



**Miguel Faria Baptista    Avaliação do processo de combustão de misturas de  
lamas biológicas e biomassa florestal em leito  
fluidizado**



**Miguel Faria Baptista      Avaliação do processo de combustão de misturas de  
lamas biológicas e biomassa florestal em leito  
fluidizado**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



## **o júri**

Presidente

**Professor Doutor António Gil D'orey de Andrade Campos**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais

**Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro  
(Orientador)

**Professor Doutor Mário Gonçalves Costa**

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico da  
Universidade de Lisboa  
(Arguente)

## **agradecimentos**

Ao Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, pela orientação disponibilidade e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao Daniel Pio, pela sua disponibilidade durante todo o trabalho laboratorial.

Aos meus pais e irmão por sempre apoiarem as minhas decisões e incentivarem a percorrer o meu caminho.

À minha namorada Daniela Brito, por todo o seu apoio e confiança depositada em mim durante esta fase da minha vida.

Um obrigado aos meus colegas e amigos pelo espírito de companheirismo.

## palavras-chave

Combustão, Leito Fluidizado, biomassa florestal, lamas primárias, lamas biológicas

## resumo

A indústria da pasta de papel é responsável por uma elevada produção de resíduos sólidos orgânicos, como por exemplo as lamas do tratamento de efluentes líquidos, sendo estes maioritariamente depositados em aterro ou utilizados para compostagem. Contudo, tem começado a haver um maior interesse no aproveitamento energético destes materiais. Para este fim podem ser utilizados vários processos, entre eles a combustão, sendo a tecnologia de leito fluidizado reconhecida como a mais adequada para o processo, uma vez que permite uma operação com uma elevada diversidade de combustíveis.

Neste contexto, este trabalho consistiu no estudo do processo de combustão de misturas compostas por biomassa florestal residual e lamas primárias e secundárias (biológicas) num reator de leito fluidizado à escala piloto. O objetivo foi avaliar o efeito que a mistura das lamas na biomassa florestal exerce no desempenho do processo de combustão.

A biomassa utilizada neste trabalho incluiu biomassa florestal residual do abate de eucalipto, a fração fina resultante do processo de produção de estilha de eucalipto e a casca de eucalipto. A biomassa foi utilizada na forma de estilha e também processada na forma de pellets. As lamas utilizadas para adicionar à mistura de combustível foram, as lamas primárias e lamas biológicas (secundárias), que foram previamente secas em condições atmosféricas.

Durante a combustão das misturas combustíveis, verificou-se que a presença das lamas em valores até 10% em massa não influenciava o comportamento do perfil de temperaturas e das emissões de CO, embora se observasse um aumento das emissões de NO e de HCl. Contudo, as emissões de HCl ao fim de um período de tempo apresentavam um decréscimo. Durante a combustão das misturas onde era utilizada a estilha, as emissões de HCl ocorreram numa gama de 21 a 13  $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $\text{O}_2$ ), e as emissões de NO numa gama de 106 a 155  $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $\text{O}_2$ ). Na combustão das misturas onde eram utilizados pellets, os valores das emissões de HCl ocorreram numa gama de 55 a 5  $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $\text{O}_2$ ), e as emissões de NO numa gama de 120 a 164  $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $\text{O}_2$ ). A combustão das misturas com lamas também resultava um acréscimo na quantidade de cinzas produzidas e acumuladas nas condutas.

**keywords**

Combustion, fluidized bed, forest biomass, primary sludge, biological sludge

**abstract**

The pulp and paper industry is responsible for the production of a high amount of organic solid waste, such as sludge from the treatment of liquid effluents, which are mainly landfilled or used for composting. However, there has been a greater interest in the energy recovery from these materials. For this purpose, several processes have been used including combustion, particularly the fluidized bed combustion since it allows the use of a variety of fuels.

This work consisted in the study of the combustion process of mixtures composed of residual forest biomass and primary and secondary (biological) sludges in a pilot scale fluidized bed reactor. The objective was to evaluate the effect of sludge mixture on forest biomass on the performance of the combustion process.

The biomass used in this work included residual forest biomass from the eucalyptus cull, the fine fraction resulting from the eucalyptus chip production process and the eucalyptus bark. The biomass was used in the form of chip and also processed in the form of pellets. The sludge used to add to the fuel mixture were primary sludge and biological (secondary) sludge which were previously dried under atmospheric conditions.

During the combustion of the fuel mixtures, it was found that the presence of sludge in amounts up to 10% in mass did not influence with the behaviour of the temperature profile and CO emissions, although an increase in NO and HCl was observed. However, the HCl emissions after a period of time started to show a decrease. During the combustion of the fuel mixtures where the eucalyptus chip was used, the HCl emissions occurred in the range of 21 to 13 mg·Nm<sup>-3</sup>(dry gases, corrected to 11% O<sub>2</sub>) and the NO emissions in a range of 106.66 to 155 mg·Nm<sup>-3</sup>(dry gases, corrected to 11% O<sub>2</sub>). In the combustion of the mixtures where the pellets were used, the range of the HCl emissions occurred in a range of 55 to 5 mg·Nm<sup>-3</sup>(dry gases, corrected to 11% O<sub>2</sub>), and the NO emissions in a range of 120 to 164 mg·Nm<sup>-3</sup>(dry gases, corrected to 11% O<sub>2</sub>).

The combustion of the fuel mixtures with the sludge also resulted in an increase in the amount of ash produced and accumulated in the conduits.

## Índice

<b>ÍNDICE.....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA QUÍMICA.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	1
<b>2 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>3</b>
2.1 A INDÚSTRIA DA PASTA DE PAPEL .....	3
2.1.1 Preparação da madeira.....	3
2.1.2 Produção de Papel .....	4
2.1.3 Resíduos .....	4
2.2 MÉTODOS PARA TRATAMENTO DAS LAMAS .....	5
2.2.1 Deposição em aterros .....	5
2.2.2 Aplicação nos Solos (Compostagem).....	6
2.2.3 Aproveitamento energético.....	6
2.3 PROPRIEDADES DO COMBUSTÍVEL.....	7
2.3.1 Teor de humidade .....	7
2.3.2 Teor de voláteis .....	7
2.3.3 Teor de Cinzas.....	7
2.3.4 Poder calorífico .....	8
2.4 COMBUSTÃO.....	8
2.4.1 Combustão de Biomassa.....	8
2.4.2 Combustão de Lamas .....	9
2.5 TECNOLOGIAS DE COMBUSTÃO.....	9
2.5.1 Leito Fixo .....	10
2.5.2 Leito fluidizado .....	10
2.5.3 Co-combustão.....	11
2.6 EMISSÕES .....	12
2.6.1 Monóxido de Carbono (CO).....	12
2.6.2 Óxidos de Azoto (NO <sub>x</sub> ) .....	12
2.6.3 Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ).....	12
2.6.4 Ácido Clorídrico (HCl).....	13
2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS REALIZADOS .....	13
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL .....	15
3.1.1 Reator de leito fluidizado .....	15
3.1.2 Sistema de Alimentação .....	17
3.1.3 Sistema de refrigeração .....	20
3.1.4 Sistema de Depoeiramento.....	21
3.1.5 Sistemas de Monitorização e análise gasosa.....	21
3.2 MANUTENÇÃO DA INSTALAÇÃO .....	23
3.3 PREPARAÇÃO DO COMBUSTÍVEL .....	24

3.4	EXPERIÊNCIAS DE COMBUSTÃO.....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA UTILIZADA COMO COMBUSTÍVEL .....	29
4.2	SECAGEM DE LAMAS .....	31
4.3	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS DE COMBUSTÃO.....	32
4.3.1	Combustão de estilha de eucalipto.....	33
4.3.2	Combustão de 95%massa de estilha de eucalipto com 5%massa de lamas biológicas (mistura ELB5).....	36
4.3.3	Combustão de 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa lamas biológicas (mistura ELB10) .....	40
4.3.4	Combustão de 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura BFLB10).....	44
4.3.5	Combustão de 90%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa lamas biológicas (mistura PC1LB10) .....	47
4.3.6	Combustão de 90%massa pellets de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura PBFLB10) .....	51
4.3.7	Combustão de 90%massa pellets de finos (<1 mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura PFLB10).....	55
4.3.8	Combustão de pellets Pinewells, pellets de casca (Tipo 1) de eucalipto, pellets de mistura de casca e folhas de eucalipto .....	58
4.3.9	Combustão de 95%massa pellets biomassa florestal residual e estilha com 5%massa lamas primárias (mistura PBFELP5) .....	63
4.3.10	Combustão de 90%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10%massa lamas biológicas (mistura PC2LB10) .....	66
4.3.11	Combustão de 95%massa pellets de casca (Tipo 2) com 5%massa lamas primárias (mistura PC2LP5) .....	70
4.4	COMPARAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DE TEMPERATURAS .....	73
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A LEGISLAÇÃO PORTUGUESA SOBRE EMISSÃO DE POLUENTES GASOSOS.....	75
4.6	ASPETO DAS CONDUTAS DE EXAUSTÃO DO REATOR DE LEITO FLUIDIZADO APÓS A REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS DE COMBUSTÃO .....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Produção de resíduos sólidos [4].....	5
Figura 2.2 - Esquema da combustão amas [12]. ....	9
Figura 3.1 - Leito Fluidizado Borbulhante à escala piloto.....	15
Figura 3.2 - Representação esquemática do sistema experimental piloto.....	16
Figura 3.3 - Curva de calibração para motor de 0.18kW e redutor de rotações 1:50. Combustível utilizado para calibração: Estilha de eucalipto .....	18
Figura 3.4 - Curva e calibração para motor de 0.18kW e redutor de rotações 1:50. Combustível utilizado para calibração: Destroçado de biomassa florestal residual .....	18
Figura 3.5 - Curva de calibração para motor com 0.18kW e redutor de rotações 1:100. Combustível utilizado para calibração: Pellets Pinewells.....	19
Figura 3.6 - Sistema de alimentação de biomassa.....	19
Figura 3.7 – Torre de arrefecimento .....	20
Figura 3.8 – a) Filtro de mangas; b) Ciclone .....	21
Figura 3.9 - Analisador on-line de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> e CO .....	22
Figura 3.10 - Analisador FTIR (CEM - Continuous Emissions Monitoring System, GASMET). ....	23
Figura 3.11 - Limpeza de sondas com HCl.....	24
Figura 3.12 - Progresso da substituição do isolamento na parte superior do reator.....	24
Figura 3.13 - a) Fração fina resultante do processo de produção de estilha de eucalipto para a indústria da pasta e papel; b) Destroçado de Biomassa Florestal Residual.....	25
Figura 3.14 a) Pellets Pinewells; b) Pellets de mistura de biomassa florestal residual e estilha .....	25
Figura 3.15 a) Pellets de casca de Eucalipto (Tipo 2); b) Pellets de biomassa florestal residual .....	26
Figura 3.16 - a) Lamas biológicas; b) Lamas primárias.....	26
Figura 4.1 – Análise imediata dos vários combustíveis utilizados. Os valores são apresentados em base tal e qual (btq). ....	29
Figura 4.2 – Composição da fração inorgânica das lamas biológicas; oxigénio não incluído (Dados obtidos a partir da análise realizada pela empresa The Navigator Company). .....	30
Figura 4.3 – Evolução da massa das lamas biológicas e da sua humidade (%massa), durante o processo de secagem a 105±5°C. R1, R2, R3 representam réplicas da mesma amostra. ....	31
Figura 4.4 – Evolução da massa das lamas primárias e da sua humidade (%massa) durante o processo de secagem em estufa a 105±5°C. R4, R5, R6 representam réplicas da mesma amostra. ....	32
Figura 4.5 - Lamas Biológicas: a) Lamas Húmidas; b) Lamas Secas.....	32
Figura 4.6 – Evolução da temperatura ao longo do tempo, para diferentes localizações ao longo da altura do reator de leito fluidizado durante a combustão de estilha de eucalipto .....	34

Figura 4.7 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de estilha de eucalipto .....	34
Figura 4.8 – Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de estilha de Eucalipto.....	35
Figura 4.9 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de estilha de Eucalipto.....	36
Figura 4.10 - Evolução da temperatura ao longo do tempo, para diferentes localizações ao longo da altura do reator de leito fluidizado durante combustão 95%massa de estilha de eucalipto com 5%massa lamas biológicas (mistura ELB5).....	37
Figura 4.11 - Perfil longitudinal de temperatura no reator durante a combustão,95%massa de estilha de eucalipto com 5%massa de lamas biológicas (mistura ELB5) .....	37
Figura 4.12 - Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 95%massa de estilha de eucalipto com 5%massa de lamas biológicas (mistura ELB5). ....	38
Figura 4.13 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão 100% estilha de eucalipto antes da introdução da mistura ELB5 e após a introdução da mistura ELB5. ....	39
Figura 4.14- Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 95%massa de estilha de eucalipto com 5%massa de lamas biológicas (mistura ELB5). ....	39
Figura 4.15 – Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura ELB10).. .....	40
Figura 4.16 - Perfil longitudinal de temperatura do reator durante a combustão 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura ELB10). 41	
Figura 4.17 - Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100%massa estilha de eucalipto antes da introdução da mistura ELB10 e após a introdução da mistura ELB10.....	42
Figura 4.18 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100%massa de estilha de eucalipto.....	43
Figura 4.19 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo durante combustão de 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura ELB10). ....	43
Figura 4.20 – Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90%massa de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura BFLB10).....	44
Figura 4.21 - Perfil longitudinal de temperaturas durante a combustão de 90%massa de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura BFLB10). ....	45
Figura 4.22 - Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100%massa biomassa florestal residual antes da introdução da mistura BFLB10 e após a introdução da mistura BFLB10. ....	45



Figura 4.23 – Evolução da concentração de $H_2O$ , $CO_2$ , e $O_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura BFLB10) .....	46
Figura 4.24 - Evolução da concentração de $CO$ , $NO$ , $HCl$ e $SO_2$ nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura BFLB10). .....	47
Figura 4.25 - Evolução da concentração de $CO$ , $NO$ , $HCl$ e $SO_2$ nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura BFLB10). .....	47
Figura 4.26 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90%massa de pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10) .....	48
Figura 4.27 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de 90%massa de pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10).....	49
Figura 4.28 - Evolução da concentração de $CO_2$ , $H_2O$ e $O_2$ nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo1) antes da introdução da mistura PC1LB10 e após a introdução da mistura PC1LB10. ....	50
Figura 4.29 - Evolução da concentração de $CO$ , $NO$ , $HCl$ e $SO_2$ nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 1).....	50
Figura 4.30 – Evolução da concentração de $CO$ , $NO$ , $HCl$ e $SO_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante combustão de 90%massa de pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10). ....	51
Figura 4.31 – Evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão 90%massa de pellets de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10). ....	52
Figura 4.32 - Perfil longitudinal da temperatura durante a combustão de 90%massa pellets de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10). ....	53
Figura 4.33 – Evolução da concentração de $CO_2$ , $H_2O$ e $O_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90%masa pellets de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10). ....	53
Figura 4.34 – Evolução da concentração de $CO$ , $NO$ , $HCl$ e $SO_2$ nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90%masa pellets de biomassa florestal residual com 10%massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10). ....	54
Figura 4.35 - Evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão 90%massa de pellets de finos de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura PFLB10). ....	55
Figura 4.36 - Perfil longitudinal de temperaturas durante a combustão de 90%massa de pellets de finos de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura PFLB10). ....	56

Figura 4.37 - Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100%massa de pellets finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual.....	56
Figura 4.38 - Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90%massa pellets finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura PFLB10).....	57
Figura 4.39 – Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90%massa de pellets finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (PFLB10).....	58
Figura 4.40 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) (pellets P2)..	59
Figura 4.41 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de pellets Pinewells (pellets P1), pellets de casca de eucalipto (pellets P2) e pellets de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).	59
Figura 4.42 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de pellets certificados e transição para pellets casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).	60
Figura 4.43 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de pellets de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).	61
Figura 4.44 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de pellets Pinewells (P1), com transição para pellets casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).	62
Figura 4.45 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).	62
Figura 4.46 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de pellets de casca de eucalipto (Tipo1) (pellets P2) com transição para pellets de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).....	63
Figura 4.47 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de 95%massa de pellets de biomassa florestal e estilha com 5%%massa de lamas primárias (mistura PBFELP5).	64
Figura 4.48 - Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante a combustão de 95%massa de pellets de biomassa florestal e estilha com 5%massa de lamas primárias (PBFELP5).	64
Figura 4.49 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90%massa de pellets de biomassa florestal e estilha com 10%massa de lamas biológicas (mistura PBFELP5).....	65
Figura 4.50 – Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão, ao longo do tempo durante a combustão de 95%massa de pellets de biomassa florestal e estilha com 5%massa de lamas primárias (mistura PBFELP5).....	66

Figura 4.51 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90%massa de pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10) .....	67
Figura 4.52 - Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante combustão de 90%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10). .....	67
Figura 4.53 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> nos gases de exaustão, ao longo do tempo ao durante a combustão de 100%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2).....	68
Figura 4.54 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e nos gases de exaustão, ao longo do tempo ao durante a combustão de 90%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10).....	68
Figura 4.55 – Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO <sub>2</sub> nos gases de exaustão durante a combustão de 100%massa de pellets de casca de eucalipto (Tipo 2).....	70
Figura 4.56 - Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão durante a combustão de 90%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10). .....	70
Figura 4.57 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 95%massa de pellets de casca (Tipo 2) com 5%massa de lamas primárias (mistura PC2LP5) .....	71
Figura 4.58 – Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante combustão de 95%massa de pellets de casca (Tipo 2) com 5%massa de lamas primárias (mistura PC2LP5). .....	71
Figura 4.59 – Evolução da concentração de H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> , nos gases de exaustão durante a combustão de 95%massa de pellets de casca (Tipo 2) com 5%massa de lamas primárias (mistura PC2LP5).....	72
Figura 4.60 Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão durante combustão de 100%massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2). .....	73
Figura 4.61 - Evolução da cocnentração CO, NO, HCl, SO <sub>2</sub> nos gases de exasutão durante a combustão de 95%massa de pellets de casca (Tipo 2) com 5%massa de lamas primárias (mistura PC2LP5).....	73
Figura 4.62 - Comparação da evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão da mistura de biomassa com lamas. ....	74
Figura 4.63 – Valores de concentração de CO nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das misturas de biomassa, e sua comparação com o limite de concentração (500 mg·Nm <sup>-3</sup> ) de CO nos gases de exaustão de acordo com a Portaria 677/2009 (linha a tracejado)[27]. .....	75
Figura 4.64 – Figura 4.65 – Valores de concentração de NO, expresso como NO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das misturas de biomassa, e sua comparação com o limite de concentração (650 mg·Nm <sup>-3</sup> ) de NO, expresso como NO <sub>2</sub> , nos gases de exaustão de acordo com a Portaria 677/2009 (linha a tracejado). .....	76

Figura 4.66 – Comparação da concentração de HCl nos gases de exaustão para as diferentes experiências de combustão. .... 77

Figura 4.67 – Condução de exaustão e de ligação do reator de leito fluidizado ao ciclone, após combustão das misturas: a) 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas; b) 90%massa pellets de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas..... 78

Figura 4.68 - Condução de exaustão do reator de leito fluidizado após combustão da mistura composta por 95%massa pellets casca de eucalipto com 5%massa lamas primárias. .... 78

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Resíduos existentes na produção de pasta de papel; Adaptado de [3] .....	4
Tabela 2.2 – Revisão dos resultados obtidos na bibliografia pesquisada .....	13
Tabela 3.1 - Experiências de combustão realizadas neste trabalho.....	27
Tabela 4.1 – Análise imediata e elementar dos combustíveis utilizados. ....	30
Tabela 4.2 - Valores médios de concentração de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O nos gases de exaustão, durante a combustão de pellets Pinewells (P1), pellets de casca de eucalipto (P2) e pellets de mistura casca e folhas de eucalipto (P3) .....	60
Tabela 4.3 – Valores médios da concentração de CO, NO e HCl nos gases de exaustão, ao longo do tempo durante a combustão dos pellets Pinewells (P1), pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) (pellets P2) e pellets de casca e folhas de eucalipto (P3) .....	63

## Lista de Abreviaturas

BFLB10	Mistura de 90%massa biomassa florestal residual e 10%massa de lamas biológicas
DAO	Departamento de Ambiente e Ordenamento
DOS	Microsoft DOS
E	Experiência de combustão com estilha
ELB10	Mistura de 90%massa de estilha de madeira de eucalipto e 10% massa de lamas biológicas
ELB5	Mistura de 95%massa de estilha de madeira de eucalipto e 5%massa de lamas biológicas
EP	Experiência de combustão com <i>pellets</i> pinewells, <i>pellets</i> casca e <i>pellets</i> de casca e folha de eucalipto
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
LFB	Leito Fluidizado Borbulhante
PBFELP5	Mistura de 95% massa de <i>pellets</i> biomassa florestal e estilha de eucalipto e 5% massa de lamas primárias
PBFLB10	Mistura de 90%massa de <i>pellets</i> de destocado e 10%massa de lamas biológicas
PC1LB10	Mistura de 90%massa de <i>pellets</i> e casca (Tipo 1) e 10%massa de lamas biológicas
PC2LB10	Mistura de 90%massa de <i>pellets</i> casca de eucalipto (Tipo 2) e 10%massa de lamas biológicas
PC2LP5	Mistura de 95%massa <i>pellets</i> casca de eucalipto (Tipo 2) e 5%massa de lamas primárias
PPLB10	Mistura de 90%massa de <i>pellets</i> de finos e 10%massa de lamas biológicas

## Nomenclatura Química

CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
Si	Sílica
Ni	Níquel
Al	Alumínio
Fe	Ferro
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Na	Sódio
K	Potássio
S	Enxofre
NO <sub>x</sub>	Óxido de Azoto
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
CO	Monóxido de Carbono
SO <sub>x</sub>	Óxido de Enxofre
HCl	Ácido Clorídrico
COV	Compostos Orgânicos voláteis
H <sub>2</sub> O	Água
O <sub>2</sub>	Oxigénio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de Cálcio
HC	Hidrocarboneto
HF	Ácido Fluorídrico
H <sub>2</sub>	Hidrogénio
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
NO	Monóxido de Azoto





# **1 Introdução**

A indústria da pasta de papel representa um dos maiores sectores em Portugal. Tanto a nível ambiental como energético tem vindo a ser feitos esforços de modo a melhorar a sua pegada ecológica.

