sítio e2p – Energias Endógenas de Portugal. A biomassa, pela consulta da base de

dados, apresenta um total de potência instalada renovável de 4%, sendo a grande hídrica e a energia eólica, as energias renováveis com maior destaque (Figura 2).

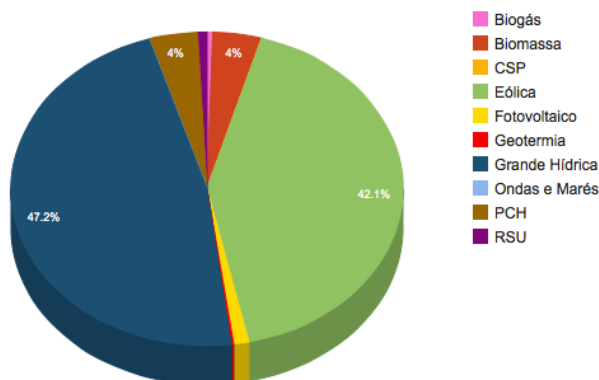


Figura 2 – Total de potência instalada renovável em Portugal (Fonte: INEGI/APREN (<http://e2p.inegi.up.pt/#Tec2> (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014)))

A reduzida percentagem de potência instalada relativa à biomassa está distribuída por sete distritos, sendo o distrito de Setúbal, 70,6%, e Aveiro, 50,3%, os maiores contribuintes para a produção de energia a partir deste recurso (Figura 3).

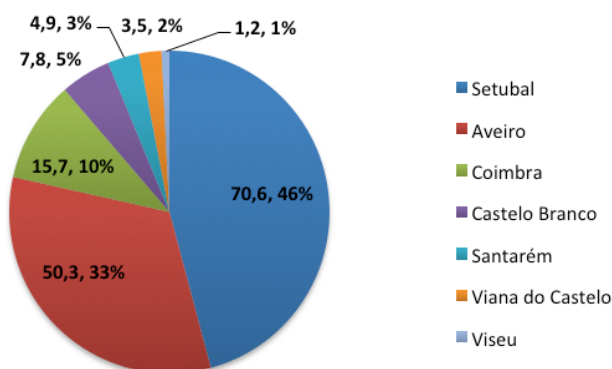


Figura 3 – Total de potência instalada de biomassa por distrito (Adaptado de INEGI/APREN (<http://e2p.inegi.up.pt/index.asp#Tec2> (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014))).

Contudo, o uso de biomassa para a produção de energia tem vindo a aumentar nos últimos anos. Pela Figura 4, é possível observar que existe uma maior utilização de

biomassa desde 1990 a 2014, sendo que a potência instalada em Portugal se situa nos 450 MW.

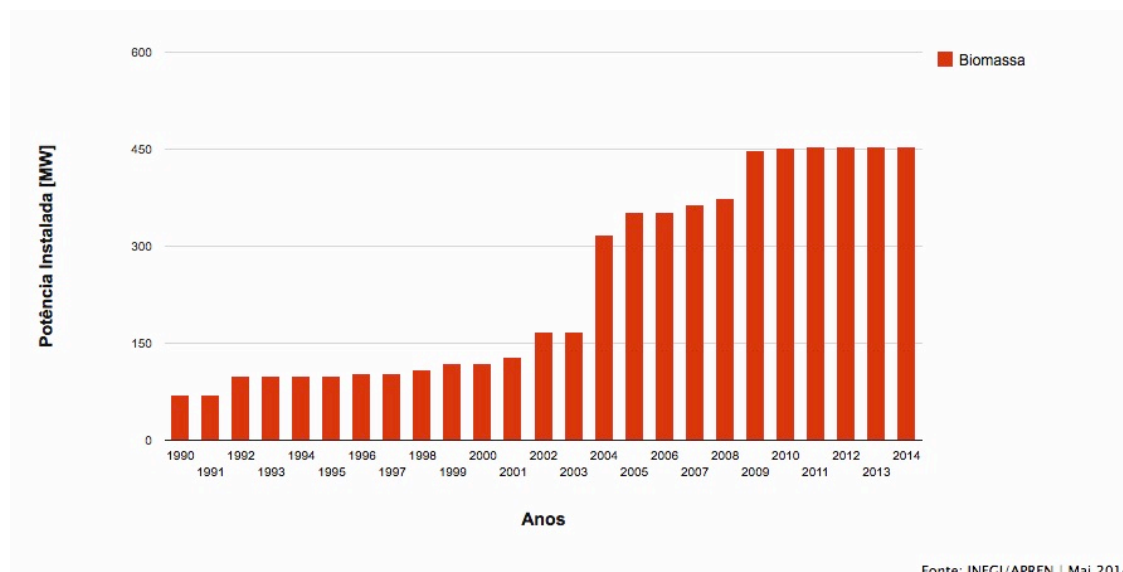


Figura 4 – Potência instalada em Portugal (<http://e2p.inegi.up.pt/#Tec2> (acedido a última vez em 29 de Maio de 2014)).

Portugal possui uma grande cobertura vegetal, apresentando assim uma enorme capacidade de produção de energia a partir de biomassa. O inventário florestal nacional referente ao ano de 2010, mostra que o solo português é maioritariamente ocupado por coberto vegetal, onde 35% diz respeito a floresta, 32% aos matos e pastagens e 24% à agricultura (Uva 2013).

2.4 Ventil - Engenharia do Ambiente, Lda.

VENTIL – Engenharia do Ambiente, Lda. é uma empresa do sector metalomecânico, fundada em 1971, com elevada experiência na concepção, fabrico e instalação de sistemas de produção de energia térmica a partir da biomassa. No decorrer dos 43 anos a VENTIL já produziu e instalou mais de 700 sistemas de combustão a biomassa, correspondendo a uma potência térmica instalada nominal superior a 700MW_{th} . A VENTIL também desenvolve equipamentos e soluções para vários sectores, tais como madeira e mobiliário, cortiça, cerâmica, calçado, avicultura e floricultura, entre outros. Produz e instala sistemas de despoejamento (filtros de mangas que permitem uma limpeza automática por jacto de ar comprimido e por contra-corrente), caldeiras de baixa pressão para a produção de energia térmica a partir de biomassa (caldeira verticais (modelos CVT), com potências que podem

variar entre 350 kW_{th} e 7000 kW_{th}), silos metálicos, ventiladores centrífugos usados para uma extensa gama de caudais, temperaturas e condições de utilização, chaminés industriais, secadores de madeira, sistemas de choque térmico para tratamento de madeiras, cabines de pintura, aquecimento industrial, elementos de tubagem, válvulas rotativas motorizadas, etc. (ventil.pt (acedido a última vez em 29 de Maio de 2015)).

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

3 Sistema de combustão a biomassa

3.1 Características do combustível sólido – Biomassa

A potência útil de um sistema de combustão relaciona-se com a extensão do processo de combustão do combustível sólido. As características e composição do combustível permitem ajustar os parâmetros de combustão promovendo a sua extensão e evitando problemas operacionais e ambientais (Saidur et al. 2011).

Assim, a obtenção de energia útil a partir da biomassa é condicionada pelas propriedades físicas e pela composição química das diferentes fontes, tendo estas influência direta sobre o tipo de reator de processamento de biomassa e composição do gás provenientes das reações, e por conseguinte, nos respectivos métodos de tratamento (Dai & Grace 2011).

3.1.1 Composição química

A composição química da biomassa é obtida com recurso a análises elementares, pelas quais se obtêm os teores de Carbono, Oxigénio, Hidrogénio, Azoto e o Enxofre. As análises elementares têm relativa importância na determinação da razão teórica Ar-Combustível nos sistemas de conversão térmica e no cálculo do poder calorífico (Telmo et al. 2010).

3.1.2 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente é definida como a massa por unidade de volume de biomassa. E pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_b}{V} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad \text{Eq.(3)}$$

ρ_b é a massa volúmica da biomassa utilizada, $kg \cdot m^{-3}$;

m_b é a massa de biomassa utilizada, kg;

V é o volume do recipiente usado para a determinação da massa da biomassa, m^3 .

A massa volúmica aparente, por razões económicas e técnicas, é uma das propriedades físicas mais importantes, destacando-se a sua importância ao nível do armazenamento e transporte. Ou seja, quanto maior for a massa volúmica, maior

será massa transportada e/ou armazenada num recipiente de volume fixo, proporcionando menores custos em ambos os processos. A biomassa possui uma massa volúmica baixa, que origina algumas desvantagens tais como, baixo poder calorífico por unidade de volume, difícil processo de controlo, transporte com elevados custos e limitação das tecnologias disponíveis. Uma forma de minimizar estas limitações é a densificação da biomassa através de processos como a prensagem, peletização e briquetagem (Carroll & Finnan 2012; Khan et al. 2008).

3.1.3 Análise próxima

A análise próxima permite aferir sobre a humidade, o teor de cinzas (sendo importante considerar as temperaturas de fusão – um ponto de fusão a temperaturas baixas leva a formação de incrustações e escórias), a matéria volátil e o carbono fixo (Saidur et al. 2011).

3.1.3.1 Teor de humidade

A humidade, propriedade macroscópica, é armazenada nas células mortas ou nas paredes celulares, variando conforme as espécies entre 41 a 70 %. A presença de água na biomassa tem influência sobre o comportamento e qualidade do processo de combustão, sobre as propriedades físicas, temperatura adiabática e sobre o volume de gases produzidos. O teor de humidade relaciona-se diretamente com o poder calorífico do combustível, isto é, quanto maior for o teor de humidade menor será o poder calorífico disponibilizado pela biomassa (Saidur et al. 2011; Demirbas 2005; Pinto 2011; Khan et al. 2008).

Em comparação como os combustíveis fósseis sólidos, o teor de humidade da biomassa tende a ser superior (Vassilev et al. 2010). Este pode ser apresentado sob duas formas: base tal e qual (btq) e base seca (bs). Contudo, o teor de humidade deve ser determinado em base tal e qual de forma a refletir diretamente o valor do combustível (McGowan et al. 2009).

3.1.3.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas pode ser definido como a parte inorgânica do combustível que permanece depois de uma combustão completa. Este pode variar desde 1% na madeira a 40% em alguns resíduos agrícolas (García et al. 2012).

Os constituintes das cinzas têm um papel importante nos problemas operacionais e nos processos de combustão. A nível operacional podem ocorrer situações de

slagging e de *fouling*. A formação de depósitos origina resistência térmica, diminuição do rendimento do sistema e um aumento na necessidade à manutenção do equipamento. Por tudo isto, o conhecimento do teor de cinzas é um parâmetro importante, permitindo também adquirir alguma informação sobre a massa da matéria inorgânica, a afinidade predominante de elementos e compostos para a matéria inorgânica ou orgânica e a possível contaminação da biomassa (Steer et al. 2013; García et al. 2012; Khan et al. 2008; Demirbas 2004; Vassilev et al. 2010).

Segundo Steer *et al.* 2013, o teor de carbono e o tamanho das partículas das cinzas volantes fornecem informações importantes sobre a combustão da biomassa na caldeira. A informação recolhida mostrou ainda que, a presença de partículas de cinzas de grandes dimensões indica uma combustão incompleta da biomassa (Steer et al. 2013).

O teor de cinzas na biomassa herbácea tende a ser significativamente superior ao da madeira. No entanto, o teor de cinza da biomassa apresenta normalmente valores bastante inferiores aos dos combustíveis fósseis sólidos. O conhecimento do teor de cinza é essencial para a seleção de parâmetros de combustão e operação adequada e de tecnologias de despoejamento. Para os combustíveis com elevado teor de cinzas a alimentação por fundo de cadinho é desaconselhável, devido ao risco de formação de camadas de cinzas, as quais podem levar a um caudal de ar irregular causando uma combustão incompleta e por sua vez o aumento das emissões. Para estes tipos de combustível é aconselhada uma combustão por grelha ou em leito fluidizado. O tipo de cinza e o seu ponto de fusão possuem também grande influência sobre a combustão (Carroll & Finnan 2012; Vassilev et al. 2010).

3.1.3.3 Teor de matéria volátil

O conceito de matéria volátil pode ser definido como a quantidade de componentes libertados quando o combustível é exposto a elevadas temperaturas, excluindo a contabilização da humidade. Os gases libertados vão ser constituídos pelos gases de combustão (C_xH_y , CO_2) e pelos gases inqueimados (CO ou H_2 , SO_2 ou NO_x) (García et al. 2012).

A biomassa possui geralmente elevados teores de matéria volátil, tendo como valor típico 75%, mas podendo aumentar até aos 90% dependendo da amostra. Tipicamente, a biomassa apresenta maior percentagem de voláteis que os

combustíveis fósseis sólidos. A combustão de biomassa ocorre a taxas muito rápidas, possuindo um ponto de ignição a baixas temperaturas devido à elevada percentagem de matéria volátil. A quantidade de combustível desvolatilizada durante o estágio de pirólise decorrente do processo de combustão aumenta com a razão H/C e diminui com a razão O/C. A rápida libertação de grandes quantidades de voláteis, leva a que sejam necessárias zonas de temperatura elevada e um maior fornecimento de ar secundário relativamente ao ar primário, com o objectivo de promover uma combustão completa com elevada eficiência assegurando uma baixa emissão de poluentes (CO e PAH) (García et al. 2012; Khan et al. 2008; Vassilev et al. 2010).

3.1.3.4 Teor de Carbono fixo

O teor de carbono fixo é a massa da amostra que permanece após a libertação dos gases voláteis, não sendo contabilizado o teor de cinzas nem o teor de humidade, ou seja, pode definir-se como sendo a matéria orgânica da amostra que após aquecimento não volatilizou. Este parâmetro apresenta valores inferiores na biomassa relativamente aos obtidos para os combustíveis fósseis sólidos. No entanto, valores elevados do teor de carbono fixo são característicos de algumas cascas de madeira e de resíduos de biomassa herbácea e de agricultura. O teor de carbono só pode ser calculado depois da obtenção de informação sobre os outros parâmetros da análise próxima (teor de humidade, teor de cinzas e teor de matéria volátil). Assim como os outros parâmetros, o carbono fixo pode ser obtido em base seca ou em base tal e qual, dependendo da informação anteriormente obtida (García et al. 2012; Silva 2009; Vassilev et al. 2010).

3.1.4 Poder calorífico

O poder calorífico pode ser considerado um dos parâmetros mais importante na caracterização de um material como combustível e está diretamente relacionado com a estrutura celular da biomassa. O seu conhecimento vai permitir obter o controlo e dimensionamento do sistema de combustão (Erol et al. 2010; Carroll & Finnan 2012).

O termo poder calorífico diz respeito à quantidade de energia produzida através da combustão de uma unidade de massa de combustível. Existem dois tipos de poder calorífico, o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). Quando uma unidade de massa sofre uma combustão completa num calorímetro em

condições bem especificadas de volume ou pressão constante, o poder calorífico pode definir-se como energia interna de combustão e entalpia de combustão respetivamente (Matos, A. 2012). O poder calorífico da madeira pode ser expresso como Poder Calorífico Superior a volume constante (bs), Poder Calorífico Inferior a pressão constante (bs) e Poder Calorífico Inferior a pressão constante (btq) (Telmo & Lousada 2011). Elementos como o Carbono e o Hidrogénio tendem a aumentar o poder calorífico, enquanto o Oxigénio tende a diminuir-lo (Saidur et al. 2011).

O valor do poder calorífico pode ser determinado experimentalmente ou pode ser calculado através dos resultados obtidos das análises elementares e próximas (Erol et al. 2010).

3.2 Sistemas de alimentação de biomassa

A alimentação desempenha um papel importante nos reatores a biomassa, pois esta influencia diretamente a eficiência de operação. Deste modo, a seleção, o *design* e a localização do método de alimentação depende das propriedades da biomassa e dos requisitos do sistema (Dai et al. 2012).

3.2.1 Tipos de sistemas de alimentação

Os sistemas de combustão industrial podem operar segundo dois tipos de sistemas de alimentação, os volumétricos (i.e., sistemas sem-fim, válvulas rotativas, tapetes vibratórios, correias, etc.) e os gravimétricos (i.e., *loss-in-weight feeder*, *weight belt feeder*, etc.). Os sistemas volumétricos ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) têm a capacidade de controlar a razão volumétrica de combustível sólido descarregado de um silo ou tremonha. Os sistemas gravimétricos permitem regular a razão de caudal mássico. Podem operar de uma forma contínua, ou seja, o sistema de alimentação estabelece a quantidade de massa de combustível sólido a debitar por unidade de tempo, ou de uma forma descontínua, modo “Batch”, onde uma certa quantidade de material é introduzida seguida de uma paragem do alimentador (Carson & Ph n.d.).

3.2.2 Sistema de alimentação por sem-fim

Os sistemas de alimentação sem-fim são detentores de características bastante flexíveis ao nível do dimensionamento, as quais lhe conferem uma vasta aplicabilidade nas mais diversas situações onde outros sistemas de alimentação não poderiam ser aplicados (Yu 1997). Os sistemas de alimentação sem-fim, sistemas

volumétricos, são caracterizados por um sistema mecânico simples. Contudo, o comportamento de alguns materiais transportados ao longo do sem-fim pode ser problemático, através da ocorrência de fenómenos como *bridging*, formação de *rathole* e *blockage* (Hou et al. 2014).

Frequentemente, nas aplicações a biomassa é usado um silo/tremonha associado a um sistema de alimentação por parafuso sem-fim. O dimensionamento de um sistema de alimentação sem-fim deve ser feito de forma a complementar o dimensionamento de um silo de alimentação. Através da largura da abertura de saída do silo/tremonha é possível determinar o diâmetro do sem-fim, e deste modo evitar a formação de *bridging* ou *rathole* na secção de entrada de alimentação (Dai & Grace 2011; Yu 1997).

3.2.1 Problemas ao nível da alimentação por sem-fim

3.2.1.1 Efeito das características do material sobre o desempenho e operação do sistema de alimentação sem-fim

A operação e o desempenho de todo o sistema podem ser afetados significativamente por factores como o tamanho e a forma das partículas e pela compressibilidade dos materiais, que está diretamente ligada aos vários tipos de forças interparticulares (Hou et al. 2014).

Propriedades como o teor de humidade, massa volúmica, forma, superfícies da partícula (lisas, rugosas ou cortantes), diferentes distribuições de tamanho, diferentes compressibilidades, entre outras propriedades, podem provocar problemas na estabilidade do caudal de alimentação (Dai & Grace 2008), muito em parte por se desenvolverem fenómenos de *bridging* e *rathole* no silo, ou por se criar uma obstrução ou desfasamento ("*slippage*") no sistema de alimentação sem-fim. A obstrução é um dos problemas mais complexos, esta deficiência na alimentação pode ser detectada pelas alterações da velocidade de rotação do sem-fim (rpm) ou pelas alterações de torque (Dai & Grace 2011).

3.2.1.2 Efeito da humidade do material sobre o desempenho e operação do sistema de alimentação sem-fim

Uma redução do caudal volumétrico e mássico no sem-fim pode relacionar-se com o teor de humidade. Quanto maior for o teor de humidade no silo de alimentação maior será a probabilidade de formação de fenómenos de *bridging* e *rathole*, reduzindo os

caudais de alimentação no sistema sem-fim. Quando a humidade se encontra entre 40 e 60 %, em base tal e qual, existe um aumento da coesão do material levando à consolidação, podendo criar-se uma “ponte”. Apesar de ocorrer por vezes consolidação do material no silo/tremonha, nenhuma consolidação deve ser observada no sistema de sem-fim (Dai & Grace 2011).

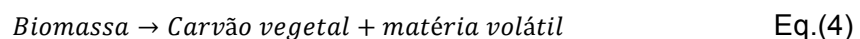
3.2.1.3 *Efeito das forças de coesão sobre a velocidade rotacional do sem-fim*

Hou *et al.* 2014 estudaram o efeito das forças coesivas sobre a velocidade rotacional do sem-fim. Os autores também desenvolveram e testaram um modelo do método elementar discreto para simular o caudal de partículas coesivas num sistema de alimentação por sem-fim com uma alimentação contínua de biomassa para um silo ou tremonha (Hou *et al.* 2014). O estudo revelou que a coesão interparticular afeta significativamente o caudal de partículas e que a taxa de caudal de sólidos é estabelecida em função da velocidade rotacional do sem-fim e da força de coesão entre as partículas (Hou *et al.* 2014).

3.3 Processos de conversão térmica

3.3.1 Pirólise

O variado número de transformações químicas e físicas e a produção de uma grande quantidade de produtos torna o processo de pirólise difícil de descrever (Neves *et al.* 2011). A pirólise pode ser definida como um processo de decomposição térmica de biomassa que se desenvolve na ausência de Oxigénio. A pirólise permite a obtenção de produtos combustíveis no estado sólido (carbonizado), gasoso (CO, CO₂, CH₄, H₂) e de líquido (mistura de hidrocarbonetos de elevado peso molecular) (Saidur *et al.* 2011; Demirbas 2004).



As quantidades e as propriedades dos produtos formados durante o processo de pirólise estão dependentes de variáveis, tais como o tipo de combustível, o tamanho das partículas, a temperatura, a pressão, o tempo de residência, os catalisadores aplicados e a taxa de aquecimento (Van Loo & Koppejan J., 2008; Saidur *et al.* 2011).

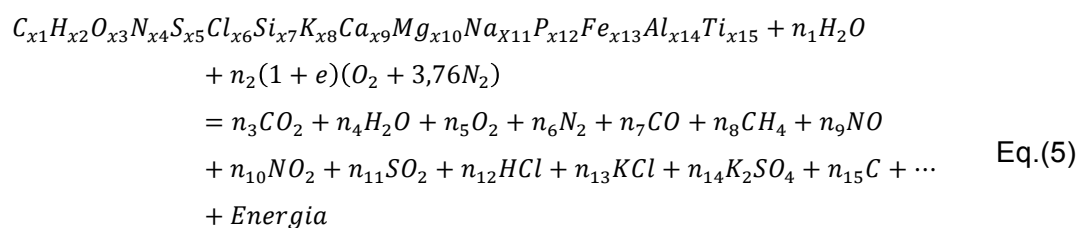
3.3.2 Gasificação

Processo que permite a transformação de biomassa em combustíveis gasosos (com baixo ou elevado poder calorífico) através da oxidação parcial e temperaturas elevadas. Este processo permite a produção de Metanol e Hidrogénio, os quais podem ter um bom futuro como combustíveis. O gás obtido pela gasificação é tipicamente composto por 30–40% de Hidrogénio, 20–30% de Monóxido de Carbono, 15–20% de Dióxido de Carbono, 10–15% de Metano, 6% de água, 1% de Etileno e 1% de Azoto (Saidur et al. 2011).

3.1.3. Combustão

De uma forma simples, o processo de combustão pode ser definido como uma reação exotérmica entre o combustível e o Oxigénio, da qual resulta vapor de água e Dióxido de Carbono (Wolf et al. 2013). No entanto, o processo de combustão é um processo complexo devido às várias reações heterogéneas e homogéneas, conferindo-lhe o estatuto de uma das tecnologias mais desenvolvidas e importantes nos dias de hoje para a valorização energética ou valorização térmica de fontes de biomassa com um teor de humidade inferior a 60 % (Nussbaumer 2003).

A complexidade da reação de combustão da biomassa com o ar (Eq.(5)) faz com que a inclusão de apenas quinze elementos na fórmula empírica do combustível seja incompleta. A existência de muitos mais constituintes inorgânicos deve ser considerada devido à sua importância ao nível de problemas de *slagging* e *fouling* (Saidur et al. 2011). A reação pode assumir a seguinte forma, onde o primeiro componente a reagir é o combustível – biomassa:



O segundo termo dos reagentes expressa a humidade do combustível. Se existir demasiada humidade o combustível não irá reagir espontaneamente. O terceiro termo dos reagentes diz respeito ao ar e é representado pela simples mistura binária de Oxigénio e Azoto com uma razão volúmica de 21% e 79% respetivamente. Os principais produtos da combustão são representados primeiro, mas existem outros

produtos originados durante a combustão, tais como o CO, Hidrocarbonetos, Óxidos de Azoto e Enxofre assim como espécies inorgânicas como os Cloretos Alcalinos, Sulfatos, Carbonatos e Silicatos (Saidur et al. 2011; Jenkins et al. 1998).

Num processo de combustão de combustíveis sólidos as principais etapas são a secagem, a desvolatilização, a gasificação, a combustão do carbonizado e a oxidação em fase gasosa. O tempo de cada reação depende do tamanho e das propriedades do combustível, da temperatura e das condições de combustão (Nussbaumer 2003; Van Loo & Koppejan J., 2008).

3.4 Parâmetros de combustão

As diferentes reações do processo de combustão ocorrem em simultâneo mas em diferentes locais da fornalha. (Nussbaumer 2003).

O principal parâmetro de combustão é a razão do excesso de ar (λ), que descreve a razão entre a quantidade de ar localmente disponível e estequiométrica (Nussbaumer 2003). As necessidades de ar durante a combustão dependem das características físicas e químicas do combustível (Abuelnuor et al. 2014).

Os sistemas de introdução e estagiamento de ar desempenham papéis importantes numa combustão completa e eficiente de biomassa. Deste modo, o dimensionamento dos sistemas de introdução de ar (primário, secundário e terciário) tem um papel importante nos processos de combustão (Yin et al. 2008). Se for utilizada uma combustão com estagiamento de ar, o excesso de ar de combustão pode variar nas diferentes secções (Nussbaumer 2003).

Nos sistemas de combustão de grelhas mecânicas a introdução de ar primário é realizada por baixo da grelha numa zona ou em zonas separadas. O ar secundário e terciário é introduzido nas câmaras de combustão acima do leito de combustível (Wolf et al. 2013); permitindo uma boa mistura entre o ar de combustão e os gases de combustão formados pela desvolatilização e gasificação do leito de combustível (Nussbaumer 2003).

Para a maioria da biomassa, os sistemas de combustão de grelhas funcionam com um excesso de ar de aproximadamente 25 % ou superior. A razão entre o ar primário e secundário, na combustão de biomassa, é por norma a razão 40/60 (Yin et al. 2008). Dependendo da razão de ar primário fornecida, podem ser identificadas três situações de combustão no leito de biomassa: quando a razão de ar introduzida

é baixa, a combustão dá-se com concentrações de oxigénio limitadas; quando a razão de ar aumenta, dá-se uma reação de combustão limitada; e por último, quando a razão de ar aumenta ainda mais, a combustão é extinta por convecção (Yin et al. 2008). Desde modo, se uma boa mistura for verificada, o sistema pode operar com um baixo excesso de ar ($\lambda < 1,5$), permitindo por um lado eficiências elevadas e por outro temperaturas mais elevadas com uma combustão mais completa, com redução das concentrações dos gases inqueimados para níveis próximos de zero, i.e., $\text{CO} < 50 \text{ mg.m}^{-3}$ e $\text{C}_x\text{H}_y < 5 \text{ mg.m}^{-3}$ a 11 %volúmica de O_2 (Nussbaumer 2003).

Para uma combustão completa dos gases e redução das emissões de poluentes, a introdução de ar secundário no *freeboard* é um dos fatores mais importantes na otimização da combustão dos gases. O principal objetivo do segundo estagiamento de ar é a redução da formação de NO_x pela redução da disponibilidade de oxigénio na chama e pela redução do pico de temperatura na chama. No estagiamento de ar, a primeira zona de déficit de ar reduz a formação de NO_x e pode atingir-se a combustão completa somente depois da adição de ar secundário na zona de queima. Factores como a mistura, a temperatura, o tempo de residência e a estequiometria local têm um papel importante no estagiamento de ar (Yin et al. 2008).

3.5 Formação de poluentes

Os poluentes podem ser classificados em poluentes inqueimados (CO , HC , *tar*, PAH , C_xH_y , e partículas de *Char*) e poluentes que são produzidos durante a combustão (cinzas, Óxido de Azoto, Óxido de Enxofre). Os poluentes inqueimados formam-se devido a baixas temperaturas de combustão, a uma mistura insuficiente do combustível com o ar de combustão e/ou a um tempo de residência curto dos gases de combustão na zona de combustão. Os poluentes produzidos durante a combustão, tais como Matéria Particulada, Óxidos de Azoto (NO_x) e Óxidos de Enxofre (SO_x) relacionam-se tanto com as características da biomassa como com as características de combustão. Podem também ser emitidos gases ácidos e metais pesados (Khan et al. 2008).

A formação de determinadas espécies químicas difere com as diferentes fases do processo de combustão. Na fase de pré-ignição (período de tempo anterior à formação de chama) são libertados produtos do processo de pirólise e a humidade

contida no combustível. Na zona de chama (período de tempo em que a chama é visível) ocorre a oxidação de componentes como o CO e o NO_x, que são libertados em conjunto com Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). E na fase de latência (fase de extinção da chama) são libertadas grandes quantidades de CO e outras substâncias menos oxidadas e uma quantidade considerável de partículas (Lusini et al. 2014).

3.5.1.1 Dióxido de carbono – CO₂

O Dióxido de Carbono, como já foi referido ao longo das secções anteriores, é o componente dos produtos de combustão de biomassa em maior quantidade.

A eficiência de combustão (Eq.(8)) pode ser obtida pela razão entre a quantidade de CO₂ e a massa total de Carbono emitida durante a combustão. Este parâmetro é útil para contabilizar a extensão da reação de oxidação do Carbono a CO₂ durante a combustão de biomassa (Lusini et al. 2014).

$$\eta_{combust\tilde{a}o} = \frac{C_{[CO_2]}}{C_{[total]}} \quad \text{Eq.(6)}$$

Onde, $C_{[CO_2]}$ é a quantidade de carbono completamente oxidada a CO₂ e $C_{[total]}$ a quantidade total de produtos de carbono (CO₂, CO, CH₄, hidrocarbonetos não-Metano e teor de Carbono nas partículas).

Um segundo parâmetro é a “eficiência de combustão modificada” (Eq.(9)), esta permite observar a transição entre a fase chama e de latência.

$$\eta_{combust\tilde{a}o\ modificada} = \frac{[CO_2]}{[CO_2] + [CO]} \quad \text{Eq.(7)}$$

A maior eficiência de combustão é observada na zona de chama com a $\eta_{combust\tilde{a}o\ modificada}$ a variar entre 0,9 e 1. Valores superiores a 0,9 são indicativos de que mais de 50% das emissões se dão na zona de chama (Lusini et al. 2014).

3.5.1.2 Monóxido de carbono - CO

O Monóxido de Carbono, produto de uma combustão incompleta e poluente inqueimado, pode ser considerado um indicador da qualidade do processo de combustão (Loo V & Koppejan J., 2008; Khan et al. 2008).

As emissões de CO a partir de processo de combustão dependem principalmente de três factores: temperatura, tempo de residência e uma razão de mistura adequada (Roy et al. 2013). Quando existe uma grande quantidade de material (baixo excesso

de Oxigénio), uma razão de mistura inadequada promove o aumento das emissões de CO. Quando existe uma baixa quantidade de material (elevado excesso de Oxigénio), a temperatura do gás diminui e existe o aumento da emissão de CO (Roy et al. 2013).