Da produção da pasta de papel são gerados resíduos, que muitas das vezes são depositados em aterros. Embora seja uma prática ainda comum, tem vindo a ser desincentivada através da sensibilização dos problemas que acarreta para o ambiente e para a saúde, bem como através de uma legislação mais rígida.

Sendo assim é necessário estudar outras formas para a eliminação dos resíduos. O aproveitamento energético trata-se de uma mais-valia, visto que não só permite eliminar estes resíduos, como também gerar energia a partir deles. Neste trabalho as lamas irão ser misturadas com diferentes tipos de biomassa onde se irá estudar o seu desempenho ao nível das emissões.

## **1.1 Objetivos do trabalho**

Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades de misturas de combustíveis entre biomassa e lamas biológicas ou primárias, como também caracterizar as condições de combustão das misturas num reator de leito fluidizado e avaliar o desempenho da combustão e as emissões provenientes dessa.

## **1.2 Organização do trabalho**

Capítulo 1: Breve introdução ao tema escolhido. Irá também ser feita uma breve descrição dos objetivos deste trabalho e a forma de como este está organizado.

Capítulo 2: Neste capítulo são averiguadas várias formas para o tratamento das lamas. Também serão explicadas as propriedades do combustível. São, também, estudadas várias tecnologias de combustão de biomassa, dando ênfase à Tecnologia de Leito Fluidizado. Por fim, foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre estudos que englobam co-combustão de biomassa com lamas, de modo a tentar perceber melhor o seu mecanismo.

Capítulo 3: Neste capítulo é descrita a metodologia feita durante todo o trabalho experimental. É também descrito o sistema de combustão, os sistemas de análise e sistemas de despoeiramento. São identificados os vários passos da manutenção feita ao sistema, como também a explicação de como é feita a preparação e caracterização do combustível.

Capítulo 4: Neste capítulo é feita uma análise de resultados, seguindo-se de uma discussão de todas as experiências feitas durante a elaboração deste trabalho. É, também, feita uma comparação com as emissões obtidas e os limites estabelecidos pela legislação.

Capítulo 5: Neste capítulo serão apresentadas as conclusões alcançadas durante todo o trabalho realizado.

## 2 Estado da arte

Neste trabalho foi feita uma breve revisão bibliográfica sobre a produção da pasta de papel, de modo a compreender a origem das lamas utilizadas neste trabalho. Também foi feita uma revisão bibliográfica das várias tecnologias utilizadas para o tratamento destes resíduos e, por fim, foram revistas várias tecnologias de combustão para a eliminação dos mesmos.

### 2.1 A Indústria da Pasta de papel

#### 2.1.1 Preparação da madeira

De modo a poder compreender a origem dos resíduos para a realização deste trabalho, irá ser feita uma abordagem ao processo de fabrico da pasta de papel.

A transformação da madeira em pasta de papel dá-se através de um processo de digestão química denominado por *Método de Kraft*. O primeiro processo desta etapa trata-se da preparação da madeira. Aqui a casca é retirada mecanicamente, onde de seguida os troncos já descascados são transformados em estilha. O tamanho da estilha irá variar de material para material, no entanto é importante que o seu tamanho seja uniforme, de modo a que o processo seja mais eficiente.[1], [2]

De seguida dá-se a cozedura e deslenhificação. Estes processos ocorrem num digestor químico, podendo ser do tipo *batch* ou contínuo. Ambos compostos por uma solução denominada de licor branco, composto por sulfureto de sódio e hidróxido de sódio. A lenhina é então separada da celulose, dissolvendo-se no licor, dando origem ao licor negro. Uma vez alcançado o valor desejado de lenhina residual, o processo de cozedura é repetido.[2]

Após a cozedura, a pasta contém vários compostos inorgânicos e uma grande quantidade de substâncias orgânicas, devido ao licor negro. Sendo este depois removido pelo processo de lavagem e levado para um sistema de recuperação químico.

Uma vez removido o licor negro, a deslenhificação continua através de oxigénio. Este processo ocorre em condições alcalinas, e de modo a manter o balanço do sódio é utilizado licor branco oxidado, onde o hidróxido de sódio é o principal químico alcalino e o sulfito é transformado em tiosulfato.

De seguida, inicia-se o processo de branqueamento químico. Neste processo a pasta é tratada de modo a atingir a qualidade desejada relativamente ao brilho, estabilidade do brilho e resistência. Para este processo são utilizados 4 químicos: dióxido de cloro, oxigénio, ozono e peróxido.

Após o branqueamento estar concluído, é iniciado o processo de secagem. Neste processo parte da água presente na pasta de papel é escoada e a restante é retirada através de prensagem.

Dando seguimento à última etapa temos a recuperação química que tem como objetivo recuperar os químicos inorgânicos, a destruição do material orgânico, recuperação do conteúdo energético através da produção de vapor para aproveitamento energético e a recuperação de subprodutos. A recuperação do licor negro normalmente é suficiente para que as fábricas de produção de pasta de papel consigam ser autossuficientes [2].

### 2.1.2 Produção de Papel

A produção de papel passa por vários processos sendo estes, a preparação do stock, desidratação do papel, prensagem e secagem e por fim conversão. Antes do stock entrar na máquina de papel é necessário que este seja tratado de modo a remover as impurezas. Normalmente, existem várias linhas de material cru que alimentam as máquinas de papel. Estas linhas são então bombeadas para caixas de mistura ou de armazenamento. Estas caixas permitem que o processo de fabrico de papel seja contínuo, sendo adicionados aditivos de modo a obter a consistência desejada.

Após a conclusão da preparação do *stock*, este dá entrada na máquina de papel. Aqui a água em excesso irá ser removida. O fabrico do papel é conseguido pela aplicação de uma suspensão aquosa de fibras de celulose numa tela, que permite a drenagem da água, deixando para trás as fibras, que são transformadas numa folha. De seguida, esta folha passa por prensas de modo a poder reduzir a sua espessura e alisar a superfície. Uma vez feito isto são adicionados revestimentos ao papel para melhorar o brilho, onde por fim este é seco. [2]

### 2.1.3 Resíduos

Da utilização do processo *Kraft*, para a produção de pasta de papel, resultam vários tipos de efluentes que estão presentes na seguinte tabela:

Tabela 2.1 - Resíduos existentes na produção de pasta de papel; Adaptado de [3].

Tipo de resíduo	Fonte do resíduo
Licor Negro	Produção de polpa química (processo de <i>Kraft</i> )
Resíduos de madeiras e cascas	Processos químicos e semi-químicos da produção de polpa
Desperdícios de processos de seleção e limpeza	Produção de polpa química; processamento de papel reciclado; preparação do <i>stock</i> de papel
Lamas mecânicas e químicas	Tratamento de licor branco e efluentes
Lamas Biológicas	Descoloração do papel reciclado
Lamas Mistas	Proveniente de outras fontes

De todos os efluentes acima descritos, o licor negro é o que apresenta maior importância como combustível para aproveitamento energético. O licor negro é constituído por cerca de 50% de substâncias à base de madeira, que estão dissolvidas numa fração orgânica. [3]

## 2.2 Métodos para tratamento das lamas

O fabrico da pasta de papel representa uma produção considerável de resíduos. Embora não sejam considerados perigosos, a sua enorme quantidade representa preocupações a nível ambiental. Na Figura 2.1 é possível verificar que a produção de lamas tem vindo a sofrer um decréscimo a partir de 2010, mas continuam a representar uma grande percentagem do total de resíduos produzidos.

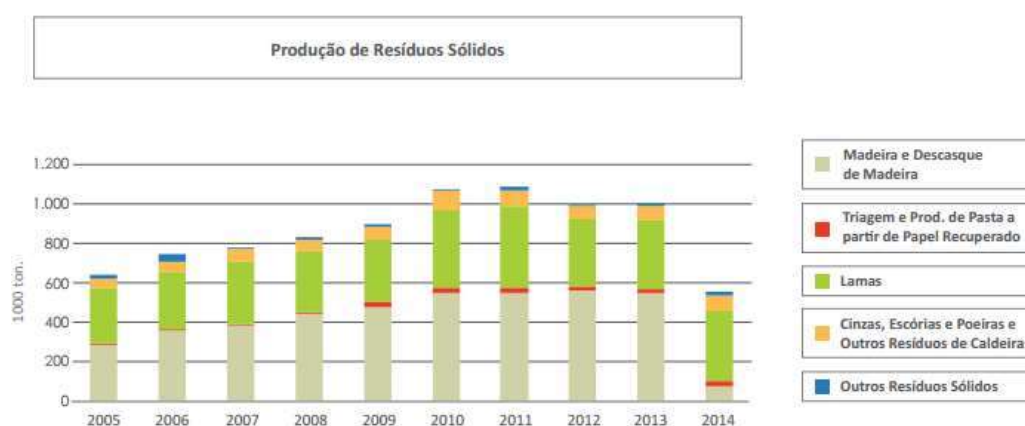


Figura 7.18

Fonte: CELPA

Figura 2.1 - Produção de resíduos sólidos [4].

De modo a poder gerir estes resíduos sólidos, lamas do tratamento de efluentes líquidos provenientes da indústria da pasta do papel, existem várias alternativas. Sendo que, as que têm vindo a ser mais utilizadas são os aterros, aplicação em solos agrícolas e incineração. Nos últimos anos, tem havido um aproveitamento das lamas para a produção de energia térmica[4].

### 2.2.1 Deposição em aterros

A utilização dos aterros para a eliminação dos resíduos tem sido o método mais adotado pelas fábricas de pasta de papel. Cerca de 70-75% dos resíduos sólidos são depositados em aterros. Entretanto as capacidades dos aterros começam a ser escassas, principalmente em países que possuem uma elevada densidade populacional. Para além da escassez começam a ser cobradas elevadas taxas para a deposição de resíduos no aterro, referindo também o elevado impacto ambiental, sendo que em média, 1 ton de lamas liberta para a atmosfera aproximadamente 2.69 tons de CO<sub>2</sub>, e 0.24 ton de CH<sub>4</sub>. Outro fator também preocupante,

relativamente a deposição em aterro, trata-se da elevada probabilidade de contaminação dos lençóis de água e libertação de mau cheiro para a vizinhança, afetando assim a saúde pública.

Posto isto, de entre as várias opções para o tratamento dos resíduos sólidos provenientes das fábricas de papel, a deposição em aterros é a menos aconselhável devido aos riscos existentes, tanto para o ambiente como para a saúde pública [5].

### **2.2.2 Aplicação nos Solos (Compostagem)**

A aplicação nos solos, também conhecido como processo de compostagem, é definido como a degradação biológica aeróbica controlada dos resíduos orgânicos até que estes estabilizem, podendo estes ser acelerados pelo homem. É um processo no qual os microrganismos são decompostos, libertando por sua vez  $\text{CO}_2$ , vapor de água e energia sobre a forma de calor.

A utilização de lamas primárias e secundárias para este método representa uma mais-valia, visto que estas são ricas em material orgânico e nutrientes, como azoto e fósforo. No entanto, é necessário ter em conta a quantidade de lama a adicionar, consoante o tipo de cultura e de solo [5].

### **2.2.3 Aproveitamento energético**

A inceneração das lamas tem sido uma alternativa adotada pelas empresas ao longo do tempo. A inceneração dos resíduos apresenta várias vantagens, uma vez que é possível a destruição do material orgânico presente nas lamas, reduzindo assim o volume a ser colocado em aterros podendo, também, ser um benefício económico[6].

De um modo geral, a combustão de resíduos consiste na oxidação dos comburentes presentes nestes resíduos. Estes resíduos aparentam um aspeto heterogéneo constituído por substâncias orgânicas, minerais metais e água.

Para que haja uma combustão eficiente, é necessário que o rácio de oxigénio a fornecer ao combustível seja o mais adequado, para este tipo de combustível, com vista a reduzir o número de emissões [7].

Uma alternativa à inceneração dos resíduos trata-se de aproveitar o calor gerado pela queima destes para aproveitamento energético.

Este aproveitamento energético pode ser feito com base na tecnologia de leito fluidizado e grelhas fixas. Estes sistemas são os mais indicados para este tipo de combustão, visto que possuem uma maior flexibilidade relativamente ao tipo de combustível e teor de humidade [6].

## **2.3 Propriedades do Combustível**

O modo como a biomassa vai ser utilizada irá variar consoante o tipo, características físicas e composição química. Os principais componentes deste tipo de combustível são o carbono, hidrogénio e oxigénio[8].

Comparando a biomassa com o carvão, esta possui um maior número de voláteis e um conteúdo menor de carbono, resultando assim num combustível muito reativo e com um baixo poder calorífico inferior (PCI)[8].

### **2.3.1 Teor de humidade**

É o teor de humidade presente na biomassa que irá determinar o seu valor energético uma vez que, quando esta é queimada, parte da energia irá ser utilizada para evaporar a água presente no combustível. Ou seja quanto mais seca for a matéria-prima maior é a quantidade de energia [9].

Um elevado teor de humidade pode trazer vários problemas, como de ignição e de redução de temperatura de combustão da biomassa. Ou seja, um combustível com um elevado teor de humidade leva a um maior consumo de combustível, afetando a qualidade dos gases de pirólise [10].

### **2.3.2 Teor de voláteis**

De um modo geral, a biomassa possui um elevado número de voláteis. Estes podem ser divididos em hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogénio, humidade e alcatrões.

Devido à existência de um elevado número de voláteis torna-se mais fácil ocorrer a sua ignição [10].

### **2.3.3 Teor de Cinzas**

As cinzas são a fração inorgânica e não comburentes do combustível.

O material inorgânico está dividido em duas partes, material inerte e outros que são adicionados ao combustível durante o seu processamento, podendo estes ser vestígios de solo presente na biomassa, podendo assim resultar numa maior fração de cinzas.

Os inertes normalmente presentes na combustão de biomassa são Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S e P, variando a concentração de cada um para cada tipo de biomassa. É preciso ter em conta que um combustível com um elevado teor de cinzas irá afetar o poder calorífico.

Combustíveis que contenham cinzas ricas em material alcalino resultam em cinzas com baixa temperatura de fusão, resultando numa aglomeração. Já o Mg e Ca aumentam a temperatura de fusão das cinzas [10].

#### **2.3.4 Poder calorífico**

O poder calorífico pode ser definido como poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior é avaliado na energia contida na biomassa em base seca. O poder calorífico inferior é calculado através da subtração da energia necessária para evaporar a humidade do combustível [10].

Por norma a biomassa possui poderes caloríficos baixos quando comparados aos combustíveis convencionais.

### **2.4 Combustão**

#### **2.4.1 Combustão de Biomassa**

A combustão de biomassa tem vindo a ser utilizada como alternativa para a produção de calor e energia nos processos industriais.

Este processo envolve um elevado número de processos químicos e físicos de elevada complexidade. A combustão da biomassa irá depender do modo de como é realizada e das características do combustível.

O processo de combustão é dividido em 4 fases, sendo estas:

- Secagem;
- Pirólise (desvolatilização);
- Gasificação;
- Combustão;

De um modo geral, o processo de combustão pode ser um processo contínuo ou por lotes. O processo contínuo é efetuado normalmente em fábricas de média escala ou superior, enquanto o processo por lotes é efetuado em fábricas de pequena escala. O fluxo de ar em ambos os processos pode ocorrer de forma natural ou forçada.

Os processos de secagem e gasificação são as primeiras etapas do processo de combustão. No entanto, a importância de cada um destes processos irá variar consoante as tecnologias, combustíveis utilizados e condições do processo de combustão [11].



## 2.4.2 Combustão de Lamas

A combustão de lamas dá-se de forma semelhante à da biomassa, passando por secagem, pirólise (desvolatilização), e combustão de voláteis e carbonizados. Segundo *Hang Cui et. al*, quando a taxa de aquecimento é rápida, estes processos podem acontecer todos em simultâneo. No entanto, caso a taxa de aquecimento seja lenta estas reações ocorrem em estados diferentes.

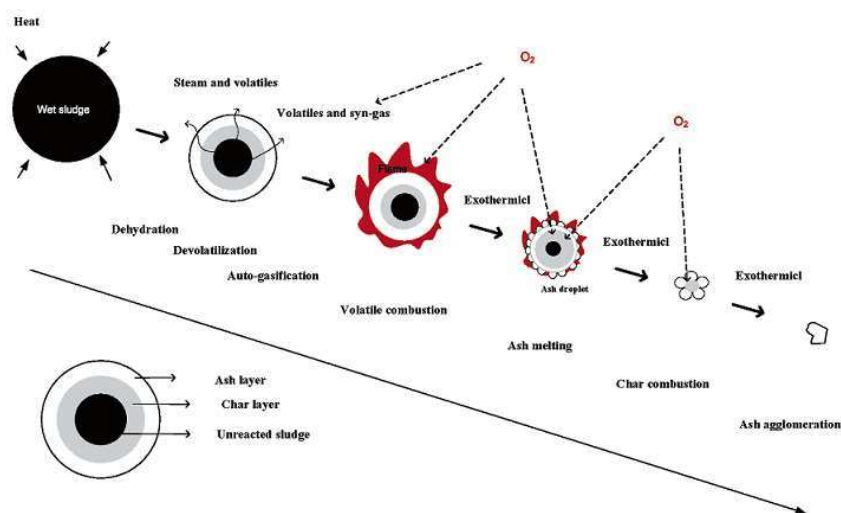


Figura 2.2 - Esquema da combustão de lamas [12].

Foi observado que durante a pirólise existem dois estágios de perda de massa. No primeiro esta perda é dada pela desidratação das lamas devido à secagem, no segundo estado seria devido ao desvolatilização ou pirólise das espécies orgânicas.

Foi então possível verificar que o processo de combustão das lamas pode ser descrito como desidratação e desvolatilização, sendo que estes processos ocorrem simultaneamente indo da superfície exterior para a interior. No entanto, os voláteis e vapor produzidos ocorrem do interior para o exterior [13].

O elevado teor de humidade e voláteis presentes nas lamas influencia as características de combustão [12].

## 2.5 Tecnologias de combustão

A combustão da biomassa envolve um número de aspetos químicos e físicos de elevada complexidade. A natureza da combustão irá variar consoante o tipo de biomassa e tecnologia utilizada.

De um modo geral, as técnicas utilizadas para a combustão de biomassa podem ser distinguidas como leito fixo e leito fluidizado.

Na combustão de leito fixo são utilizados fornos de grelha fixa, móvel, vibratória e rotativa. O desempenho destas tecnologias irá variar consoante as características do combustível utilizado, sendo necessário avaliar qual o melhor combustível a utilizar em cada grelha [11].

Por fim, temos a combustão de leito fluidizado, será esta a tecnologia utilizada para a realização deste trabalho. Este sistema consiste num corpo cilíndrico com um determinado número de injetores na sua base. O interior deste reator é composto por duas partes. O leito, sendo este constituído por areia de sílica ou dolomite, e o *freeboard* que se trata do espaço acima do leito [8].

### 2.5.1 Leito Fixo

Como referido no ponto anterior, a combustão em leito fixo, pode ser realizada em grelhas fixas, móveis, rotativas e vibratórias.

Este tipo de caldeira é apropriado para combustíveis com um elevado teor de humidade, alto teor de cinzas e diferentes tamanhos de partículas.

A combustão de misturas de combustíveis é possível neste tipo de caldeiras. No entanto, este tipo de combustão é aconselhável em apenas alguns tipos de leito fixo, grelhas vibratórias ou rotativas, tendo estas de garantir a mistura do combustível ao longo da grelha.

O bom dimensionamento e controlo da grelha garante uma distribuição homogénea do combustível. Sendo isto relevante para que haja uma adição homogénea de ar primário nas várias superfícies da grelha [11].

### 2.5.2 Leito fluidizado

Na combustão de leito fluidizado, o combustível é queimado num leito quente de material inerte, sendo mantido em suspensão pelo fluxo ascendente do ar de combustão que é injetado pelo fundo do combustor. Devido ao leito melhorar as transferências de calor e de massa, faz com que seja possível tanto aumentar o rácio de conversão do combustível como transferir o calor para as superfícies de aquecimento.

Existem dois tipos de leito fluidizado, leito fluidizado borbulhante e circulante. No primeiro as velocidades de fluidização são lentas, criando um leito borbulhante na parte inferior do reator. No segundo, as velocidades de fluidização aumentam até ao ponto onde não existe uma transição distinta entre o leito e o *freeboard* [14].

### **2.5.2.1 Leito Fluidizado Borbulhante**

No leito fluidizado borbulhante, o leito está localizado na parte inferior da fornalha. Para que se possa fluidizar o leito é adicionado ar primário através de vários injetores presentes no fundo da caldeira [15].

O ar secundário é adicionado na parte superior ao leito (*freeboard*) através de um bocal que é inserido pelo topo. Neste tipo de sistemas o leito tem de ser aquecido, seja por fonte interna ou externa, até atingir uma temperatura de 500°C. Só depois será então possível adicionar o combustível.

O processo de combustão num LFB ocorre maioritariamente no leito e as suas emissões de SO<sub>x</sub> são reduzidas quando é adicionado calcário à combustão [14].

O leito fluidizado borbulhante apresenta uma grande flexibilidade relativamente ao conteúdo de humidade presente na biomassa, permitindo assim a sua combustão de biomassa com um elevado teor de humidade [16].

Dado que nestes sistemas o combustível possuiu um tempo de residência elevado, permite que haja uma elevada taxa de conversão [14].

### **2.5.2.2 Leito fluidizado circulante**

Os leitos fluidizados circulantes por norma funcionam com velocidades de fluidização de 5 a 10 m/s e as partículas têm um diâmetro de 0.1-0.6 mm. O ar de fluidização representa 50-70% do ar de combustão sendo o restante injetado como ar secundário. A temperatura de leito por norma encontra-se entre os 750-900 °C. Uma vez que, o leito fluidizado circulante possuiu uma elevada eficiência de mistura é possível obter um número baixo de emissões de CO.

A combinação da baixa necessidade de excesso de ar e temperatura baixas resulta numa redução das emissões de NO<sub>x</sub>. Este tipo de reatores permite, também, a dessulfurização através da adição de cal no leito.

No entanto, as emissões de N<sub>2</sub>O são elevadas devido às baixas temperaturas de combustão [14].

### **2.5.3 Co-combustão**

A co-combustão significa a combustão simultânea de dois combustíveis ou mais e pode ser realizada em qualquer tipo de queimador, esta tem vindo a ser utilizada através da mistura de carvão com biomassa. No entanto, ultimamente, tem surgido estudos que referenciam a utilização de biomassa com lamas.

Neste tipo de combustão é necessário ter em atenção as características do combustível secundário a adicionar, pois este pode conter um elevado teor de cinzas, humidade, assim

como também elevados teores de potássio, que com as temperaturas elevadas no leito podem levar a criação de aglomerados, podendo influenciar a queima da mistura. O rácio de combustível primário e secundário a adicionar à mistura permite controlar o impacto do combustível secundário no desempenho da combustão [17].

## **2.6 Emissões**

Da combustão num leito fluidizado resultam vários poluentes, sendo eles o CO, HCl, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos e metais pesados.

### **2.6.1 Monóxido de Carbono (CO)**

O monóxido de carbono resulta da combustão incompleta dos componentes que têm como base o carbono [18].

Uma elevada concentração de monóxido de carbono nos gases de combustão está diretamente relacionada com um elevado caudal de alimentação para o excesso de ar atual, o que resulta numa baixa eficiência de conversão do carbono. Ou seja, de modo a ser possível diminuir os níveis de CO nos gases de combustão, é necessário manter um nível de excesso de ar alto. Fornecendo assim uma quantidade necessária de oxigénio, de modo a obter uma elevada taxa de conversão de carbono [18].

### **2.6.2 Óxidos de Azoto (NO<sub>x</sub>)**

As lamas possuem um elevado teor de azoto, o que resulta num elevado número de emissões de NO<sub>x</sub> e N<sub>2</sub>O.

Os óxidos de azoto são emitidos como óxidos nítrico, sendo responsáveis por 95% das emissões de NO<sub>x</sub>. O controlo destas emissões pode ser feito através de mudanças na combustão, estando estas relacionadas com o controlo da alimentação de ar ou do combustível. Sendo que o princípio base desta base trata-se de controlar a disponibilidade do oxigénio, uma vez que as emissões de NO<sub>x</sub> estão correlacionadas com o excesso de oxigénio [15].

### **2.6.3 Óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>)**

De modo a poder reduzir as emissões de SO<sub>x</sub>, é efetuado o processo de dessulfurização. Este processo é possível quando o combustível sólido apresenta diferentes formas de pirite. Outra forma seria através da oxidação do enxofre a SO<sub>2</sub>, uma vez que este apresenta uma reação ácida quando na presença de substâncias alcalinas, sendo assim possível a sua neutralização e formação de sais, que podem ser removidos em conjunto com as escórias ou cinzas volantes [19].

### 2.6.4 Ácido Clorídrico (HCl)

A presença de HCl nos gases de combustão pode trazer graves problemas de corrosão no reator e na zona de pós-combustão. De modo a ser possível reduzir a presença de HCl nos gases de exaustão são adicionados compostos à base de cálcio, como CaO, NaHCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>. A sua adição é feita diretamente no leito dentro das temperaturas de combustão para as lamas, podendo assim capturar o ácido clorídrico transformando em CaCl<sub>2</sub> [18].

## 2.7 Revisão bibliográfica de estudos realizados

De modo a poder compreender melhor o comportamento das lamas durante a sua combustão, foi realizada uma pesquisa bibliográfica. Na Tabela 2.2 estão representadas as características dos combustíveis utilizados em estudos realizados

Tabela 2.2 – Revisão dos resultados obtidos na bibliografia pesquisada.

Lamas	Humidade (%)	Cinzas (%)	PCI (MJ/kg)
<i>Ogada et Werther (1996)</i>	76	43.9	1.098
<i>M. Hartman et. Al (2005)</i>	1.2	67.79	6.73
	2.93	50.17	10.24
<i>D.shin et al. (2005)</i>	14, 25, 35, 45 e	40.77	5.49
	62		
<i>Nils Skoglund et. al (2015)</i>	37.16	6.56	10.04
	43.16	7.08	8.67

Um estudo realizado por *Ogada et Werther*, teve como objetivo estudar os tempos de secagem, desvolatização, combustão de carbonizados e o comportamento a temperatura ao longo de todos estes processos.

Para poder determinar os fatores acima referidos foram utilizadas partículas únicas de lama com um diâmetro de 18 mm e  $W_w = 76\%$ . Também foram utilizadas lamas secas, tendo estas passado por um processo de secagem durante um período de 24 h a 100°C.[20]

Após realizados os ensaios, verificou-se que à medida que se aumenta o diâmetro das partículas de lamas húmidas, o seu tempo de desvolatização também aumenta. É de notar, que a desvolatização começa a ocorrer ao mesmo tempo que a secagem, embora o período de desvolatização seja superior ao da secagem [20].

Relativamente à libertação do carbono juntamente com os voláteis foi obtido um resultado de 79% e 69%, para as lamas húmidas e secas, respetivamente. Ao aumentar a temperatura de desvolatização verificou-se no global um aumento de 46-60% para 70-80%.

Foi, também, determinada a concentração de carbonizados presentes no leito. Esta concentração variou entre 150 e 50 g m<sup>-3</sup>, tendo-se verificado que à medida que se aumentava

a temperatura do leito de 750 para 830 °C, menor era o número de carbonizados presentes neste.

Outra experiência realizada por *M. Hartman et al* tinha como objetivo estudar a relação entre os gases poluentes presente no gás de combustão com a temperatura de *freeboard* e *overbed burning*, para lamas pré-secas.

Foi observado que as emissões de CO e COV reduziam quando a temperatura do leito era aumentada tanto para o lote 1 como para o lote 2.

Relativamente às emissões de N<sub>2</sub>O, estas reduziam nos gases de exaustão quando o reator aumentava a temperatura. Foi verificado que quanto maior a temperatura de *freeboard* maior a redução das emissões de N<sub>2</sub>O e CO.

Num estudo realizado por *D.shin et al.*, com o objetivo de estudar as características de combustão das lamas provenientes da indústria do papel no leito fluidizado circulante com um ciclone interno, foi observado o efeito da alimentação de massa com vários teores de humidade. Verificou-se que à medida que o teor de humidade aumenta o tempo de conversão também aumenta devido à evaporação da humidade presente no combustível, atrasando assim o processo de combustão.

Foi, também, estudado o efeito do ar secundário na combustão. Foi verificado que para lamas com um teor de 35% de humidade à medida que o ar secundário aumentava a taxa de conversão do carbono também aumentava.

Relativamente as emissões de CO e CO<sub>2</sub>, à medida que o ar secundário aumentava as emissões de CO diminuía, enquanto as de CO<sub>2</sub> aumentavam. O mesmo ocorre para as emissões de NO<sub>x</sub>, sendo que estas também diminuía à medida que o ar secundário aumenta [21].

Numa experiência realizada por *Nils Skoglund et. Al*, com o objetivo de determinar os aglomerados da co-combustão de estilha com lamas municipais num leito fixo, foram estudados dois tipos de mistura, uma em que o combustível tinha 35% de lamas e outra em que tinha 45%. Verificou-se que ao utilizar as misturas de combustíveis, o funcionamento de mecanismo de alimentação comportou-se de forma diferente, sendo necessário ajustar os parâmetros para o novo tipo de combustível. Também, foi necessário aumentar o ar primário para que fosse possível melhorar a combustão da mistura dos combustíveis.

Foi também verificado, que as emissões de NO<sub>x</sub> não foram um problema. No entanto, as emissões de SO<sub>2</sub> foram muito elevadas ultrapassando os limites permitidos por lei de 92 (mg/Nm<sup>3</sup> a 6% de O<sub>2</sub>) [22].

### 3 Metodologia

Neste capítulo é apresentada uma descrição da metodologia experimental utilizada para a realização das experiências de combustão.

#### 3.1 Descrição do sistema experimental

##### 3.1.1 Reator de leito fluidizado

A infraestrutura experimental utilizada neste trabalho é composta pelo sistema reativo, sistema de amostragem e análise gasosa e o sistema de controlo e aquisição de dados (Figura 3.1). O sistema tem como base um reator de leito fluidizado à escala piloto constituído por um corpo cilíndrico com um diâmetro de 0.25 m e uma altura total de 3 m, com uma câmara de combustão de 2.5 m de altura. Em regime de combustão, o reator pode operar com uma potência térmica até 20 kW<sub>th</sub>.



Figura 3.1 - Leito Fluidizado Borbulhante à escala piloto.

Na Figura 3.2, esta apresentada uma representação esquemática do reator de leito fluidizado.

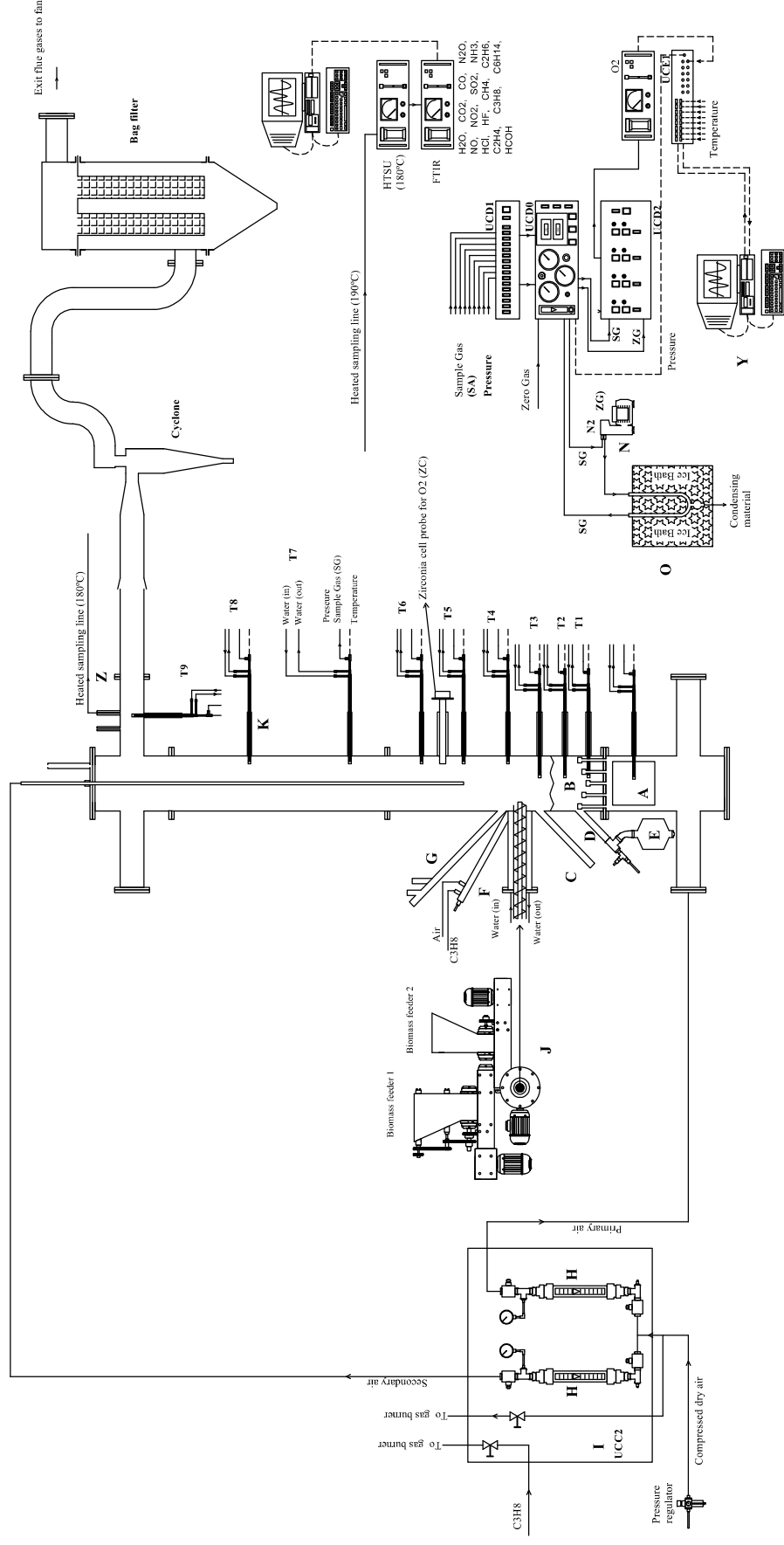


Figura 3.2 - Representação esquemática do sistema experimental piloto. Legenda: Linha Tracejada – Circuito elétrico, Linha Contínua – Circuito Pneumático, A– Sistema de aquecimento do ar primário, B - Leito de areia, C – Nível de controle dos sólidos do leito, D – Local de descarga dos sólidos do leito, E – Silo de descarga dos sólidos do leito, F – Queimador do gás propano, G – Pórtico para a visualização da superfície do leito, H –Medidor de fluxo de ar (primário e secundário), I – Unidade de Controle e Comando (UCC2), J – Alimentadores de Biomassa, K – Sonda de amostragem de gás arrefecida com água, L, M, P, Q – Unidades de comando e distribuição de gás (UCD0, UCD1, UCD2, UCD3), N – Bomba de amostragem gasosa, O – Unidade de condensação do gás para a remoção da humidade, R, S, T, U, V, W – Analisadores automáticos de gás, X – Unidade de comando eletrônica (UCE1), Y – Computador de aquisição data e sistema de controle e Z – Canal de exaustão para o ciclone.



A câmara de combustão possui na sua base uma placa de distribuição composta por 19 injetores com um total de 57 orifícios para injeção de ar primário. A adição de ar secundário é feita 1.1 m acima da placa de distribuição.

O leito de reator é constituído por areia, composta maioritariamente por sílica. A areia é peneirada manualmente, através da utilização de peneiros ASTM, de modo a que o leito contenha partículas com diâmetro na gama 0.125 mm a 1 mm. Este leito apresenta 20 kg e encontra-se assente na placa distribuidora, constituindo um leito fixo com 0.20 m de altura acima dos injetores.