3.5.1.3 Óxidos de Azoto - NO_x

Um processo de combustão completo depende do excesso de Oxigénio presente durante o processo. Contudo, o excesso de Oxigénio leva a processos de formação de NO_x a partir de *fuel*-N. Uma forma de assegurar uma combustão completa, sem a introdução de Oxigénio em excesso, consiste na introdução de ar numa zona da fornalha posterior à queima do combustível (*overfire air*). Assim, o Oxigénio em excesso é introduzido após o pico de temperatura da chama, garantindo uma combustão completa com baixas emissões de NO_x (Miller & Tillman 2008). Ou seja, para uma operação com baixas emissões de NO_x , o controlo da razão de ar primário necessária à combustão permite assegurar uma atmosfera redutora na câmara de combustão primária (Van Loo & Koppejan J., 2008).

Existem três mecanismos relacionados com a formação e emissão de NO_x a partir dos sistemas de combustão (Figura 5), o *thermal* – NO_x formado a partir do Azoto presente no ar atmosférico a altas temperaturas, o *prompt* – NO_x formado a partir do Azoto atmosférico, temperaturas elevadas e presença de Hidrocarbonetos, e o *fuel* – NO_x formado a partir de combustíveis que contenham Azoto na sua constituição (Nussbaumer 2003). Nos processos de combustão, 95% do NO_x apresenta-se na forma de Óxido de Azoto (NO) e os restantes 5 % na forma de Dióxido de Azoto (NO_2) (Miller & Tillman 2008).

Nos sistemas de combustão de grelha, as quantidades *thermal*- NO_x formadas podem ser consideradas pequenas ou negligenciáveis devido às baixas temperaturas de combustão. O *fuel* – NO_x é considerado a maior fonte de NO_x (Yin et al. 2008).

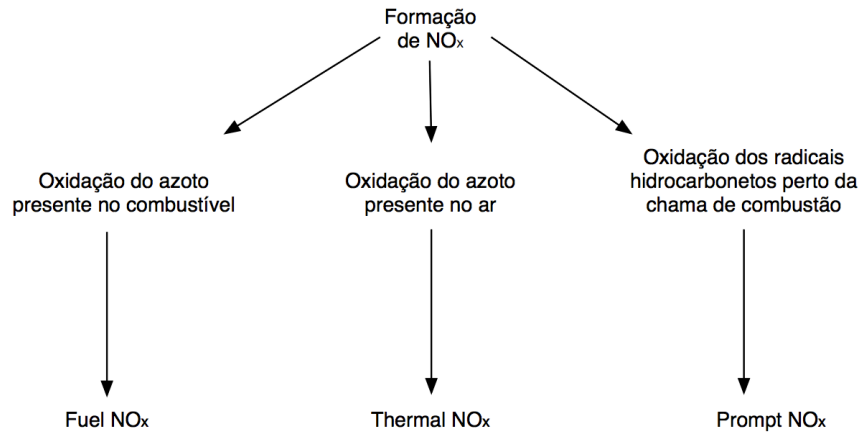


Figura 5 – Formação de NO_x durante o processo de combustão (adaptado de Miller & Tillman 2008).

O *fuel* – N da biomassa é libertado em três estágios (Figura 6). No primeiro estágio, o N-volátil é libertado durante o primeiro estágio da pirólise em conjunto com a maioria dos voláteis. Os maiores percursores de NO_x durante a pirólise da biomassa são o NH₃, HCN e o HNCO. Devido à elevada razão O/N na biomassa, parte do N-combustível é obtido diretamente na forma de NO durante o primário estágio da pirólise. No segundo estágio de pirólise, ocorre o *cracking* térmico e a combustão de voláteis (principalmente *Tar*), que fornecem fontes adicionais de HCN e NH₃. No terceiro estágio, durante a combustão do resíduo de *Char*, o N-*Char* forma principalmente NO enquanto o resto é convertido a N₂. O NO formado pode ser reduzido a N₂ a partir do N-*Char* como resultado do seu efeito catalítico na formação e redução do NO (Yin et al. 2008).

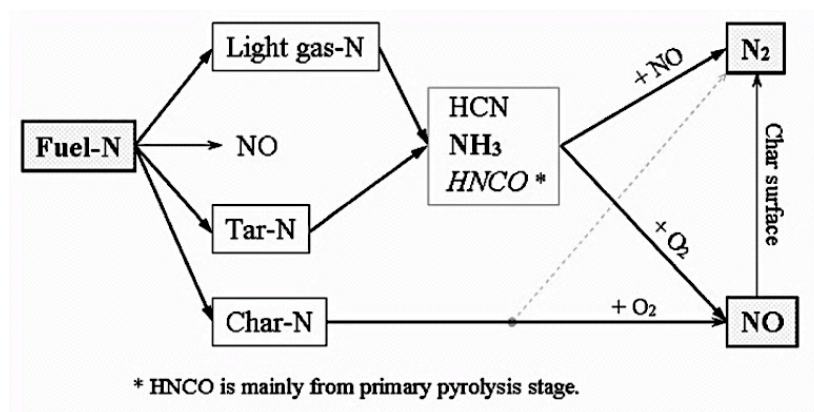


Figura 6 – Representação esquemática de três estágios de libertação de N-combustível (adaptado de Yin et al. 2008).

Num sistema de combustão por grelha, a razão mássica dos precursores de NO_x (i.e., NH_3 , HCN , HNCO , NO) libertada do leito de biomassa depende dos tipos de biomassa utilizados, das temperaturas de pirólise, do teor de N-combustível, da razão estequiométrica de ar, do tamanho das partículas e do teor de humidade. A partir do leito de biomassa, os precursores NO_x mais relevantes são o NO , que se destaca como o maior precursor de NO_x numa atmosfera rica em ar, e o NH_3 que se destaca como o precursor mais importante de NO_x numa atmosfera rica em combustível (Yin et al. 2008).

A modificação tecnológica mais barata ao nível da combustão para a redução das emissões de NO_x é o estagiamento de ar. O estagiamento de ar limita a disponibilidade de O_2 e reduz os picos de temperatura na chama de forma a reduzir a formação de *thermal* – NO_x , ao mesmo tempo que produz uma sequência de ambientes ricos e pobres em combustíveis, favorecendo a conversão do *Fuel* – N para N_2 (Yin et al. 2008).

Os trabalhos experimentais desenvolvidos em vários países europeus mostram que o fornecimento de ar de combustão, a geometria e o tipo de fornalha são as variáveis de maior influência na formação de NO_x . Resultados, obtidos na investigação de sistemas de combustão, mostram que o ar primário e o ar secundário deve ser injetado geometricamente e em câmaras de combustão diferentes, e que os ventiladores de ar de combustão devem garantir um excesso de ar na fornalha entre 0,6 a 0,8 (Wolf et al. 2013).

3.5.1.4 Partículas

A combustão de biomassa gera emissões de partículas acima dos 50 mg.m^{-3} a 11 % volúmica de O_2 , podendo ser consideradas concentrações relativamente elevadas. Se uma fornalha bem dimensionada atingir uma combustão quase completa, as partículas resultam quase exclusivamente dos componentes das cinzas do combustível, tendo o KCl como principal componente. O Potássio apresenta um ponto de fusão elevado assim como uma elevada temperatura de desvolatilização (Nussbaumer 2003).

A emissão total de Matéria Particulada (PM) pode ser definida em dois tipos: partículas grosseiras, PM_{10} , com um diâmetro inferior a $10 \mu\text{m}$ e partículas finas, $\text{PM}_{2,5}$, com diâmetro igual ou inferior a $2,5 \mu\text{m}$. As PM provenientes de processos de combustão são compostas por material inorgânico, cinzas, e por material orgânico,

inqueimados tais como *Soot*, *Tar* e *Char*. Estas apresentam ainda riscos para a saúde humana (efeitos carcinogéneos e problemas respiratórios) (Villeneuve et al. 2012).

Num processo de combustão de madeira, à medida que a temperatura diminui dentro da caldeira, as partículas formam-se por nucleação, coagulação e condensação (Nussbaumer 2003).

3.6 Tecnologias de combustão

3.6.1 Tipos de sistemas de combustão

Existem várias tecnologias de combustão de biomassa disponíveis (Saidur et al. 2011; Nussbaumer 2003). A sua aplicação pode relacionar-se com as características e qualidade do combustível sólido utilizado (Van Loo & Koppejan J., 2008). Os sistemas de combustão (Figura 7) podem ser classificados como leitos fixos, leitos fluidizados, leitos pulverizados, leitos borbulhantes e leitos circulantes (Saidur et al. 2011; Nussbaumer 2003). As fornalhas a biomassa podem ainda ter sistemas de combustão com alimentação inferior, considerados como sistemas de baixo investimento para unidades com potências inferiores a 6 MW_{th} (Van Loo & Koppejan J., 2008).

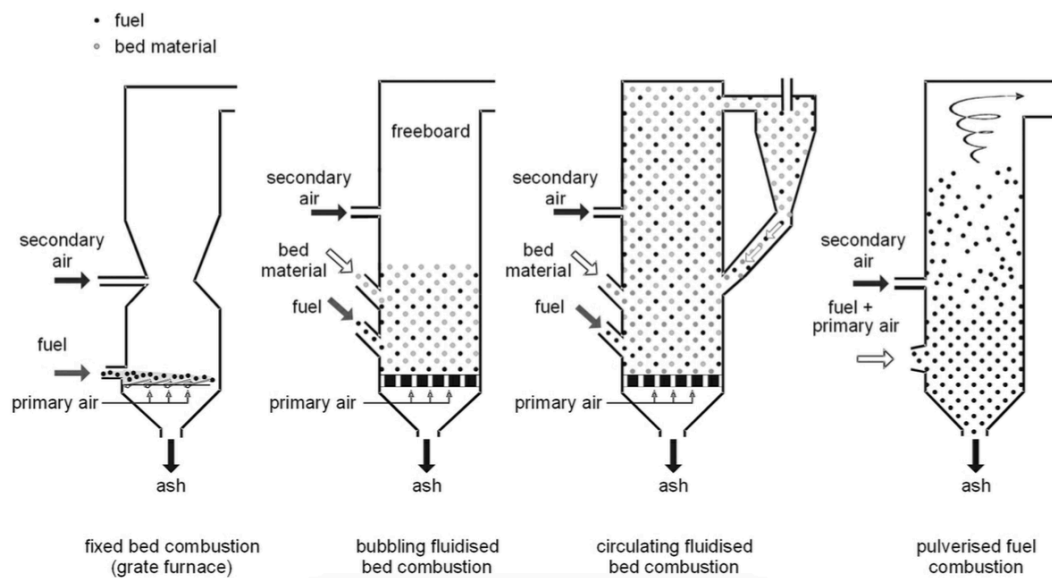


Figura 7 – Processos de combustão de biomassa (adaptado de Van Loo & Koopejan J., 2008).

Nas unidades de combustão por grelha os sistemas podem operar em contra-corrente, em co-corrente e fluxo cruzado (Van Loo & Koppejan J., 2008). No sistema de combustão em contra-corrente os gases de combustão quentes passam por todo o leito de combustível até à sua entrada na grelha. Num sistema de combustão com fluxo em co-corrente o ar primário é previamente aquecido, aumentando o tempo de residência dos gases inqueimados, potenciando a redução de NO_x . A combinação destes dois tipos de fluxo origina uma combustão de fluxo cruzado (Van Loo & Koppejan J., 2008).

Nos sistemas de combustão com alimentação inferior (Figura 8) o combustível sólido é introduzido na câmara de combustão com recurso a um sistema de alimentação por sem-fim. A quantidade de combustível dentro da câmara de combustão é relativamente baixa quando comparada com sistemas de combustão de leito fixo; esta situação permite controlar mais facilmente a quantidade de combustível introduzida na fornalha. O tamanho das partículas de biomassa utilizada deve ser pequeno ($< 50 \text{ mm}$) e com baixo teor de cinzas. A fusão de cinzas, sobre a superfície da zona de combustão, pode levar a condições de instabilidade ao nível do processo de combustão, devido à dificuldade de introdução de combustível (biomassa e ar primário). O ar primário é introduzido através das grelhas e o ar secundário é introduzido no início da câmara de combustão secundária (Van Loo & Koppejan J., 2008).

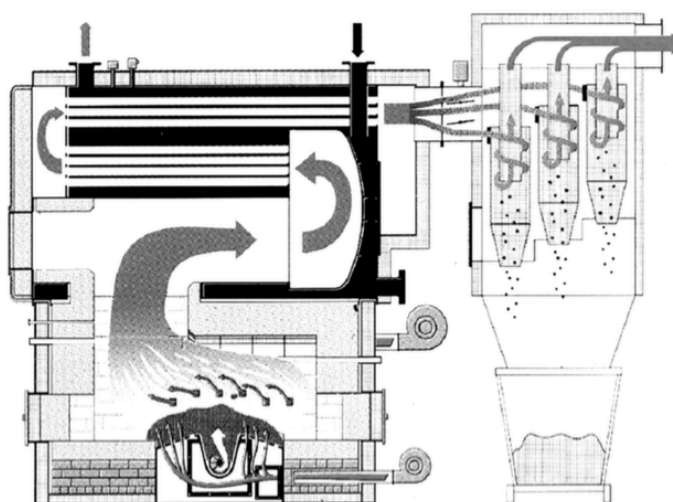


Figura 8 – Representação esquemática de sistema de combustão com alimentação inferior (Van Loo & Koppejan J., 2008).

3.6.2 Tipos de grelhas nos sistemas de combustão

Os sistemas de combustão devem ser detentores de um sistema de sustentação do material a queimar, normalmente uma grade que pode ser fixa ou dotada de alguma mobilidade (Matos A., 2012).

Para sistemas de combustão em leito fixo existem várias tecnologias de grelha disponíveis. Estas podem ser grelhas estacionárias, grelhas móveis, grelhas circulantes, grelhas rotativas e grelhas vibratórias. A sua aplicação nas fornalhas depende das propriedades dos combustíveis, permitindo uma melhor combustão (Van Loo & Koppejan, 2008).

Dependendo do poder calorífico e do teor de humidade, as grelhas podem ser arrefecidas com água ou com a introdução de ar primário através delas. Nos sistemas arrefecidos por água o ar introduzido está condicionado às necessidades de combustão e existe flexibilidade no uso de sistemas avançados de ar secundário (Wolf et al. 2013; Yin et al. 2008).

3.7 Fração inorgânica do combustível

À fração inorgânica do combustível associa-se a possibilidade de poder causar graves problemas de deposição, estes podem ser fenómenos de *fouling*, *slagging* ou problemas relacionados com a corrosão (Nielsen et al. 2000; Nutalapati et al. 2007). A fração inorgânica da biomassa tem normalmente elevados teores de Potássio, Silício e Cálcio, mas pode também ser rica em Enxofre e Cloro (Nielsen et al. 2000). A composição da biomassa pode ser classificada em três grupos: resíduos agrícolas (alto teor de Sílica/ alto teor de Potássio/ baixo teor de Cálcio), combustíveis derivados de madeira (baixo teor de Sílica/ baixo teor de Potássio/ elevado teor de Cálcio) e resíduos aplicados como fertilizantes (elevado teor de Cálcio/ elevado teor de Fósforo) (Nutralapati et al. 2007). A combustão de material herbáceo pode originar depósitos com elevado teor de Potássio e Cloro, elementos que possuem um elevado potencial de corrosão sobre a superfície dos tubos dos permutadores de calor (Nielsen et al. 2000). O *slagging* pode ser significativamente afetado pelas concentrações de Cl, S, K, Si e Al (Niu et al. 2014).

A corrosão dos tubos dos permutadores de calor está relacionada com o material que os constitui, assim como, com a composição química dos depósitos formados sobre os mesmos (Nielsen et al. 2000). A corrosão dos permutadores é um dos

problemas relacionados com o desenvolvimento da biomassa como uma fonte de energia sustentável (Antunes & de Oliveira 2013).

3.7.1 Metais alcalinos

Os Metais Alcalinos (K e Ca) presentes na biomassa apresentam-se maioritariamente na forma de sais ou em compostos organometálicos (organicamente associados) (Li et al. 2013). Durante a fase de combustão, estes podem ser libertados rapidamente para a fase gasosa (Nielsen et al. 2000).

O Potássio desempenha um papel importante no aumento dos problemas na deposição de cinzas (Notalapati et al. 2007). O seu comportamento termodinâmico durante o processo de combustão é principalmente influenciado pela presença de Cloro e Enxofre (Nielsen et al. 2000; Li et al. 2013).

O Potássio, durante o processo de combustão, sofre reações indesejáveis na presença de elementos como o Cl, o S ou o Si. Por exemplo, os Metais Alcalinos reagem com a Sílica e formam Silicatos Alcalinos, que derretem e fundem a baixas temperaturas. Se por sua vez os Metais Alcalinos reagirem com o Enxofre ou com o Cloro formam Sulfatos ou Cloretos Alcalinos, que se depositam na fornalha ou na superfície dos permutadores de calor (Notalapati et al. 2007). Estes elementos podem ser potencialmente prejudiciais à corrosão a temperaturas elevadas (Liu et al. 2014).

O K, Ca e Cl podem combinar-se através da condensação de vapores, aglomeração de partículas e reações químicas, como a sinterização e fenómenos de *slagging*, formando compostos corrosivos nos gases de combustão e nos depósitos sedimentados nas superfícies dos permutadores de calor (Liu et al. 2014).

3.7.2 Efeito do cloro nos constituintes do sistema de combustão

O Cloro pode apresentar-se sob três formas no combustível: na forma orgânica, inorgânica e em iões relacionados com o sal presente no combustível. Maioritariamente, todo o Cloro presente no combustível é transformado em HCl e libertado durante a combustão (Li et al. 2013).

O Cloro pode aumentar a volatilidade do Potássio, que se apresenta principalmente na forma de KCl e na forma de KOH na fase gasosa. Caso exista uma quantidade suficiente de Enxofre no sistema, o Sulfato de Potássio estará na única fase sólida estável (Nielsen et al. 2000). Os depósitos formados nos permutadores de calor

(ricos em Cloro) são considerados como os propulsores dos problemas mais severos ao nível de fenómenos de corrosão nos sistemas de combustão a biomassa (Liu et al. 2014).

Os gases que contenham Cl_2 , HCl, NaCl e KCl podem causar um processo de corrosão direta, fenómeno também descrito como Oxidação Ativa, pela aceleração da oxidação da liga metálica. O fenómeno de Oxidação Ativa consiste na formação de Cloretos Metálicos voláteis e subsequente oxidação (Li et al. 2013; Nielsen et al. 2000). A corrosão pode ser causada diretamente, tanto pelos componentes da fase gasosa, como pelos depósitos formados nos tubos, como pela combinação de ambos (Nielsen et al. 2000).

O Cloro elementar possui também um papel importante na Oxidação Ativa, pois o Ciclo do Cloro permite uma sequência repetida de passos, sustentando as reações de oxidação da superfície metálica (Metsäjoki et al. 2014).

A elevada temperatura de corrosão do Cloro é um dos parâmetros mais importantes que promove a degradação dos tubos dos permutadores de calor dos sistemas de combustão a biomassa (Li et al. 2013).

Numa atmosfera oxidativa, a superfície de metal exposta a temperaturas elevadas é oxidada, formando um filme de óxidos, densos e estáveis, que fornece uma barreira protetora à difusão do Oxigénio e outros gases que possam reagir com o metal. O Cloro possui características que lhe permitem penetrar através dos poros ou fissuras do filme de óxidos ou difundir-se pela interface entre o filme de óxidos e o metal, reagindo com o metal e formando Cloretos Metálicos (Li et al. 2013).

3.7.3 Efeito do Cloreto de Potássio

O KCl sólido possui uma elevada tendência para causar corrosão nos materiais dos sistemas de combustão, destruindo a camada de óxidos que se forma sobre as ligas metálicas e que as protege. Se fontes de Enxofre estiverem presentes em quantidades suficientes, o Enxofre pode reagir com o Potássio formando espécies menos corrosivas que o KCl, tais como o Sulfato de Potássio, K_2SO_4 (Metsäjoki et al. 2014).

A existência de um gradiente químico por baixo dos depósitos de KCl permite a entrada do Cloro na camada de óxidos de proteção, promovendo um mecanismo de múltiplos passos – Oxidação Ativa (Metsäjoki et al. 2014).

3.7.4 Fenómeno de slagging

Elevadas concentrações de Cl, K, e Na promovem a formação de partículas finas de Cloretos Alcalinos levando à formação de *slagging*. Este fenómeno não só reduz a transferência de calor e a eficiência da caldeira, como também promove estragos nos permutadores de calor (Niu et al. 2014). No entanto, elevadas concentrações de Si e Al podem capturar as substâncias Alcalinas através da ligação Silício – Alumina e enfraquecer a formação de *slagging* (Niu et al. 2014).

O fenómeno de *slagging* por Metais Alcalinos num sistema de combustão a biomassa consiste em dois passos: o primeiro é a formação da primeira camada de *slagging*, o segundo é a deposição das cinzas sobre a camada inicial de *slagging* (Figura 9) (Niu et al. 2014).

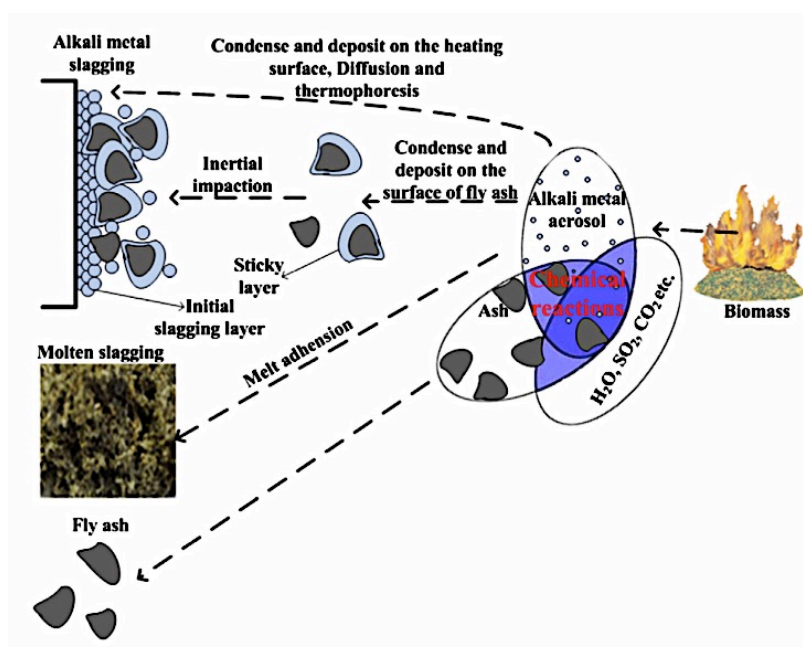


Figura 9 – Representação esquemática dos diferentes destinos da cinza na fornalha (adaptado de Niu et al. 2014).

Os aerossóis de Metais Alcalinos têm um rápido crescimento e formam partículas de cinzas micrométricas com a descida da temperatura dos gases de combustão através de uma série de mecanismos como a nucleação, a adsorção, a condensação e reações químicas. Estes aerossóis podem condensar nas superfícies do permutador de calor e formar uma camada inicial de *slagging* através de termoforese e difusão turbulenta. Esta camada promove a adesão das cinzas volantes nas superfícies do permutador. A condensação dos aerossóis de Metais Alcalinos sobre as superfícies das cinzas volantes pode formar uma camada

pegajosa ou formar substâncias com baixo ponto de fusão através do aumento das reações com o SiO_2 e Fe_2O_3 nas cinzas volantes (Niu et al. 2014).

3.7.1 Redução dos efeitos de corrosão

Estudos desenvolvidos por Antunes & de Oliveira 2013, mostraram que os Cloretos Alcalinos, principalmente o Cloreto de Potássio, aumentam a taxa de corrosão dos materiais utilizados nos tubos dos permutadores de calor. A formação de um denso e compacto filme oxidativo durante as condições de combustão permite a diminuição da taxa de oxidação do material dos permutadores. Esta diminuição é favorecida pelas ligas metálicas que contêm Cr_2O_3 . As ligas metálicas com Níquel e Crómio na sua constituição possuem uma maior resistência à corrosão, sendo que a presença de elementos como o Nióbio, o Tântalo e Titânio previne a perda de Crómio por corrosão, melhorando a resistência química da liga metálica dos permutadores (Antunes & de Oliveira 2013).

As taxas de corrosão dos permutadores de calor de um sistema de combustão podem ser reduzidas e a eficiência da conversão energética melhorada através da redução das temperaturas dos gases de combustão (Karlsson et al. 2015) e pela utilização de aço de elevada qualidade (Li et al. 2013). Ligas metálicas que incorporem na sua constituição Crómio e Níquel melhoram a qualidade do aço, pela possibilidade de formação de camadas oxidativas de carácter protetor (Lehmusto et al. 2012). Com a adição suficiente de Crómio, desenvolve-se um óxido rico em Crómio que pode aumentar a resistência à cloração. Alguns autores verificaram também que a presença de Molibdénio pode prevenir a corrosão (Li et al. 2013). Uma explicação para o comportamento corrosivo dos Cloretos Alcalinos sobre o aço inoxidável é a formação de Cromato Alcalino. Inicialmente os Cloretos Alcalinos reagem com o Crómio, originando uma camada oxidativa sobre o aço inoxidável que serve de proteção (Karlsson et al. 2015).

Estudos desenvolvidos por Lehmusto et al. 2012, mostraram que a presença de Potássio é suficiente para iniciar uma rápida oxidação. Contudo, a formação de camadas oxidativas de carácter protetor, de diferentes composições e espessuras, depende não só da temperatura e da atmosfera, mas também dos componentes de Potássio. Os autores verificaram também que a presença de vapor de água afeta a espessura da camada oxidativa, acelerando o processo de oxidação do aço. Uma atmosfera húmida, na presença de KCl , leva a que a camada oxidativa seja mais fina; esta situação pode dever-se ao aumento da densidade da camada oxidativa

devido à água ou à formação de espécies voláteis tais como o HCl quando o KCl reage com a água, ao mesmo tempo que diminui a quantidade de Cloro reativo no sistema (Lehmusto et al. 2012).

3.8 Sistema de despoeiramento

A separação de partículas de um gás está diretamente relacionada com a interação dessas partículas com uma ou mais forças (centrífugas, gravitacionais, inerciais ou de atrito e electrostáticas) ou a mecanismos moleculares, tais como a difusão e a termoforese) (Antunes & Matos 2011).

Existem diferentes tecnologias disponíveis para a remoção de partículas de escoamentos gasosos. A classificação dos diferentes tipos de sistemas de despoeiramento está relacionada com as forças envolvidas e com as superfícies de recolha. Assim, podem ser divididos em duas categorias: separadores de superfície (ciclone, precipitador electrostático, câmara de sedimentação) e separadores de obstáculos (filtros de tecido, filtro granular, lavador húmido) (Antunes & Matos 2011).

3.8.1 Separador de superfície – Ciclone

Os ciclones são separadores gás-sólidos (despoeiradores), mecanicamente simples, com baixos custos de construção e manutenção. Estes têm a capacidade de operar a temperaturas e pressões elevadas e em ambientes com gases corrosivos. Possuem ainda uma grande capacidade de remoção de partículas. Este tipo de despoeiradores são os mais utilizados e aplicados nas mais diversas aplicações industriais, assim como em estudos académicos (Azadi & Azadi 2012; Hsiao et al. 2011; Karagoz et al. 2013; Lim et al. 2004; Shin et al. 2005; Xiang et al. 2001).

O princípio de funcionamento de um ciclone tem por base a ação de forças centrífugas sobre uma mistura gasosa (Avci & Karagoz 2003). Este utiliza a força centrífuga criada pelo vórtice do fluxo para remover as partículas com elevada inércia (Hsiao et al. 2011). As partículas de maiores dimensões colidem com as paredes do ciclone devido à força centrífuga, que é localmente contrariada pelo arrasto aerodinâmico de direção radial. Deste modo, as partículas perdem a sua energia cinética, deixam de conseguir acompanhar as linhas de corrente do escoamento e são levadas para a parte inferior do ciclone através de um vórtice de saída descendente (Shin et al. 2005; Almeida 2010).

3.8.2 Configuração do ciclone

As duas configurações de ciclones mais utilizadas são os ciclones com fluxo tangencial e os ciclones com fluxo axial. Estes diferem um do outro através da direção relativa que o caudal de aerossóis possui à entrada e à saída. Nos ciclones com entrada tangencial, o fluxo de aerossóis entra perpendicularmente ao eixo da estrutura e sai por cima em paralelo ao eixo, formando um vórtice no cimo do corpo do ciclone. Nos ciclones com fluxo axial, o fluxo de aerossóis entra por cima e sai por baixo sempre em paralelo com o eixo do ciclone, formando um vórtice na base do corpo. A configuração axial permite que estes dispositivos possam ser ligados em linha com outros sem dificuldades (Hsiao et al. 2011).

Num ciclone de entrada tangencial, o gás com partículas entra pelo topo e descreve um vórtice descendente junto às paredes. De seguida inverte o sentido do movimento antes de atingir a base devido ao aumento da pressão estática e começa a subir segundo um vórtice ascendente saindo limpo pelo topo do ciclone (Figura 10). A velocidade tangencial desempenha um dos efeitos mais importantes na eficiência de recolha de partículas mesmo em condições de temperatura e pressão elevadas. Caso se verifique uma diminuição da eficiência de recolha devido a operações a altas temperaturas, a situação pode ser revertida pelo aumento da pressão (Shin et al. 2005).

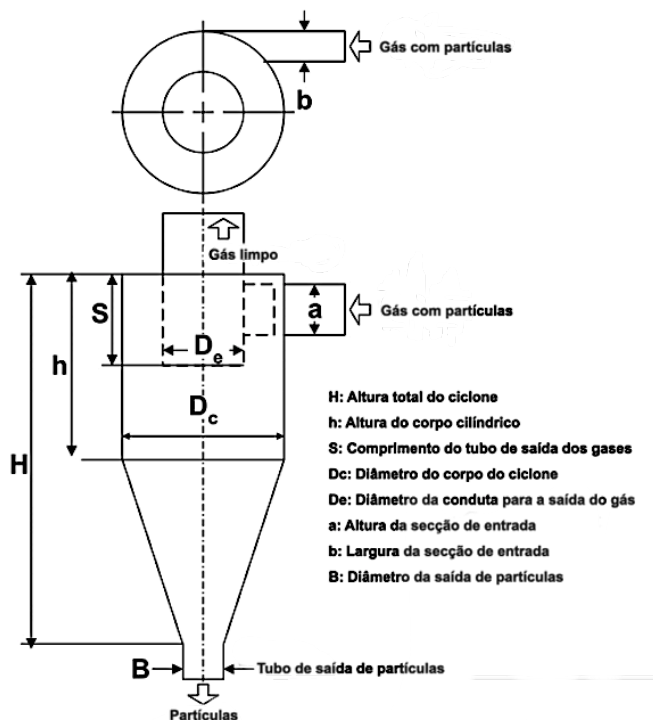


Figura 10 – Representação esquemática de um ciclone de fluxo invertido (Adaptado de Shin et al. 2005).