A operação do reator é assegurada por um conjunto de equipamentos e acessórios, incluindo uma unidade de controlo e comando (UCC2) que é responsável pelo suporte dos circuitos elétricos, pelo controlo dos caudais de ar de combustão e pelo controlo do pré-aquecimento do reator, composto por um queimador a gás propano.

Fazem também parte do sistema reativo o sistema de alimentação de biomassa e o sistema de refrigeração.

### **3.1.2 Sistema de Alimentação**

O sistema de alimentação de biomassa (Figura 3.6) é composto por dois silos. Na base de cada um dos quais existe um sem-fim operado por um moto-redutor elétrico com controlo de velocidade de rotação regulável, permitindo debitar um caudal de combustível sólido, previamente especificado numa dada gama, e de acordo com as condições de estequiometria definidas para cada experiência. Consoante a mistura combustível utilizada nas experiências foi necessário utilizar uma combinação sem-fim/moto-redutor adequado ao caudal de alimentação necessário.

O processo de calibração do sistema de alimentação foi realizado com base num método que consistiu em quantificar a massa de biomassa debitada num determinado período de tempo e para uma dada velocidade de rotação do sem-fim. Dessa forma, obtiveram-se curvas de calibração de diferentes tipos de combustíveis, sendo estes a estilha de eucalipto (Figura 3.3), o destocado de biomassa florestal (Figura 3.4) e *pellets* Pinewells (Figura 3.5)

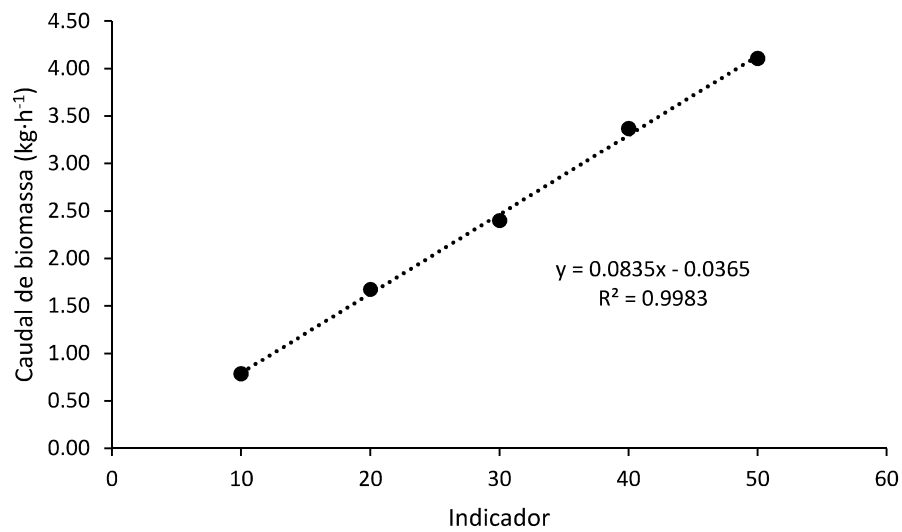


Figura 3.3 - Curva de calibração para motor de 0.18kW e redutor de rotações 1:50. Combustível utilizado para calibração: Estilha de eucalipto.

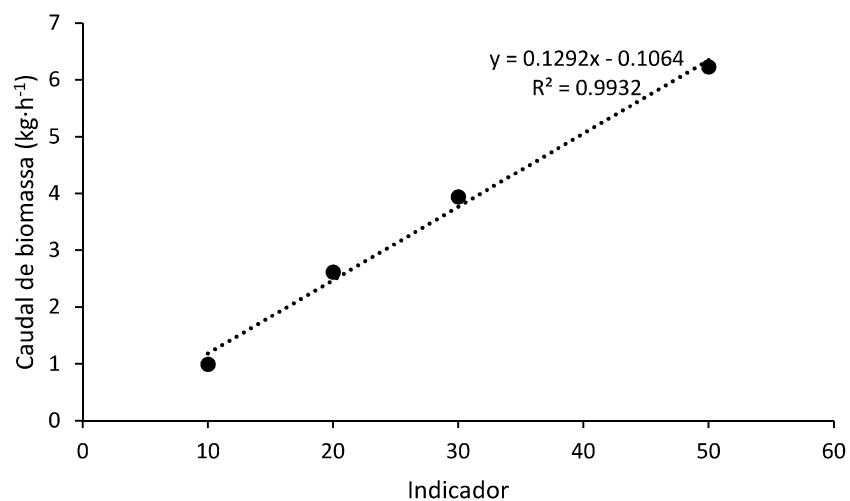


Figura 3.4 - Curva e calibração para motor de 0.18kW e redutor de rotações 1:50. Combustível utilizado para calibração: Destroçado de biomassa florestal residual.

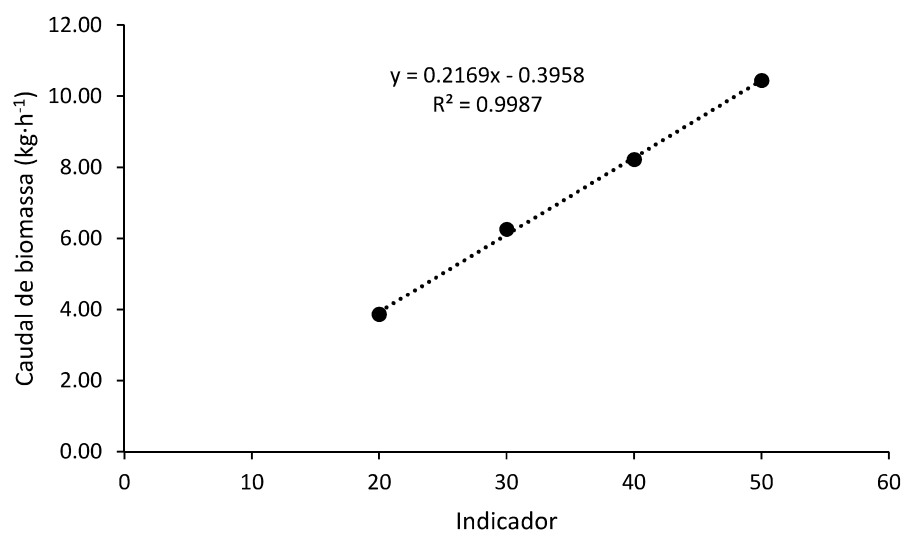


Figura 3.5 - Curva de calibração para motor com 0.18kW e redutor de rotações 1:100. Combustível utilizado para calibração: *Pellets* Pinewells.

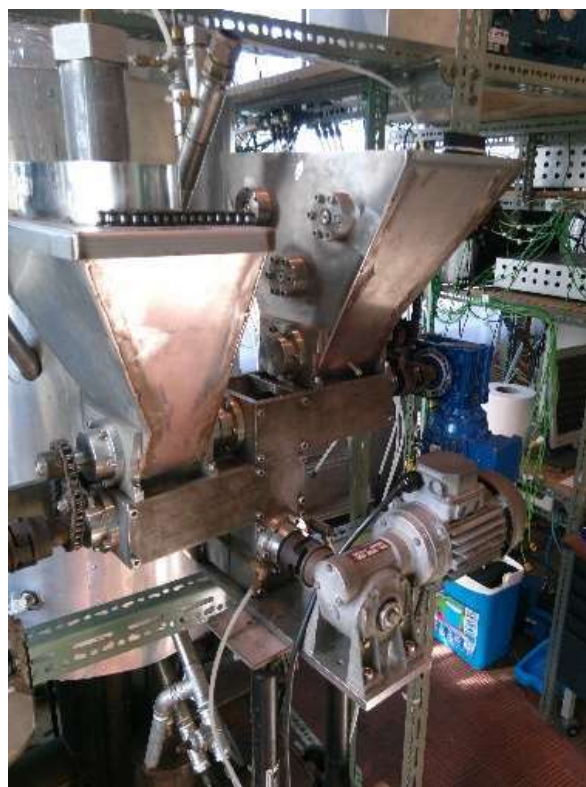


Figura 3.6 - Sistema de alimentação de biomassa.

### 3.1.3 Sistema de refrigeração

Devido às elevadas temperaturas de operação do sistema de combustão, é necessário dispor de um sistema de refrigeração que garanta o controlo da temperatura de operação do reator na gama desejada.

Este sistema é composto por um reservatório de 100 litros de capacidade, um reservatório de amortecimento de 70 litros, que se encontra pressurizado (2 a 4 bar), uma bomba de água e oito sondas que têm como função extrair calor na região do leito de modo a permitir o controlo da sua temperatura na gama de operação selecionada.

Este sistema de refrigeração permite ainda assegurar o arrefecimento das sondas de amostragem, de modo a garantir o *quenching* de reações, permitindo também realizar a condensação de vários compostos indesejados (p.e., vapor de água, orgânicos) e condicionar o gás de amostragem, para posterior caracterização em analisadores de gás on-line [23].

Também faz parte do sistema de refrigeração um permutador de calor situado a 1.3m da placa distribuidora e operado com um caudal de água de cerca  $0.6\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ . O fluido de refrigeração (água) entra no permutador a  $16^{\circ}\text{C}$  e sai a  $80^{\circ}\text{C}$ .



Figura 3.7 – Torre de arrefecimento.

### 3.1.4 Sistema de Despoeiramento

O sistema de despoeiramento utilizado na instalação de combustão em leito fluidizado consiste num ciclone seguido de um filtro de mangas (Figura 3.8).

O ciclone e o filtro de mangas são utilizados na instalação para remover as partículas de cinzas volantes presentes no efluente gasoso e, em algumas circunstâncias, para recolher amostras de cinzas para posterior caracterização.



(a)



(b)

Figura 3.8 – a) Filtro de mangas; b) Ciclone.

### 3.1.5 Sistemas de Monitorização e análise gasosa

A amostragem de gases de combustão e respetiva caracterização (pressão, temperatura e composição química) é realizada por um conjunto de sondas de amostragem (aquecidas e arrefecidas), unidades de condicionamento de amostra gasosa e analisadores de gás on-line. A pressão e temperatura dos gases no reator é monitorizada por meio de 9 sondas localizadas em diferentes pontos ao longo do reator. Estas sondas são arrefecidas em água, estando equipadas com um termopar tipo K e na sua extremidade posterior, localizada no interior do reator, possuem um filtro de lã cerâmica, de modo a ser possível reter as partículas presentes no efluente gasoso quando se realiza a amostragem de gás. Na extremidade anterior, localizada no exterior do reator, a sonda dispõe de um filtro-condensador mergulhado em água líquida, em equilíbrio com gelo, e que permite condensar o vapor de água e compostos orgânicos presentes no efluente gasoso e pré-condicionar o gás para posterior caracterização (como gás seco) em analisadores on-line.

O gás de combustão após devidamente condicionado para remoção de humidade e partículas é encaminhado para um analisador de gases marca ADC modelo 700 (Figura 3.9), de modo a determinar a concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$  nos gases de combustão secos.



Figura 3.9 - Analisador on-line de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CO$ .

A composição do efluente gasoso é realizada também utilizando uma linha de amostragem aquecida ( $180^{\circ}C$ ) e um analisador FTIR Gasmet (Continuous Emissions Monitoring System) (Figura 3.10). Neste caso, é possível determinar a composição do efluente gasoso em termos de gases húmidos e para os seguintes compostos de  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $CH_4$ .

Os dados de pressão, temperatura e composição do efluente gasoso são recolhidos num sistema automático de aquisição de dados, ao qual se encontra conectados os diversos sistemas de análise.



Figura 3.10 - Analisador FTIR (CEM - Continuous Emissions Monitoring System, GASMET).

### 3.2 Manutenção da instalação

Após a realização das experiências é necessário realizar a manutenção da instalação, para que seja possível manter o seu estado de operação adequado ao longo do tempo. Para o efeito, no fim de cada experiência são realizadas manutenções periódicas. Estas manutenções incluem a limpeza do reator, limpeza das sondas e renovação do leito.

No início do trabalho experimental foi necessário proceder à limpeza das sondas (Figura 3.11) de amostragem e de refrigeração do reator, de modo a evitar entupimentos no circuito de água que garante o arrefecimento da sonda, e consequente diminuição da capacidade de extração de calor aquando da sua utilização para controlo da temperatura do leito. Para efetuar a limpeza do circuito de água das sondas e remover possíveis incrustações utilizou-se ácido clorídrico (HCl).





Figura 3.11 - Limpeza de sondas com HCl.

No contexto das atividades de manutenção da instalação de combustão em leito fluidizado, foi realizada a substituição do isolamento da parte superior do reator (Figura 3.12). O material utilizado na substituição do isolamento foi lã de rocha e lã cerâmica, estando esta última localizada na parte interior do isolamento e em contacto com o corpo de aço.



Figura 3.12 - Progresso da substituição do isolamento na parte superior do reator.

### 3.3 Preparação do combustível

Dada a heterogeneidade da biomassa florestal residual resultante de processos de destroçamento e estilhamento, foi necessário realizar a seleção de amostras de biomassa com



tamanhos de partículas adequados ao sistema de alimentação do reator de leito fluidizado à escala piloto. Para o efeito, após destroçamento/estilhamento a biomassa foi crivada para frações com tamanho de partícula inferior a 5mm e noutros casos abaixo de 10 mm. Na Figura 3.13 é apresentado o aspeto final dos combustíveis.

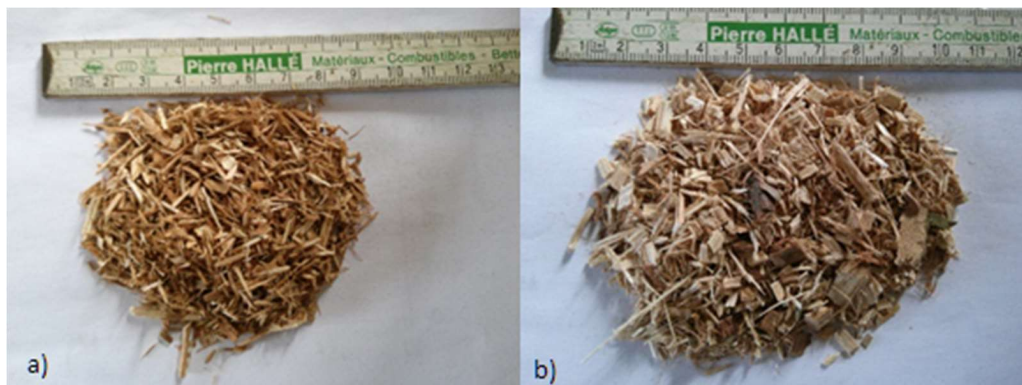


Figura 3.13 - a) Fração fina resultante do processo de produção de estilha de eucalipto para a indústria da pasta e papel; b) Destroçado de Biomassa Florestal Residual.

Uma vez que a fração fina de estilha e o destroçado de biomassa florestal não permitiam uma alimentação estável do combustível, foi necessário produzir *pellets*, com o objetivo de melhorar as condições de alimentação do combustível. Nas figuras (Figura 3.14 e Figura 3.15) são apresentados alguns exemplos dos *pellets* produzidos.

As lamas primárias e biológicas que foram utilizadas nas experiências de combustão são apresentadas na Figura 3.16. Dado que o teor de teor de humidade nestas lamas é elevado, foi necessário proceder à secagem de lotes de cada tipo de combustível, para posterior utilização nas experiências. Esta secagem foi realizada às condições atmosféricas.



Figura 3.14 a) *Pellets* Pinewells; b) *Pellets* de mistura de biomassa florestal residual e estilha.



Figura 3.15 a) *Pellets* de casca de Eucalipto (Tipo 2); b) *Pellets* de biomassa florestal residual.



Figura 3.16 - a) Lamas biológicas; b) Lamas primárias.

No desenvolvimento e compreensão do processo de combustão é necessário saber as características de cada combustível, uma vez que o modo de operação do reator e desempenho do processo de combustão é influenciado pelas características do combustível a ser utilizado. Entre as propriedades mais relevantes do combustível, encontram-se aquelas que podem ser determinadas pela sua análise imediata e análise elementar.

De modo a poder caracterizar o combustível, foi determinado o seu teor de humidade, voláteis e cinzas, de acordo com as normas técnicas CEN/TS 14774-1, CEN/TS 14775 e CEN/TS 15148.

### 3.4 Experiências de combustão

O reator de leito fluidizado operou numa gama de temperatura entre de 600 a 1000 °C, com um excesso de ar que variou consoante a experiência, e na gama 40% a 70%. O ar de combustão era admitido em dois estágios, ar primário e ar secundário. O caudal de ar primário foi mantido a 200 NL·min<sup>-1</sup>, e o ar secundário a 50 NL·min<sup>-1</sup>.

As temperaturas no interior do reator foram monitorizadas através de nove sondas localizadas em diferentes alturas do reator.

Na Tabela 3.1 estão representadas todas as experiências de combustão e co-combustão em leito fluidizado borbulhante realizadas neste trabalho.

Tabela 3.1 - Experiências de combustão realizadas neste trabalho.

Referência da Experiência	Designação do combustível	Composição da mistura combustível (% em massa)	Caudal médio de biomassa (kg·h <sup>-1</sup> )	Caudal de ar atual (NL·m <sup>-1</sup> )
E	Estilha de madeira eucalipto (E)	100	2.54	250
ELB5	Estilha de madeira eucalipto (E) Lamas Biológicas (LB)	95 5	2.78	250
ELB10	Estilha de madeira eucalipto (E) Lamas biológicas (LB)	90 10	3.11	250
BFLB10	Estilha de biomassa florestal residual (BF) Lamas biológicas (LB)	90 10	2.84	250
PC1LB10	<i>Pellets</i> de casca de eucalipto (Tipo 1) (PC1) Lamas biológicas (LB)	90 10	2.99	250
PBFLB10	<i>Pellets</i> de destroçado de biomassa florestal (PBF) Lamas biológicas (LB)	90 10	2.67	250
PFLB10	<i>Pellets</i> de finos (<1mm) da trituração de BF (PF) Lamas biológicas (LB)	90 10	2.73	250
EP	<i>Pellets</i> Pinewells (P) <i>Pellets</i> de casca de eucalipto (PC) <i>pellets</i> BF+E	100 100 100	3.01 2.73 2.55	250
PBFLP5	<i>Pellets</i> de mistura de estilha biomassa florestal e estilha de eucalipto (PBF+E) Lamas primárias (LP)	95 5	2.68	250
PC2LB10	<i>Pellets</i> casca de eucalipto (Tipo 2) (PC2) Lamas biológicas (LB)	90 10	3.21	250
PC2LP5	<i>Pellets</i> de casca de eucalipto (PC2) Lamas primárias (LP)	95 5	3.23	250

Nas experiências onde ocorria mistura de combustíveis, optou-se por numa fase inicial alimentar durante um intervalo de 60 minutos apenas biomassa antes de iniciar a alimentação da mistura de combustíveis. O objetivo desta metodologia foi avaliar o impacto que as lamas provocam no funcionamento dos alimentadores de combustível sólido e no desempenho do processo de combustão.

## 4 Resultados

Neste capítulo é apresentado um conjunto de resultados relativos às características dos diversos tipos de biomassa utilizados nas experiências de combustão, secagem de lamas e experiências de combustão.

### 4.1 Características da biomassa utilizada como combustível

Na Figura 4.1 é apresentada informação relativa à análise imediata (humidade, cinzas, voláteis e carbono fixo) dos vários tipos de biomassa florestal e lamas (primárias e biológicas) utilizadas neste trabalho.

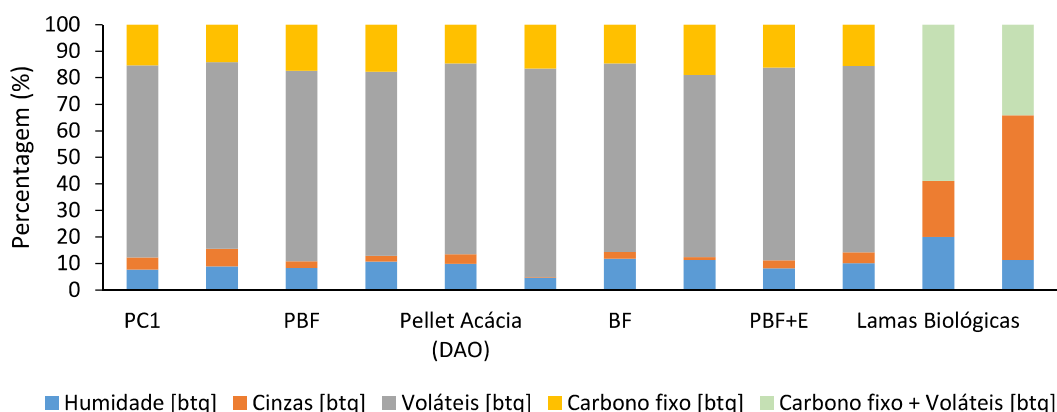


Figura 4.1 – Análise imediata dos vários combustíveis utilizados. Os valores são apresentados em base tal e qual (btq).

Na Tabela 4.1 estão representadas as características dos combustíveis utilizados, considerando parâmetros relativos à análise imediata, e para alguns deles também valores relativos à análise elementar.

As lamas biológicas são resultantes do processo de tratamento de efluentes líquidos na indústria da pasta de papel, e a sua composição em termos de elementos químicos inorgânicos é apresentada na Figura 4.2; a identificação destes elementos químicos inorgânicos nas lamas é de particular relevância no contexto do processo de combustão. Verifica-se que a maior fração de matéria inorgânica nas lamas é composta por Cálcio, o que pode ter particular interesse durante o processo de combustão de biomassa em leito fluidizado, pois é reconhecida a utilização de compostos à base de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ) para mitigar a emissão de alguns poluentes gasosos durante o processo [18][24][25].

Tabela 4.1 – Análise imediata e elementar dos combustíveis utilizados. Os valores são apresentados em base seca (bs)

Análise imediata	Biomassa Florestal residual (BF)	Estilha de madeira de eucalipto (E)	Pellets casca de eucalipto (Tipo 1) (PC1)	Pellets de finos (< 1mm) de trituração de BF (PF)	Pellets de BF	Pellets de BF+E	Pellets Pinewells	Pellets casca de eucalipto (Tipo 2) (PC2)	Lamas Biológicas	Lamas Primárias
Humidade [% massa, btq]	11.80	11.40	7.71	8.95	8.33	8.28	4.60	10.19	20.00	11.13
Cinzas [% massa, bs]	2.90	1.20	5.02	7.26	2.77	3.28	0.30	4.46	26.46	61.51
Voláteis [% massa, bs]	80.50	77.30	78.28	77.08	78.23	78.99	82.3	78.06	nd	nd
Carbono fixo [% massa, bs]	16.60	21.50	16.69	15.66	19.00	17.72	17.40	17.47	nd	nd
<b>Análise elementar (% massa, bs)</b>										
C	45.85	49.07	44.36	nd	45.85	nd	47.50	48.60	44.70	nd
H	6.13	6.45	5.43	nd	6.13	nd	6.20	5.50	6.30	nd
N	0.35	0.07	0.23	nd	0.35	nd	0.09	0.30	6.70	nd
S	nd-ald	nd-ald	nd-adl	nd	nd-ald	nd	nd-ald	nd-ald	1.30	nd
O (por diferença)	44.80	43.22	44.96	nd	44.80	nd	45.89	41.10	33.90	nd
PCI [MJ/kg, bs]	17.60	18.30	15.70	17.30 <sup>(1)</sup>	17.60	18.40 <sup>(1)</sup>	18.00	17.58	16.02	nd

<sup>(1)</sup> PCI determinado a partir da análise imediata[26]

nd: não determinado

nd-ald: não determinado, abaixo do limite de deteção do método, 0.05%massa

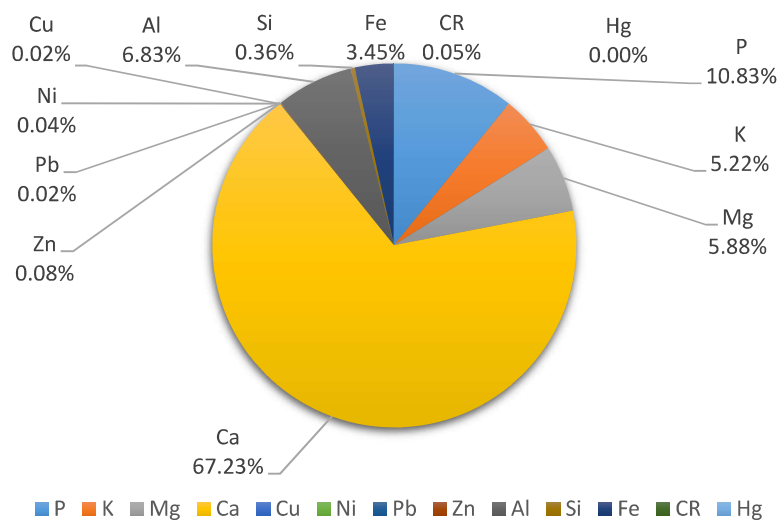


Figura 4.2 – Composição da fração inorgânica das lamas biológicas; oxigénio não incluído (Dados obtidos a partir da análise realizada pela empresa The Navigator Company).

## 4.2 Secagem de lamas

As lamas biológicas e primárias, resultantes do processo de tratamento de efluentes líquidos na indústria da pasta e papel, apresentavam elevados teores de humidade, o que inviabiliza a sua utilização tal e qual em sistemas de combustão. Neste contexto, foi decidido realizar uma avaliação sucinta da perda de água nestas lamas quando submetidas a um processo de secagem. A análise de evolução da humidade das lamas ao longo do tempo, quando submetidas a secagem, foi realizada a uma temperatura de 105°C (CEN/TS 14774-1).

Nas Figuras (Figura 4.3 e Figura 4.4) é apresentada a evolução da massa das lamas biológicas e das lamas primárias, respetivamente, correspondente à perda de humidade, durante o processo de secagem em estufa a 105±5°C.

Da análise do processo de secagem das lamas biológicas (Figura 4.3), verifica-se que nas primeiras horas ocorre uma perda acentuada de massa de água, sendo que essa perda de massa vai diminuindo com o decorrer do tempo. Relativamente às lamas primárias (Figura 4.4), verifica-se uma menor variação de perda de massa, o que se justifica em resultado do menor conteúdo inicial de água neste material. A secagem em estufa a 105±5°C durante 24h permitiu determinar que o teor inicial de humidade das lamas biológicas era igual a 86.1%massa (base húmida) e para as lamas primárias 49.3%massa (base húmida).

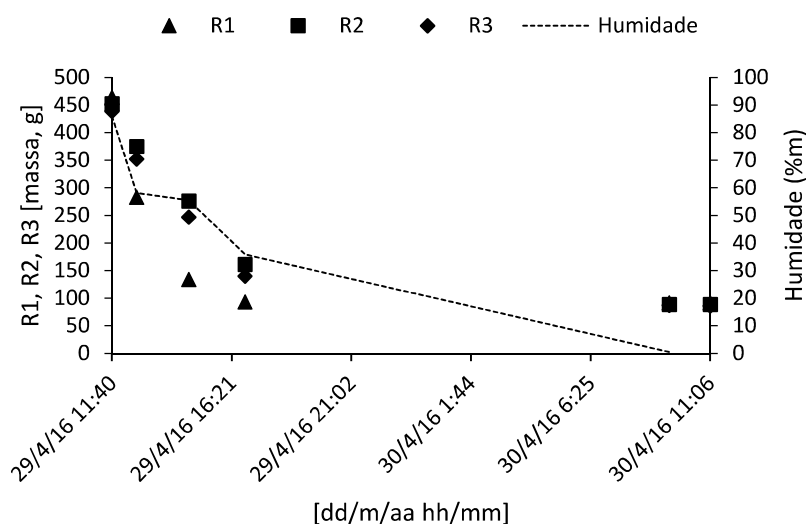


Figura 4.3 – Evolução da massa das lamas biológicas e da sua humidade (%massa), durante o processo de secagem a 105±5°C. R1, R2, R3 representam réplicas da mesma amostra.



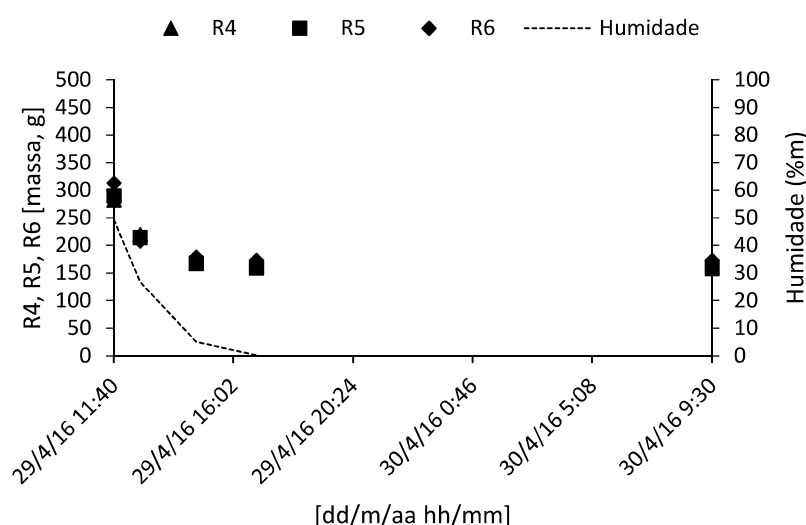


Figura 4.4 – Evolução da massa das lamas primárias e da sua humidade (% massa) durante o processo de secagem em estufa a  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ . R4, R5, R6 representam réplicas da mesma amostra.

Na Figura 4.5 é apresentada informação sobre as características macroscópicas das lamas biológicas (lamas secundárias), antes e após o processo de secagem. Para além duma elevada perda de massa em resultado da perda de água, verifica-se a consequente perda de volume por parte das lamas.



Figura 4.5 - Lamas Biológicas: a) Lamas Húmidas; b) Lamas Secas.

### 4.3 Análise e discussão de resultados das experiências de combustão

Neste trabalho foi realizado um conjunto de experiências de combustão em leito fluidizado com o objetivo de analisar o desempenho de misturas constituídas por biomassa florestal residual e lamas, primárias e secundárias (biológicas), provenientes do processo de tratamento de efluentes líquidos na indústria da pasta de papel.

Nas secções seguintes são apresentados resultados relativos a perfis de temperatura ao longo do reator e evolução desta ao longo do tempo, e perfis de composição gasosa do



efluente gasoso ao longo do tempo, durante as experiências de combustão de diferentes misturas preparadas a partir de biomassa florestal residual e lamas.

#### 4.3.1 Combustão de estilha de eucalipto

Foi realizada uma experiência onde foi utilizada estilha de madeira de eucalipto, com o objetivo de obter um nível de referência para as experiências de combustão de misturas dos outros tipos de biomassa selecionados neste trabalho.

Na Figura 4.6 é apresentada a evolução da temperatura com o tempo em vários pontos ao longo da altura do reator. Verifica-se que a temperatura em cada uma das localizações apresenta muito pequenas flutuações, o que reflete o bom desempenho do leito fluidizado para a combustão deste tipo de biomassa, e a garantia de manutenção de condições estacionárias e de temperatura bastante uniforme. Verifica-se ainda que a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.7 m acima da superfície do leito (localização T6), para depois diminuir no espaço acima como se verifica na Figura 4.7. A temperatura mais elevada monitorizada na zona do *freeboard* (em T6) foi cerca de 980°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi 798°C e na exaustão (T9) igual a 362°C. O ponto T1 situa-se na base do leito, e é uma zona onde o leito permanece fixo pois está abaixo do nível dos injetores e ar de fluidização; nesta zona não ocorre combustão, e é aquecida apenas por transferência de calor a partir do leito fluidizado localizado acima, e o objetivo é prevenir que a placa de distribuidora atinja elevadas temperaturas. Este comportamento resulta do facto de a biomassa ser alimentada na superfície do leito, região onde acaba por ocorrer a libertação de uma fração significativa dos voláteis, como é reconhecido neste tipo de reatores. Os voláteis libertados nessa região vão sendo oxidados à medida que se misturam com o oxigénio proveniente do leito e se deslocam ao longo do *freeboard*, resultando destas reações exotérmicas a geração de uma quantidade significativa de energia térmica que promove o aumento da temperatura dos gases de combustão e, portanto, desta região do reator. No espaço acima, a intensidade das reações de combustão já será menor, pois os componentes combustíveis já terão sido praticamente convertidos e, portanto, ocorre uma menor geração de energia térmica, e as perdas de energia térmica por condução e convecção nas paredes do reator, com os gases de combustão, e a energia extraída no permutador de calor operado a água localizado no *freeboard*, acabam por promover uma diminuição da temperatura na parte superior do *freeboard*.

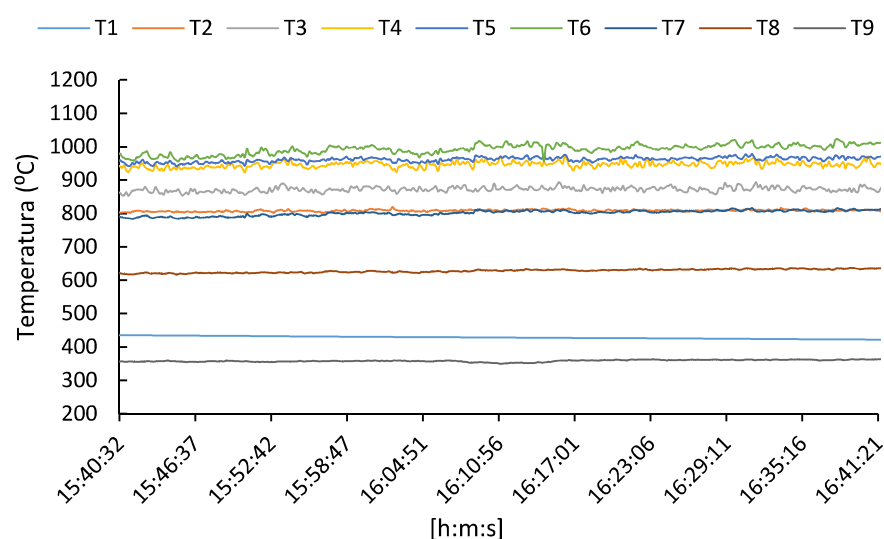


Figura 4.6 – Evolução da temperatura ao longo do tempo, para diferentes localizações ao longo da altura do reator de leito fluidizado durante a combustão de estilha de eucalipto. Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1– 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66, m T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

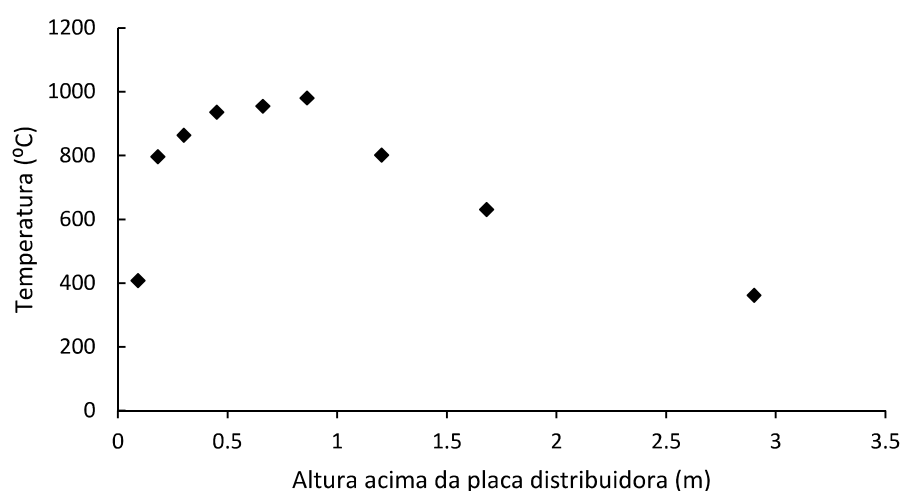


Figura 4.7 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de estilha de eucalipto.

Na Figura 4.8 é apresentado um exemplo da evolução da concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  nos gases de exaustão ao longo do tempo. Contrariamente ao observado para a temperatura, verifica-se que a composição dos gases de combustão apresenta uma flutuação mais pronunciada. Este efeito está relacionado com alguma heterogeneidade das características físicas do combustível, o que promove alguma irregularidade na sua alimentação, e a consequente flutuação na composição dos gases resultantes da conversão termoquímica do combustível. No entanto, pode-se observar que apesar dessas flutuações, a evolução temporal da composição dos gases de combustão flutua em torno de um valor médio, ou seja, reflete um padrão de operação estacionário. Os valores médios de

concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão de estilha de eucalipto foram, respetivamente, 9%v, 12%v e 10%v.

Acerca deste assunto, importa referir que apesar das flutuações na composição gasosa, a temperatura em diferentes pontos ao longo do reator apresenta um padrão mais regular, conforme analisado anteriormente. Este resultado pode ser explicado em resultado da inércia térmica da massa de leito e da sua capacidade de compensar pequenas flutuações de alimentação de combustível.

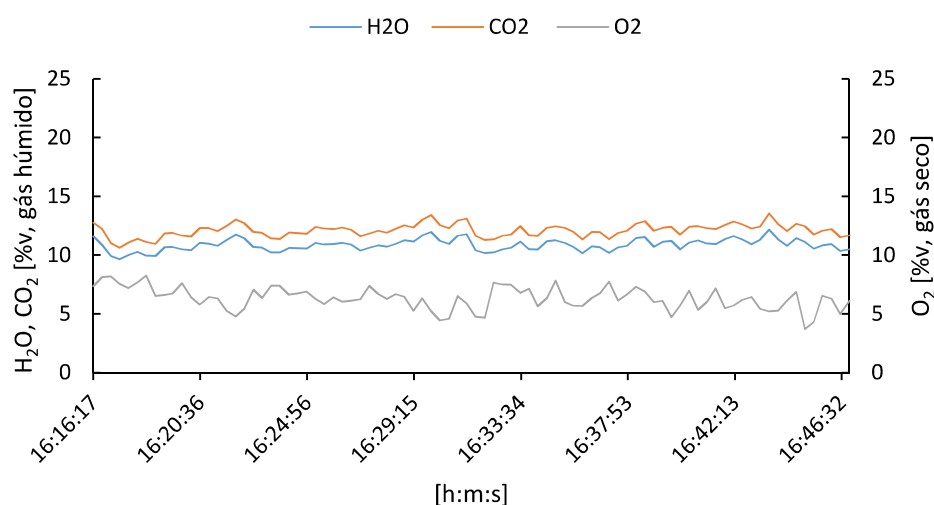


Figura 4.8 – Evolução da concentração de  $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $O_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de estilha de Eucalipto.

Na (Figura 4.9) é apresentado um exemplo da evolução da concentração de  $CO$ ,  $NO$ ,  $HCl$  e  $SO_2$  nos gases de exaustão. Verifica-se, também, que estas espécies gasosas refletem alguma flutuação na sua concentração ao longo do tempo, o que é justificado pela mesma razão descrita anteriormente para as espécies ( $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $O_2$ ), ou seja, flutuações na alimentação de combustível. Além disso, verifica-se que a flutuação na concentração de  $CO$  é muito superior ao observado por exemplo para o  $NO$ . A concentração de  $SO_2$  nos gases de exaustão é relativamente baixa e encontra-se no limite de sensibilidade do equipamento de análise. Nesta experiência, os valores médios de concentração de  $CO$ ,  $NO$  e  $HCl$  foram, respetivamente, 48, 107 e 17  $mg \cdot Nm^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11%v  $O_2$ ).