3.8.3 Eficiência de recolha do ciclone

O desempenho de um ciclone é avaliado através da eficiência de recolha, que é definida como a capacidade de remoção de uma fração de partículas consoante o seu diâmetro, e da perda de carga, que é definida como a diferença entre a pressão inicial e a pressão média da saída (Azadi & Azadi 2012).

O aumento da eficiência de recolha das partículas pode ser feito através de modelos de associação. Assim, podem ser associados em paralelo (associação utilizada para grandes caudais e grandes eficiências) ou em série, menos utilizado e aplicado para situações de partículas grosseiras e finas. Os multiciclones são um exemplo de uma associação em paralelo, com uma entrada e uma saída comum. Estes são caracterizados por um conjunto de ciclones de pequenos diâmetros entre os 15 e os 25 cm, com cones muito compridos e perdas de carga acentuada; ou seja ciclones de alta eficiência, que permitem uma eficiência de remoção elevada para partículas de 5 a 10 μm (90 % de eficiência). A aplicação de um ciclone simples antes de um ciclone de alta eficiência é um exemplo de uma associação em série. Os ciclones simples possuem grandes diâmetros, entre 0,75 a 1,50 m, operam com caudais

elevados e possuem pequenas perdas de carga e baixas eficiência de remoção para partículas finas (Antunes & Matos 2007).

3.9 Processo de controlo e optimização de um sistema de combustão

O controlo e optimização de um sistema de combustão é um processo complexo. A sua complexidade prende-se com o facto de existirem várias variáveis com influência direta sobre a eficiência do processo de combustão.

O processo de controlo e monitorização inicia-se com as propriedades e características da biomassa selecionada para produção de energia. Diferentes propriedades do combustível causam diferentes condições de combustão, desenvolvendo desafios no processo de controlo e optimização (Boriouchkine et al. 2012).

A produção de espécies químicas, tais como gases, frações de *tar* e *char*, durante o processo de combustão, assim como a sua reatividade nas diversas reações, são afetadas pelas condições operacionais da fornalha (Boriouchkine et al. 2012).

Boriouchkine *et al.* 2012 observaram através de simulações que, combustíveis com elevado teor de humidade têm uma combustão mais limpa, por causa de uma maior quantidade de oxigénio disponível para as reações, levando à produção de mais CO₂ e de menos de CO. No caso de combustíveis secos, verificou-se que a produção de CO é o dobro da de CO₂. O teor de humidade afeta também os perfis de temperatura dos gases de combustão, onde os gases provenientes de combustíveis secos atingem temperaturas superiores à dos combustíveis com teores elevados de humidade. O elevado teor de humidade diminui a taxa de conversão total do combustível, ao mesmo tempo que atrasa o processo de pirólise e as reações do *char* (Boriouchkine et al. 2012).

Quanto maior for a introdução de ar de combustão maior será a diminuição de massa do leito de combustível, ou seja uma maior quantidade de O₂ disponível permite a reação do *char* disponível (Boriouchkine et al. 2012). O arrefecimento do leito de combustível através de elevados caudais de ar, leva à descida da temperatura abaixo do ponto crítico, resultando numa diminuição da produção de CO₂. As simulações realizadas por Boriouchkine *et al.* 2012 mostram que quanto maior for o caudal de ar, maior será a quantidade de CO produzida e menor será a

quantidade de CO₂ (Boriouchkine et al. 2012). As simulações efetuadas pelos autores mostraram ainda que o tamanho das partículas influencia a rapidez de ignição. Partículas pequenas têm uma maior área de contacto para a troca de calor, absorvendo mais calor por radiação e levando a uma ignição mais rápida. Partículas grandes são menos eficientes na absorção de calor por radiação, mas são menos afetadas pelos processos de convecção na fase gasosa (Boriouchkine et al. 2012).

4 Descrição e sistematização dos componentes e sistemas a caracterizar no sistema caso-de-estudo

4.1 Lay-out do sistema caso-de-estudo

Por forma a melhor compreender o contexto do sistema de combustão do caso-de-estudo, é apresentada na Figura 11 uma representação esquemática dos principais elementos a caracterizar.

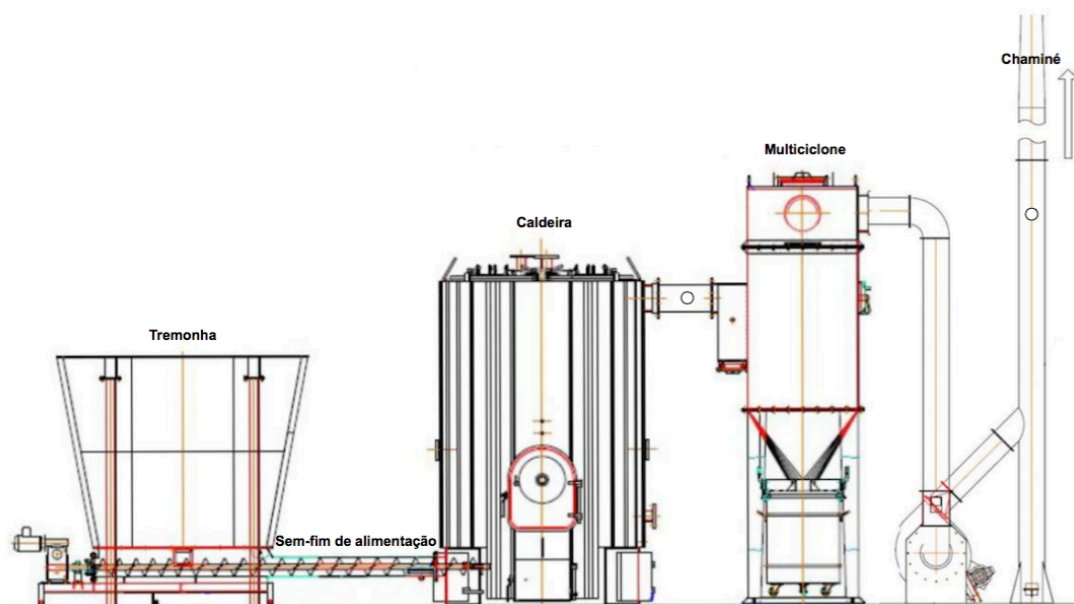


Figura 11 – Representação esquemática dos componentes do sistema de combustão a biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.2 Caracterização de biomassa

O conhecimento das características da biomassa aplicada a sistemas de combustão é fundamental para a optimização das condições de combustão, pois permite ajustar os parâmetros de combustão de forma a aumentar a eficiência do processo (temperatura, introdução de ar, tempo de residência, entre outros). O conhecimento destas características é feito através de análises próximas e elementares.

No caso de estudo vão ser utilizados diferentes tipos de biomassa. A casca de pinheiro, pellets de palha, pellets de madeira e uma mistura de pellets com diferente

granulometria e diferentes tipos de constituintes (Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15), são exemplos de diferentes tipos de biomassa que poderiam ser utilizados. Para fins meramente científicos foram analisadas as características físicas do carvão de Acácia (Figura 16) produzido por tecnologia Ventil – Engenharia do Ambiente. Os resultados obtidos para o carvão de acácia vão ser posteriormente comparados com as características dos vários tipos de biomassa.



Figura 12 – Casca de Pinheiro.



Figura 13 – Mistura de pellets.



Figura 14 – Pellets de Palha.



Figura 15 – Pellets de Madeira.

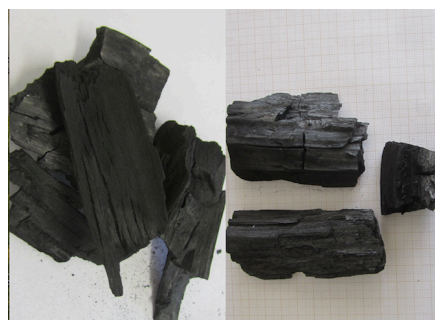


Figura 16 – Carvão de Acácia (Produzido por tecnologia Ventil).

É de salientar que estas análises devem ser realizadas para qualquer tipo de biomassa que se pretenda usar nos sistemas de combustão a biomassa.

4.3 Sistema de alimentação

A alimentação da caldeira do caso de estudo vai ser realizada com recurso a um sem-fim de alimentação com passos variáveis (Figura 17). O funcionamento em contínuo deste sistema reduz o risco de retorno de chama e por sua vez a propagação da combustão de biomassa até ao sistema de armazenamento (tremonha).

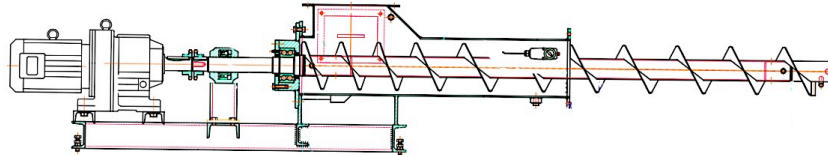


Figura 17 – Sistema de alimentação sem-fim com passos variáveis (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Este sistema permite alimentar a caldeira com diferentes tipos de biomassa. Um dos objectivos do presente trabalho passa pela correta calibração do sistema sem-fim que se encontra acoplado à fornalha (Figura 18).

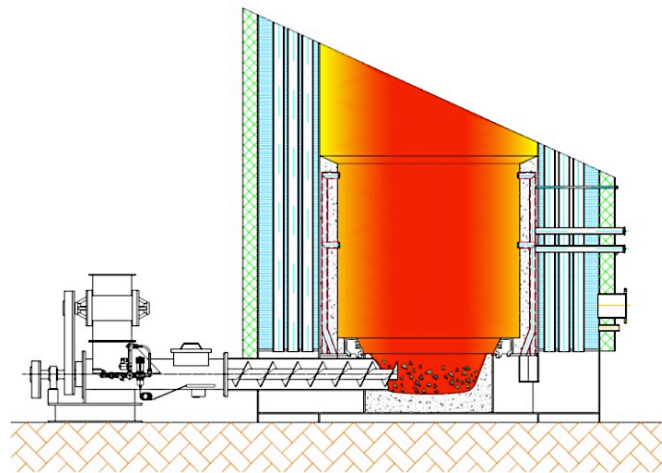


Figura 18 – Sem-fim de alimentação inferior acoplado à fornalha (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

O sem-fim de alimentação instalado no caso de estudo tem um número máximo de rotações de 12 rpm. O moto-redutor que confere movimento ao parafuso sem-fim trabalha com uma frequência máxima de 50 Hz e uma frequência mínima de 5 Hz (100% e 10% da frequência de funcionamento do variador do moto-redutor do sem-fim controlado pelo sistema de controlo da caldeira).

4.3.1 Sistemas de segurança associados ao sistema de alimentação

Os sem-fim de alimentação dos sistemas de combustão Ventil são detentores de um sistema de detecção e extinção de incêndio (Figura 19). A principal função desta aplicação é detetar e extinguir o eventual retorno de chama e a combustão da biomassa no interior do sistema de alimentação. Acoplado ao sistema sem-fim existem dois componentes de segurança, um sistema elétrico e um sistema mecânico.

O sistema elétrico ativa uma electroválvula de descarga de água para o interior do sem-fim, a descarga é ativada quando a sonda de temperatura de superfície de cariz elétrico deteta temperaturas superiores a 80°C. O sistema mecânico, dispositivo de ativação secundária que ativa igualmente a electroválvula de descarga de água, é ativado em situações de falha de energia elétrica permitindo não pôr em causa a detecção e extinção de incêndio (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil).

O sistema de segurança deve estar ligado à rede de água de incêndio, a uma pressão mínima de 3 bar, garantido a disponibilidade de água no circuito (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil).



Figura 19 - Sistema de detecção e extinção de incêndio. Sistema elétrico (esquerda). Sistema mecânico (direita) (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.4 Sistemas de introdução de ar de combustão

A introdução do ar de combustão vai ser feita com recurso a um ventilador centrífugo modelo RM 280/2 (Figura 20) com uma potência instalada de 0,75 kW e 2830 rpm.



Figura 20 – Ventilador centrífugo RM 280 (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Associada ao ventilador existe uma conduta seccionada em três partes (ar primário, secundário e terciário), cada secção possui uma válvula ligada a um servo-motor de regulação que possibilita diferentes aberturas e por conseguinte diferentes caudais de ar (Figura 21).

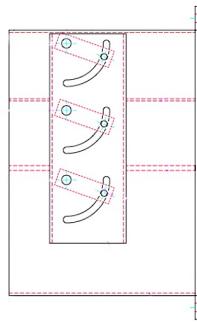


Figura 21 – Conduto seccionada para a introdução de ar primário, secundário e terciário na caldeira do caso de estudo (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Ao ventilador centrífugo RM 280 corresponde uma curva de funcionamento (Figura 22) pela qual é possível obter alguma informação relativa ao rendimento do ventilador consoante o caudal de ar estabelecido.

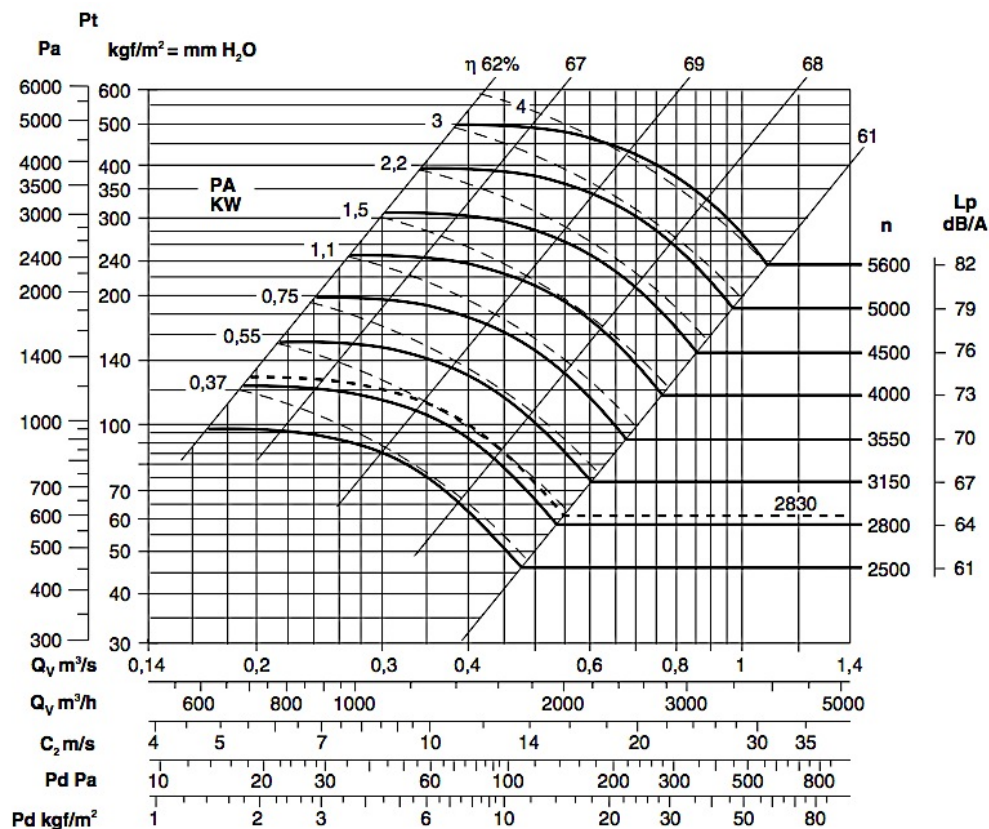


Figura 22 – Curva de funcionamento do ventilador centrífugo RM 280 usado na introdução de ar na fornalha (adaptado do catálogo de ventiladores centrífugos modelos RM da MZ Aspiratori, Budrio Bologna).

A introdução de ar primário na fornalha é feita através de um grelha circular fixa (ponto 1- Figura 23). E ar secundário e terciário (ponto 2 -Figura 23) por entradas otimizadas acima do leito de combustível.

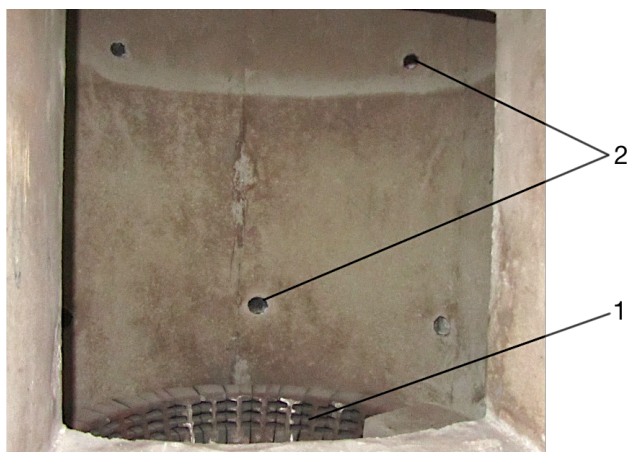


Figura 23 – Entradas de ar de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.4.1 Instrumentos de medição de caudais

4.4.1.1 Tubo de Pitot

O tubo de Pitot (Figura 24) foi inventado em 1732 e permanece até hoje um instrumento importante na determinação da velocidade dos fluídos (Boetcher & Sparrow 2007). Ao longo dos anos, tem vindo a ser amplamente utilizado pelas indústrias de modo a obter o caudal de escoamento de efluentes no interior das condutas. O princípio de medição do caudal, usando o tubo de Pitot, é baseado na diferença de pressão entre dois pontos de referência (Vinod et al. 2012). O diferencial de pressão é obtido pela diferença entre a pressão total (causada pelo movimento do fluxo de ar mais a coluna de ar estático) e a pressão estática (pressão que atua em todos os pontos do ar em estado estacionário). A pressão resultante (pressão total - pressão estática = pressão de velocidade) representa a pressão real causada pelo movimento da massa de ar. O caudal volumétrico de ar é determinado pela medição da velocidade de uma massa de ar que se movimenta através de um orifício de diâmetro conhecido. Se o tubo de Pitot for corretamente colocado vai ser possível a medição da velocidade média do ar que atravessa um orifício de diâmetro conhecido. O tubo de Pitot permite simultaneamente medir a pressão causada pelo movimento das moléculas de ar que atingem a tomada de pressão total (nariz) e a pressão estática de uma massa de ar estacionária (Jr 1998).

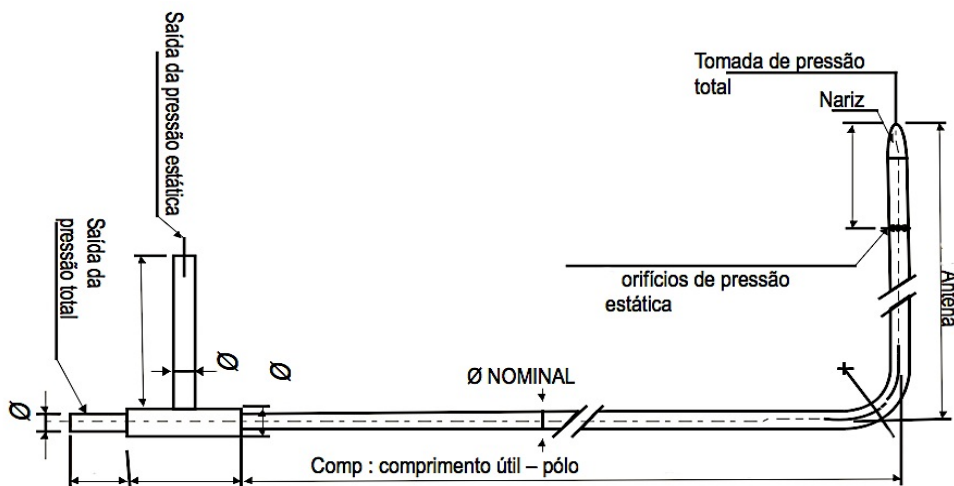


Figura 24 – Constituição de um tubo de Pitot normalizado (adaptado da Ficha Técnica da *KIMO Instruments*).

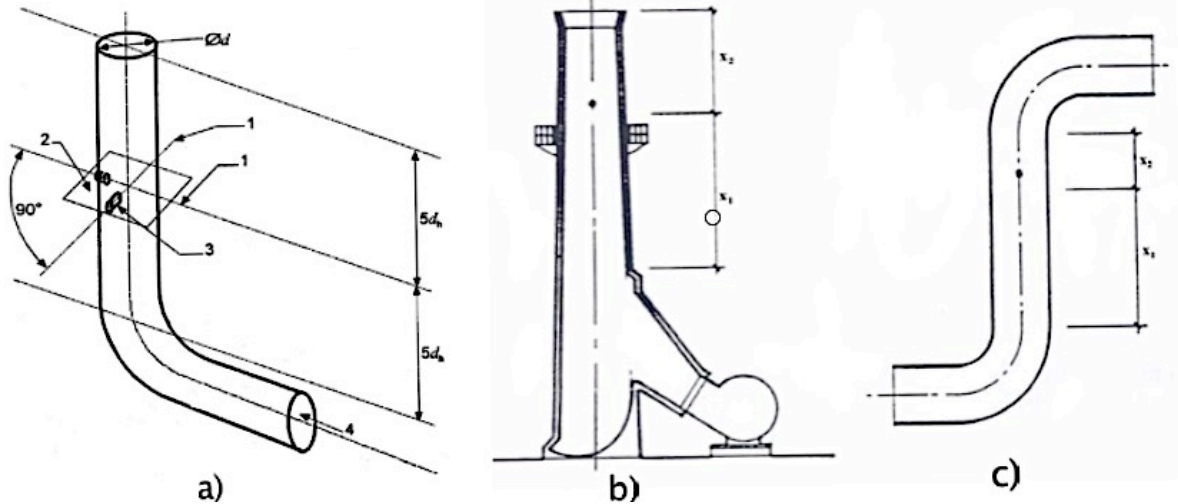
4.4.1.2 Manómetros de coluna de água

A medição da pressão gerada pela passagem da massa de ar no tubo de Pitot necessita de instrumentos de medição. Tradicionalmente, são usados manómetros na medição do diferencial de pressão entre a pressão total e a pressão estática. Quando se mede a pressão de uma massa de ar com recurso a um tubo de Pitot, são registadas pressões relativamente baixas, assim, o manómetro pode ter como líquido manométrico a água (Jr 1998).

4.4.2 Quantificação de caudais

A metodologia da seleção e preparação da toma de amostragem para quantificação de caudais em condutas horizontais e verticais é definida e apresentada na Norma NP 2167:2007 e pelos métodos EPA-01 e EPA-02.

A Norma NP 2167:2007 permite definir a secção de amostragem onde posteriormente será possível a monitorização dos parâmetros operacionais previamente selecionados. A secção de amostragem é definida como um plano normal à linha central da conduta na posição de amostragem. O plano de amostragem deve ser localizado numa extensão longitudinal de uma conduta reta, deve ser de fácil acesso com tomas de amostragem adequadas (Figura 25 a)). A secção de amostragem deve ficar o mais afastada possível de qualquer perturbação, tanto a montante como a jusante, que possa interferir na direção do escoamento (Figura 25b) e c). Para secções de conduta, a secção de amostragem deve estar localizada cinco diâmetros hidráulicos de conduta reta a montante do plano de amostragem e dois diâmetros a jusante (Figura 16 c)).



Legenda:

a)

1. Linha de amostragem
2. Plano de amostragem
3. Toma de amostragem
4. Escoamento
- d. Diâmetro interno da conduta
- d_h . Diâmetro hidráulico

b) e c)

- x_1 Distância a montante da toma de amostragem
- x_2 Distância a jusante da toma de amostragem

Figura 25 – Ilustração da secção de amostragem em condutas circulares. a) Definições de conduta circular; b) e c) Localização da secção de amostragem (adaptado da Norma NP 2167:2007).

A toma de amostragem é definida como a abertura na conduta onde é possível a inserção e retirada da sonda de amostragem de uma forma fácil. O tamanho da toma não deve ser inferior a 125 mm; no entanto, para condutas com diâmetros internos inferiores a 0,7 m o tamanho da toma pode ser inferior. Para condutas circulares com um diâmetro igual ou inferior a 0,35 m apenas é requerida uma toma de amostragem. Para diâmetros superiores, a conduta deve possuir pelo menos duas tomas desfasadas de 90°.

4.5 Sistema de combustão Ventil

4.5.1 Estrutura da caldeira

As caldeiras Ventil, independentemente da sua potência nominal possuem uma estrutura genérica. Na Figura 26 é possível observar a estrutura genérica de uma caldeira Ventil vertical para produção de energia térmica.

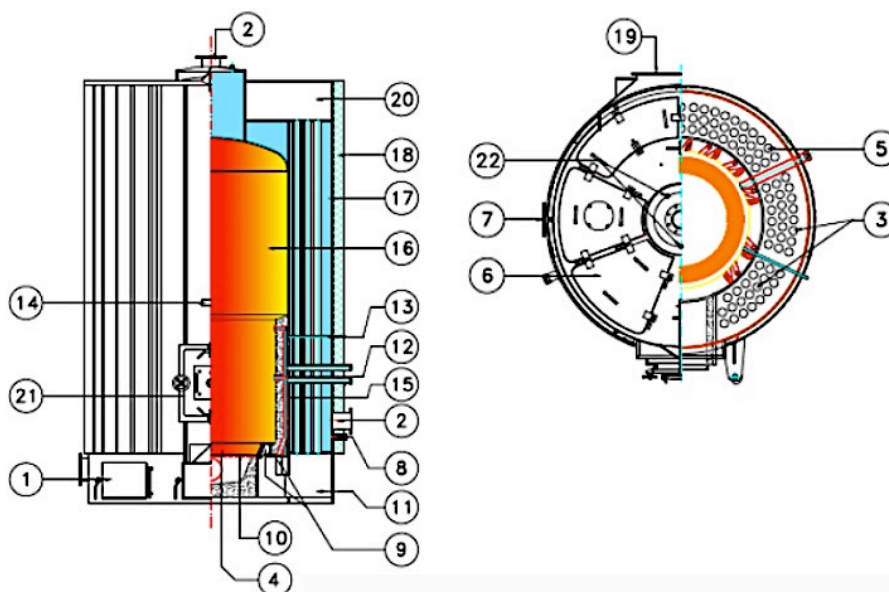


Figura 26 – Representação esquemática da estrutura genérica de uma caldeira Ventil modelo CVT (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Legenda da Figura 26:

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) Portas inferiores para limpeza de escórias; | (12) Introdução de ar secundário; |
| (2) Ida e retorno de água; | (13) Ligação do sensor de pressão; |
| (3) Primeiro conjunto de tubulares do permutador de calor vertical; | (14) Placa identificativa com número e ano de fabrico; |
| (4) Introdução de ar primário; | (15) Betão refractário; |
| (5) Segundo conjunto de tubulares do permutador de calor vertical; | (16) Fornalha interna; |
| (6) Tampas superiores para limpeza dos tubos de fumos; | (17) Permutador de calor vertical; |
| (7) Boca de entrada para alimentação de biomassa através de um sem-fim de alimentação; | (18) Isolamento em lã rocha revestido por chapa pintada; |
| (8) Purga da caldeira; | (19) Colector de saída dos gases de combustão; |
| (9) Grelha; | (20) Câmara superior para inversão do sentido dos gases de combustão; |
| (10) Base da fornalha com revestimento refractário; | (21) Porta principal da caldeira para acesso, limpeza e manutenção da fornalha; |
| (11) Câmara inferior para inversão do sentido dos gases de combustão; | (22) Pontos de ligação para a sonda de regulação de temperatura de água, pressostato e termóstato de segurança (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil). |

4.5.2 Transferência de energia térmica dos gases de combustão para a água

A eficiência de um sistema de combustão relaciona-se com a quantidade de energia térmica que o sistema de permutação de calor é capaz de extrair dos gases de combustão. É necessária a máxima rentabilização da transferência de calor contida nos gases de combustão para a água de aquecimento. Nas caldeiras Ventil, a transferência de calor é feita por tripla passagem (Figura 27). Diz-se que a transferência de calor é feita por tripla passagem devido à passagem dos gases de combustão por três secções.

A segunda câmara de combustão da fornalha não possui revestimento refractário, permitindo que a energia libertada pelo processo de combustão seja transmitida por radiação para a superfície interior do permutador de calor – primeira passagem. Os gases de combustão têm um sentido de escoamento ascendente, e a sua inversão de sentido para o primeiro conjunto de tubulares é feita numa câmara superior no topo da caldeira. A energia térmica dos gases que escoam pelos tubos é transferida principalmente por convecção para a água do permutador de calor – segunda passagem. No final do primeiro conjunto de tubulares encontra-se a câmara inferior de inversão de gases, que permite a passagem dos gases para o segundo conjunto de tubulares (terceira passagem) em direção ao coletor de saída para o mult ciclone, onde ainda ocorre a transmissão de alguma energia (processo de convecção) (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil).

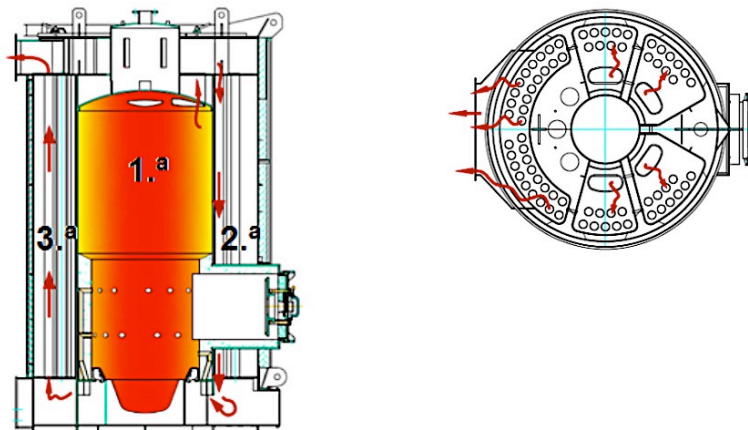


Figura 27 – Representação esquemática da transferência de calor dos gases de combustão para a água de aquecimento (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.5.3 Caracterização das condições da fornalha

Para que se possa traçar um perfil de temperatura e adquirir uma análise do gás de combustão foi necessário desenvolver sondas de amostragem. Assim, as sondas de amostragem têm como principal função permitir a monitorização da temperatura e dos gases de combustão ao longo do tempo nos pontos selecionados na caldeira (Figura 28).

Para além das sondas, foram também aplicados termopares simples noutros pontos para complementar a monitorização do perfil de temperaturas. A medição de temperaturas realizadas por termopares simples é feita no ponto 1 (cadinho de combustão de biomassa), no ponto 8 (câmara inferior de inversão de gases de combustão) e no ponto 10 (coletor de saída dos gases de combustão).

As sondas de amostragem vão ser introduzidas no ponto 2, 3, 4, 5 e 6 (perfil vertical entre a câmara de combustão primária e secundária), no ponto 7 (câmara superior de inversão de sentido dos gases de combustão) e ponto 9 (câmara superior de saída de gases de combustão).