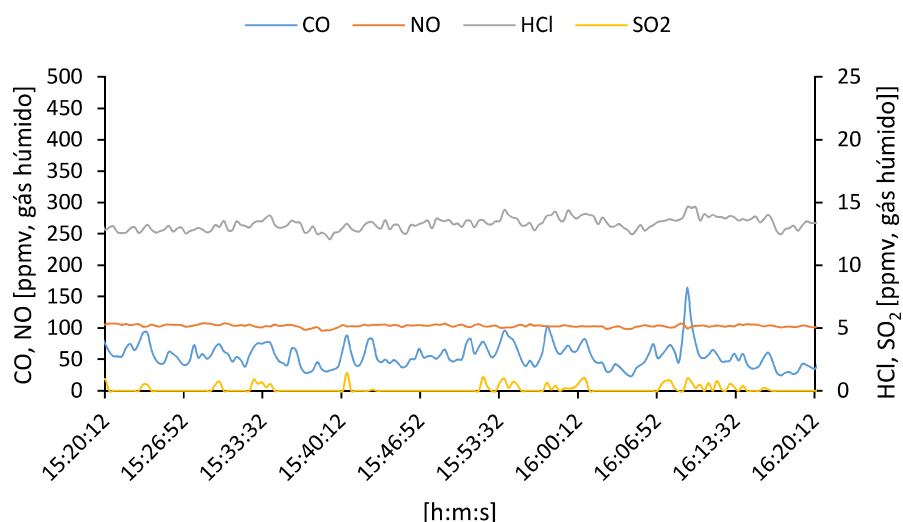


Figura 4.9 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de estilha de Eucalipto.

#### 4.3.2 Combustão de 95% massa de estilha de eucalipto com 5% massa de lamas biológicas (mistura ELB5)

Nesta experiência de combustão foi utilizada uma mistura combustível composta por estilha de madeira de eucalipto 95% massa à qual foi adicionado 5% massa de lamas biológicas; a mistura tem referência ELB5.

Na Figura 4.10, é apresentada a evolução da temperatura ao longo do tempo em diferentes localizações no reator durante a combustão desta mistura. Tal como verificado na combustão de estilha de eucalipto (secção 4.3.1), verifica-se uma estabilidade na temperatura ao longo do tempo, sendo observadas apenas pequenas flutuações de temperatura. Este comportamento permite concluir que a adição de 5% massa de lamas biológicas na mistura de combustível não prejudicou o desempenho do processo de combustão em reator de leito fluidizado.

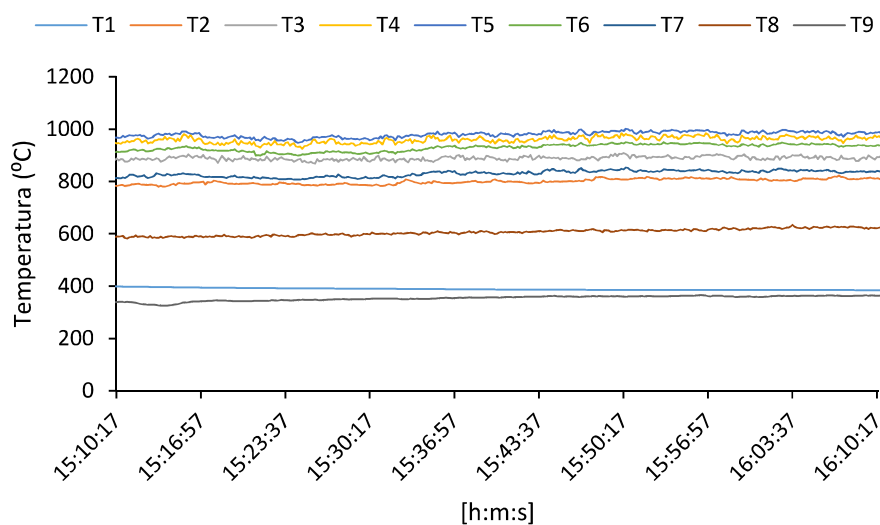


Figura 4.10 - Evolução da temperatura ao longo do tempo, para diferentes localizações ao longo da altura do reator de leito fluidizado durante combustão 95% massa de estilha de eucalipto com 5% massa lamas biológicas (mistura ELB5). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

Na Figura 4.11 verifica-se que durante a combustão da mistura ELB5 a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.7 m acima da superfície do leito (localização T6), para depois diminuir no espaço acima, tal como foi verificado na experiência anterior com estilha de madeira de eucalipto. A temperatura mais elevada monitorizada na zona do *freeboard* (em T6) foi cerca de 988°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi 812°C e na exaustão (T9) igual a 387°C.

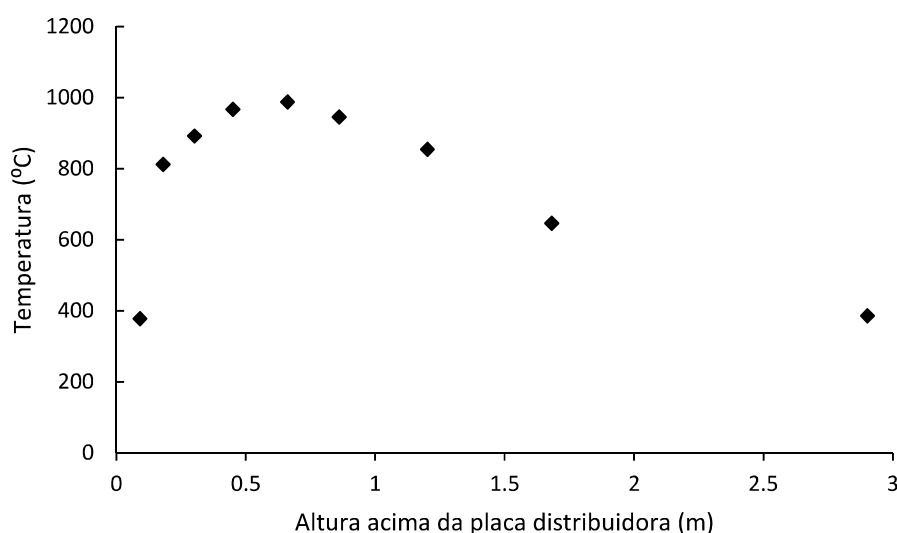


Figura 4.11 - Perfil longitudinal de temperatura no reator durante a combustão, 95% massa de estilha de eucalipto com 5% massa de lamas biológicas (mistura ELB5).

Na Figura 4.12 é apresentada a evolução da composição do efluente gasoso, em termos de compostos maioritários ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ ), durante a combustão da mistura. Observa-se uma maior flutuação na concentração de espécies como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ , ao contrário do verificado no perfil de temperatura. Embora, exista uma maior flutuação das espécies, estas apresentam um perfil constante, variando sempre em torno de um valor médio. No entanto, a adição das lamas biológicas à mistura de combustível provocou uma diminuição da estequiometria, mas pouco significativa, uma vez que o reator de leito fluidizado manteve um padrão de operação estacionário. Durante a combustão da mistura ELB5, os valores médios de concentração de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  foram, respetivamente, 6 %v, 12%v e 11%v.

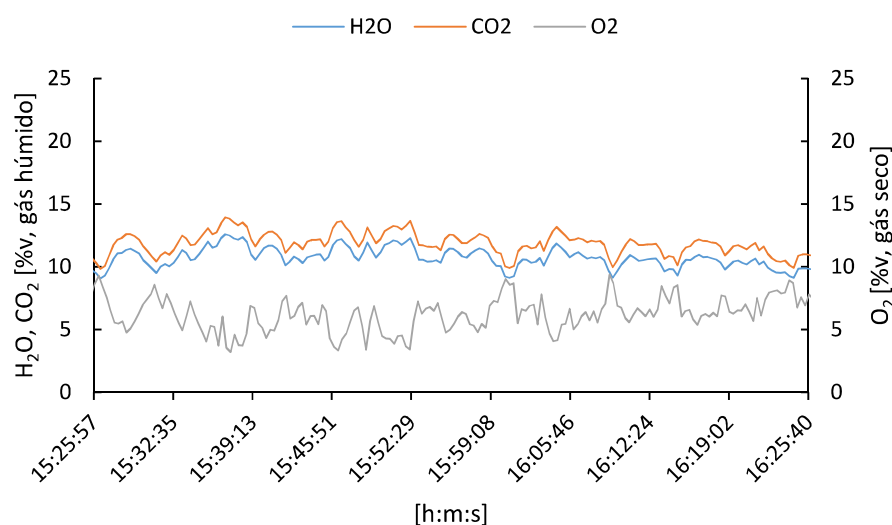


Figura 4.12 - Evolução da concentração de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 95% massa de estilha de eucalipto com 5% massa de lamas biológicas (mistura ELB5).

Na Figura 4.13, é apresentada a evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do tempo. Verifica-se que existe alguma flutuação na concentração dos vários compostos analisados, sendo o  $\text{CO}$  que apresenta uma flutuação mais acentuada. No entanto, com o decorrer do tempo de operação após a introdução da mistura ELB5 a amplitude das flutuações foi diminuindo (Figura 4.14). Relativamente ao  $\text{NO}$ , observa-se que a sua concentração apresenta pequenas flutuações ao longo do tempo quando comparado por exemplo com o  $\text{CO}$ .

Após a introdução da mistura ELB5 a concentração de  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  aumentaram ligeiramente. No entanto, após algum tempo de operação verifica-se que a concentração de  $\text{HCl}$  nos gases de exaustão estabiliza num valor próximo de 14 ppmv e a concentração de  $\text{SO}_2$  diminui para valores baixos (<5 ppmv) e da ordem dos valores observados antes da introdução das lamas (Figura 4.14). Relativamente ao  $\text{NO}$ , após o aumento da sua concentração após a introdução das lamas, a sua concentração estabiliza em valores da ordem de 125 ppmv.

Os valores médios da concentração de CO, NO e HCl durante a combustão da mistura ELB5 foram, respetivamente, 35, 126 e 13 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>).

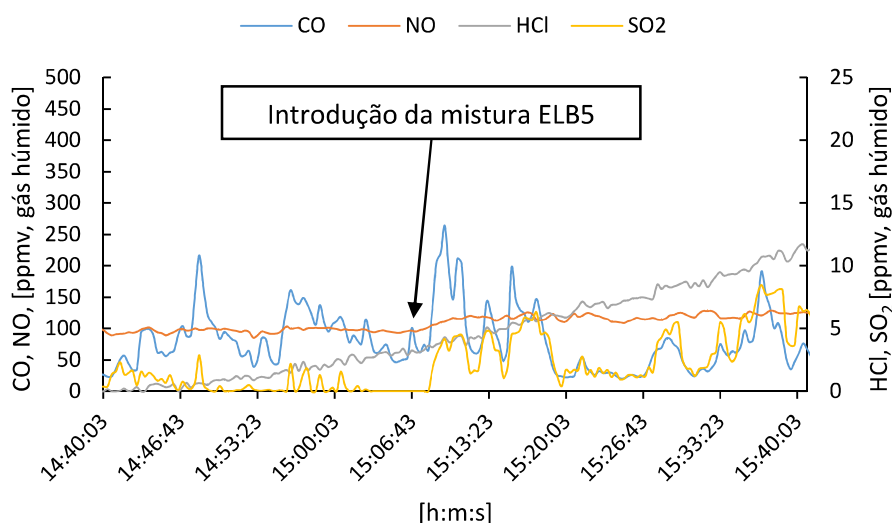


Figura 4.13 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão 100% estilha de eucalipto antes da introdução da mistura ELB5 e após a introdução da mistura ELB5.

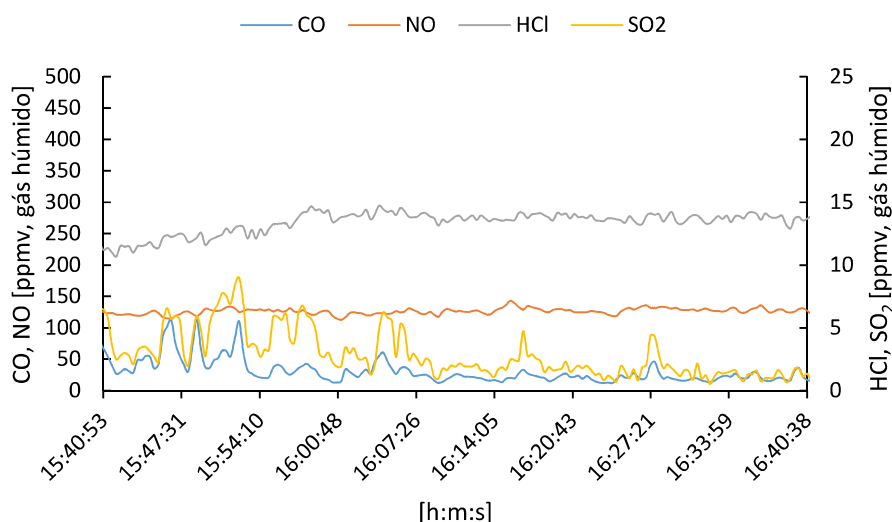


Figura 4.14- Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 95% massa de estilha de eucalipto com 5% massa de lamas biológicas (mistura ELB5).

Quando comparado com a combustão de estilha de madeira de eucalipto (secção 4.3.1), verifica-se que durante a combustão da mistura ELB5, o valor médio de concentração (corrigido para gases secos e 11%v O<sub>2</sub>) de NO nos gases de exaustão aumenta e que a concentração de HCl diminui. Esta diminuição da concentração de HCl deve-se à adição das lamas biológicas, que são ricas em cálcio, o que pode promover a adsorção de HCl. Por outro

lado, o aumento da concentração de NO resulta da introdução de lamas que apresentam um elevado teor em azoto, quando comparado com a estilha de eucalipto.

#### 4.3.3 Combustão de 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa lamas biológicas (mistura ELB10)

Nesta experiência de combustão foi aumentada a percentagem de lamas biológicas na mistura combustível, sendo a sua composição igual a 90%massa de estilha de eucalipto e 10%massa de lamas biológicas; a mistura tem a referência ELB10.

A análise do perfil de temperatura ao longo do tempo, em várias localizações do reator (Figura 4.15), mostra que durante a combustão da mistura ELB10 a temperatura apresenta flutuações muito reduzidas, significando que a combustão da mistura é um processo estável e que o reator de leito fluidizado encontra-se a operar num padrão de regime estacionário. O perfil longitudinal de temperatura (Figura 4.16) reflete o mesmo comportamento do processo de combustão dos outros combustíveis, isto é, a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.7 m acima da superfície do leito (localização T6), para depois diminuir no espaço acima. A temperatura mais elevada monitorizada na zona do *freeboard* (em T6) foi cerca de 1007°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi 810°C e na exaustão (T9) igual a 407°C.

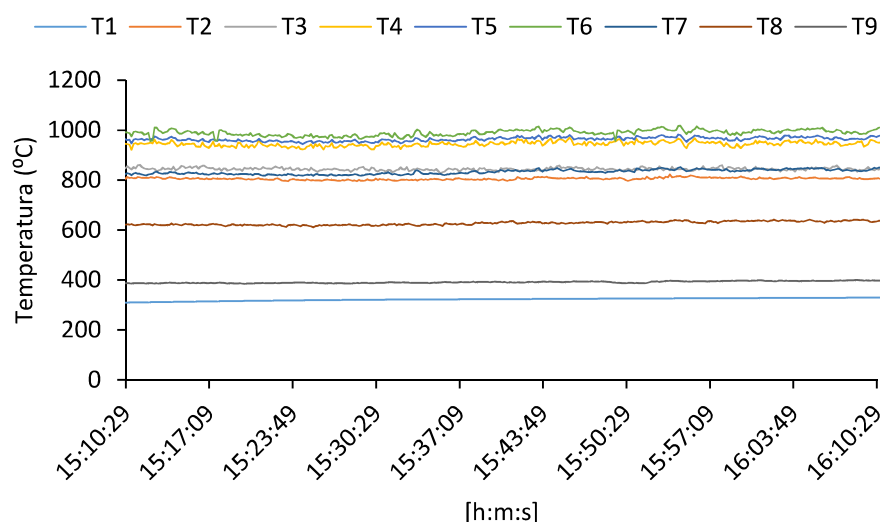


Figura 4.15 – Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão 90%massa de estilha de eucalipto com 10%massa de lamas biológicas (mistura ELB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1– 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66, m T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.



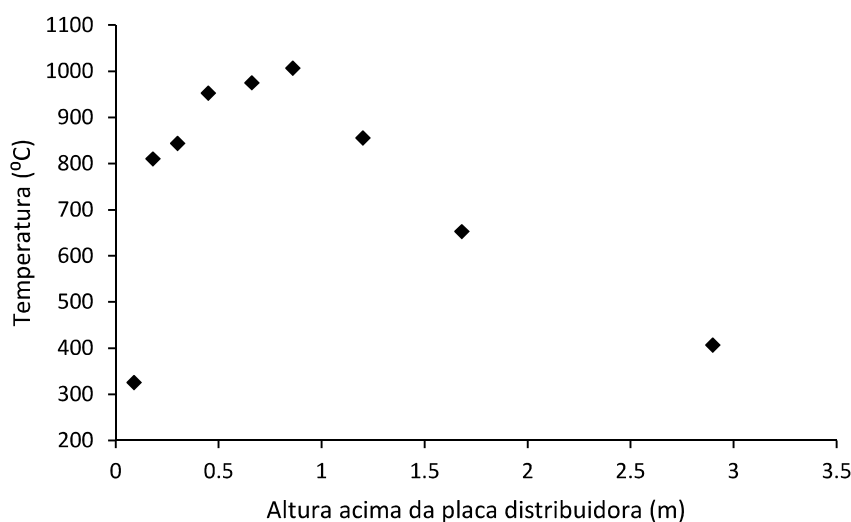


Figura 4.16 - Perfil longitudinal de temperatura do reator durante a combustão 90% massa de estilha de eucalipto com 10% massa de lamas biológicas (mistura ELB10).

A Figura 4.17 representa a transição da alimentação de 100% massa estilha de eucalipto para a alimentação da mistura ELB10. Durante a combustão de 100% massa de estilha de eucalipto, a concentração das espécies nos gases de exaustão apresenta uma maior flutuação quando comparada com a evolução da temperatura ao longo do tempo, contudo, esta flutuação ocorre em torno de um valor médio.

No momento em que ocorreu a transição para a alimentação da mistura ELB10, é verificada uma elevada flutuação das espécies representadas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ ). No entanto, após um curto período de tempo as espécies voltam a apresentar um comportamento estável. Os valores médios de concentração de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  durante a combustão da mistura ELB10 foram, respetivamente, 6%v, 12%v e 11%v.