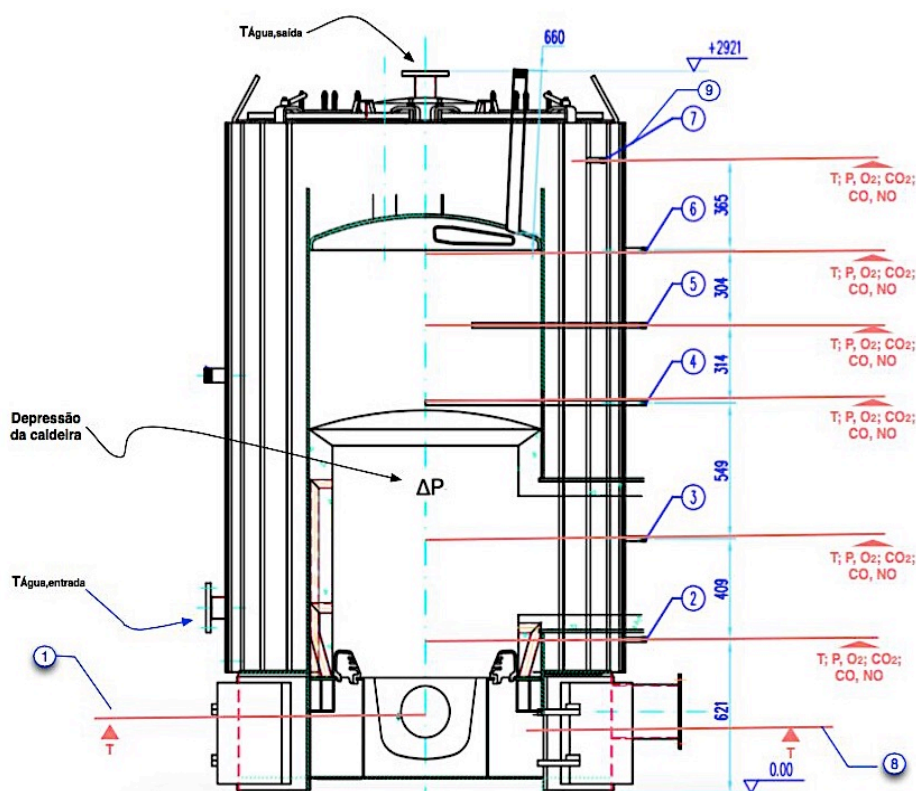


Figura 28 – Representação esquemática dos pontos de monitorização/medição e respetivas variáveis a obter com recurso a sondas de amostragem e termopares (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.6 Sistema de despoejamento

A remoção das partículas formadas durante a combustão de biomassa é feita por um multiciclone (Figura 29) constituído por dezasseis ciclones individuais de forma a maximizar a eficiência de remoção (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil). A eficiência do multiciclone depende de condições hidrodinâmicas como a velocidade de entrada e perda de carga do gás. Assim, e por forma a obter dados suficientes que permitam a interpretação das condições de operação do multiciclone, é calculado o caudal de gases de combustão que sai da caldeira, e a perda de carga entre a entrada e saída do multiciclone.



Figura 29 – Sistema de despoejamento – multiciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

As cinzas removidas do escoamento gasoso pelos vários ciclones vão ser recolhidas num balde (Figura 30) que se encontra acoplado na base do multiciclone. No final de cada ciclo de queima, de um determinado combustível sólido, é feita uma recolha de uma amostra de cinzas para posterior análise em laboratório.



Figura 30 – Balde de recolha de cinzas volantes recolhidas nos ciclones individuais do multiciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.7 Extração dos gases de combustão para a atmosfera

A extração dos gases de combustão vai ser feita através de um ventilador (Figura 31). O ventilador de extração de gases de combustão, para além de permitir a emissão dos gases de combustão para atmosfera através da chaminé, funciona como sistema de segurança. A existência de uma válvula borboleta a montante do ventilador permite manter uma depressão constante no interior da câmara de combustão. A válvula funciona de uma forma modulante, abrindo e fechando consoante as necessidades de ajuste da depressão. O desenvolvimento de uma depressão forçada permite minimizar os riscos de retorno de chama, partículas e gases para o exterior, caso a porta principal da caldeira seja aberta (Dossier Técnico – Caldeiras Ventil).

Neste sistema experimental, o ventilador de exaustão está dotado de um variador de frequência, pelo que a pressão no interior da fornalha é controlada pelo funcionamento deste variador de frequência.

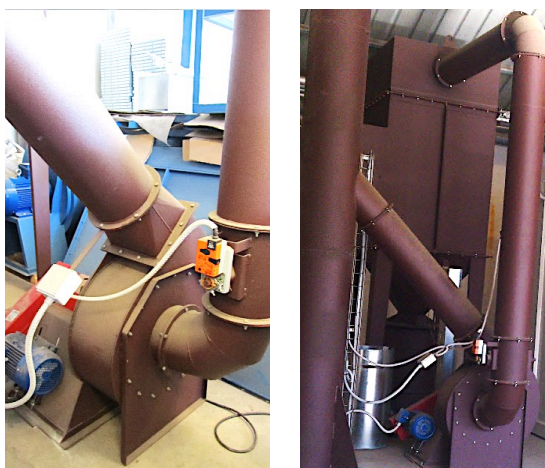


Figura 31 – Ventilador de extração dos gases de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

A pressão negativa no interior da fornalha (Figura 32) é medida em contínuo por um sensor de pressão CP110 da *Kimo instruments*. Este é um sistema padrão nos sistemas comerciais da Ventil.



Figura 32 – Sensor de pressão CP110 da *Kimo instruments* instalado num ponto fixo da caldeira para medição em contínuo da depressão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.8 Sistemas de monitorização e controlo

A monitorização e controlo do sistema de combustão vão ser feitos através de dois sistemas independentes (Figura 33). Um sistema de controlo que adquire informação de parâmetros como a pressão na fornalha, a temperatura da água à saída do permutador de calor e da água de retorno, a temperatura dos gases de combustão e a percentagem de oxigénio; ao mesmo tempo que controla e monitoriza os equipamentos mecânicos mostrando a sua percentagem de funcionamento e os componentes de segurança. O segundo sistema consiste numa central de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados de todos os componentes do sistema de combustão.



Figura 33 – Sistema de aquisição de dados, controlo e monitorização do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.8.1 Sistema de controlo e monitorização da caldeira

Como foi referido anteriormente, o sistema de controlo da caldeira monitoriza e controla uma série de elementos. O sistema possui um ecrã interativo que permite ao operador verificar visualmente a evolução da combustão consoante as

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

necessidades térmicas do processo, assim como a atividade ou inatividade dos equipamentos mecânicos do sistema de combustão e seu nível de funcionamento (Figura 34). Na secção da programação do sistema existe uma série de comandos que permitem ajustar parâmetros, tais como temperatura desejada e de segurança da caldeira, controlo do oxigénio de combustão, abertura dos servo-motores de regulação do ar primário, secundário, terciário e combustão, percentagem de funcionamento dos variadores do sem-fim de alimentação, ventilador de combustão, ventilador de exaustão, entre outros. Toda a informação disponibilizada por este sistema é enviada e registada num segundo sistema de aquisição de dados que se encontra dentro do módulo pré-fabricado junto ao sistema de combustão. O sistema de segurança emite um sinal sonoro caso exista algum parâmetro acima ou abaixo do valor previamente estipulado.

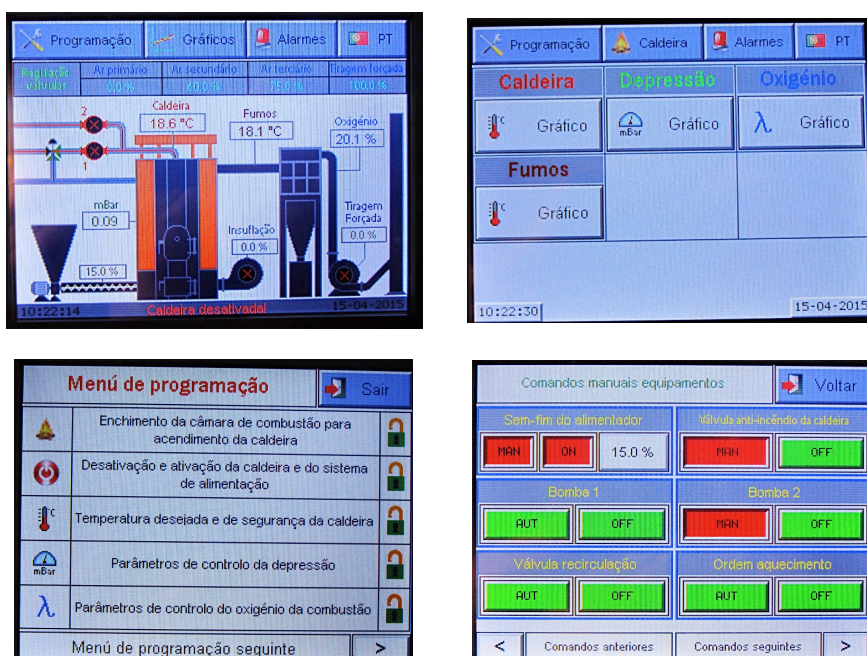


Figura 34 – Sistema de controlo da caldeira (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.8.2 Sistema de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados de todos os componentes do sistema de combustão

A caracterização de um sistema de combustão só é possível através de uma monitorização integrada. Ou seja, a aplicação de metodologias, métodos e equipamentos que permitam monitorizar, controlar e melhorar o processo de

combustão é fundamental para que o processo se possa dar de uma forma eficiente e controlada.

O correto controlo e monitorização de todos os componentes do sistema permite desenvolver metodologias de funcionamento que permitam uma combustão o mais completa possível, e por sua vez, um elevado grau de eficiência. A observação direta de todos os elementos a caracterizar torna este processo mais viável (Figura 35). Este sistema recebe toda a informação visualizada no sistema de controlo e monitorização da caldeira, a informação do perfil de temperaturas e pressões ao longo do sistema de combustão e a análise do gás de combustão.

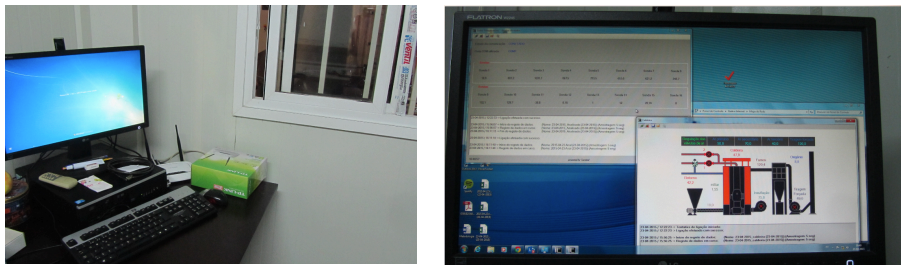


Figura 35 – Sistema de aquisição, monitorização, controlo e tratamento de dados de todos os componentes do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

A aquisição de dados é feita de uma forma contínua e é ativada ou desativada manualmente. Os dados são armazenados em formato csv para posterior tratamento de dados em *Excel*.

4.8.3 Sistema de multiplexagem para as sondas de amostragem

O sistema de multiplexagem assegura o transporte do gás desde o interior da fornalha até ao condicionador de gás de uma forma fiável. Cada tubo, que transporta o gás dos vários pontos de amostragem, vai estar ligado a uma electroválvula de 220 V; esta vai permitir que apenas a recolha de gás de um determinado ponto seja transmitida ao condicionador de gás e posteriormente ao analisador. Assim, dos nove tubos que chegam ao sistema de multiplexagem, sairá apenas um com a amostra a analisar, de acordo com a sonda para a amostragem/monitorização.



Figura 36 – Sistema de multiplexagem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.8.4 Monitorização e controlo de temperatura

Na subsecção “Caracterização das condições da fornalha” são definidos os pontos do sistema onde o registo de temperaturas foi realizado. A medição de temperaturas foi feita usando termopares do tipo N com bainha em inox e com uma gama de utilização entre 0...1250°C.

A seleção de termopares do tipo N em detrimento de termopares do tipo K (mais comuns), deve-se à sua gama de temperaturas ser superior, a uma maior estabilidade termoelétrica, maior tempo de vida e maior precisão.

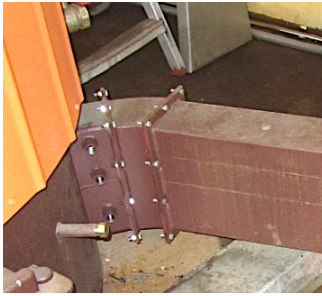


Figura 37 – Termopar tipo N (0...1250°C) para leitura de temperaturas ao longo do sistema de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

4.8.5 Monitorização e controlo de pressão

4.8.5.1 Manómetros de coluna de água formato em U

Os manómetros em U de coluna de água vão ser aplicados na medição de perdas de carga em alguns pontos seleccionados no sistema de combustão. Na Figura 38 é possível ver os vários pontos seleccionados para efetuar as várias medições. Para este sistema de medição, a recolha de dados deve ser efetuada manualmente e posteriormente analisada. Contudo, este só pode ser utilizado para diferenças de pressão maiores do que 1 mm (menor leitura de escala).



a) Tomas de medição nas condutas de ar primário, secundário e terciário à entrada da caldeira.



b) Toma de medição à saída do ventilador de combustão de ar.



c) Tomas de medição antes e após o multiclone.



d) Toma de medição na conduta de ligação entre o ventilador de tiragem forçada e a chaminé.

Figura 38 – Tomas de amostragem para medição de perdas de carga com recurso a um manómetro em U coluna de água (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

A simplicidade deste sistema de medição permite a sua construção no local, com materiais simples e de fácil acesso.

4.8.5.1 Medidor de pressão diferencial Testo 512

Para diferenças de pressão menores do que 1 mm de coluna de água é utilizado um medidor de pressão diferencial *Testo 512*. A aplicação deste medidor vai conferir uma maior precisão relativamente à aplicação de manómetros coluna de água a velocidades de escoamento muito baixas. O medidor de pressão seleccionado, para a utilização do tubo de Pitot, opera numa gama de 0 a 2 hPa.

4.8.5.2 Transmissor de pressão diferencial da Jumo Instrument Co. Ltd.

O transmissor diferencial da *Jumo Instrument Co. Ltd*, tipo 404304 (Figura 39), vai ser aplicado no sistema de multiplexagem para medição do diferencial de pressão nos vários pontos definidos para amostragem (sondas de amostragem). A diferença de pressão registada pelo transmissor vai ser feita entre a pressão no interior da fornalha relativamente à atmosfera.



Figura 39 – Transmissor de pressão diferencial, tipo 404304 da *Jumo Instrument Co. Ltd* (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

O transmissor de pressão, selecionado para monitorizar a pressão diferencial em cada ponto, opera numa gama de -25 a 25 mbar e com uma alimentação de 230V, 50 – 60Hz. A seleção de um equipamento que realize medições de pressões negativas, deve-se ao facto de se registarem pressões negativas relativamente à pressão atmosférica no interior da fornalha – sistema em depressão.

4.8.5.3 Transmissor de pressão diferencial da Kimo Instruments

O transmissor de pressão diferencial da *kimo Instruments*, série CP110 e modelo CP113, como foi referido anteriormente, realiza a medição em contínuo da depressão da fornalha. Este opera numa gama de pressão diferencial entre -10000 a 10000 Pa.

4.8.6 Monitorização de gases de combustão

A monitorização da composição dos gases de combustão, extraídos do interior da fornalha pelas diferentes sondas de amostragem, é realizada por um analisador de gases da ABB, série EL3000 e modelo EL3040, e por um condicionador de gás da M&C®, série CSS e versão CSS-V1 (Figura 40).



Figura 40 – Sistema de monitorização de gases de combustão. Analisador de gases ABB no canto superior direito. Condicionador de gases em baixo do lado direito (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

O condicionador de gases CSS-V1 é um sistema compacto, que permite a ocupação de pouco espaço, e que pode ser integrado num sistema de análise de gases.

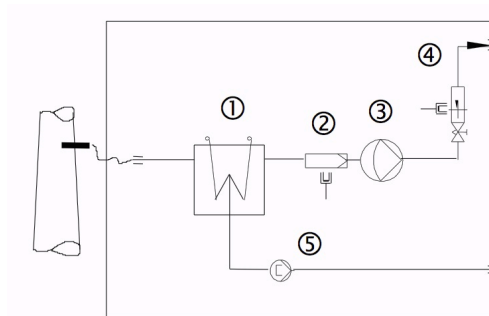


Figura 41 – Representação esquemática do condicionador de gás CSS-V1 (adaptado do manual de operação do condicionador de gás da M&C®, série CSS, versão CSS-V1).

Legenda da Figura 41:

- 1- Sistema de arrefecimento do gás;
- 2- Filtro com painel frontal, com uma porosidade de 0,3 μm e sistema de alarme de líquido instalado;
- 3- Bomba de amostragem de gás;
- 4- Caudalímetro com opção de alarme de caudal;
- 5- Bomba peristáltica para a remoção automática e contínua dos condensados.

O condicionador de gás opera a uma taxa de caudal máxima de 250 L.h⁻¹ e a uma gama de pressão entre 0,7 a 1,4 bar. O filtro de porosidade 3 μm garante a remoção necessária das partículas sólidas transportadas pelo gás. O sistema de alarme de líquido integrado no filtro permite a proteção do analisador instalado a jusante e

aumenta a segurança de operação de todo o sistema. Os condensados obtidos são removidos continuamente através da bomba peristáltica. O sistema é alimentado com uma corrente de 230V/50 – 60Hz.

Depois da amostra gasosa passar pelo condicionador de gás, onde são retiradas as partículas sólidas e os condensados, é analisada no analisador da ABB. O analisador pode ser constituído por vários sensores de análise. O analisador adquirido para a análise dos gases de combustão possui um sensor de análise Uras26 e um sensor de análise Magnos206. Os componentes selecionados para medição são o CO, o CO₂, o NO e o O₂. A medição destes elementos é feita aplicando tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR) e o método paramagnético. A gama de leitura definida para cada elemento é de:

- 0...25 %_{volúmica} para o O₂;
- 0...2000 ppm para o NO;
- 0...25%_{volúmica} para o CO₂;
- 0...10000 ppm para o CO.

Este equipamento inclui a correção de interferentes para uma matriz típica de combustão de biomassa, nomeadamente 2 % de CH₄ e teores de SO₂.

O sensor de análise Uras26 mede de forma seletiva a concentração do NO, CO₂ e CO por NDIR. O gás de enchimento das células de medição corresponde ao gás a ser medido, o que confere uma boa sensibilidade de medição ao sistema. A entrada do gás no sensor de análise pode apresentar valores na gama de pressão de 2...500 hPa e na gama de caudal de 20...100 L/h.

O sensor de análise Magnos206 aplica o método paramagnético para a medição do O₂. Este possui um tempo de resposta baixo, o que permite medir as rápidas variações na concentração da amostra gasosa. A entrada do gás no sensor de análise pode apresentar valores na gama de pressão de 2...100 hPa e na gama de caudal de 30...90 L/h. O analisador ABB é alimentado com uma corrente de 240 V/50 – 60 Hz.

4.8.7 Monitorização e controlo de humidade

A humidade é um parâmetro de combustão importante, pois a sua percentagem no combustível está diretamente relacionada com o poder calorífico, com a formação de condensados e com a formação de compostos entre determinados elementos

presentes na biomassa, levando a problemas operacionais e de eficiência do sistema.

O teor de humidade do combustível sólido pode ser obtido através do desenvolvimento de balanços mássicos ou pela aplicação da Norma CEN/TS 14774-3:2004 numa amostra de combustível. Contudo, este processo apenas analisa uma pequena fração do combustível sólido utilizado e não a fração completa nem a fração imediatamente a seguir. Diferentes condições atmosféricas e diferentes temperaturas no sistema de alimentação influenciam de forma diferente o teor de humidade.

A medição contínua do teor de humidade no combustível pode ser obtida por métodos diretos e métodos indiretos (Kortela & Jämsä-Jounela 2013; Hermansson et al. 2011). Os métodos diretos são aplicados diretamente no combustível, enquanto os métodos indiretos calculam o teor de humidade do combustível pela análise dos gases de combustão ou do ar de combustão (Hermansson et al. 2011; Kortela & Jämsä-Jounela 2013). Contudo, os métodos diretos são dispendiosos para sistemas de combustão de pequena e média escala sendo apenas viáveis para sistemas de grandes dimensões. Por sua vez, os métodos indiretos são mais baratos e são fáceis de aplicar (Hermansson et al. 2011).

Assim, aplicando um transmissor de humidade e temperatura (método indireto) é possível obter o teor de humidade existente nos gases de combustão. E através do desenvolvimento do balanço mássico, incluindo o teor de humidade do ar de combustão e a composição elementar do combustível e do ar de combustão, é possível calcular o teor de humidade do combustível que está no interior da fornalha. O valor obtido vai ter um *delay* na ordem dos segundos (tempo de transporte do gás desde a fornalha até ao ponto de medição) o que permite ajustar e controlar a alimentação e o ar de combustão (Hermansson et al. 2011; Kortela & Jämsä-Jounela 2013).

O equipamento selecionado para monitorização e controlo do teor de humidade é o transmissor de humidade e temperatura Vaisala HUMICAP[®], modelo HMT310 com sonda HMT315 para temperaturas elevadas até 180°C e sensor HUMICAP[®]180RC com purga química e aquecimento de sonda.

A medição do teor de humidade vai ser feita pela análise dos gases de combustão em dois pontos de amostragem. As tomas de amostragem devem ser feitas em locais onde a temperatura não ultrapasse os 180°C.

4.8.8 Monitorização do caudal de água de aquecimento

A monitorização do caudal de água de aquecimento vai ser feita com recurso a dois *Sonometer™ 1100 da Danfoss* (Figura 42), sistemas estáticos e compactos de ultrassons para medição de energia em locais com aplicações de aquecimento ou arrefecimento ou a combinação dos dois. Os medidores vão ser aplicados na rede de distribuição de água para aquecimento do complexo industrial e na rede de distribuição de água de dissipação de energia para a atmosfera. Sendo o medidor com uma gama de medição entre 25 – 50 m³.h⁻¹ aplicado na rede de distribuição de água para o complexo industrial e o medidor com uma gama entre 15 – 30 m³.h⁻¹ na rede de distribuição de água para o dissipador.



Figura 42 – Sistemas de monitorização do caudal de água de aquecimento. Sistemas estáticos e compactos de ultrassons para medição de energia – *Sonometer™ 1100 da Danfoss* (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

O *Sonometer™ 1100* é composto por um sensor de caudal ultrassónico, um sistema de cálculo com *software* e *hardware* integrado para medição de caudais, temperatura e consumos energéticos e sondas de temperatura (água quente (ida) e água fria (retorno)) (Figura 43).

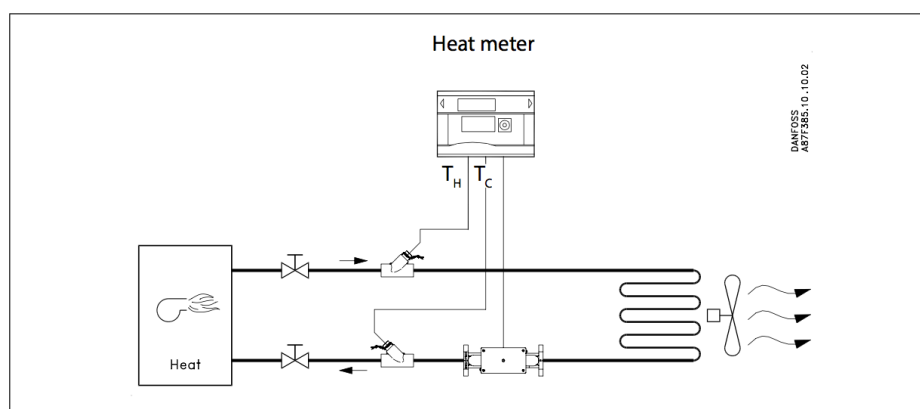


Figura 43 – Representação esquemática para aplicação das sondas de temperatura numa rede de distribuição de água para aquecimento.

5 Aplicação dos métodos de monitorização do sistema de combustão do caso de estudo

5.1 Caracterização física das diferentes biomassas utilizadas

As análises próximas, aplicadas aos diferentes tipos de biomassa, foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

5.1.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras de biomassa é feita segundo a Norma CEN/TS 14780:2005 (E) (A.1.1 Métodos de preparação de amostras). O teor de humidade foi realizado com dois tipos de amostras: amostras biomassa no seu estado tal e qual e amostras de biomassa após moagem com um diâmetro inferior a 1 mm. O teor de cinzas e o teor de voláteis vai ser realizado com biomassa de granulometria inferior a 1 mm.

Amostras muito heterogéneas precisam de cuidado adicional devido à existência de materiais finos e grosseiros. Para que a amostra teste seja representativa de toda a amostra recolhida recorre-se à técnica de esquetejamento. A amostra recolhida é espalhada de forma uniforme sobre uma superfície e dividida em partes equivalentes (Figura 44). Usando porções das amostras das parcelas diagonais é obtida uma amostra representativa.



Figura 44 – Esquetejamento de amostras para obtenção de uma amostra teste representativa.



Figura 45 – Redução de tamanho da biomassa usando um almofariz de Ágata.

Antes da moagem, as amostras muito grosseiras devem sofrer uma redução prévia de tamanho usando um almofariz de Ágata (Figura 45), facilitando a entrada da amostra no moinho de corte (Figura 46).



Figura 46 – Moinho de corte e acessórios.

5.1.2 Determinação do teor de humidade

A determinação do teor de humidade das amostras de biomassa a utilizar nos sistemas de combustão deve ser feita antes do seu uso. Como foi referido anteriormente, o teor de humidade deve ser determinado usando biomassa no seu estado tal e qual e usando biomassa com um diâmetro inferior a 1 mm. Para ambas as amostras o procedimento seguido é apresentado na Norma CEN/TS 14774-3:2004 (A.1.2 Determinação do teor de humidade de uma amostra).



Figura 47 – Amostras de biomassa usadas na determinação do teor de humidade.

Para determinar o teor de humidade numa amostra em base seca, a amostra deve ser pesada antes e após secagem na estufa a uma temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até a obtenção de uma massa constante. A expressão de cálculo pode ser apresentada da seguinte forma,

$$TH_{bs} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad [\% \text{ bs}] \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde,

m_1 – massa do recipiente, g;

m_2 – massa do recipiente mais amostra antes de ir à estufa, g;

m_3 – massa do recipiente mais amostra depois de ir à estufa, g.

5.1.3 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinza é determinado usando biomassa com uma granulometria inferior a 1 mm. A determinação do teor de cinzas é obtida segundo a Norma CEN/TS 14775:2004 (E) (A.1.3 Determinação do teor de cinzas).

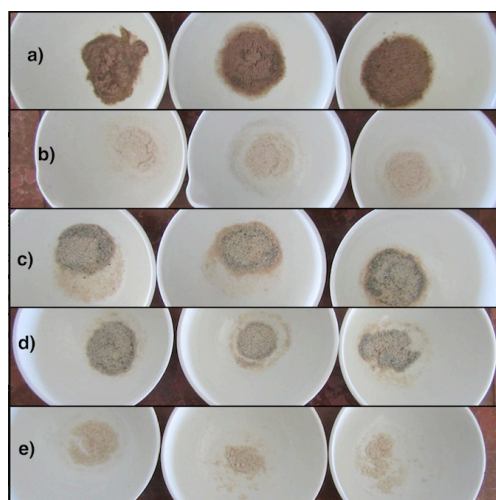


Figura 48 – Cadinhos com a amostra de biomassa após mufla na determinação do teor de cinzas. a) Carvão de Acácia; b) Casca de pinheiro; c) Mistura de Pellets; d) Pellets de Palha; e) Pellets de madeira.

O cálculo do teor de cinzas (A.1.3 Determinação do teor de cinzas) vai permitir determinar o teor de matéria orgânica e a eficiência de combustão (Silva 2012; Coelho 2010).

$$TC_{bs} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad [\% \text{ bs}] \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde,

m_1 – massa do cadinho vazio, g;

m_2 – massa do cadinho mais a amostra antes de ir à mufla, g;

m_3 – massa do cadinho mais amostra depois de ir à mufla, g.

5.1.4 Determinação do teor de matéria volátil

O teor de matéria volátil é determinado usando biomassa com uma granulometria inferior a 1 mm. A determinação do teor de matéria volátil é obtida através da metodologia apresentada na Norma CEN/TS 14775:2004 (A.1.4 Determinação do teor de matéria volátil).



Figura 49 – Mufla para determinação do teor de matéria volátil; suporte e respetivos cadinhos.

O cálculo do teor de matéria volátil é obtido pela seguinte expressão (Norma CEN/TS 14775:2004 (A.1.4 Determinação do teor de matéria volátil)):

$$MV_{bs} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 [\%, bs] \quad \text{Eq.(10)}$$

m_1 – massa do cadinho vazio, g;

m_2 – massa do cadinho mais amostra antes de ir à mufla, g;

m_3 – massa do cadinho mais amostra depois de ir à mufla, g.

5.1.5 Determinação do teor de carbono fixo

Como já foi referido anteriormente, o teor de Carbono fixo é obtido após a obtenção de informação relativa às análises ao teor de humidade, das cinzas e da matéria volátil. O cálculo do teor de Carbono fixo é obtido através da diferença entre 100% e

o somatório do teor de cinzas com o teor de matéria volátil, com todos os parâmetros em base seca (García et al. 2012; Silva 2009; Telmo et al. 2010). E pode ser expresso por:

$$CF_{bs} = 100 - (TC_{bs} + MV_{bs}) [\%, bs] \quad \text{Eq.(11)}$$

5.1.6 Determinação do poder calorífico

Através da relação entre a análise próxima (teor de cinzas, teor de matéria volátil e teor de Carbono fixo, em base seca) e a análise elementar (teor de Carbono, de Hidrogénio e de Oxigénio, em base seca), é possível observar que o Carbono e o Hidrogénio são proporcionais ao teor de Carbono e ao teor de matéria volátil (Parikh et al. 2007).

Parikh *et al.* 2007, com recurso a um algoritmo, desenvolveram expressões algébricas e calcularam as respectivas constantes que permitem uma estimativa da composição elementar da biomassa. Assim, pela análise próxima é possível obter os valores de Oxigénio, Hidrogénio e Carbono, podendo ser calculados a partir das seguintes expressões:

$$C = 0,637CF + 0,455MV (\%, bs) \quad \text{Eq.(12)}$$

$$H = 0,052CF + 0,062MV (\%, bs) \quad \text{Eq.(13)}$$

$$O = 0,304CF + 0,0476MV (\%, bs) \quad \text{Eq.(14)}$$

Devendo os valores obtidos situarem-se entre as gamas apresentadas,

$$57,2 \% \leq MV \leq 90,6 \%$$

$$4,7 \% \leq CF \leq 38,4 \%$$

$$36,2 \% \leq C \leq 53,1 \%$$

$$4,36 \% \leq H \leq 8,3 \%$$

$$31,37 \% \leq O \leq 49,5 \%$$

Onde,

MV – teor de matéria volátil, %, bs;

CF – teor de Carbono fixo, %, bs;

C – Carbono, %, bs;

H – Hidrogénio, %, bs;

O – Oxigénio, %, bs.

Deste modo, é possível obter uma estimativa dos componentes elementares de forma rápida, fácil e económica (Parikh et al. 2007).

Channiwala & Parikh 2002 compilou uma série de correlações para o cálculo do poder calorífico de vários biocombustíveis. Os autores consideraram a correlação da Eq.(15) como a melhor estimativa para o cálculo do Poder Calorífico Superior da biomassa, considerando a utilização da composição elementar.

$$PCS = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211.TC [MJ \cdot kg^{-1}] \quad \text{Eq.(15)}$$

C – Carbono, % bs;

H – Hidrogénio, % bs;

S – Enxofre, % bs;

O – Oxigénio, % bs;

N – Azoto, % bs;

TC – Teor de cinzas, % bs.

Devendo os valores obtidos situarem-se entre as gamas apresentadas,

$$0,00 \% \leq C \leq 92,25 \%$$

$$0,43 \% \leq H \leq 25,15 \%$$

$$0,00 \% \leq O \leq 50,00 \%$$

$$0,00 \% \leq N \leq 5,60 \%$$

$$0,00 \% \leq S \leq 94,08 \%$$

$$0,00 \% \leq TC \leq 71,40 \%$$

$$4,745MJ/kg \leq PCS \leq 55,345MJ/kg$$

Relativamente ao PCI, a sua estimativa é obtida recorrendo ao uso da equação Eq.(16) (correlação apresentada em Tarelho L., 2013), e em que é considerada a fração mássica de Hidrogénio no combustível em base seca, a razão mássica de humidade no combustível em base seca, e a entalpia de vaporização da água à temperatura de referência especificada.

$$PCS = PCI - h_{fg,T} \left(W_{WR} + w_{HR} \cdot \frac{18}{2} \right) [MJ \cdot kg^{-1}] \quad \text{Eq.(16)}$$

Onde,

$h_{fg,T}$ é a entalpia de vaporização da água à temperatura de referência especificada, $MJ \cdot kg^{-1}$;

W_{WR} é a razão mássica de humidade no combustível, em base seca;

w_{HR} é a fracção mássica de hidrogénio no combustível, em base seca.

5.2 Determinação da massa volúmica aparente das diferentes biomassas utilizadas

A influência que a massa volúmica do combustível sólido tem sobre o desempenho dos sistemas de alimentação conduz ao desenvolvimento de uma metodologia que se possa utilizar em ambiente industrial.

Assim, com recurso a um recipiente de dimensões e peso bem conhecido (Figura 50), é determinada a massa da biomassa que permite o cálculo da massa volúmica aparente. O valor da massa de biomassa utilizada é obtido através de uma balança dinamométrica Cachapuz (Figura 51). Para verificação do valor da massa volúmica obtido em ambiente industrial é determinado, para a mesma biomassa, o valor da massa volúmica no laboratório do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.



Figura 50 – Recipiente usado para a determinação da massa da biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).



Figura 51 – Balança dinamométrica Cachapuz (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

5.3 Calibração do sistema de alimentação sem-fim

A recta de calibração de um sistema de alimentação sem-fim é obtida através da determinação do caudal mássico ou caudal volumétrico que atravessa o sistema sem-fim com um número implícito de rotações.

O número de medições experimentais realizadas para obter a reprodutibilidade e a gama de caudais a que o sem-fim de alimentação opera deve ser realizada entre 2 a 5 vezes (Dai & Grace 2007).

O sem-fim usado é detentor de três tipos de passos (passo progressivo) (Figura 52), afastados entre si com diferentes distâncias, aumentando o seu espaçamento com a proximidade à fornalha. Esta tipologia de sem-fim prende-se com o facto do sistema de combustão em estudo poder utilizar diferentes tipos de biomassa ao longo do processo experimental e evitar a compressão do material no seu interior, provocando obstruções ou encravamentos. Assim, diferentes espaçamentos entre as alhetas conferem uma maior flexibilidade de alimentação. O sistema de controlo da caldeira vai controlar a velocidade de rotação do sistema sem-fim.

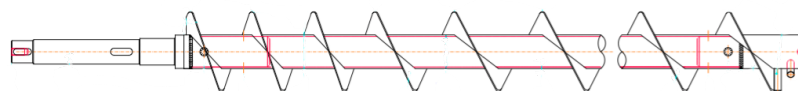


Figura 52 – Configuração do sistema de alimentação de sem-fim do caso de estudo (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.)

Para proceder à calibração do sem-fim é necessário o desacoplamento da estrutura mecânica do sistema sem-fim da caldeira. Deste modo, torna-se importante criar uma estrutura que possa representar de uma forma realista as condições de funcionamento (Figura 53). A estrutura desenvolvida tem como objetivo representar o cadinho de combustão da fornalha, ao mesmo tempo que simula de uma forma equivalente a entrada de material no cadinho.



Figura 53 – Prolongamento da estrutura do sem-fim para simular as condições de combustão dentro do cadinho da fornalha (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

Antes de se iniciar a calibração, o sistema de alimentação sem-fim e o prolongamento da estrutura devem estar totalmente cheios. Por forma a contabilizar apenas a biomassa que é introduzida no cadinho da fornalha e não a biomassa que preenche a estrutura de suporte do sem-fim, antes de cada medição, a biomassa que se encontra à superfície do cadinho da estrutura deve ser alisada.



Figura 54 – Aspecto do cadinho da estrutura de prolongamento do sistema sem-fim preenchido com biomassa (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

Devido às dimensões do sistema sem-fim, a recolha da biomassa debitada ao longo do tempo de funcionamento vai ser feita com recurso a um *big-bag* (Figure 55). Este

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

deve ser colocado de forma a que não exista perda de biomassa, evitando erros por perda de material.



Figure 55 – Recolha de biomassa com recurso a um big-bag (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

O sistema de alimentação de biomassa (com parafuso sem-fim) é controlado pelo sistema de controlo da caldeira. Este estabelece a frequência de funcionamento do moto-reductor que aciona a rotação do sem-fim em função dos níveis de oxigénio registados numa sonda localizada a jusante do multiclone e a montante do ventilador de extração dos gases de combustão. A frequência de funcionamento do moto-reductor varia numa escala entre 10% (mínimo permitido pelo sistema) e 30% (alimentação máxima necessária para este tipo de biomassa) (Figura 56).

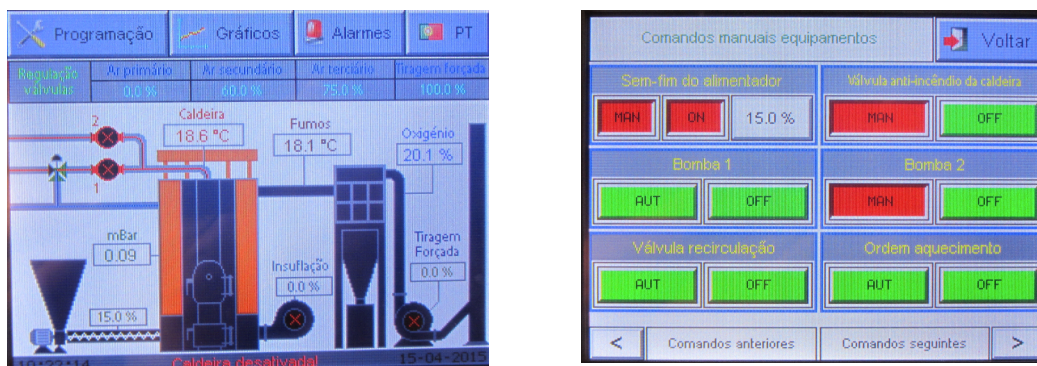


Figura 56 – Monitorização do sistema de alimentação sem-fim pelo sistema de controlo da caldeira (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

Além da frequência definida no sistema de controlo da caldeira para o variador de frequência, a alimentação pode ser condicionada pela abertura ou fecho da guilhotina que se encontra na base da tremonha de alimentação (Figura 57).

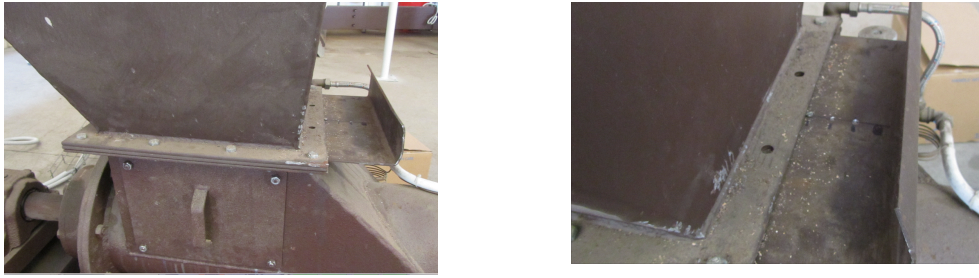


Figura 57 – Guilhotina de fecho da base da tremonha de alimentação do sistema de alimentação sem-fim (Cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente).

Deste modo, para a calibração do sistema de alimentação sem-fim com pellets de madeira, vão 2r realizadas três medições para cinco frequências do variador do moto-reductor. As frequências seleccionadas para a calibração foram 10, 15, 20, 25 e 30%.

Pela representação do caudal mássico do sistema sem-fim em função da percentagem de funcionamento do variador do moto-reductor do sistema de alimentação são obtidas retas de calibração. Pelas retas de calibração é possível obter os coeficientes de regressão linear (a_0 e a_1) os quais permitem obter a equação de calibração para o parafuso sem-fim, da qual se obtém o caudal médio de combustível introduzido na fornalha.

$$Q \left[\frac{kg}{h} \right] = a_0 \times f(\%) + a_1 \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde,

a_0 é o coeficiente angular;

a_1 é o ponto onde a reta intercepta o eixo y;

$f(\%)$ é a frequência de funcionamento do moto-reductor do sem-fim.

A reta de calibração permite gerir os caudais de biomassa necessários ao bom funcionamento da fornalha alterando apenas a velocidade de rotação do parafuso sem-fim pelo ajuste do torque.

5.4 Quantificação do caudal de ar de combustão

Tal como já foi referido anteriormente, o ar de combustão é um parâmetro de elevada importância devido à sua influência sobre a eficiência de combustão.

5.4.1 Método 1- Aplicação de uma conduta circular ao ventilador

5.4.1.1 Definição da secção de amostragem

Para se poder quantificar o caudal de ar introduzido na fornalha pelo ventilador foi instalada uma conduta com 1,5 m de comprimento e 0,2 m de diâmetro, a qual foi acoplada ao ventilador. Pela Norma NP 2167:2007 obtém-se a secção de amostragem e a respetiva toma. A Norma define que para condutas com 0,35 m apenas é necessária uma toma e que a secção de amostragem deve localizar-se a pelo menos 5 diâmetros hidráulicos (d_h) a montante da perturbação e a 2 diâmetros hidráulicos a jusante. Assim vem,

$$5d_h = 5 \times 0,2 = 1 \text{ m} \quad \text{Eq.(18)}$$

$$2d_h = 2 \times 0,2 = 0,4 \text{ m} \quad \text{Eq.(19)}$$

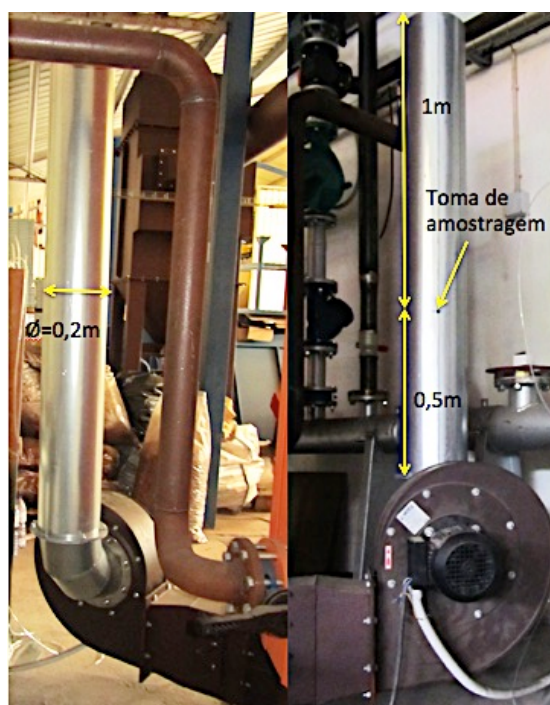


Figura 58 – Definição da toma e secção de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

5.4.1.2 Determinação da velocidade do ar de combustão recorrendo ao tubo de Pitot

A diferença entre a pressão dinâmica e a pressão estática no ponto de amostragem permite o cálculo da velocidade do ar nesse ponto. Assim, considerando o termo potencial desprezável e aplicando a equação de Bernoulli, obtêm-se

$$u = k_p \sqrt{\frac{2\Delta p_d}{\rho_G}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad \text{Eq.(20)}$$

sendo,

k_p o fator de correção do tubo de Pitot ($0,98 \leq k_p \leq 1$ para um tubo com configuração normalizada); $k_p = 1$, factor de correção utilizado;

ρ_G a massa volúmica do fluído gasoso nas condições atuais do escoamento, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

Δp_d a diferença entre a pressão dinâmica e a pressão diferencial, m.

A pressão diferencial é obtida em manómetros em U de coluna líquida. Nestes, a relação entre a pressão diferencial e o desnível da coluna líquida entre ambos os ramos do manómetro é dada por

$$\Delta p_d = \rho_L g \Delta z_d \quad \text{Eq.(21)}$$

em que

ρ_L é a massa volúmica do líquido manométrico, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

g é a aceleração da gravidade, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;

Δz_d é a diferença de altura do líquido manométrico nos dois ramos de tubo em U, m.

5.4.1.3 Determinação do caudal de ar de combustão introduzido na fornalha

O caudal de ar de combustão introduzido na fornalha com recurso a um ventilador centrífugo modelo RM 280/2 é dado por

$$Q = A \cdot u \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad \text{Eq.(22)}$$

onde,

A é a área da conduta da secção de amostragem, m^2 ;

u é a velocidade de escoamento do efluente gasoso, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

O caudal de ar deve ser apresentado na forma normalizada (condições PTN (Pressão e Temperatura Normais), assim vem

$$Q = Q \left(\frac{P_{actual}}{P_N} \right) \left(\frac{T_N}{T_{actual}} \right) [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad \text{Eq.(23)}$$

onde,

P_{actual} é a pressão na conduta registada no momento da medição, Pa;

P_N é a pressão nas condições PTN, $1,013 \times 10^5$ Pa;

T_{actual} é a temperatura na conduta registada no momento da medição, k;

T_N é a temperatura nas condições PTN, 273,15 k.

5.4.2 Método 2 – Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão

A introdução de ar na fornalha é feita através de condutas de secção retangular. De forma a obter uma leitura equivalente e por forma a minimizar erros de leitura nos caudais das diferentes secções é desenvolvida uma conduta devidamente seccionada. A expansão da conduta (Figura 59) deve ser dimensionada segundo a Norma NP 2167:2007 para conseguir um escoamento laminar.



Figura 59 – Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão na fornalha (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

A Norma NP 2167:2007 define que a secção de amostragem deve localizar-se a pelo menos 5 diâmetros hidráulicos a montante da perturbação e a 2 diâmetros hidráulicos a jusante (Figura 60). O diâmetro hidráulico de secções retangulares é calculado a partir do diâmetro equivalente (D_{eq}) apresentado na equação seguinte

$$D_{eq} = \frac{2ab}{a+b} [m] \quad \text{Eq.(24)}$$

onde,

a é a altura da secção de amostragem, m;

b é a largura da secção de amostragem, m.



Figura 60 - Prolongamento da conduta de introdução de ar de combustão na fornalha com secção de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Em cada toma de amostragem vai ser colocado um tubo de Pitot ligado a um manómetro em U de coluna de água. Pela diferença de pressão obtida é calculada a velocidade do escoamento e por conseguinte é possível obter o caudal.

5.5 Desenvolvimento de sondas de amostragem de temperatura e gases de combustão

5.5.1 Construção de sondas de amostragem

A amostragem dos pontos seleccionados para caracterização de gases de combustão (CO , NO , CO_2 e O_2) e registo de temperaturas vai ser realizada com recurso a sondas arrefecidas (Figura 61). A sonda deve possuir comprimento suficiente de forma a atingir o centro da área seleccionada para amostragem (centro da câmara de combustão (Figura 62)), sendo constituída por três tubos de aço inox resistente a altas temperaturas de diferentes diâmetros, permitindo a concentricidade e áreas equivalentes para a circulação de água de arrefecimento.



Figura 61 – Sonda de amostragem em aço inox (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).



Figura 62 – Vista da posição das sondas de amostragem no interior das câmaras de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

O tubo de diâmetro inferior vai permitir a passagem de um termopar do tipo N (0 ... 1250 °C) (Figura 65) para a medição de temperatura e a extração do gás de combustão para posterior análise num analisador de gás contínuo EL3040 da ABB. Numa das extremidades a sonda vai possuir um T (Figura 63) com uma saída para o gás de combustão, onde se vai acoplar um copo de condensados (Figura 64), e uma saída para a fixação do termopar. Na extremidade oposta vai ser introduzida lã de rocha como primeiro filtro, permitindo a retenção das partículas e a redução dos depósitos no interior do tubo.



Figura 63 – Entrada e saída de água. fixação do termopar tipo N e extração de gases de combustão (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).



Figura 64 – Copo de condensados (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).



Figura 65 – Termopar tipo N (0...1250 °C) a introduzir na sonda de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

Na Figura 63 é possível ver o ponto de entrada e de retorno de água, que permite o arrefecimento da sonda para a diminuição da temperatura dos gases de combustão, ao mesmo tempo que funciona como sistema de segurança, evitando queimaduras graves caso seja necessário o ajuste da sonda.

5.5.2 Processo de arrefecimento das sondas de amostragem

O arrefecimento das sondas vai ser feito com recurso a água da rede com uma pressão aproximada de 3 bar. Para que esta possa circular pelas sondas e proporcionar o arrefecimento suficiente é necessário construir coletores que permitam a entrada e o retorno de água das sondas. Os coletores foram feitos em aço inox com oito entradas/saídas para a água (Figura 66).



Figura 66 – Coletores de recirculação de água para o arrefecimento das sondas de amostragem (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

5.6 Quantificação do caudal do gás de combustão

A quantificação do caudal do gás de combustão vai ser feita recorrendo a um tubo de Pitot. A leitura da velocidade do escoamento gasoso vai ser obtida com recurso a um sensor Testo 512. Devido às velocidades muito baixas do escoamento dos gases de combustão, a aplicação de um manómetro coluna de água não tem sensibilidade suficiente para efetuar a leitura.

O caudal volumétrico dos gases de combustão vai permitir a verificação do balanço mássico e energético do sistema bem como o cálculo da velocidade de entrada dos gases nos ciclones. Velocidades muito elevadas, ou velocidades muito baixas, vão interferir na eficiência de remoção de partículas e promover a ocorrência de problemas operacionais. Velocidades de entrada elevadas promovem problemas de abrasão, perdas de carga elevadas e ressalto das partículas, diminuindo a eficiência do sistema. Velocidade de entrada baixas impossibilitam a formação de um vórtice

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

estável, levando a uma menor separação de partículas devido à baixa força centrífuga.

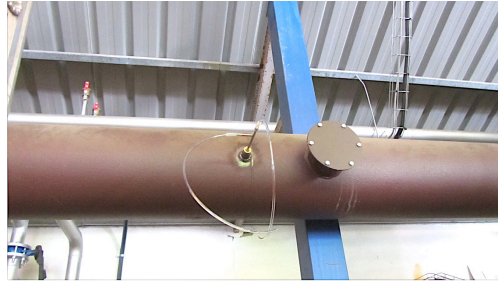


Figura 67 – Medição da velocidade de escoamento dos gases de combustão, aplicação do tubo de Pitot na conduta de ligação da caldeira ao mult ciclone (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).

5.7 Amostragem de cinzas

De forma a melhor caracterizar os vários combustíveis sólidos utilizados no processo de combustão, foram recolhidas várias amostras de cinzas em vários pontos do sistema de combustão. As amostras foram recolhidas junto à porta da caldeira (Figura 68), junto à grelha de introdução de ar primário, sobre as grelhas de introdução de ar primário, no cadinho da fornalha (Figura 70), nos cinzeiros da caldeira (zona de inversão de gases do permutador) (Figura 69) e no balde do multiclone.



Figura 68 – Zona junto à porta caldeira (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).



Figura 69 – Zona de inversão de gases do permutador (cortesia Ventil – Engenharia do Ambiente, Lda.).



Figura 70 – Zona de combustão de biomassa; 1 – Cadinho da fornalha; 2 – zona de introdução de ar primário; 3 – Ponto de amostragem sobre as grelhas de combustão.

Consoante os combustíveis sólidos e os efeitos visíveis que estes demostrem sobre o equipamento, o número de amostras pode aumentar diversificando os pontos de amostragem.

As análises das amostras de cinzas serão realizadas num laboratório acreditado pelo Instituto Português de Acreditação, com metodologias de ensaios analíticos em Combustíveis Sólidos.

6 Resultados

6.1 Caracterização de biomassa

6.1.1 Análise próxima

Na Figura 71 é apresentada a caracterização física, em base seca, em termos de teor de humidade, teor de cinzas, teor de matéria volátil e Carbono fixo. A casca de pinheiro foi a amostra analisada com maior teor de humidade, seguida da amostra de pellets de bagaço de azeitona. Os pellets de madeira correspondem à amostra de biomassa com o menor teor de humidade. Tendo o teor de humidade influência sobre o volume de gases produzidos e sobre as temperaturas adiabáticas, a casca de pinheiro é a biomassa que poderá levar a um maior caudal volumétrico de gases de combustão e a menores temperaturas no interior das câmaras de combustão, tendo como referência um mesmo valor de potência térmica útil.

O teor de cinzas normalmente estabelecido para pellets de biomassa certificados para sistemas de combustão é inferior ou igual a 1,5 %, em base seca (ENplus certificate, 2013). Observou-se que a amostra com maior teor de cinzas diz respeito aos pellets de palha, sendo seguida da amostra de pellets de bagaço de azeitona. A utilização destes materiais pode originar problemas operacionais devido à deposição de cinzas sobre o equipamento (fenómenos de *slagging* e *fouling*), diminuindo o rendimento do sistema de combustão por redução da eficiência de permuta de calor, isto é, resistência à transferência de calor. O elevado teor de cinzas é desaconselhável para sistemas de alimentação por fundo de cadinho, devido ao risco de formação de camadas de cinzas, as quais podem levar a um caudal de ar irregular causando uma combustão incompleta e por sua vez o aumento das emissões (Carroll & Finnan 2012).

Os pellets de madeira apresentam o maior teor de matéria volátil, o que lhes pode conferir um ponto de ignição a baixas temperaturas devido à elevada percentagem de matéria volátil.

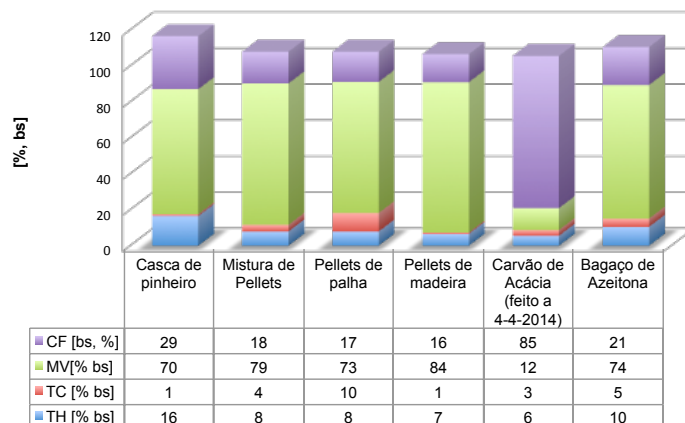


Figura 71 – Análise próxima a diferentes tipos de biomassa.

6.1.1.1 Comparação dos valores obtidos entre as amostras de biomassa vs as amostras de carvão de acácia

Comparando os valores obtidos para a amostra de carvão de acácia com as restantes biomassas, observa-se que o carvão apresenta baixos teores de humidade e baixos teores de matéria volátil que levam a elevados teores de carbono fixo.

6.1.2 Análise elementar

Realizou-se uma estimativa com base em correlações da literatura (Parikh et al. 2007) para a obtenção dos teores de Oxigénio, Hidrogénio e Carbono (5.1.6 Determinação do poder calorífico). Os resultados podem ser observados na Figura 72.

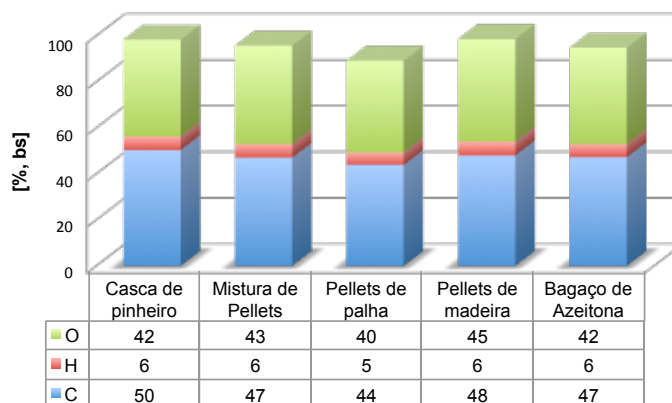


Figura 72 – Estimativa da composição elementar com base nas correlações da literatura (Parikh et al. 2007).

A quantidade de combustível desvolatilizada durante o estágio de pirólise decorrente do processo de combustão aumenta com a razão H/C e diminui com a razão O/C (García et al. 2012).

6.1.3 Poder Calorífico Superior e Inferior

Utilizando os valores obtidos para o Oxigénio, o Hidrogénio e o Carbono e aplicando a correlação de Channiwala & Parikh 2002 (5.1.6 Determinação do poder calorífico) obtêm-se estimativas para o Poder Calorífico Superior e Inferior. Os resultados podem ser observados na Figura 73.

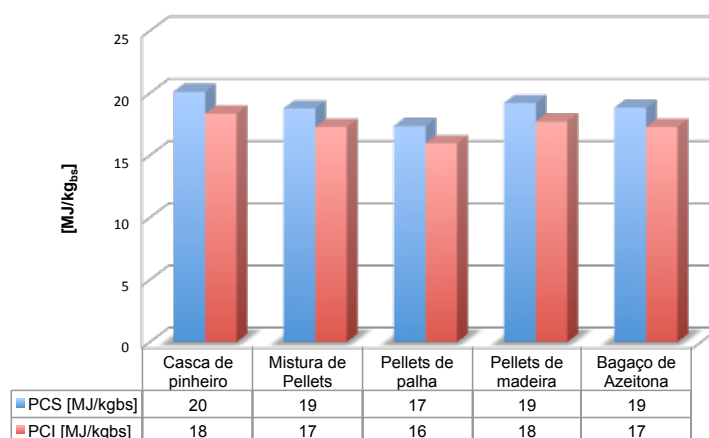


Figura 73 – Estimativa do Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior de diferentes tipos de biomassa obtida com base na correlação de Channiwala & Parikh 2002d.

Os combustíveis com elevados teores de Carbono e Hidrogénio e baixos teores de Oxigénio apresentam um maior Poder Calorífico.

6.2 Aplicação dos vários métodos de monitorização e controlo do sistema de combustão

De forma a melhor compreender o sistema de combustão foram elaborados dois ensaios, nos quais foram aplicados os métodos de monitorização e controlo apresentados nas secções anteriores. Um ensaio em modo manual, onde a alimentação do sistema de combustão foi controlada manualmente através do sistema de controlo da caldeira, ou seja, a introdução de biomassa no interior da fornalha (sistema pára-arranca) foi imposta pelo operador consoante as necessidades do sistema. Outro ensaio em modo automático, onde a alimentação foi

feita de uma forma automática, ou seja, o sistema de controlo da caldeira controla a introdução do material na fornalha tendo por base o oxigénio desejado e o oxigénio mínimo, sendo estes dois parâmetros previamente definidos. Os ensaios experimentais e os dados apresentados a seguir, dizem respeito a Pellets de Madeira, fornecidos pela Enermontijo| Enerpar.

Antes do sistema de combustão ser ativado, foi necessário definir alguns parâmetros, como por exemplo a temperatura desejada da caldeira e o seu diferencial de temperatura, i.e., o sistema vai funcionar até atingir a temperatura desejada e pára, mantendo-se desativado até atingir o diferencial de temperatura estabelecido; ao chegar a essa temperatura o sistema reinicia o processo de combustão. A depressão desejada no interior da fornalha, a percentagem de ar introduzida nas câmaras de combustão (rotação do ventilador de combustão e percentagem dos belimos), Oxigénio desejado e Oxigénio mínimo, rotação do ventilador de extração de gases de combustão e rotação do sem-fim de alimentação, são outros parâmetros que podem ser definidos e controlados pelo operador antes ou durante o ensaio.

6.2.1 Calibração do sem-fim de alimentação

A reta de calibração referente ao sem-fim de alimentação utilizado no caso de estudo (quantidade de combustível introduzido na fornalha em função da frequência de funcionamento do moto-redutor do sistema de alimentação) é representada na Figura 74 (figura do lado direito). A quantidade de combustível introduzida na fornalha aumenta com o aumento da frequência de funcionamento, ou seja, quanto maior for a variação da frequência do moto-redutor do sem-fim, maior será a quantidade de combustível introduzida na fornalha.

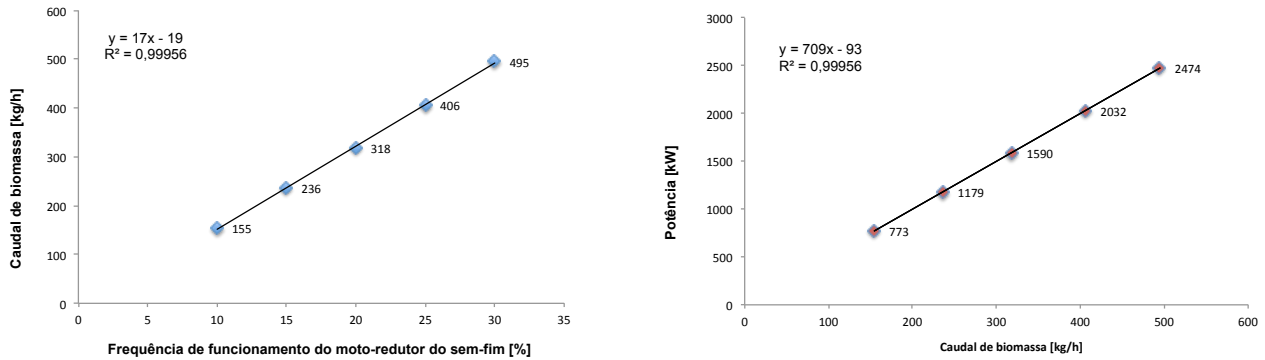


Figura 74 – Reta de calibração do sem-fim de alimentação aplicado ao sistema de combustão em estudo (lado direito) para pellets de madeira. Relação entre o caudal mássico e a potência térmica (lado esquerdo).