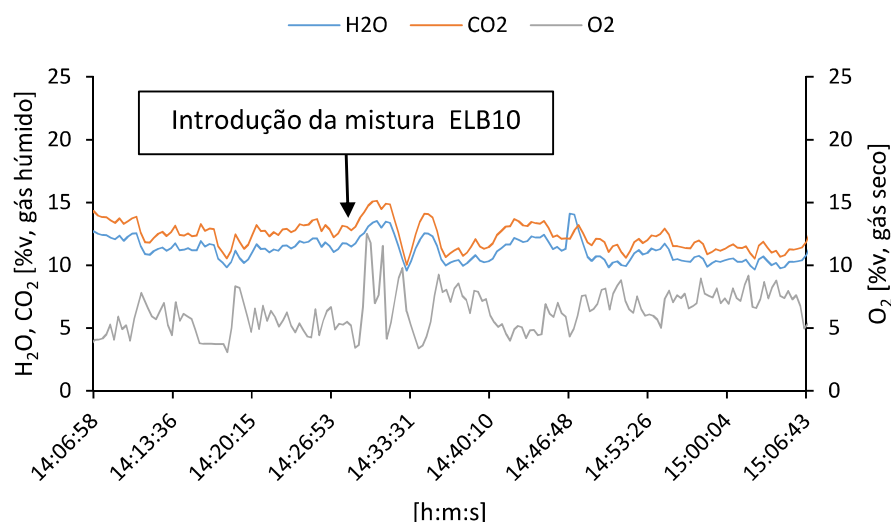


Figura 4.17 - Evolução da concentração de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100% massa estilha de eucalipto antes da introdução da mistura ELB10 e após a introdução da mistura ELB10.

A Figura 4.18 apresenta a evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$ , durante a combustão de 100% estilha de eucalipto. Analisando a evolução do  $\text{CO}$ , esta demonstra uma flutuação mais acentuada no início da combustão. Contudo, ao fim de um determinado período de tempo é possível verificar uma atenuação da concentração de  $\text{CO}$  nos gases de exaustão.

Relativamente ao  $\text{NO}$  verifica-se que a sua concentração nos gases de exaustão apresenta uma flutuação reduzida, ao contrário do verificado no  $\text{CO}$ , mantendo sempre essa flutuação em torno de um valor médio. No entanto, tal como verificado na experiência anterior, no instante em que se começou a alimentar a mistura de estilha de eucalipto com lamas biológicas (Figura 4.19), foi registado um aumento instantâneo na concentração de  $\text{NO}$ , apresentando de seguida um comportamento semelhante ao observado no início da experiência de combustão, sendo registados valores na ordem dos 150 pmv.

A concentração de  $\text{HCl}$  durante a combustão de 100% de estilha de eucalipto apresenta um crescimento progressivo durante um determinado período de tempo, mostrando indícios de estabilização. No entanto, após a transição da alimentação da estilha de eucalipto para mistura ELB10 apesar de se verificar um aumento progressivo da sua concentração no início, ao fim de um curto período de tempo, a concentração de  $\text{HCl}$  nos gases de exaustão começa a diminuir progressivamente. Esta diminuição mantém-se até ao fim da experiência, mesmo após se voltar a alimentar a estilha de eucalipto.

Os valores de concentração de  $\text{SO}_2$  presente nos gases de exaustão apresentaram uma elevada flutuação no início da experiência, mostrando de seguida uma diminuição com o tempo, contudo, após a adição das lamas volta-se a verificar uma maior flutuação deste. Embora esta flutuação na concentração seja verificada, com o decorrer da experiência a

concentração de SO<sub>2</sub> diminui para valores abaixo do limite de deteção do analisador de gases húmidos (<5 ppmv).

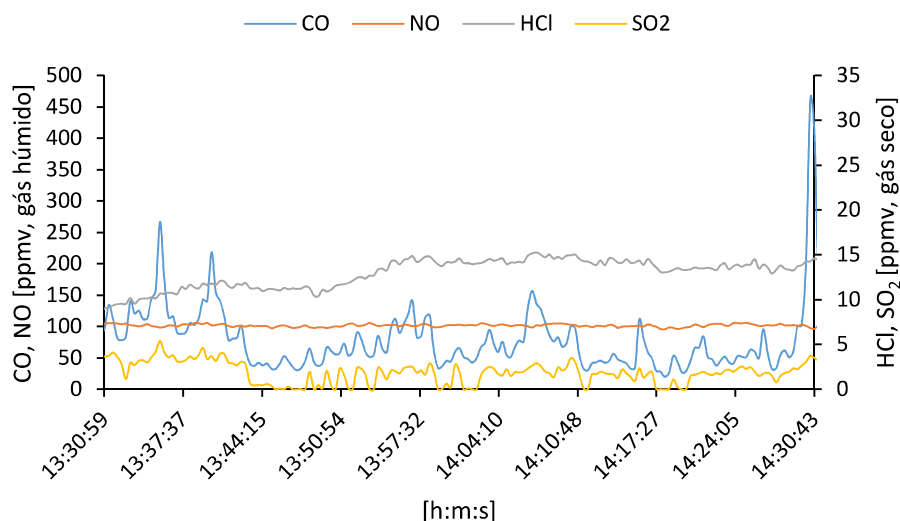


Figura 4.18 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100% massa de estilha de eucalipto.

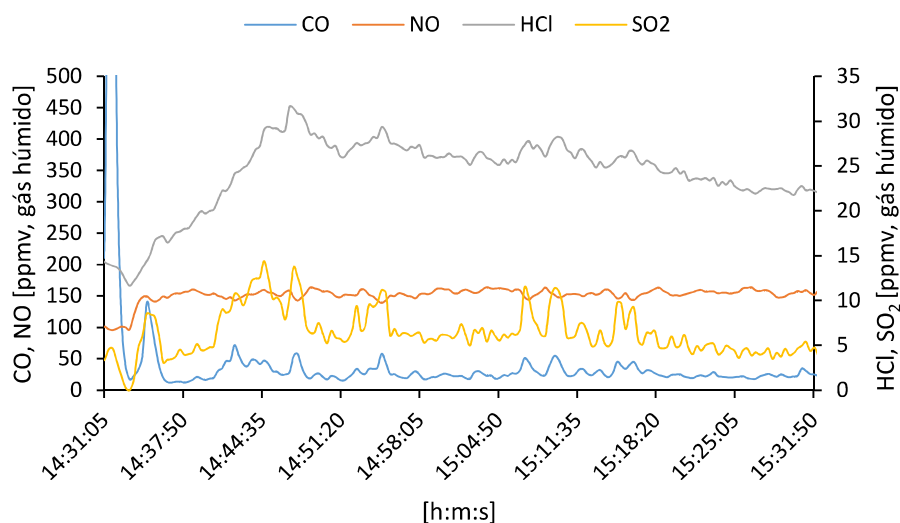


Figura 4.19 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo durante combustão de 90% massa de estilha de eucalipto com 10% massa de lamas biológicas (mistura ELB10).

Para esta experiência de combustão os valores médios de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> durante a combustão da mistura ELB10, foram, respetivamente, 11, 154 e 21 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>). Ao comparar estes com os valores obtidos durante a combustão da mistura ELB5 verifica-se uma maior concentração de NO e HCl. Estando este aumento relacionado com introdução de uma maior percentagem de lamas na mistura de combustível, como referido na experiência anterior.

#### 4.3.4 Combustão de 90% massa biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura BFLB10)

Nesta experiência foi utilizada a biomassa florestal residual. A composição da mistura de combustível foi de 90% massa de biomassa florestal residual e 10% massa de lamas biológicas; a mistura tem referência BFLB10.

Na Figura 4.20 é possível verificar que durante esta experiência houve uma flutuação mais acentuada das temperaturas na zona de *freeboard*, ao longo do tempo. Esta maior flutuação está relacionada com as falhas existentes na alimentação devido às características físicas da biomassa. Contudo, após a adição da mistura BFLB10 verifica-se uma maior oscilação dos valores de temperatura ao longo do tempo. Dado que a biomassa florestal residual apresenta uma elevada irregularidade na sua alimentação, foi necessário ajustar a velocidade dos alimentadores de biomassa, em determinadas alturas, de modo a ser possível manter um bom funcionamento do reator de leito fluidizado.

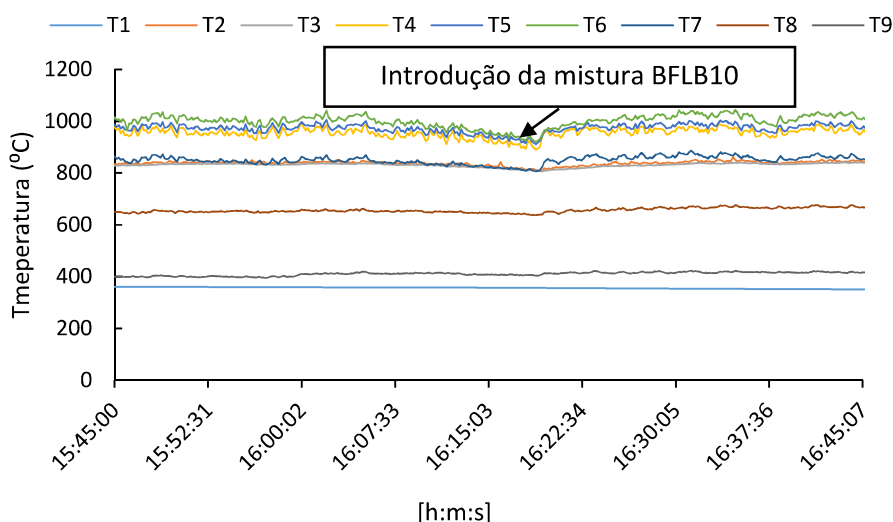


Figura 4.20 – Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura BFLB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1– 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66, m T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

Embora a evolução das temperaturas apresente uma elevada flutuação, o perfil longitudinal de temperaturas (Figura 4.21) apresenta um comportamento semelhante ao verificado em experiências anteriores. Ou seja, a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.7 m acima da superfície do leito (localização T6), diminuindo no espaço acima. A temperatura mais elevada no *freeboard* (em T6) foi cerca de 1000°C, enquanto que a temperatura média do leito (T2) foi de 824°C e de 423°C na exaustão (T9).

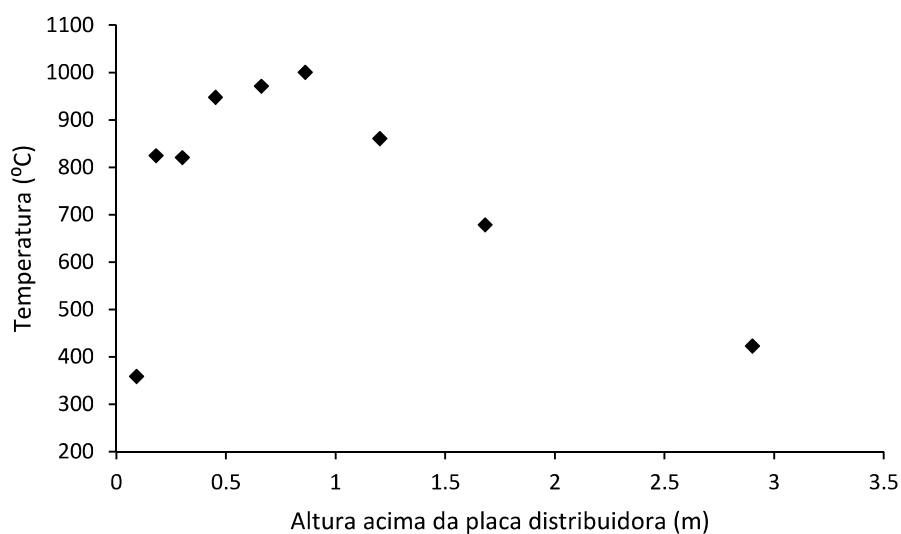


Figura 4.21 - Perfil longitudinal de temperaturas durante a combustão de 90% massa de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura BFLB10).

A Figura 4.22 apresenta a evolução da concentração das espécies  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ . Verifica-se uma elevada flutuação das espécies, estando esta relacionada com a elevada variação das temperaturas verificada anteriormente (Figura 4.2). Contudo, ao fim de um determinado período de tempo é possível verificar na Figura 4.23 uma menor flutuação da concentração. Os valores médios da concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão da mistura BFLB10 foram, respetivamente, 8%v, 12%v e 10%v.

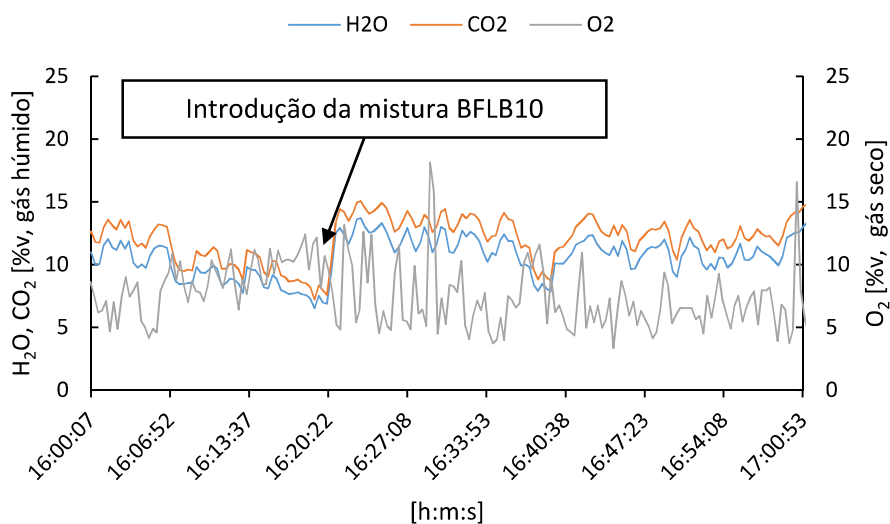


Figura 4.22 - Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$ , e  $O_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100% massa biomassa florestal residual antes da introdução da mistura BFLB10 e após a introdução da mistura BFLB10.

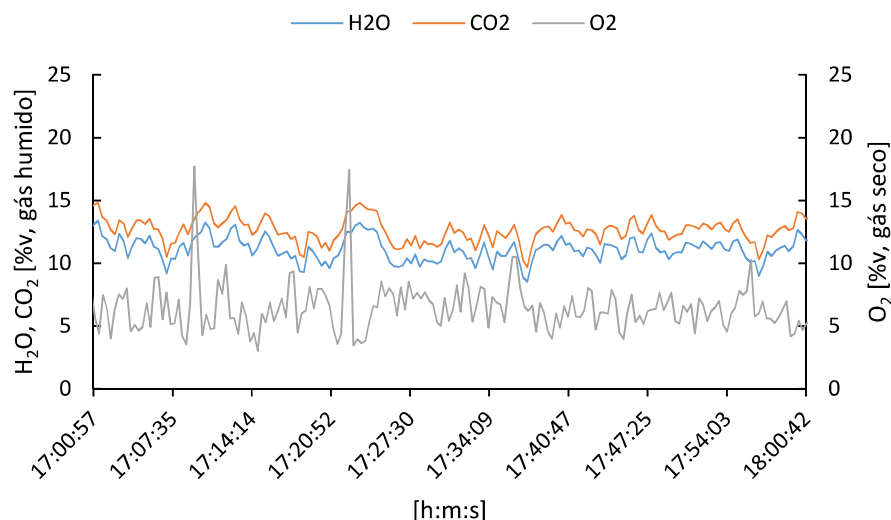


Figura 4.23 – Evolução da concentração de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , e  $\text{O}_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90% massa biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura BFLB10).

Nas Figuras (Figura 4.24 e Figura 4.25), é apresentada a evolução das concentrações de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do tempo durante a combustão de 100% massa biomassa florestal e da mistura BFLB10, respetivamente. Ao analisar as duas figuras verifica-se que a concentração de  $\text{CO}$  tanto antes como depois da introdução da mistura BFLB10 apresenta uma flutuação muito acentuada, sendo esta superior às registadas nas experiências anteriores (secções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3), sendo registados valores acima do nível de deteção do analisador de gases húmidos. Esta variação da concentração de  $\text{CO}$  seria esperada, uma vez que a evolução da concentração de  $\text{O}_2$  apresenta alguma instabilidade.

Relativamente à concentração de  $\text{NO}$  nos gases de exaustão, durante a combustão de biomassa florestal e da mistura BFLB10, é verificada uma maior variabilidade dos seus valores ao longo do tempo. Contudo, após o início da alimentação da mistura BFLB10, essa flutuação torna-se mais acentuada, mantendo este comportamento durante a combustão da mistura. A evolução da concentração de  $\text{HCl}$  ao longo do tempo não foi influenciada pelas irregularidades na alimentação, uma vez que esta manteve uma flutuação pouco acentuada em torno de um valor médio, mesmo após o início da combustão da mistura BFLB10.

A concentração de  $\text{SO}_2$  durante toda a experiência de combustão apresenta sempre alguma variação da sua concentração, algo não verificado nas experiências anteriores, onde ao fim de um certo período de tempo os valores de concentração de  $\text{SO}_2$  eram de tal forma reduzidos que se encontravam abaixo do limite de deteção ( $<5\text{ppmv}$ ) do analisador de gases húmidos (Gasmeter). As características físicas da biomassa estão diretamente relacionadas com este fenómeno, pois como já referido anteriormente, estas provocaram um funcionamento instável do sistema de alimentação.

Para esta experiência os valores médios obtidos durante a combustão da mistura BFLB10 para as concentrações de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  e  $\text{HCl}$  foram, respetivamente, 1136, 167 e 8

$\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11%v  $\text{O}_2$ ). Como é possível verificar tanto o valor médio na concentração de CO como de NO apresentam valores superiores aos verificados em experiências anteriores.

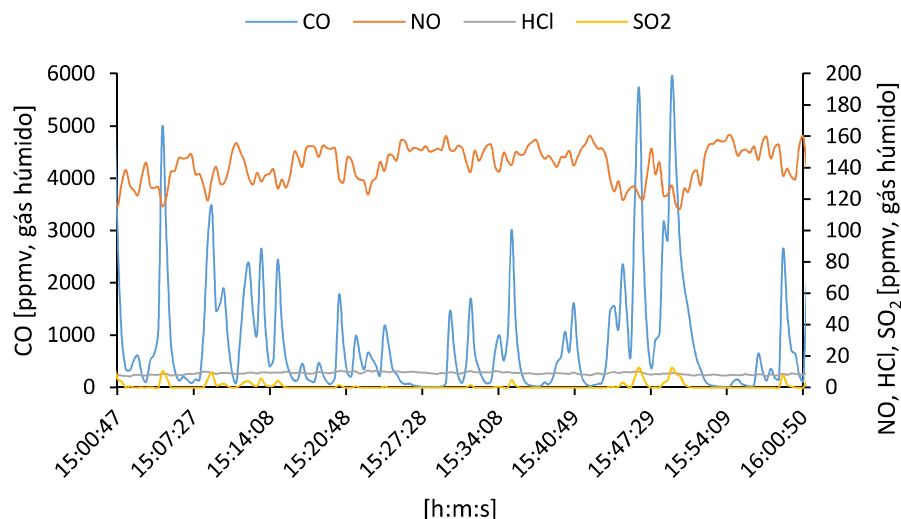


Figura 4.24 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e  $\text{SO}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura BFLB10).

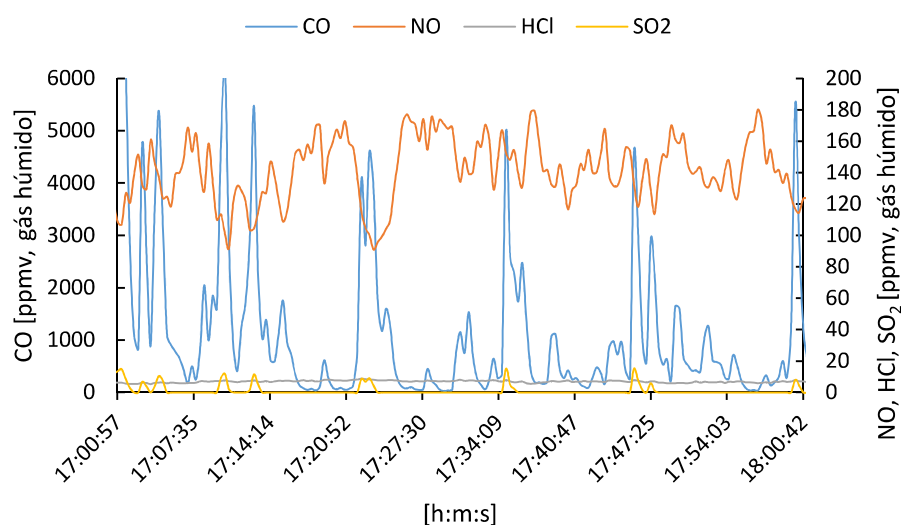


Figura 4.25 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e  $\text{SO}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura BFLB10).