Pela análise dos resultados obtidos, a potência térmica do combustível é linearmente proporcional ao caudal de biomassa introduzido na fornalha.

O sem-fim de alimentação do sistema de combustão em estudo, utilizando pellets de madeira com um Poder Calorífico de 18000 kJ.kg^{-1} , a funcionar com uma rotação de 3,6 rpm (correspondente a 30% da frequência de funcionamento do moto-reductor do sem-fim de alimentação), permite a introdução de 495 kg.h^{-1} de combustível na fornalha o que permite ao sistema produzir uma potência térmica na ordem dos $2474 \text{ kW}_{\text{th}}$.

6.2.1 Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim

Na Figura 75 é representado o perfil de alimentação controlado pelo sistema de controlo da caldeira (operação em modo automático) durante um período de tempo selecionado.

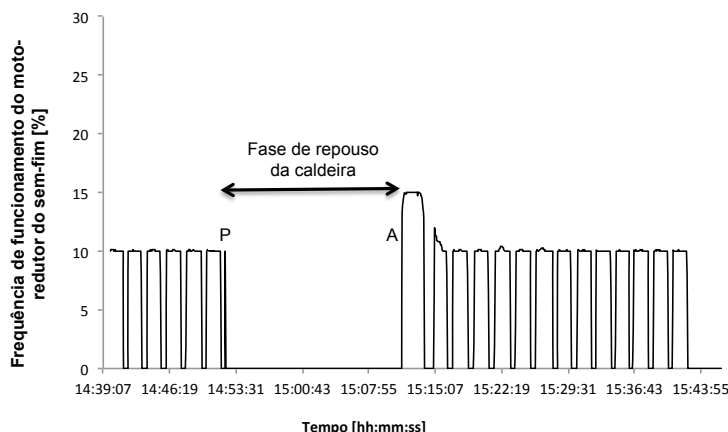


Figura 75 – Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim, para uma operação em modo automático. P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

Na Tabela 1 é apresentada a duração dos tempos de alimentação e repouso realizados pelo sem-fim de alimentação. Durante o período de tempo selecionado, o sem-fim de alimentação teve um tempo de funcionamento equivalente a 31 minutos. Utilizando os coeficientes de correlação da reta de calibração do sem-fim é possível saber o caudal médio de biomassa debitado para o interior da fornalha e obter a quantidade de combustível introduzida durante o período de tempo selecionado.

Tabela 1 – Intervalos de tempo (alimentação e repouso) impostos pelo sistema de controlo da caldeira e quantidade total de material introduzido na fornalha durante o período de alimentação, para uma operação em modo automático.

Tempo de alimentação	Tempo de repouso	m_{combustível}
[min]	[min]	[kg]
31	33	80

Na Figura 76 é representado o perfil de alimentação controlado pelo operador (operação em modo manual) através do sistema de controlo da caldeira durante um período de tempo selecionado.

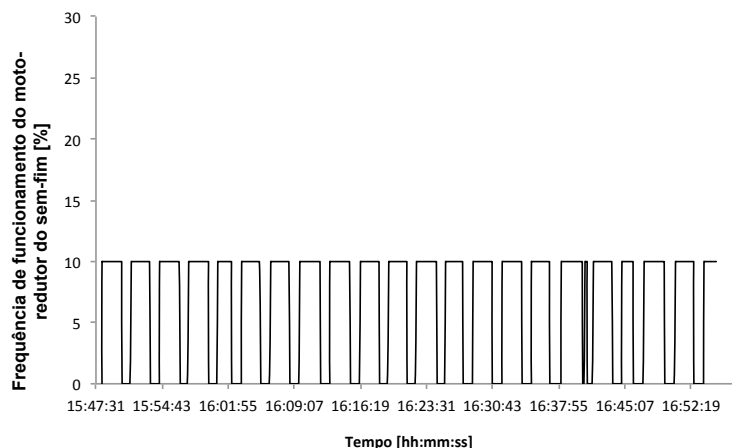


Figura 76 – Perfil de alimentação de biomassa através do sem-fim, para uma operação em modo manual.

Na Tabela 2 é apresentada a duração dos tempos de alimentação e repouso realizados pelo sem-fim de alimentação. Durante o período de tempo selecionado, o sem-fim de alimentação teve um tempo de funcionamento equivalente a 43 minutos. Utilizando os coeficientes de correlação da reta de calibração do sem-fim é possível saber o caudal médio de biomassa debitado para o interior da fornalha e obter a quantidade de combustível introduzida durante o período de tempo selecionado.

Tabela 2 – Intervalos de tempo (alimentação e repouso) impostos pelo operador e quantidade total de material introduzido na fornalha durante o período de alimentação, para uma operação em modo manual.

Tempo de alimentação	Tempo de repouso	$m_{\text{combustível}}$
[min]	[min]	[kg]
43	20	111

6.2.2 Perfil de temperatura registada na fornalha

Na Figura 77 (operação em modo automático (lado direito) e operação em modo manual (lado esquerdo)) são apresentados os perfis de temperatura monitorizados, durante um período de tempo selecionado, no interior da fornalha. Nas figuras estão representados três pontos de amostragem: a sonda 2 e a sonda 3 monitorizam e registam as temperaturas da câmara de combustão primária e a sonda 5 regista as temperaturas da câmara de combustão secundária (4.5.3 Caracterização das condições da fornalha).

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

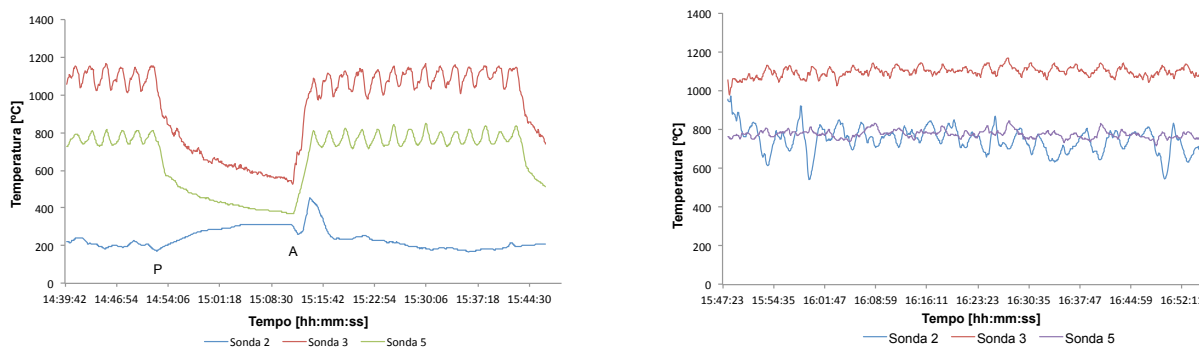


Figura 77 – Perfil de temperatura referente ao interior das câmaras de combustão, obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

No perfil de temperaturas, durante a operação em modo automático, é possível observar o ponto em que a caldeira atinge a temperatura desejada (P) e o ponto em que ela retoma o processo de combustão (A). Durante a operação em modo manual, o operador faz com que a temperatura da água flutue entre a temperatura desejada e o diferencial de temperatura, nunca atingindo a temperatura desejada que provocaria o desligar do sistema.

O controlo das temperaturas permite um melhor controlo da emissão de gases inqueimados para a atmosfera.

A sonda 2 apresenta um perfil mais irregular, tanto na operação em modo automático como na operação em modo manual, essa irregularidade deve-se ao facto da sonda ficar coberta pelo leito de combustível durante os períodos de alimentação

6.2.3 Perfil de temperatura registada na zona de permuta de calor e saída da caldeira

Na Figura 78 (operação em modo automático (lado direito) e operação em modo manual (lado esquerdo)) são apresentados os perfis de temperatura monitorizados durante um período de tempo seleccionado. Nas figuras estão representados quatro pontos de amostragem: sonda 7 refere-se à entrada dos gases de combustão no primeiro conjunto de tubulares; a sonda 8 diz respeito à entrada do gás no segundo conjunto de tubulares; a sonda 9 monitoriza a temperatura à saída do segundo

conjunto de tubulares e a sonda 10 localiza-se à saída da caldeira para o multiclone (4.5.3 Caracterização das condições da fornalha).

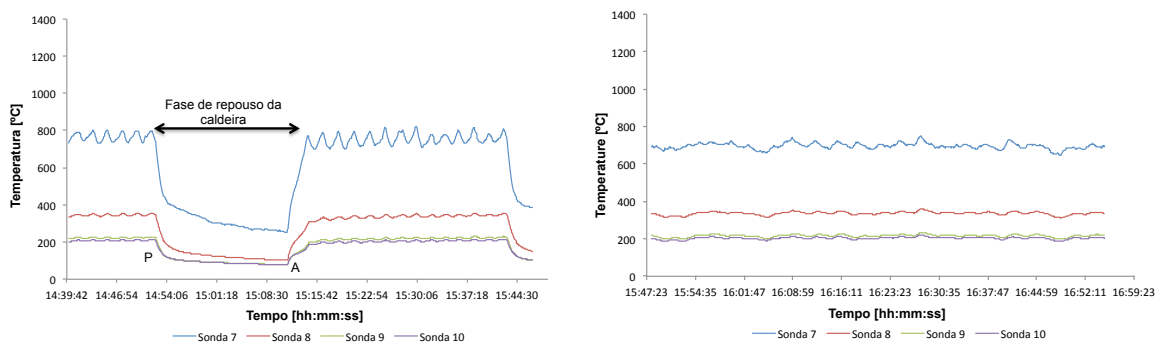


Figura 78 - Perfil de temperaturas referente à entrada dos gases de combustão no primeiro conjunto de tubulares (sonda 7), no segundo conjunto de tubulares (sonda 8), à saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9) e saída da caldeira para o multiclone (sonda 10), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

Pela observação das figuras é possível perceber se a permuta de calor está a ser feita e qual a quantidade de energia transmitida para o fluido de aquecimento por cada conjunto de tubos de fumos atravessados. A Tabela 3 e Tabela 4 mostram a permuta de calor ao longo do percurso dos gases de combustão.

Tabela 3 – Temperatura média registada pelos termopares das quatro sondas, para a operação em modo automático.

Sonda 7 [°C]	Sonda 8 [°C]	Sonda 9 [°C]	Sonda 10 [°C]
609	269	177	167

Tabela 4 – Temperatura média registada pelos termopares das quatro sondas, para a operação em modo manual.

Sonda 7 [°C]	Sonda 8 [°C]	Sonda 9 [°C]	Sonda 10 [°C]
696	336	216	204

6.2.4 Caracterização do gás de combustão quanto à emissão de CO, O₂, NO e CO₂

O CO é um indicador de eficiência de conversão do combustível, e portanto da qualidade do processo de combustão. Quando existe um baixo excesso de Oxigénio, a razão de mistura pode ser inadequada promovendo o aumento das emissões de CO. Quando existe um elevado excesso de Oxigénio, a temperatura do gás diminui promovendo um aumento da emissão de CO (Roy et al. 2013). Na Figura 79 estão representados os perfis de CO e O₂ monitorizados, durante um período de tempo selecionado, e recolhidos pela sonda 9, à saída do segundo conjunto de tubulares. O perfil de CO e O₂, obtido em modo automático, apresenta valores médios de emissão de 716 ppmv e 9 %vol, respetivamente. A concentração de CO em condições normalizadas para um teor de oxigénio de referência de 11% (Portaria 677/2009) é de 1472 mg·m⁻³. O funcionamento em contínuo (operação em modo manual) do sistema (sem período de paragem e arranque), apresenta um perfil de CO com um valor médio de emissão de 57ppmv e um perfil de O₂ com um valor médio de emissão de 10 %vol. A concentração de CO em condições normalizadas para um teor de oxigénio de referência de 11% (Portaria 677/2009) é de 64 mg·m⁻³.

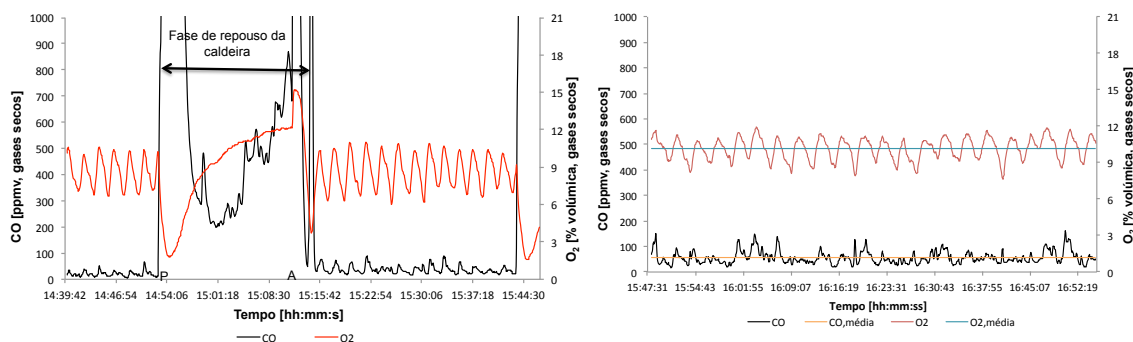


Figura 79 – Perfil de CO vs perfil O₂ do gás de combustão, em base seca, extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

Na Figura 80 é apresentada a relação que a temperatura e a concentração do CO nos gases de exaustão. O favorecimento de uma combustão completa com uma elevada eficiência, através de um fornecimento adequado de ar secundário e zonas

de temperatura elevada, asseguram uma baixa emissão de poluentes, como o CO (Nussbaumer 2003). Uma temperatura constante, como a desenvolvida na operação em modo manual, permite obter uma combustão completa do gás sem perturbações ou oscilações bruscas na condição de operação do sistema (i.e., interrupção da alimentação), diminuindo a emissão de gases inqueimados como o CO.

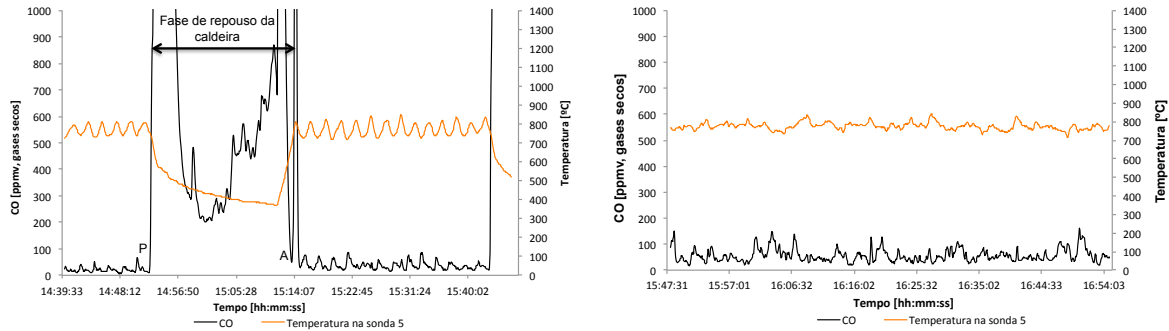


Figura 80 – Perfil de CO vs temperatura no interior da câmara de combustão secundária (sonda 5), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

Nos processos de combustão, 95% do NO_x apresenta-se na forma de Óxido de Azoto (NO) e os restantes 5 % na forma de Dióxido de Azoto (NO_2) (Miller & Tillman 2008). O Dióxido de Carbono, componente em maior quantidade num processo de combustão de biomassa, é um indicativo da eficiência de combustão.

Os perfis de NO e CO_2 monitorizados, durante um período de tempo selecionado, e recolhidos pela sonda 9 à saída do segundo conjunto de tubulares, são apresentados na Figura 81. O perfil de NO e CO_2 obtido na operação em modo automático apresenta valores médios de emissão de 106 ppmv e 12 %vol, respetivamente. A concentração de NO em condições normalizadas para um teor de oxigénio de referência de 11% (Portaria 677/2009) é de $233 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Na operação em modo manual, o NO tem um valor médio de 113 ppmv e o CO_2 um valor médio de 10 %vol. A concentração de NO em condições normalizadas para um teor de oxigénio de referência de 11% (Portaria 677/2009) é de $136 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

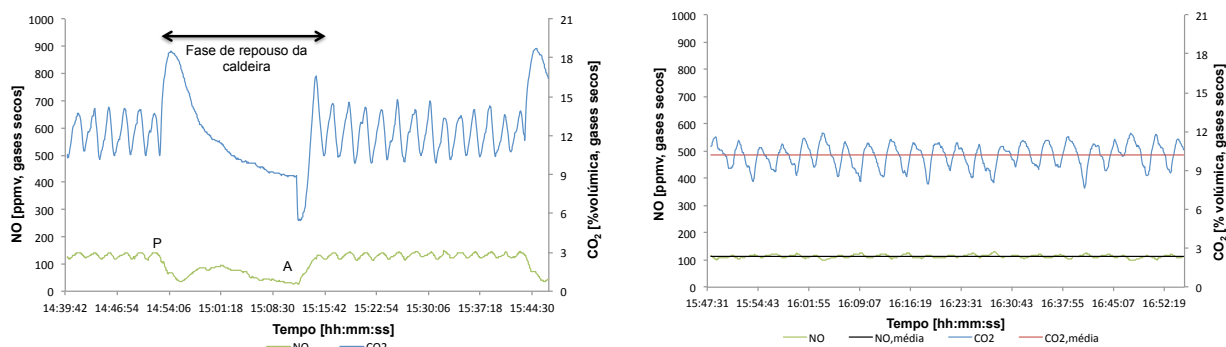


Figura 81 – Perfil de NO vs perfil CO₂ do gás de combustão, em base seca, extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

A Figura 82 mostra a influência da temperatura na emissão do NO e do CO₂ durante um período de tempo selecionado. Diferentes estagiamentos de ar permitem limitar a disponibilidade de O₂ e reduzir os picos de temperatura na chama de forma a reduzir a formação de NO_x, ao mesmo tempo que permite a criação de uma sequência de ambientes ricos e pobres em combustíveis, favorecendo a conversão do *Fuel-N* para N₂ (Yin et al. 2008). O perfil de CO₂, tanto na operação em modo manual como na operação em modo automático, mostra que o aumento ou diminuição do CO₂ é inversamente proporcional à temperatura registada naquele momento pela sonda 5. O perfil de NO, tanto na operação em modo manual como em na operação em modo automático, mostra que o aumento ou a diminuição do NO é diretamente proporcional ao aumento ou diminuição temperatura registada naquele momento pela sonda 5.

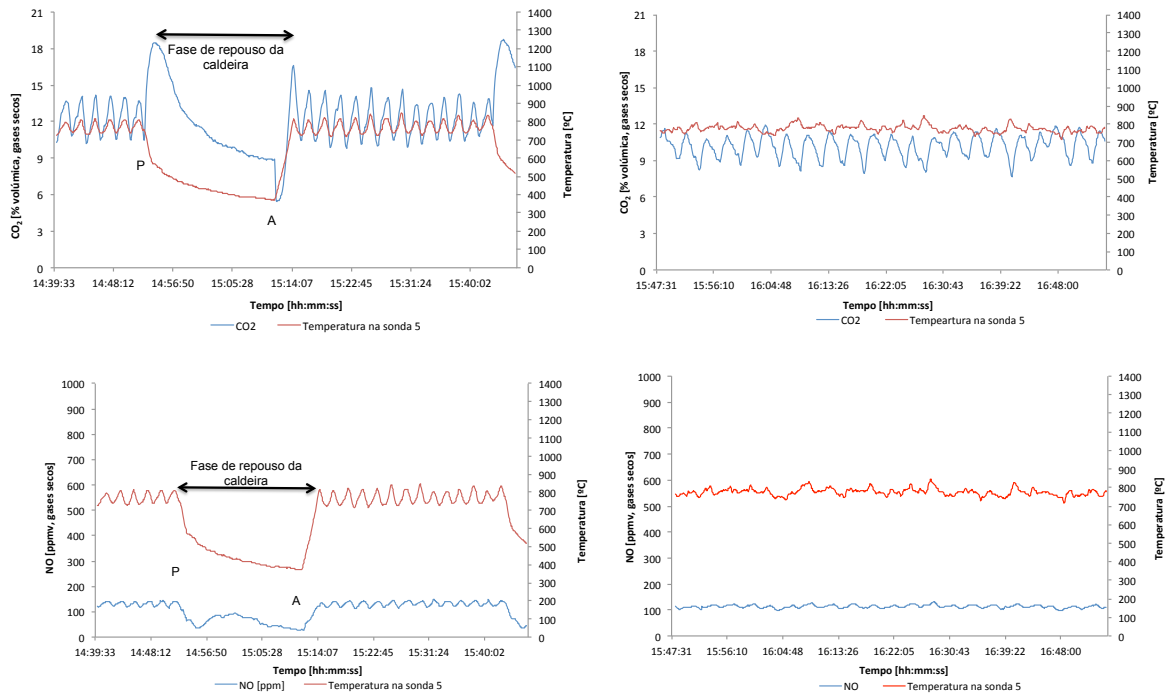


Figura 82 – Perfil de CO₂ e NO (extraído na saída do segundo conjunto de tubulares (sonda 9)) vs temperatura no interior da câmara de combustão (sonda 5), obtido para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

6.2.5 Perfil de pressão diferencial medida em contínuo no centro da fornalha

A pressão (pressão negativa) no interior da fornalha do sistema de combustão é medida em contínuo e controlada pelo sistema de controlo da caldeira. A depressão desejada no interior da fornalha é definida pelo operador (1,50 mbar para este tipo de combustível (pellets de madeira)), sendo depois monitorizada e controlada pelo sistema de controlo da caldeira. O seu controlo vai ser feito pela regulação automática do variador de frequência do ventilador de extração de gases de combustão, aumentando ou diminuindo consoante as necessidades do sistema. O perfil de pressão diferencial monitorizado, durante um período de tempo seleccionado, é apresentado na Figura 83.

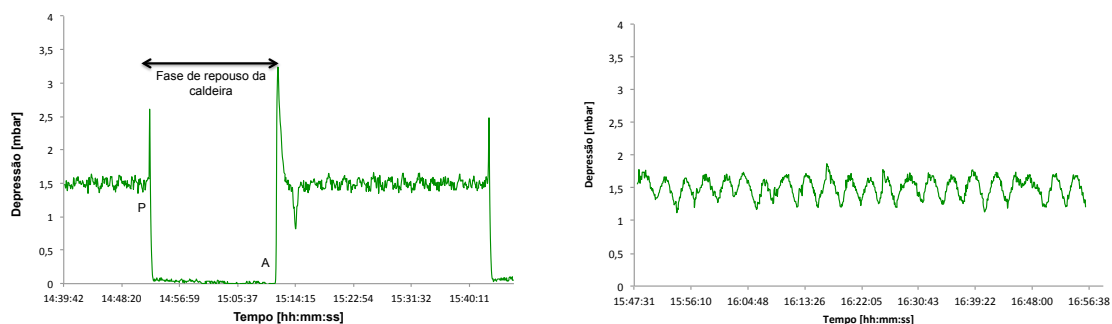


Figura 83 – Perfil de pressão diferencial, medida em contínuo no centro da fornalha e com recurso a um transmissor de pressão *Kimo*, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

6.2.6 Perfil de Oxigénio, em base tal e qual, medido em contínuo antes do ventilador de extração de gases de combustão

A alimentação do sistema de combustão, como já foi referido, é condicionada pelos valores de Oxigénio. A monitorização do Oxigénio é feita com uma sonda do sistema de controlo da caldeira instalada antes do ventilador de extração de gases de combustão. Os valores de Oxigénio registados pelo sistema de aquisição de dados são apresentados em base tal e qual. O perfil de Oxigénio em base tal e qual, durante um período de tempo seleccionado, é apresentado na Figura 84.

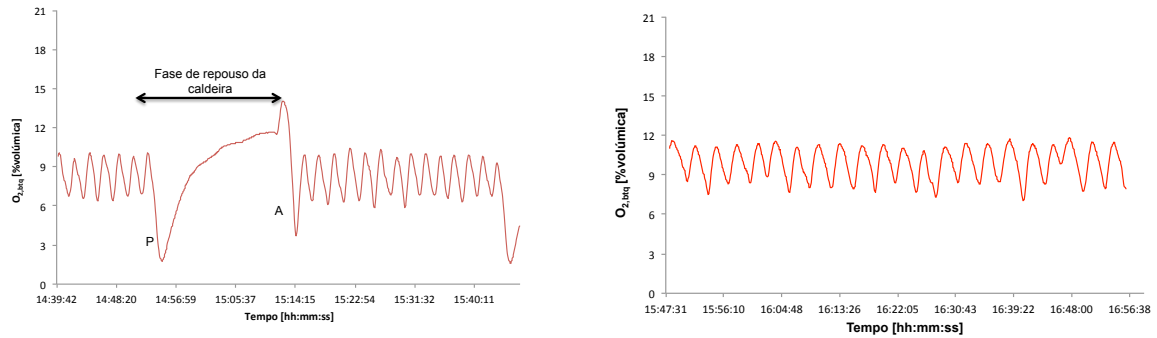


Figura 84 – Perfil de oxigénio, em base tal e qual, medido em contínuo antes do ventilador de extração de gases de combustão, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

6.2.7 Perfil de temperatura dos gases de exaustão, medido em contínuo à saída da caldeira

O sistema de controlo da caldeira permite o controlo em contínuo da temperatura dos gases de exaustão. O perfil de temperaturas dos gases de exaustão, durante um período de tempo selecionado, é apresentado na Figura 85.

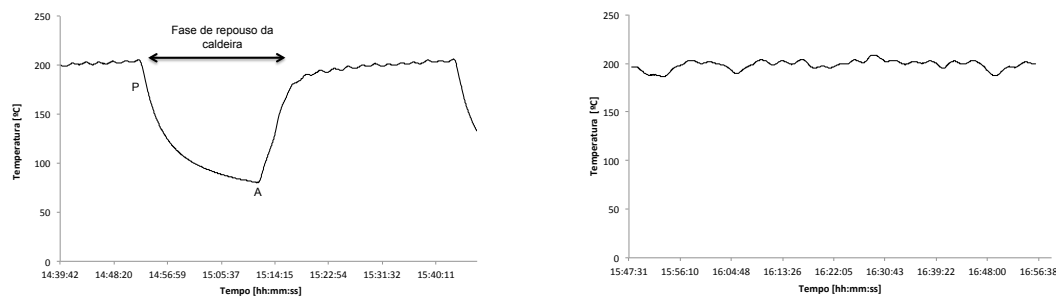


Figura 85 – Perfil de temperatura dos gases de exaustão, medido em contínuo à saída da caldeira, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema de controlo reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

A sonda de temperatura controlada pelo sistema de controlo da caldeira está situada junto da sonda 10. Contudo, a comparação dos valores obtidos para ambas

mostram uma diferença, esta pode dever-se a diferente sensibilidade dos instrumentos de medição.

6.2.8 Perfil de potência térmica do sistema de combustão

O perfil de potência térmica do sistema, durante um período de tempo selecionado, é apresentado na Figura 86. A dissipação da energia, obtida pela combustão de biomassa, foi feita com recurso a duas bombas circuladoras. A bomba 1 permite que a água de aquecimento circule pela unidade fabril, possibilitando a dissipação de energia térmica através de aerotermos instalados ao longo do pavilhão. A bomba 2 permite a recirculação da água de aquecimento até ao dissipador de energia, que dissipa a energia para a atmosfera. A Tabela 5 mostra o caudal de água que passa por cada bomba circuladora.

Tabela 5 – Caudal de água que atravessa a bomba 1 e bomba 2 (para uma pressão máxima de 3 bar).

Caudal da Bomba 1	Caudal da Bomba 2
[m ³ .h ⁻¹]	[m ³ .h ⁻¹]
40	20

O funcionamento durante a operação em modo automático do sistema de combustão, funcionou apenas com a dissipação de energia para atmosfera (bomba 2). Contudo, a bomba 1 esteve ligada, o que levou à recirculação de água por toda a unidade fabril, existindo alguma dissipação de energia através da tubagem. O funcionamento durante a operação em modo manual do sistema de combustão funcionou com a dissipação de calor para o interior da unidade fabril (bomba 1), existindo períodos de tempo em que a dissipação para o exterior foi ativada, de modo a conseguir evitar a paragem da caldeira por esta atingir a temperatura desejada.

A potencia térmica do sistema de combustão pode ser calculada pela Eq.(26)

$$Potência = Q \times \rho \times c p_{\text{água}} \times \Delta T \text{ [kJ} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Eq.(25)}$$

Onde,

Q – caudal de água de aquecimento registado pelo caudalímetro, m³.h⁻¹;

ρ – massa volúmica da água, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

$c_{p\text{água}}$ – calor específico a pressão constante, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

ΔT – diferencial de temperatura, entre a água de ida e de retorno, $^{\circ}\text{C}$.

Os picos de potência observados na Figura 86 respeitantes à operação em modo manual devem ser negligenciados, pois estes devem-se à entrada de água fria (aumentando portanto o ΔT de uma forma que não corresponde a um aumento da potência térmica real) no sistema quando a bomba 2 é ativada. A seleção de períodos de tempo representativos do perfil de potência térmica (sem picos de potência) monitorizado em contínuo (operação em modo manual) do sistema (sem período de paragem e arranque), apresenta um valor médio de potência térmica de $312 \text{ kW}_{\text{th}}$. A seleção de períodos de tempo representativos do perfil de potência térmica (sem a fase de repouso da caldeira) monitorizado durante a operação em modo automático (período com paragem e arranque), apresenta um valor médio de potência térmica de $111 \text{ kW}_{\text{th}}$.

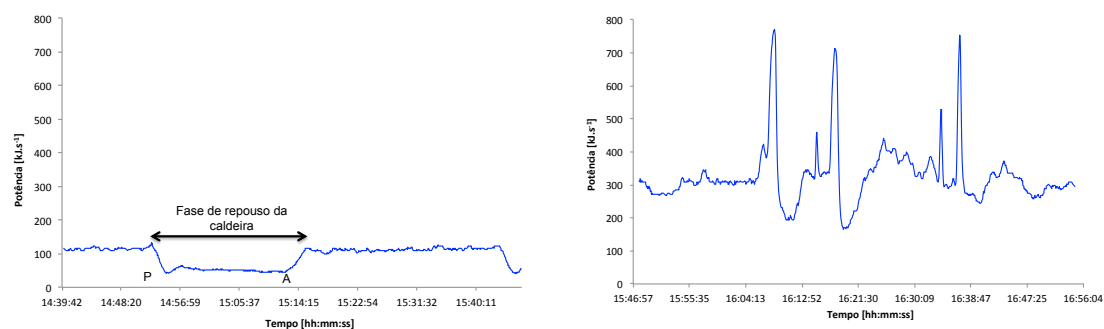


Figura 86 – Perfil de potência térmica obtido com a dissipação de energia para o exterior da unidade fabril, para a operação em modo automático (lado esquerdo) e para a operação em modo manual (lado direito). P – Paragem da caldeira ao atingir a temperatura desejada; A – O sistema reinicia o processo de combustão após atingir o diferencial de temperatura estabelecido.

6.3 Conclusão

O objetivo principal do presente relatório de estágio “Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa” foi alcançado. A monitorização das condições de operação foi possível através da análise dos resultados obtidos pela aplicação de uma série de metodologias de medição e monitorização ao sistema de

combustão – Caldeira a biomassa, modelo CVT, com uma potência nominal de 581 kW_{th}. As principais conclusões obtidas foram:

- O caudal mássico de combustível sólido introduzido na fornalha com recurso a um sem-fim de alimentação é linearmente proporcional à frequência de funcionamento do moto-reductor do sem-fim, quanto maior for a frequência de funcionamento maior será o caudal de biomassa introduzido.
- O sem-fim de alimentação permite obter potências térmicas muito superiores à potência nominal da caldeira – 581kW_{th}.
- Temperaturas constantes no interior da fornalha permitem um melhor controlo das emissões de poluentes.
- O perfil de CO e O₂ obtido durante a operação em modo automático apresenta valores médios de emissão de 716 ppmv e 9 %vol, respetivamente. Corrigindo o valor de CO para um teor de O₂ de referência de 11%, obtêm-se o valor de 1472 mg·m⁻³.
- O perfil de CO e O₂ obtido durante a operação em modo manual apresenta valores médios de emissão de 57 ppmv e 10 %vol, respetivamente. Corrigindo o valor de CO para um teor de O₂ de referência de 11%, obtêm-se o valor de 64 mg·m⁻³.
- O perfil de NO e CO₂ obtido durante a operação em modo automático apresenta valores médios de emissão de 106 ppmv e 12 %vol, respetivamente. Corrigindo o valor de NO para um teor de O₂ de referência de 11%, obtêm-se o valor de 233 mg·m⁻³.
- O perfil de NO e CO₂ obtido durante a operação em modo manual apresenta valores médios de emissão de 113 ppmv e 10 %vol, respetivamente. Corrigindo o valor de NO para um teor de O₂ de referência de 11%, obtêm-se o valor de 136 mg·m⁻³.

A monitorização detalhada das condições de operação permite um melhor controlo de todos os parâmetros do sistema de combustão. Com os resultados obtidos neste trabalho, prova-se que seja possível uma otimização e controlo do processo, assim como o desenvolvimento de métodos de funcionamento que permitam uma melhor eficiência térmica e uma redução da emissão de poluentes inqueimados.

O estudo realizado permite concluir que é possível melhorar o desempenho do sistema combustão pelo desenvolvimento e implementação de um algoritmo de

controlo e operação da fornalha que permita um doseamento mais adequado dos caudais de combustível e ar de combustão.

7 Trabalhos desenvolvidos para outras tecnologias Ventil

7.1 Caracterização de depósitos na superfície das paredes do pirolisador

Os sistemas de combustão VENTIL mostram-se adequados e adaptados para uma variada gama de biomassa, sendo que a sua experiência se reflete no funcionamento, sem problemas técnicos relevantes, de centenas de instalações completas. Os reatores de pirólise, em estudo, são construídos em aço P265GH, aço com uma vasta aplicação na construção de equipamentos de transferência de calor e em caldeiras. A composição elementar do aço usado na construção dos pirolisadores é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição elementar do aço P265GH usado para construção dos reatores.

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N	V	Mo	Ti	As	Nb	Cr+Cu+Mo+Ni
	x100		x1000			x100					x100				x100
16	88	21	12	9	5	1,9	2,4	28	4,3	2	2,3	1,2	2	0,5	9,5

Danos estruturais devido à corrosão do aço do reator e outros danos nos equipamentos podem dever-se a elementos presentes na biomassa utilizada. Componentes elementares que em certas condições de temperatura e pressão sofrem rearranjos químicos e reagem com os elementos constituintes do aço utilizado na construção dos equipamentos.

7.2 Características do combustível utilizado no sistema em estudo

A alimentação do pirolisador vai ser feita recorrendo a pellets de bagaço de azeitona. A sua caracterização física, em termos de teor humidade, teor de cinzas, teor de matéria volátil, Carbono fixo e Poder Calorífico Superior (PCS), são apresentados na Tabela 7. O teor de cinza apresenta um valor superior ao dos pellets de madeira, e superior ao normalmente estabelecido para pellets de

biomassa certificados para sistemas de combustão (cinzas $\leq 1,5$ %,base seca (ENplus certificate, 2013)), o que se pode vir a traduzir em problemas operacionais de *slagging* e *fouling*, nas fornalhas e respectivos equipamentos de transferência de calor, diminuição do rendimento da fornalha e caldeira, por exemplo, em resultado do aumento da resistência à transferência de calor devido à formação de depósitos nas superfícies expostas aos gases de combustão, o que implica uma necessidade adicional de manutenção do equipamento.

Tabela 7: Caracterização física e obtenção do Poder Calorífico Superior dos pellets de bagaço de azeitona.

Teor de humidade	Teor de cinzas	Matéria volátil	Carbono fixo	PCS _{estimado}
[%massa, base húmida]	[%massa, base seca]	[%massa, base seca]	[%massa, base seca]	[MJ/kg base seca]
10,49	4,54	74,32	21,14	19,03

Foi calculada uma estimativa do Poder Calorífico Superior do combustível, de acordo com a correlação de Parikh *et al.* 2005, e em que é considerado o valor da matéria volátil, o teor de cinzas e o carbono fixo.

$$PCS = 0,3536CF + 0,1559MV - 0,0078TC \text{ [MJ.kg}^{-1}\text{]} \quad \text{Eq.(26)}$$

MV - Matéria Volátil (% em massa, bs);

CF – Carbono Fixo (% em massa, bs);

TC – Teor de Cinzas (% em massa, bs);

bs – base seca.

Como nesta fase não se dispõe de informação sobre a composição elementar do combustível, para poder determinar o seu Poder Calorífico Inferior (PCI), realizou-se uma estimativa com base em correlações da literatura (Parikh *et al.* 2007), de acordo com as equações Eq.(27), Eq.(28) e Eq.(29) para o C, H e O.

$$C = 0,637CF + 0,455MV \text{ [%}, bs\text{]} \quad \text{Eq.(27)}$$

$$H = 0,052CF + 0,476MV \text{ [%}, bs\text{]} \quad \text{Eq.(28)}$$

$$O = 0,304CF + 0,476MV \text{ [%}, bs\text{]} \quad \text{Eq.(29)}$$

Estas correlações só podem ser usadas caso o valor da matéria volátil se encontre entre 57,2% e 90,6% e o valor de carbono fixo entre 4,7% e 38,4%. Os valores obtidos para os componentes elementares devem situar-se entre: $36,2 \% \leq C \leq 53,1 \%$, $4,32 \% \leq H \leq 8,3\%$ e $31,37 \leq O \leq 49,5 \%$ (Parikh et al. 2007). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Estimativa da composição elementar, em termos de CHO de pellets de bagaço de azeitona com base nas Eq.(27) a Eq.(29) (Parikh et al. 2007).

C [%, bs]	H [%, bs]	O [%,bs]
47,3	5,7	41,8

Dados recolhidos na literatura (Tabela 9), mostram que a estimativa da composição elementar dos pellets de bagaço de azeitona utilizado na reação de pirólise, apresenta valores elevados de Carbono e Hidrogénio e valores baixos de Oxigénio, resultados concordantes com os apresentados na literatura (Şensöz et al. 2006).

Tabela 9: Composição elementar, em termos de CHO dos pellets de bagaço de azeitona (Şensöz et al. 2006)

C [%, bs]	H [%, bs]	O [%, bs]	N [%, bs]
53,4	7,5	37,4	1,7

É possível uma nova estimativa do Poder Calorífico Superior do combustível (Eq.(30)), de acordo com a correlação de Channiwala & Parikh 2002, e em que é considerada a composição elementar estimada.

$$PCS = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211.TC [MJ.kg^{-1}] \quad \text{Eq.(30)}$$

C – Carbono;

H – Hidrogénio;

S – Enxofre;

O – Oxigénio;

N – Azoto;

Se compararmos o valor de PCS estimado com base na composição elementar com valores determinados para pellets de bagaço de azeitona nalguns trabalhos da literatura (Şensöz et al. 2006), verifica-se que está numa gama aproximada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 : Comparação entre o valor do Poder Calorífico teórico e estimado.

PCS _{teórico} [MJ/kg _{bs}] (Şensöz et al. 2006)	PCS _{estimado} [MJ/kg _{bs}]
20,00	18,81

Relativamente ao PCI (Eq.(31)), a sua estimativa é obtida recorrendo ao uso da correlação apresentada em Tarelho 2013, e em que é considerada a fração mássica de Hidrogénio no combustível em base seca, a razão mássica de humidade no combustível, em base seca, e a entalpia de vaporização da água à temperatura de referência especificada. O valor estimado para o Poder Calorífico Inferior foi de 17,56 MJ.kg⁻¹.

$$PCS = PCI - h_{fg,T} \left(W_{wR} + W_{HR} \cdot \frac{18}{2} \right) [MJ \cdot kg^{-1}] \quad \text{Eq.(31)}$$

$h_{fg,T}$ - entalpia de vaporização da água à temperatura de referência especificada, MJ.kg⁻¹;

W_{wR} - razão mássica de humidade no combustível, em base seca;

W_{HR} - Fração mássica de hidrogénio no combustível em base seca;

7.3 Caracterização de amostras de material depositado nas superfícies expostas aos gases de pirólise e combustão, utilizando Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM - EDS)

As amostras recolhidas no reator de pirólise foram analisadas num microscópio electrónico de varrimento (SEM - *Scanning Electron Microscopy*) do Laboratório de Microscopia Electrónica do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro. A identificação dos elementos químicos presentes em pontos na superfície da amostra é obtida através de um espectrómetro dispersivo de energias (EDS). A análise por SEM, técnica analítica aplicada em análises de

microestruturas de cinzas e depósitos (Shao et al. 2012), permite obter informação sobre os tamanhos, a forma e texturas dos constituintes que estão presentes num determinado local da amostra.

7.3.1 Amostra 1

Amostra recolhida no ventilador do sistema de pirólise, com alimentação a pellets de bagaço de azeitona. Na Figura 87 é apresentado o aspecto macroscópico do material recolhido no ventilador do sistema de pirólise.



Figura 87 – Amostra recolhida no ventilador de um sistema de pirólise, com alimentação a pellets de bagaço de azeitona.

Na Figura 88, é apresentada a morfologia típica da superfície da Amostra 1, na qual é possível perceber a existência de diferentes texturas.

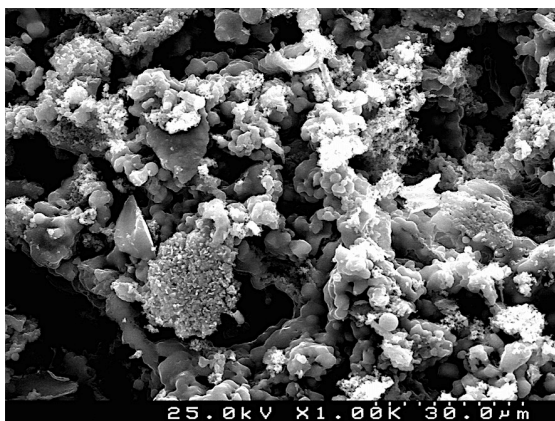


Figura 88 – Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 1.

A identificação de elementos predominantes num ponto da amostra foi realizada por análise EDS, e o resultado é apresentado na Figura 89. A Amostra 1 apresenta elementos característicos da biomassa (i.e. Na, Cl, K, Ca, S) e Ferro, sendo que este último pode ser um elemento proveniente da biomassa ou consequência da

degradação do material das paredes do reator, dos permutadores de calor ou outros elementos do sistema de pirólise, ou seja, a degradação do metal leva a que elementos deste tipo sejam arrastados pela corrente gasosa até ao ventilador; o Ferro pode também dever-se à degradação do ventilador por reação química com os elementos provenientes da biomassa. No ponto analisado, o Cloro e o Potássio são os elementos presentes em maior concentração, 18,81 e 18,26 (% atómica) respetivamente (Tabela 11).

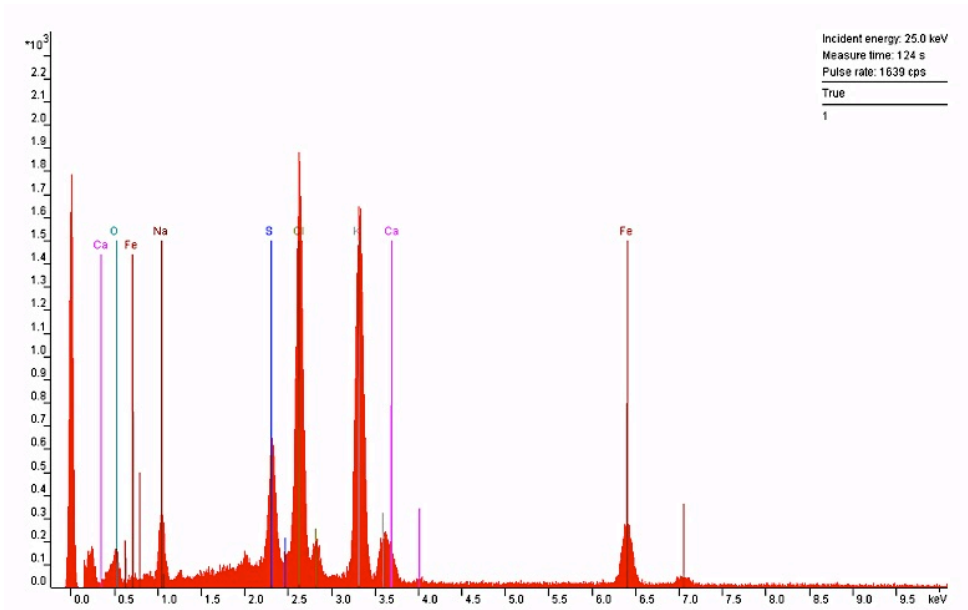


Figura 89 – Espectros EDS obtidos num ponto da superfície da Amostra 1.

Tabela 11 – Principais elementos químicos identificados num ponto da superfície da Amostra 1.

Elementos	C(atom) [%]
O	45,28
Fe	4,45
Na	5,19
S	6,35
Cl	18,81
K	18,26
Ca	1,65

7.3.2 Amostra 2

Na Figura 90 é apresentado o aspecto macroscópico de amostras que se desprendem das paredes laterais exteriores da parte central inferior do pirolisador.



Figura 90 – Amostra recolhida nas paredes exteriores, localização na parte central inferior, de um pirolisador.

A morfologia da superfície destas amostras é apresentada na Figura 91. Ao mesmo tempo, o principal elemento químico detectado num ponto da superfície é o Ferro, não tendo sido observados nessa localização elementos químicos normalmente associados à fracção inorgânica da biomassa (Figura 92). Contudo, salienta-se a necessidade de uma análise mais detalhada destas amostras utilizando mais pontos de análise. Esta necessidade justifica-se em resultado de não ser compreensível a inexistência de elementos químicos típicos da biomassa nestas superfícies, uma vez que elas estão em contacto directo com os gases da câmara de combustão e gases de pirólise.



Figura 91 – Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 2.

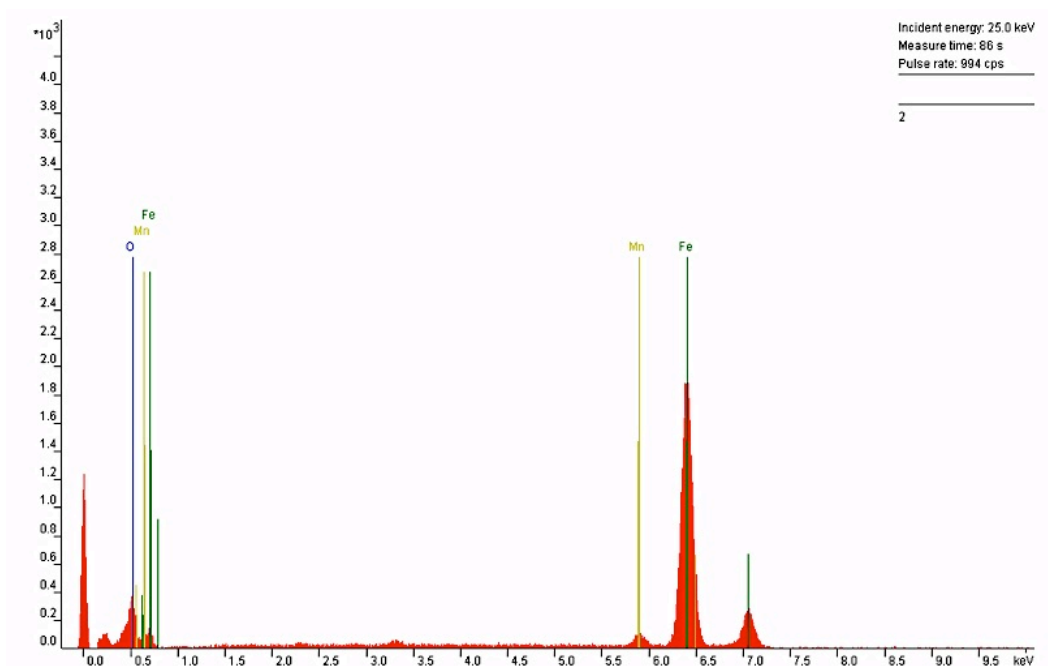


Figura 92 – Espectro EDS obtido num ponto na superfície da Amostra 2.

Tabela 12 – Principais elementos químicos detectados num ponto da superfície da Amostra 2.

Elementos	C(atom)
O	48,61
Fe	49,47
Mn	1,91

7.3.3 Amostra 3

Na Figura 93 é apresentado o aspecto macroscópico de amostras que se desprendem das paredes exteriores da base do pirolisador e próximo da zona de chama proveniente da combustão da biomassa e gases de pirólise.



Figura 93 – Amostra recolhida nas paredes exteriores, localização na parte inferior, de um pirolisador

A morfologia observada na superfície da Amostra é apresentada na Figura 94. O espectro EDS dum ponto localizado na superfície desta amostra revela a existência de diversos elementos (Figura 95), alguns dos quais característicos da biomassa e outros típicos da composição do aço dos reatores Tabela 6. Os elementos encontrados em mais abundância incluem o Ferro (17,56 % atómica), o Sódio (33,16 % atómica) e o Potássio (8,00 % atómica). Uma vez que a composição elementar do aço constituinte das paredes do reator não apresenta Sódio e Potássio, os valores elevados de Na e K observados estarão certamente associados à combustão da biomassa.

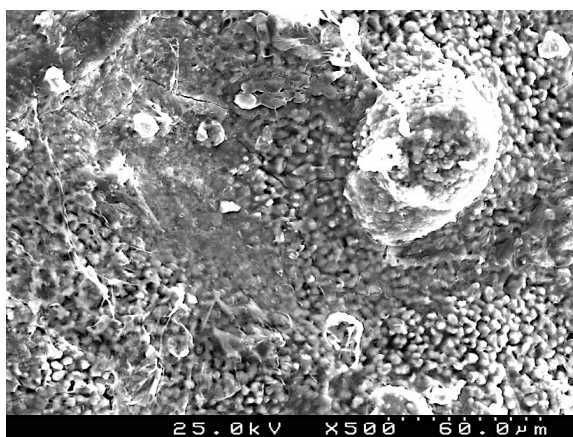


Figura 94 - Micrografia obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM) numa região da superfície da Amostra 3.

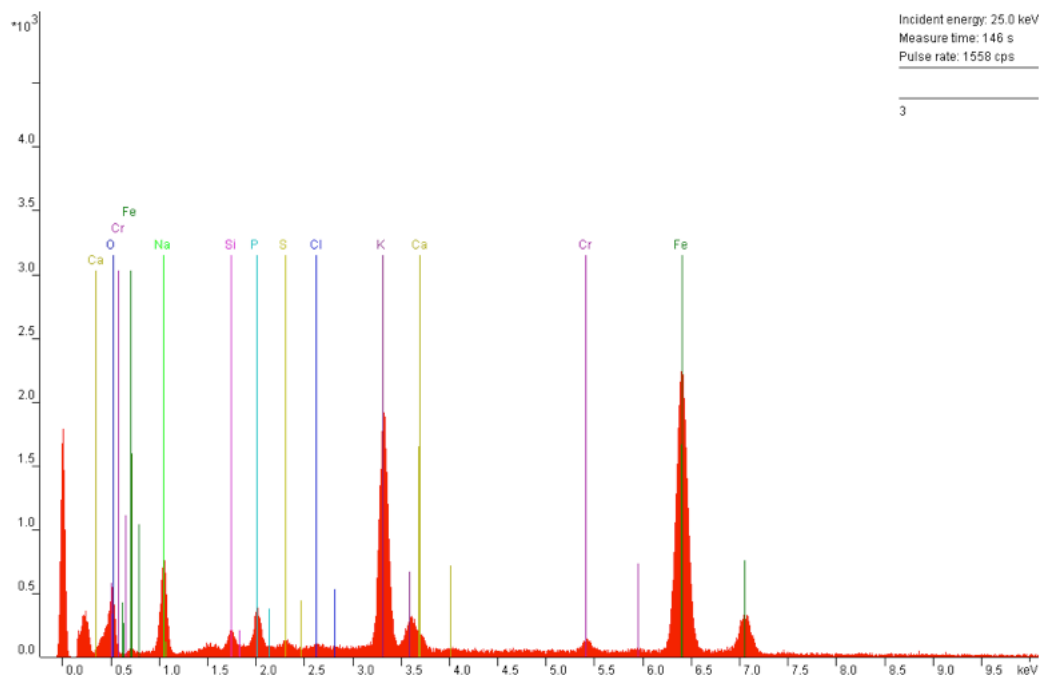


Figura 95 – Espectros EDS obtidos num ponto na superfície da Amostra 3.

Tabela 13 - Principais elementos químicos observados num ponto na superfície da Amostra 3.

Elementos	C(atom)
O	37,47
Fe	17,56
Na	33,16
Si	0,99
P	1,6
S	0,19
Cl	0,05
K	8,00
Ca	0,57
Cr	0,41

7.4 Discussão

O Sódio e o Potássio estão normalmente associados à formação de depósitos nos sistemas de combustão de biomassa (Nutralapati et al. 2007). O Na e o K reagem com o Cl, S e Si durante o processo de combustão. O K pode reagir com o Cl ou o S, originando Cloretos e Sulfatos de Potássio, que são compostos susceptíveis a deposição nas superfícies internas dos reatores, das condutas de gases e nas zonas onde ocorrem trocas de calor. O K pode ainda reagir com o Si, formando Silicatos de Potássio os quais tem um ponto de fusão a temperaturas baixas. O Cl é um elemento químico que volatiliza com facilidade às condições de temperatura e pressão nos reatores de combustão, fenómeno este associado também ao transporte do K, originando a formação de KCl nos depósitos (Teixeira 2012).

Tem sido referido (Shao et al. 2012) que um indicador da tendência de deposição e corrosão das cinzas ricas em Cloro é a razão atómica entre o Enxofre e o Cloro no combustível. Se a razão S/Cl do combustível for inferior a 2, existe um elevado risco de corrosão. Se a razão S/Cl for igual ou superior a 4, o combustível pode ser considerado como não corrosivo. Para valores entre as duas situações referidas o combustível é considerado corrosivo. De acordo com alguns estudos (Sandberg 2011), a formação de Silicatos Alcalinos pode ser prevista pela razão atómica $S/(Na+K)$, sendo que a formação destes compostos parece ser promovida caso a razão apresente valores inferiores a 0,5 %.

Um elevado teor de Potássio e um baixo teor de Cálcio na biomassa pode promover um decréscimo na temperatura de fusão das cinzas de biomassa, temperatura essa que pode ser abaixo de 900°C (Teixeira 2012). Neste contexto, verifica-se que para a Amostra 1 foi observada a presença de um elevado teor de K (18,26 % atómica) e um baixo teor de Ca (1,65 % atómica). O elevado teor de K e Cl (18,81 % atómica) poderá estar relacionado com uma possível presença destes compostos na forma KCl e à sua deposição nas paredes do sistema, conforme é por vezes referido na literatura (Teixeira 2012). No caso da Amostra 1, a razão atómica S/Cl é inferior a 2 (Tabela 14), o que, pode traduzir risco de corrosão (Shao et al. 2012) nestas superfícies onde foi recolhido o material, se tivermos em atenção o valor desta razão enquanto parâmetro indicador de potencial de corrosão de uma biomassa.

Tabela 14 – Razões atômicas entre os elementos obtidos por análise EDS .

Amostra 1		Amostra 3	
S/Cl	S/(K+Na)	S/Cl	S/(K+Na)
0,338	0,271	3,800	0,005

A presença de Si no combustível leva a que durante a combustão possam existir reações com os metais alcalinos (Nutralapati et al. 2007). Estas reações promovem a formação de Silicatos Alcalinos, os quais, devido ao seu ponto de fusão relativamente baixo tendem a ficar retidos na grelha ou nas paredes da fornalha ou em equipamentos de transferência de calor. A presença de Si (0,99 % atômica) na Amostra 3 (Tabela 13), pode ser vista como indicativa da possibilidade duma possível formação destes compostos durante o processo de combustão.

Apesar do comportamento de fusão dos compostos de Fósforo não ser completamente conhecido, a sua presença pode influenciar a formação de depósitos no reator durante a combustão (Teixeira 2012). Uma vez que a abundância de Fósforo no aço constituinte das paredes do reator é baixa, os valores de P observados estarão certamente associados à sua proveniência da combustão da biomassa. A presença deste elemento no combustível, implica que às condições de pressão e temperatura do processo de combustão ele possa reagir com outros elementos (Piotrowska et al. 2010) formando compostos que acabam por se depositar na superfície das paredes do sistema. Portanto, o P (1,6 % atômica) observado na análise da Amostra 3 (Tabela 13) pode resultar da combustão de biomassa.

Relativamente à Amostra 3, a razão atômica S/Cl é inferior a 4 (Shao et al. 2012). Tendo em conta que o valor desta razão é um parâmetro indicador de potencial de corrosão de uma biomassa, verifica-se que face aos valores calculados para as amostras recolhidas na superfície das paredes do reator, a deposição de material proveniente da biomassa sobre a superfície pode promover o risco de corrosão.

Nas Amostras 1 e 3 a razão atômica S/(K+Na) é inferior a 0,5 (Tabela 14), o que pode estar relacionado com a formação de Silicatos Alcalinos nas superfícies onde foi recolhido o material, se tivermos em atenção o valor desta razão enquanto parâmetro indicador de formação de Silicatos Alcalinos de uma biomassa.

O Cloro é um dos elementos químicos que tem sido associado à promoção do aumento da corrosão do aço dos reatores de combustão (Mudgal et al. 2014). Este elemento promove o aumento da oxidação do aço, a quebra do metal, degradação da estrutura interna do aço, com a consequente formação de vazios e a perda de escamas não aderentes. Processos de corrosão mais acentuada no aço têm sido associados à presença de depósitos ricos em Cl. Os sais NaCl, KCl e CaCl₂ tem influência na corrosão do aço de reatores de combustão, sendo o CaCl₂ o menos corrosivo.

7.5 Material aplicado na construção dos reatores de pirólise

A construção de reatores de pirólise de biomassa, para produção de carvão, deve ter em atenção a composição elementar do combustível. A escolha de aço inoxidável deve ter em conta a presença de elementos químicos da biomassa que podem promover o risco de corrosão, e as espécies químicas suscetíveis de oxidar o aço do reator. A construção dos reatores em aço inoxidável deve-se à sua elevada resistência à corrosão e resistência a uma elevada gama de temperaturas.

A diferente tipologia de aços inoxidáveis deve-se às diferentes percentagens de elementos que os constituem e à existência de elementos com características específicas. Os três elementos característicos do aço inoxidável são o Crómio, o Níquel e o Molibdénio. Diferentes proporções destes elementos conferem comportamentos distintos do aço. A presença de Crómio fornece um carácter protetor à superfície do aço. A formação de Óxido de Crómio vai revestir as paredes do reator e este vai sendo repostado de uma forma passiva pela oxidação do Crómio pelo ar (Gholi 2011). Contudo, algumas circunstâncias, como a presença de elementos corrosivos típicos dos que se podem encontrar na composição da biomassa, podem conduzir à quebra desta barreira protetora, causando a corrosão do aço. A formação de *slag* e Sulfatos e sua subsequente deposição nas paredes do aço inoxidável leva a uma corrosão alveolar, provocando a quebra da barreira protetora (Mudgal et al. 2014; Gholi 2011). A utilização de aço inoxidável rico em Crómio, Níquel, Molibdénio e Azoto, promove o desenvolvimento de um filme de Óxido de Ferro e Crómio que tende a manter-se passivo na superfície do material (Mudgal et al. 2014; Sandberg 2011; Gholi 2011).

7.6 Conclusão

A degradação dos reatores de pirólise construídos em aço P265GH, aço com uma vasta aplicação na construção de equipamentos de transferência de calor e em fornalhas/caldeiras, pode ter origem no contato prolongado e sucessivo com os gases de combustão de biomassa sólida ou gases de pirólise na câmara de combustão. Estes gases contêm na sua composição elementos e compostos químicos provenientes do combustível, e resultantes do processo de conversão do combustível, os quais se podem depositar nas paredes do reator. Às condições de pressão e temperatura características do processo de conversão termoquímica da biomassa (pirólise, combustão), os compostos químicos presentes nos depósitos podem reagir com os elementos do aço inoxidável provocando a sua degradação.

As análises realizadas às amostras recolhidas nas superfícies das paredes do reator são indicativas de que a biomassa utilizada poderá ser rica em elementos favoráveis à degradação do aço inoxidável às condições de operação do reator. O ataque sucessivo da superfície do aço pelos elementos característicos do combustível certamente que irá provocar danos nos reatores num período mais ou menos longo de exposição.

Neste contexto, aconselha-se que seja dada especial atenção à natureza do combustível que está a ser utilizado na fornalha responsável pelo aquecimento do reator de pirólise, quer seja combustível sólido quer sejam os gases de pirólise. Por exemplo, ter em atenção os teores de Cloro e Potássio no combustível, de forma a prevenir efeitos corrosivos derivados de fenómenos de *slagging* e *fouling* relacionados com compostos Alcalinos depositados nas superfícies do reator de pirólise, e deste modo reduzir a corrosão do aço inoxidável aumentando o tempo de vida útil do equipamento.

8 Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho permitiu constatar que existem inúmeras variáveis que influenciam, das mais diversas formas, o funcionamento e por sua vez a eficiência do sistema. Um sistema de combustão a biomassa de média potência é constituído por vários equipamentos e todos eles têm de funcionar de uma forma integrada, proporcionando condições o mais adequadas possível para que a combustão possa ser o mais completa possível.

Ao longo deste trabalho, foram aplicadas metodologias e referidos equipamentos de medição que não foram referenciados na análise de resultados. Apesar da ausência de informação nos resultados do presente trabalho, esses métodos, instrumentos e equipamentos estão e vão continuar a estar aplicados no caso de estudo.

A monitorização das condições de operação da caldeira a biomassa do caso de estudo levou à aplicação de uma série de metodologias. Para a sua implementação foi necessária a seleção/compra de equipamentos, materiais e métodos, a definição das características construtivas dos instrumentos que permitem monitorizar e medir as variáveis de operação de caldeiras a biomassa, o desenvolvimento das infraestruturas que permitem a aplicação dos métodos idealizados e uma constante procura de soluções que permitam a aquisição de informação (correta e em tempo real) necessária à caracterização do sistema.

A monitorização das condições de operação da caldeira a biomassa do caso de estudo incidiu sobre os caudais de alimentação de biomassa à caldeira realizada por sistemas de alimentação sem-fim, sobre os caudais de ar de combustão, de gases de exaustão e de água de aquecimento, sobre a temperatura e pressão, sobre a humidade nos gases de exaustão, sobre a composição do efluente gasoso e sobre a potência térmica. Além destas condições de monitorização, também se efetuou a caracterização física das amostras e a recolha de amostras de cinzas para a caracterização físico-química. Estas duas caracterizações permitem relacionar as características da biomassa com o funcionamento do sistema e com os problemas técnicos que possam ser observados (i.e., corrosão, slagging, fouling, condensados, entre outros).

A complexidade do sistema de combustão e a existência de uma matriz diversificada de variáveis a caracterizar e a otimizar, levou a que no presente trabalho para além do desenvolvimento de aspectos de caracterização operacionais também fossem

realizados dois ensaios completos. Em ambos os ensaios foram utilizados pellets de madeira. Nestes comparou-se a influência de diversos parâmetros de operação sobre o comportamento do sistema de combustão.

Dos ensaios realizados, e através da sua comparação, concluiu-se que através do controlo da alimentação de biomassa através do sistema de controlo da caldeira é possível controlar parâmetros como o oxigénio, as temperaturas, a emissão de poluentes inqueimados, a redução de partículas inqueimadas, entre outros. Diferentes condições de operação do sistema traduzem resultados muito diferentes.

Saliento o facto, de que o todo o trabalho experimental desenvolvido continua e continuará a ser aplicado ao sistema de combustão. Em sequência, serão realizados vários ensaios e testadas diferentes condições de operação para pellets de bagaço de azeitona, estilha, casca de pinheiro entre outros tipos de biomassa.

O desenvolvimento e conclusão do presente relatório, permitiu a aquisição de conhecimentos importantes sobre o comportamento de um sistema desta escala. As diversas variáveis que o compõe são alvo de interesse, pois mais do que dados experimentais são resultados/informações científicas importantes que contribuem para o avanço científico e tecnológico nesta área. Todos os dados obtidos fornecem informação sobre aspectos que podem ser optimizados, mostrando que através de uma correta monitorização é possível determinar as condições mais favoráveis ao processo de combustão, de forma a que haja uma diminuição da emissão de poluentes, um aumento da eficiência e um aumento da rentabilidade económica e energética.

O trabalho desenvolvido, tem como base muito trabalho de “campo”, trabalho exaustivo, com bastante desgaste físico, em que são necessárias muitas horas e muitos dias, visto que é um sistema de grandes dimensões, escala industrial, que envolve diversas estruturas e componentes. No decorrer do trabalho experimental foram sentidas algumas dificuldades. O controlo de problemas, como avarias de equipamentos (i.e., degradação do aço das sondas de amostragem), corrosão de materiais devido às elevadas temperaturas do interior da fornalha (i.e., corrosão de termopares), atrasos dos fornecedores, problemas do dia-a-dia de uma instalação industrial e outros problemas de força maior, são difíceis de prever e contornar e levam a atrasos no desenvolvimento da pesquisa e trabalho científico. O uso de diferentes tipos de *software* (*software* desenvolvido para este tipo de sistemas de combustão e diferentes tipos de *software* dos equipamentos de medição) aos quais

não estava ambientada exigiu um estudo e bastantes horas de prática, criando ao mesmo tempo uma nova experiência e a obtenção de novos conhecimentos.

Em suma, como em qualquer processo que se pretenda aplicar em ambiente industrial, é fundamental uma otimização contínua do mesmo, e a combustão de biomassa para a produção de energia térmica não é exceção. Este trabalho pretende dar contributo nesta área, de modo a que este tipo de processo se torne cada vez mais eficiente e satisfaça as necessidades da sociedade, salvaguardando os recursos naturais e minimizando os impactos ambientais através da redução de emissão de poluentes. Sempre com a consciência de que ainda existe muita informação neste tipo de sistema para explorar e otimizar.

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

Referências

I. Referências bibliográficas

- Abbasi, T. & Abbasi, S.A., 2010. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp.919–937.
- Abuelnuor, A. a. a. et al., 2014. Characteristics of biomass in flameless combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp.363–370.
- Almeida, J.M.R., 2010. *Projecto de sistema à escala piloto para conversão energética de biomassa*. Universidade de Aveiro.
- Antunes, F.J.M. & Matos, M.A.A., 2011. Fundamentos e eficiência de separação de partículas. In *Técnicas de Tratamento de Effluentes Gasosos*. Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento, pp. 1–28.
- Antunes, F.J.M. & Matos, M.A.A., 2007. Separação Ciclónica. In *Técnicas de Tratamento de Effluentes Gasosos*. Aveiro.
- Antunes, R.A. & de Oliveira, M.C.L., 2013. Corrosion in biomass combustion: A materials selection analysis and its interaction with corrosion mechanisms and mitigation strategies. *Corrosion Science*, 76, pp.6–26.
- Avci, A. & Karagoz, I., 2003. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Journal of Aerosol Science*, 34(7), pp.937–955.
- Azadi, M. & Azadi, M., 2012. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. *Powder Technology*, 217, pp.121–127.
- Boetcher, S.K.S. & Sparrow, E.M., 2007. Limitations of the standard Bernoulli equation method for evaluating Pitot/impact tube data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(3-4), pp.782–788.
- Boriouchkine, A., Zakharov, A. & Jämsä-Jounela, S.L., 2012. Dynamic modeling of combustion in a BioGrate furnace: The effect of operation parameters on biomass firing. *Chemical Engineering Science*, 69(1), pp.669–678.
- Carpio, M., Zamorano, M. & Costa, M., 2013. Impact of using biomass boilers on the energy rating and CO₂ emissions of Iberian Peninsula residential buildings. *Energy and Buildings*, 66, pp.732–744.
- Carroll, J.P. & Finnan, J., 2012. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, 112(2), pp.151–159.

- Carson, J.W. & Ph, D., How to Design Efficient and Reliable Feeders for Bulk Solids by. *Jenike & Johanson Incorporated*, (978).
- Channiwala, S.A. & Parikh, P.P., 2002. A unified correlation for estimating HHV of solid , liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81, pp.1051–1063.
- Coelho, A.M.S.L., 2010. *Gestão de Cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa*. Universidade de Aveiro.
- Dai, J., Cui, H. & Grace, J.R., 2012. Biomass feeding for thermochemical reactors. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(5), pp.716–736.
- Dai, J. & Grace, J.R., 2007. A model for biomass screw feeding. *Powder Technology* 186 (2008) 40-55, 186, p.16.
- Dai, J. & Grace, J.R., 2011. Biomass granular screw feeding: An experimental investigation. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), pp.942–955.
- Dai, J. & Grace, J.R., 2008. Biomass screw feeding with tapered and extended sections. *Powder Technology*, 186(1), pp.56–64.
- Demirbas, A., 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. , 30, pp.219–230.
- Demirbas, A., 2005. Potential applications of renewable energy sources , biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, pp.171–192.
- Díaz, M. et al., 2008. Comparison of the Environmental Impact of Biomass and Fossil Fuels Medium-Scale. *16th European Biomass Conference & Exhibition*, (June), pp.2641–2646.
- Ed. James H. Clark, Fabien E. I. Deswarte, 2009. Introduction to chemicals from biomass. John Wiley & Sons
- Erol, M., Haykiri-Acma, H. & Küçükbayrak, S., 2010. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 35(1), pp.170–173.
- Esteban, B. et al., 2014. Environmental assessment of small-scale production of wood chips as a fuel for residential heating boilers. *Renewable Energy*, 62, pp.106–115.
- García, R. et al., 2012. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource technology*, 103(1), pp.249–58.
- Gholi, A.R., 2011. *Effects of tempering on corrosion properties of high nitrogen alloyed tooling steels in pyrolysis oil*, Stockholm.
- Hermansson, S., Lind, F. & Thunman, H., 2011. On-line monitoring of fuel moisture-content in biomass-fired furnaces by measuring relative humidity of the flue gases. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(11), pp.2470–2476.

- Hou, Q.F., Dong, K.J. & Yu, A.B., 2014. DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder. *Powder Technology*, pp.1–11.
- Hsiao, T.-C. et al., 2011. Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones. *Journal of Aerosol Science*, 42(2), pp.78–86.
- Jenkins, B.M. et al., 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54, pp.17–46.
- Jr, R.K., 1998. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. *ISA Transactions*, 37, pp.257–263.
- Kaivosoja, T. et al., 2013. Comparison of emissions and toxicological properties of fine particles from wood and oil boilers in small (20-25kW) and medium (5-10MW) scale. *Atmospheric Environment*, 77, pp.193–201.
- Karagoz, I. et al., 2013. Design and performance evaluation of a new cyclone separator. *Journal of Aerosol Science*, 59, pp.57–64.
- Karlsson, S., Åmand, L.-E. & Liske, J., 2015. Reducing high-temperature corrosion on high-alloyed stainless steel superheaters by co-combustion of municipal sewage sludge in a fluidised bed boiler. *Fuel*, 139, pp.482–493.
- Khan, A.A. et al., 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), pp.21–50.
- Kortela, J. & Jämsä-Jounela, S.L., 2013. Fuel moisture soft-sensor and its validation for the industrial BioPower 5 CHP plant. *Applied Energy*, 105, pp.66–74.
- Lehmusto, J. et al., 2012. High temperature corrosion of superheater steels by KCl and K₂CO₃ under dry and wet conditions. *Fuel Processing Technology*, 104, pp.253–264.
- Li, X. et al., 2013. Investigations on the behavior of laser cladding Ni–Cr–Mo alloy coating on TP347H stainless steel tube in HCl rich environment. *Surface and Coatings Technology*, 232, pp.627–639.
- Lim, K.S., Kim, H.S. & Lee, K.W., 2004. Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field. *Journal of Aerosol Science*, 35(1), pp.103–116.
- Liu, S. et al., 2014. A comparative study on the high temperature corrosion of TP347H stainless steel, C22 alloy and laser-cladding C22 coating in molten chloride salts. *Corrosion Science*, 83, pp.396–408.
- Lusini, I. et al., 2014. Novel application of a combustion chamber for experimental assessment of biomass burning emission. *Atmospheric Environment*, 94, pp.117–125.

- Matos, M.A.A. de, 2012. Valorização e Eliminação Termoquímica de Resíduos. In U. de Aveiro, ed. *Tratamento de Gestão de Resíduos Sólidos*. Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento.
- McGowan, T.F. et al., 2009. *Biomass and alternate fuel systems* Thomas F. J. Michael L. Brown; William S. Bulpitt; James L. Walsh, ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Metsäjoki, J., Huttunen-Saarivirta, E. & Lepistö, T., 2014. Elevated-temperature corrosion of uncoated and aluminized 9–12% Cr boiler steels beneath KCl deposit. *Fuel*, 133, pp.173–181.
- Miller, B.G. & Tillman, D.A., 2008. *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems* E. S. P. C. Inc, ed.,
- Mudgal, D., Singh, S. & Prakash, S., 2014. Corrosion Problems in Incinerators and Biomass-Fuel-Fired Boilers. *International Journal of corrosion*, p.14.
- Neves, D. et al., 2011. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(5), pp.611–630.
- Nielsen, H.P. et al., 2000. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(3), pp.283–298.
- Niu, Y. et al., 2014. Investigations on biomass slagging in utility boiler: Criterion numbers and slagging growth mechanisms. *Fuel Processing Technology*, 128, pp.499–508.
- Nussbaumer, T., 2003. Combustion and Co-combustion of biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy & Fuels*, 17, pp.1510–1521.
- Nutalapati, D. et al., 2007. Assessing slagging and fouling during biomass combustion: A thermodynamic approach allowing for alkali/ash reactions. *Fuel Processing Technology*, 88(11-12), pp.1044–1052.
- Parikh, J., Channiwala, S. & Ghosal, G., 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), pp.487–494.
- Parikh, J., S.A., C. & G.K., G., 2007. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86, pp.1710–1719.
- Pinto, J.C.F., 2011. *Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado*. Universidade de Aveiro.
- Piotrowska, P. et al., 2010. Fate of alkali metals and phosphorus of rapeseed cake in circulating fluidized bed boiler part 1: Cocombustion with wood. *Energy and Fuels*, 24(10), pp.333–345.
- Qiu, G., 2013. Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions. *Renewable Energy*, 50, pp.94–102.

- Rafael, S.I.M., 2012. *A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a Qualidade do Ar*. Universidade de Aveiro.
- Roy, M.M., Dutta, A. & Corscadden, K., 2013. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, 108, pp.298–307.
- Saidur, R. et al., 2011. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp.2262–2289.
- Sandberg, J., 2011. *Fouling in biomass fired boilers*. Mälardalen University Sweden.
- Şensöz, S., Demiral, I. & Gerçel, H.F., 2006. Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresource Technology*, 97, pp.429–436.
- Shao, Y. et al., 2012. Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation. *Energies*, 5(12), pp.5171–5189.
- Shin, M.-S. et al., 2005. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments. *Applied Thermal Engineering*, 25(11-12), pp.1821–1835.
- Silva, D.F.R., 2009. *Efeito do envelhecimento da biomassa sobre as características do biocombustível*. Universidade de Aveiro.
- Silva, T.C.S.R. da, 2012. *Características da cinza da combustão de diferentes tipos de biomassa*. Universidade de Aveiro.
- Sippula, O. et al., 2009a. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. *Atmospheric Environment*, 43(32), pp.4855–4864.
- Sippula, O. et al., 2009b. Particle emissions from small wood-fired district heating units. *Energy and Fuels*, 23, pp.2974–2982.
- Steer, J. et al., 2013. Biomass co-firing trials on a down-fired utility boiler. *Energy Conversion and Management*, 66(x), pp.285–294.
- Tarelho, L.A. da C., 2013. Caracterização de biomassa. Unidade curricular de Conversão de Energias Renováveis. Curso de Mestrado em Sistemas Energéticos Sustentáveis. Universidade de Aveiro
- Teixeira, P.A.L., 2012. *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*. Universidade Nova de Lisboa.
- Telmo, C. & Lousada, J., 2011. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), pp.2634–2639.
- Telmo, C., Lousada, J. & Moreira, N., 2010. Bioresource Technology Proximate analysis , backwards stepwise regression between gross calorific value , ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology*, 101(11), pp.3808–3815.

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

- Uva, J.S., 2013. *IFN6-Áreas dos usos do solo e das espécies florestais de Portugal continental*, Lisboa.
- van Loo, S., Koppejan, J. (editors) (2008) "Handbook of biomass combustion and co-firing.". Earthscan
- Vassilev, S. V. et al., 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), pp.913–933.
- Villeneuve, J. et al., 2012. A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3MW). *Bioresource Technology*, 111, pp.1–11.
- Vinod, V. et al., 2012. Calibration of an averaging pitot tube by numerical simulations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24, pp.26–28.
- Wolf, J.P. et al., 2013. *Biomass, combustion science, technology and engineering* L. Rosendahl, ed.,
- Xiang, R., Park, S.H. & Lee, K.W., 2001. Effects of cone dimension on cyclone performance. *Aerosol Science*, 32, pp.549–562.
- Yin, C., Rosendahl, L. a. & Kær, S.K., 2008. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, pp.725–754.
- Yılmaz, S. & Selim, H., 2013. A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp.420–430.
- Yu, Y., 1997. *Theoretical modelling and experimental investigation of the performance of screw feeders*.

II. Legislação e normas

CEN/TS 14780:2005n(E) – Solid biofuels – Methods for sample preparation.

CEN/TS 14774-3:2004 (E) – Solid biofuels – Methods for the determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample.

CEN/TS 14775:2004 (E) – Solid biofuels – Method for the determination of ash content.

CEN/TS 15148:2005 (E) – Solid biofuels – Method for the determination of the content of volatile matter.

Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, Jornal Oficial da União Europeia L140, de 23 de Abril de 2009, 16-62.

Environmental Protection Agency – Method 1 – Sample and velocity traverses for stationary sources.

Environmental Protection Agency – Method 2 – Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot tube).

Norma Portuguesa 2167:2007 – Emissões de fontes fixas. Secção de amostragem e plataforma para chaminés ou condutas. Instituto Português da Qualidade, Abril de 2008.

Portaria n.º 677/2009, Diário da República 1ª série, n.º 199, de 23 de junho de 2009, 4112-4116.

III. Sítios na internet

[URL1] e2p – energias de Portugal – Base de dados de fontes renováveis de energia. Disponível em URL: <http://e2p.inegi.up.pt/index.asp> e acedida pela última vez em 29 de Maio de 2014.

[URL 2] VENTIL – Engenharia do ambiente, Lda. Disponível em URL: <http://ventil.pt> e acedida pela última vez em 29 de Maio de 2015.

A Anexos

A.1 Anexo A – Caracterização da biomassa

A partir da adaptação das normas do Comité Europeu de Normalização é possível o desenvolvimento de métodos para a caracterização de biomassa. Os métodos desenvolvidos pela adaptação das normas são apresentados a seguir.

A.1.1 Métodos de preparação de amostras

(Adaptado da Norma CEN/TS 17780:2005 (E))

A Norma CEN/TS 17780:2005 (E) apresenta as várias técnicas usadas para o tratamento de amostras. Nesta secção apenas serão apresentadas as técnicas utilizadas no tratamento das possíveis amostras a aplicar no sistema do caso de estudo.

Princípio do método

A redução do tamanho da amostra recolhida para caracterização, em uma ou mais amostras para análise, é o principal objetivo da preparação de amostras, sendo a preservação da composição da amostra um dos requisitos do método.

Cada partícula da amostra original, antes da redução de massa, deve ter igual probabilidade de inclusão na amostra para análise, de forma a que a amostra a analisar seja representativa da amostra original. As partículas finas da amostra devem ser alvo de um cuidado especial, de modo a evitar perdas de material durante a moagem ou outras técnicas. A escolha do método de preparação da amostra deve ter em conta a caracterização pretendida, por exemplo, para a determinação do teor de humidade o método não deve secar a amostra nem formar pontos quentes.

Material

1. Moinho de corte – é usado na redução do tamanho nominal dos materiais usados como biocombustíveis com 10 a 30 mm para 1 mm ou menos (dependendo do biocombustível e das análises pretendidas).
2. Balança

Preparação da amostra

A amostra a analisar vai ser obtida pela técnica de esquarteramento. Para se aplicar a técnica escolhida é necessária uma superfície limpa e dura, onde se possa depositar a amostra sobre quatro folhas de papel. De seguida, e com cuidado, as folhas devem ser separadas, de modo a obter quatro parcelas equivalentes de amostra. A recolha da amostra para análise pode ser feita usando material das parcelas diagonais.

Procedimento experimental

1. Verificar o tamanho da peneira a introduzir no moinho;
2. Verificar se o moinho e os tubos de recolha de amostra se encontram devidamente limpos;
3. Verificar se o material da amostra é facilmente introduzido no moinho de corte. Caso este facto não se verifique, reduzir o seu tamanho com auxílio de um almofariz de Ágata.
4. Moer a amostra até se obter a quantidade necessária de amostra para análise.
5. Pesar a amostra de análise e guardar no exsicador de modo a evitar perda ou absorção de humidade.

A.1.2 Determinação do teor de humidade de uma amostra

(Adaptada da Norma CEN/TS 14774-3:2004 (E))

A determinação teor de humidade de uma amostra através do processo de secagem numa estufa é apresentado no método a seguir descrito.

Princípio do método

A amostra de biomassa para análise deve ser seca numa estufa a uma temperatura de (105 ± 2) °C e a percentagem de humidade deve ser calculada a partir da perda de massa da amostra. A amostra pode ser seca numa atmosfera de ar ou azoto, caso o material a analisar seja oxidável a 105°C, este deve ser seco numa atmosfera de azoto.

Material

1. Estufa, com possibilidade de controlo de temperatura de (105 ± 2) °C e na qual o ar possa ser renovado de 3 a 5 vezes por hora sem que a velocidade do ar remova amostra.
2. Prato de pesagem, este deve ser de vidro ou de um material resistente à temperatura e corrosão, e deve permitir a deposição da amostra sem que esta exceda os $0,2 \text{ g.cm}^{-2}$.

3. Balança com um erro associado de $\pm 0,1$ mg.
4. Exsiccador, de modo a evitar a absorção de humidade presente na atmosfera pela amostra de biomassa.

Preparação das amostras

As amostras de biomassa devem ser preparadas de acordo com a Norma CEN/TS 14780. A biomassa deve ser homogeneizada antes de se retirar uma amostra.

Procedimento experimental

1. Secar o prato de pesagem vazio na estufa a (105 ± 2) °C até se obter uma massa constante e deixar arrefecer num exsiccador até à temperatura ambiente. (Nota: Podem ser usados vários pratos ao mesmo tempo.)
2. Pesar os pratos de pesagem numa balança com sensibilidade de 0,1mg.
3. Colocar cerca de 5g de biomassa no seu estado tal e qual nos pratos de pesagem, numa camada uniforme, e pesar.
4. Colocar os pratos com as amostras na estufa a (105 ± 2) °C, durante 60 minutos. Retirar os pratos com as respetivas amostras da estufa e colocar num exsiccador com sílica e deixar arrefecer até à temperatura ambiente. Pesar os pratos com as respectivas amostras o mais rápido possível de modo a evitar a absorção da humidade presente na atmosfera.
5. Colocar novamente na estufa a (105 ± 2) °C durante 60 minutos e repetir todo o processo apresentado no ponto 4.
6. Colocar as amostras na estufa a (105 ± 2) °C durante 24 horas e repetir todo o processo do ponto 4. A amostra deve voltar para a estufa até se obter uma massa constante. Uma massa constante é definida como aquela que não sofre uma variação de massa superior a 1mg quando submetida a um período adicional de aquecimento (60 minutos). O tempo necessário para a massa estabilizar é de 2-3 horas.

(Nota: As partículas pequenas de biomassa são muito higroscópicas.)

Cálculo do teor de humidade

O teor de humidade é expresso em percentagem mássica e calculado pela seguinte expressão:

$$TH_{bs} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad [\% \text{ bs}]$$

Onde,

m_1 – é a massa do prato de pesagem vazio [g];

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

m_2 - é a massa do prato de pesagem mais a amostra antes da estufa [g];

m_3 - é a massa do prato de pesagem mais a amostra depois da estufa [g].

A.1.3 Determinação do teor de cinzas

(Adaptada da Norma CEN/TS 14775:2004 (E))

A determinação do teor de cinzas permite saber a quantidade de massa de resíduo inorgânico que permanece após a ignição do combustível sob condições específicas e vem expressa em percentagem de massa em base seca de combustível.

Princípio do método

O teor de cinzas é determinado através do cálculo da massa de resíduo que permanece após o aquecimento da amostra sob um controlo rigoroso de tempo, do peso da amostra e de especificações do equipamento a uma temperatura controlada de (550 ± 10) °C.

Material

1. Cadinhos de porcelana onde a camada de amostra não exceda os $0,1 \text{ g.cm}^{-2}$ por área de fundo.
2. Mufla com capacidade de fornecer uma temperatura estável requerida pelo procedimento, permanecendo estável durante o tempo necessário para o processo de aquecimento.
3. Balança com um erro associado de 0,1 mg.
4. Exsiccador, sem sílica.

Preparação das amostras

As amostras de biomassa para este procedimento devem possuir um tamanho nominal igual ou inferior a 1mm, a metodologia de preparação vem apresentada na Norma CEN/TS 14780. As amostras de biomassa para a determinação do teor de cinzas devem primeiramente passar pela determinação do teor de humidade descrito na Norma CEN/TS 14774-3.

Procedimento experimental

1. Calcinar os cadinhos de porcelana na mufla a uma temperatura de (550 ± 10) °C durante 60 minutos.

1.1 Remover os cadinhos da mufla, colocar sobre uma material resistente (i.e., tijolo), e deixar arrefecer entre 5 a 10 minutos.

1.2 Transferir os cadinhos para um exsicador sem sílica e deixar arrefecer até à temperatura ambiente.

1.3 Quando os cadinhos se encontrarem à temperatura ambiente, pesar numa balança de sensibilidade de 0,1 mg e registar o seu peso.

2. Homogeneizar bem as amostras antes da utilização.

2.1 Colocar aproximadamente 1g de amostra e espalhar no fundo do cadinho numa camada uniforme.

2.2 Pesar o cadinho mais a amostra e registar o seu peso.

(Nota: Se o teor de cinzas que se prevê obter for muito baixo, usar uma quantidade superior de amostra para melhorar a exatidão dos resultados.)

3. Colocar os cadinhos com a amostra na mufla fria.

1.1 Aumentar a temperatura da mufla até ao 100°C e esperar 10 minutos.

1.2 Continuar o aquecimento com incrementos de 50°C de 10 em 10 minutos até atingir os 250°C. Ao atingir os 250°C permanecer a esta temperatura durante 60 minutos, de forma a permitir a libertação dos voláteis presentes na amostra.

1.3 Aumentar a temperatura da mufla até aos 300°C com incrementos de 25°C de 10 em 10 minutos.

1.4 De seguida, aumentar a temperatura da mufla até aos (550 ± 10) °C, com incrementos de 50°C de 10 em 10 minutos, mantendo esta temperatura durante 120 minutos.

2. Retirar os cadinhos da mufla, colocar sobre uma material resistente (i.e., tijolo), e deixar arrefecer entre 5 a 10 minutos.

2.1 Transferir os cadinhos para um exsicador sem sílica e deixar arrefecer até à temperatura ambiente.

2.2 Quando os cadinhos se encontrarem à temperatura ambiente, pesar numa balança de sensibilidade de 0,1 mg e registar o seu peso.

Nota: Caso se verifique uma combustão incompleta nas amostras, estas devem ser colocadas novamente na mufla, durante períodos de 30 minutos, até a amostra apresentar variações de massa inferiores a 0,2mg.

Cálculo do teor de cinzas

O teor de cinzas em base seca, TC_{bs} , de uma amostra é expressa pela seguinte expressão;

$$TC_{bs} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \text{ [\% bs]}$$

Onde,

m_1 – é a massa do cadinho [g];

m_2 – é a massa do cadinho mais a amostra antes de ir à mufla [g];

m_3 – é a massa do cadinho mais a amostra após de ir à mufla [g].

A.1.4 Determinação do teor de matéria volátil

(Adaptada da Norma CENT/TS 15148:2005 (E))

O teor de matéria volátil é determinado como sendo a perda de massa quando a biomassa é aquecida em ambiente anaeróbio sob condições padronizadas. Este processo vai originar uma combustão incompleta onde ocorre a volatilização da matéria orgânica de uma forma incompleta, produzindo um resíduo carbonoso constituído por cinzas e carbono fixo.

Princípio do método

O método para a determinação do teor de matéria volátil é feito usando uma amostra de biomassa, a qual vai ser aquecida na ausência de ar (ou pobre em oxigénio) a uma temperatura de (900 ± 10) °C durante 7 minutos. A percentagem de matéria volátil é calculada a partir da perda de massa da amostra após a dedução da perda de massa devido à humidade.

Material

1. Mufla aquecida a eletricidade, com capacidade de manter a temperatura de (900 ± 10) °C uniforme, durante o tempo necessário ao processo de aquecimento em meio não oxidante.
2. Termopar permanentemente instalado na mufla.
3. Cadinhos cilíndricos com tampa bem ajustada, ambos de sílica fundida. O cadinho com tampa deve possuir uma massa entre as 10 e 14g.
4. Suporte para cadinhos, onde os cadinhos são colocados na mufla.
5. Balança com erro associado de 0,1mg.
6. Material resistente a temperaturas elevadas (luvas, apoio para o suporte e cadinhos e pinça).

Calibração da temperatura

A temperatura da mufla deve ser verificada a intervalos de tempo regulares com recurso a um termopar calibrado e não embainhado.

Preparação das amostras

As amostras de biomassa para este procedimento devem possuir um tamanho nominal igual ou inferior a 1mm, a metodologia de preparação vem apresentada na Norma CEN/TS 14780. A amostra recolhida deve estar bem homogeneizada e em equilíbrio com a humidade atmosférica do laboratório ou deve ter passado pelo método de determinação de humidade apresentado na Norma CEN/TS 14774-3. As amostras para a determinação do teor de humidade e teor de matéria volátil devem ser recolhidas ao mesmo tempo.

Procedimento experimental

1. Calcinar os cadinhos e respetivas tampas
 - 1.1 Num suporte colocar os cadinhos e levar à mufla a uma temperatura constante de (900 ± 10) °C durante 7 minutos.
 - 1.2 Remover os cadinhos da mufla, colocar num material resistente e deixar arrefecer durante 5 a 10 minutos.
 - 1.3 Transferir os cadinhos para um exsicador e deixar arrefecer até à temperatura ambiente.
 - 1.4 Pesar os cadinhos numa balança com sensibilidade de 0,1mg e registar o seu peso.
2. Homogeneizar bem as amostras e colocar aproximadamente $1 \pm 0,1$ g no cadinho. Tapar novamente o cadinho e esperar que a amostra ocupe todo o fundo numa camada uniforme. Pesar e registar o valor. Colocar os cadinhos no suporte frio.
3. Levar o suporte com os cadinhos à mufla a uma temperatura de (900 ± 10) °C durante 7 minutos. Verificar se se encontram bem fechados com a tampa, de modo a obter uma atmosfera pobre em oxidante e garantir uma combustão incompleta.
4. Remover os cadinhos da mufla e colocar num material termo-resistente, deixar arrefecer durante 5 a 10 minutos e transferi-los para um exsicador sem sílica até atingirem a temperatura ambiente. Este processo deve ser feito com algum cuidado de modo a que não se verifique perda de amostras, danificação do material ou perigo para o utilizador devido às elevadas temperaturas.
5. Pesar e registar o seu valor.

Monitorização das condições de operação de uma caldeira a biomassa

Nota: A mufla deve ser programada com um programa de rampa direta (1 *step*) a 900°C. A cronometragem dos 7 minutos deve iniciar-se logo após a introdução dos cadinhos na mufla. Os cadinhos não devem permanecer mais do que 15 segundos após os 7 minutos (aconselhável começar a retirar os cadinhos 15s antes do tempo finalizar).

Cálculo do teor de matéria volátil

O teor de matéria volátil da amostra é expresso em percentagem em base seca e é dado pela seguinte expressão:

$$MV_{bs} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \text{ [\% bs]}$$

Onde,

m1 – é a massa do cadinho vazio [g];

m2 – é a massa do cadinho mais amostra antes de ir à mufla [g];

m3 – é a massa do cadinho mais a amostra após ir à mufla [g]