#### 4.3.5 Combustão de 90% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10% massa lamas biológicas (mistura PC1LB10)

Uma vez que os *pellets* permitem uma alimentação mais constante, decidiu-se converter a biomassa disponível em *pellets*, para que assim fosse possível obter um conjunto de dados

mais estáveis. A mistura utilizada durante esta experiência continha 90% massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) e 10% de lamas biológicas; a mistura tem referência PC1LB10.

Ao analisar a Figura 4.26 é possível verificar uma flutuação muito reduzida na variação da temperatura ao longo do tempo, permanecendo em torno de um valor médio, mesmo após o início da alimentação da mistura PC1LB10, algo também verificado nas experiências onde o combustível base utilizado foi a estilha de eucalipto.

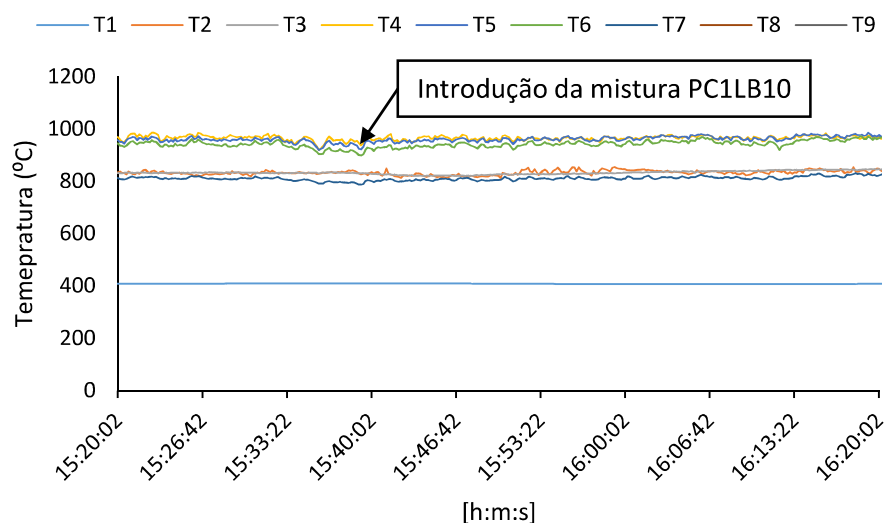


Figura 4.26 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10% massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

Ao analisar a Figura 4.27, verifica-se que durante a combustão da mistura PC1LB10, tal como verificado nas experiências anteriores, a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard*. Contudo, neste caso é registado um aumento da temperatura até 0.5 m acima da superfície do leito (localização da T5) apresentando de seguida uma diminuição no espaço acima. A temperatura mais elevada monitorizada na zona do *freeboard* (em T5) foi cerca de 963°C, enquanto a temperatura média no interior do leito (T2) foi de 837°C e na exaustão (T9) de 403°C. Ao comparar estes valores com as experiências onde o combustível utilizado nas misturas foi a estilha de eucalipto, verifica-se uma maior temperatura na zona do leito (T2). Para além disso a temperatura máxima registada na zona do *freeboard* ocorre a 0.5m acima do leito (localização T5) e não a 0.7m (localização da T6) como verificado em experiências anteriores.



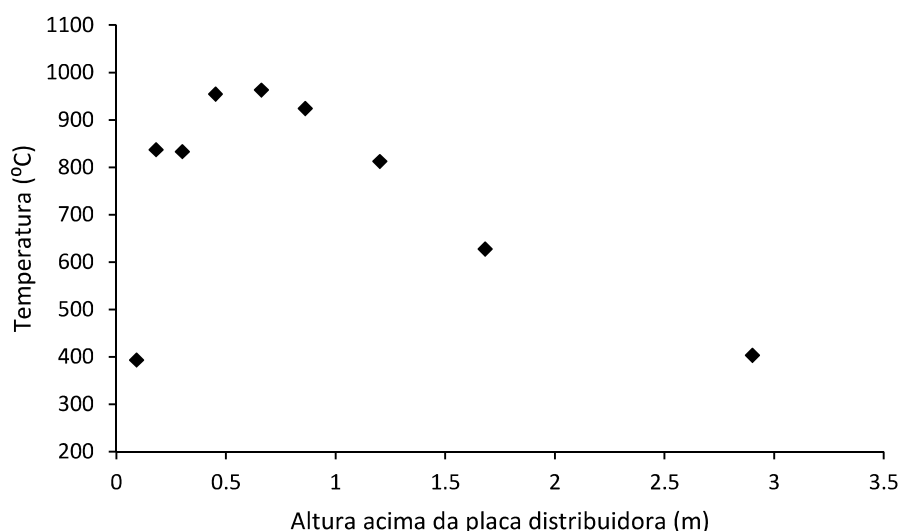


Figura 4.27 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de 90%massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10).

Na Figura 4.28 está representada a evolução da concentração das espécies  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$ , durante a transição de 100%massa *pellets* de casca de eucalipto e da mistura PC1LB10. Verifica-se uma maior flutuação das espécies quando comparado com o perfil de temperatura ao longo do tempo. No entanto, estas flutuações são pouco acentuadas, sendo isto o resultado de um bom funcionamento do sistema de alimentação.

Ao adicionar a mistura PC1LB10, verifica-se uma maior flutuação em todas as espécies ( $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$ ). Este incremento da flutuação é explicado pelo facto de não haver homogeneidade na mistura de *pellets* de casca com as lamas biológicas. Contudo, embora haja uma maior flutuação, os valores registados durante combustão da mistura PC1LB10 apresentam um comportamento estável. Os valores médios da concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão da mistura PC1LB10 foram, respetivamente, 7%v, 12%v e 10%v.

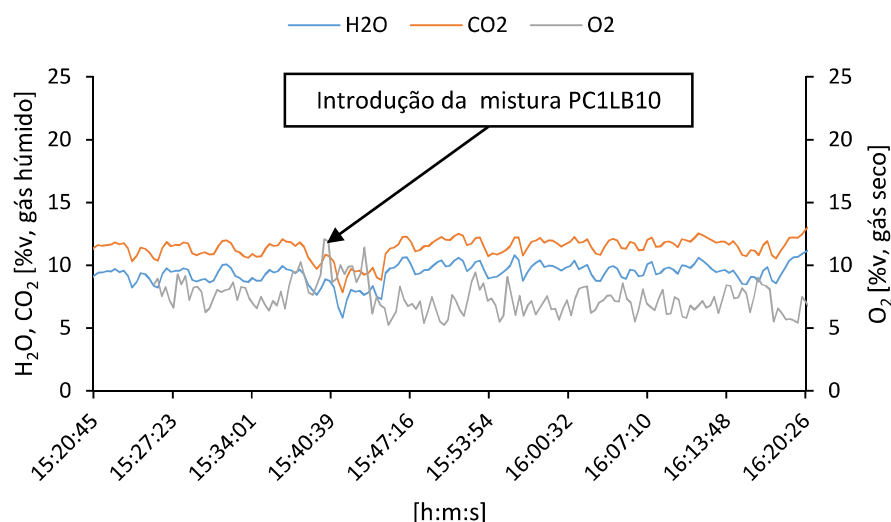


Figura 4.28 - Evolução da concentração de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100% massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 1) antes da introdução da mistura PC1LB10 e após a introdução da mistura PC1LB10.

A evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$ , durante a combustão de 100% massa pellets de casca de eucalipto (Figura 4.29), apresenta flutuações muito reduzidas ao longo do tempo. No entanto, ao analisar a concentração de  $\text{NO}$ , este apresenta uma maior flutuação quando comparado com a estilha de eucalipto. Para além da maior flutuação foram registados valores médios de concentração superiores durante esta fase da experiência. A concentração de  $\text{HCl}$  durante a combustão de 100% massa pellets de casca apresentou um crescimento semelhante ao verificado nas experiências anteriores, verificando-se posteriormente um decréscimo dos valores ao longo do tempo.

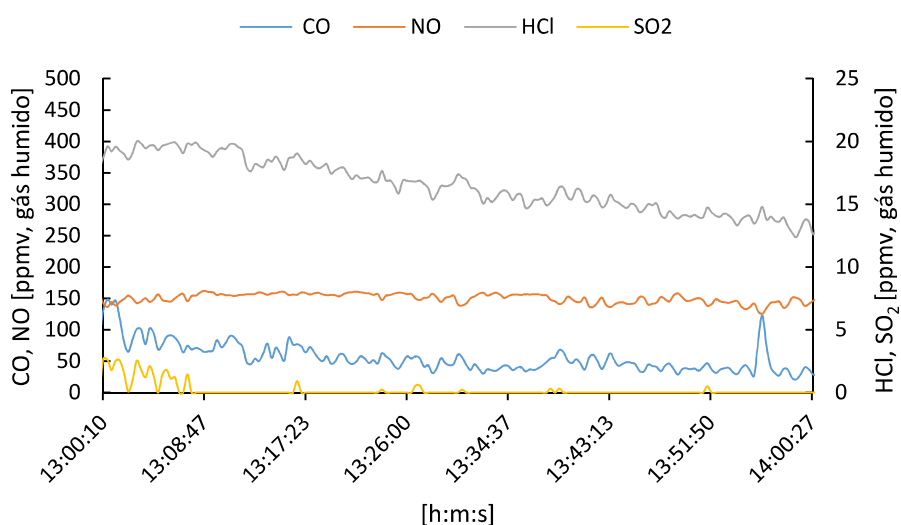


Figura 4.29 - Evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 100% massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 1).

O início da alimentação da mistura PC1LB10 (Figura 4.30), não representou um aumento na concentração de HCl, ao contrário do verificado nas experiências anteriores. Contudo, quando se iniciou a alimentação da mistura, verifica-se uma maior flutuação da concentração de NO ao longo do tempo. Estando este aumento na flutuação da concentração relacionado com a heterogeneidade da mistura de *pellets* com as lamas biológicas, como referido anteriormente. Para além de uma maior flutuação, também, foram registados valores médios superiores durante a combustão da mistura PC1LB10.

Relativamente ao CO durante toda a experiência, este apresentou uma flutuação por vezes acentuada, no entanto, em torno de um valor médio. A adição da mistura PC1LB10 não influenciou o seu comportamento.

O SO<sub>2</sub> apresentou de início alguma flutuação, contudo, ao fim de um determinado período de tempo, a concentração de SO<sub>2</sub> existente nos gases de exaustão era muito reduzida (<5 ppmv).

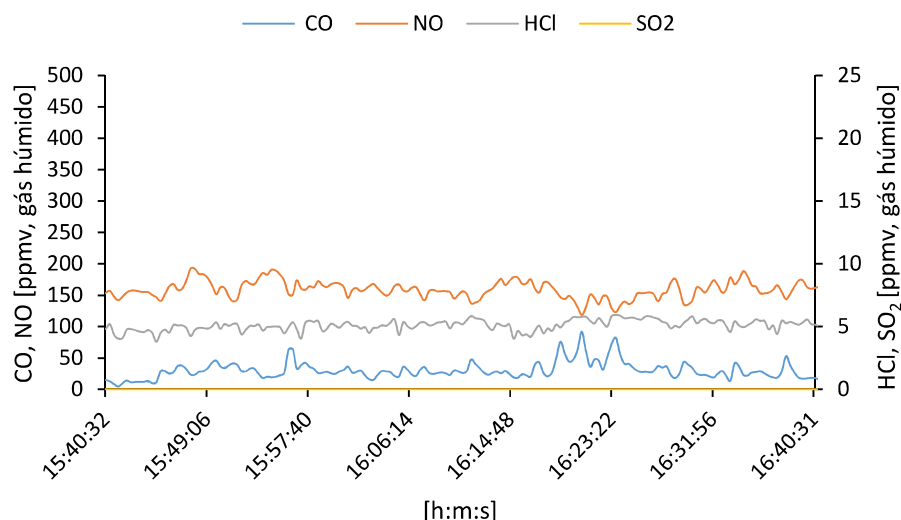


Figura 4.30 – Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante combustão de 90%massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) com 10%massa de lamas biológicas (mistura PC1LB10).

Nesta experiência durante a combustão da mistura PC1LB10 os valores médios de concentração obtidos para o CO, NO e HCl foram, respetivamente, 48, 164 e 8 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>).

#### 4.3.6 Combustão de 90%massa *pellets* de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas (mistura PBFLB10)

Nesta experiência a biomassa utilizada para a produção destes *pellets*, trata-se da biomassa florestal residual, sendo esta, a mesma utilizada na secção 4.3.4. A mistura de combustível é composta por 90%massa de *pellets* de biomassa florestal à qual foi adicionado 10%massa de lamas biológicas; a mistura tem referência PBFLB10.

Através da análise da Figura 4.31, verifica-se que a evolução das temperaturas durante a combustão de 100% massa *pellets* de biomassa florestal e da mistura PBFLB10 apresenta flutuações muito reduzidas, o que está diretamente relacionado com uma alimentação estável. Ao contrário do verificado na secção 4.3.4 onde havia uma elevada flutuação das temperaturas durante toda a experiência, que tinha como base a mesma biomassa, só que disponível num diferente tipo de combustível.

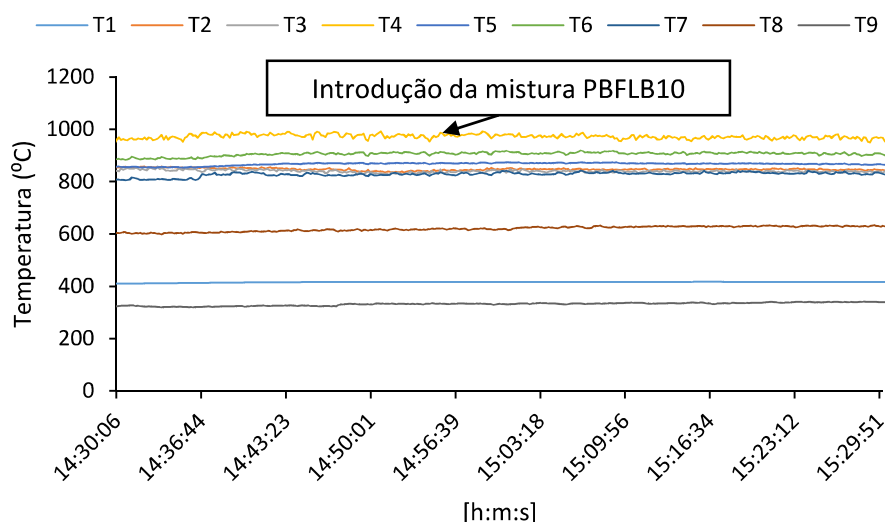


Figura 4.31 – Evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão 90% massa de *pellets* de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

Na Figura 4.32, verifica-se que durante a combustão da mistura PBFLB10 a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.3m acima do leito (localização da T4), contrariamente ao verificado na experiência anterior, onde a temperatura máxima registada ocorreu ao nível da sonda T5. Para além disso, é registada uma anomalia no perfil de temperaturas, verificando-se que a T5 apresenta um valor médio inferior ao da T6. Esta anomalia no perfil longitudinal de temperaturas poderá estar relacionada com o mal funcionamento do termopar. No entanto, a temperatura máxima registada na região do *freeboard* (em T4) foi cerca de 961°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi de 848°C e de 356°C na exaustão (T9).

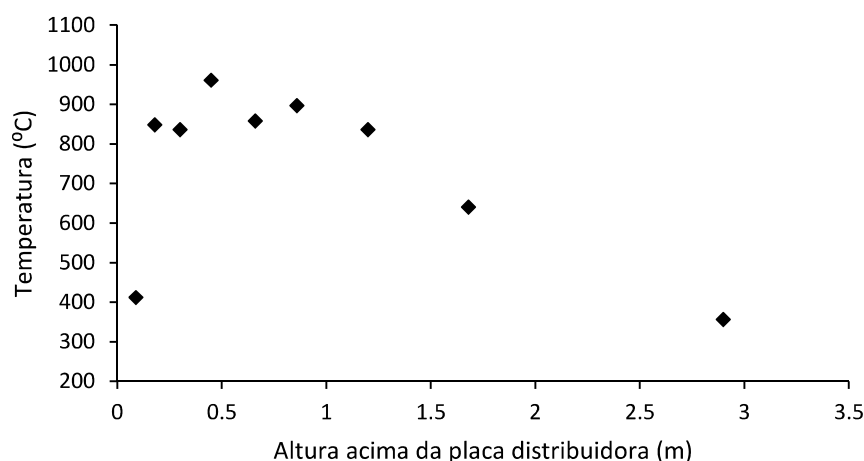


Figura 4.32 - Perfil longitudinal da temperatura durante a combustão de 90% massa *pellets* de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10).

Na Figura 4.33 está representada a evolução das espécies  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ , ao longo do tempo durante a combustão da mistura PBFLB10. Ao analisar a evolução das espécies, tal como em experiências anteriores, é verificada uma maior flutuação destas quando comparado com a temperatura. Contudo, esta flutuação ocorre em torno de um valor médio, significando que o reator de leito fluidizado encontrava-se a operar em regime estacionário. Os valores médios de concentração de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  durante a combustão da mistura PBFLB10 foram, respetivamente, 7%v, 12%v e 10%v.

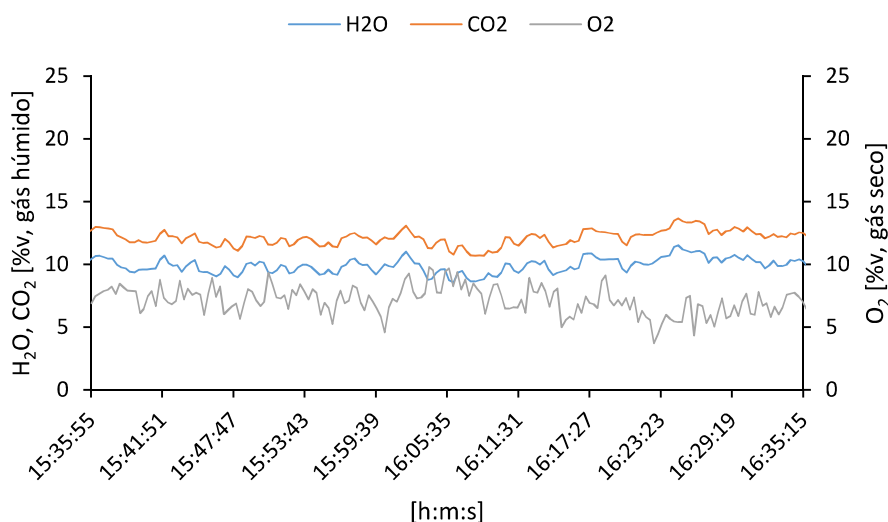


Figura 4.33 – Evolução da concentração de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90% massa *pellets* de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10).

A Figura 4.34 apresenta a evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub>, durante a combustão de 100% massa de *pellets* de biomassa florestal residual e da mistura PBFLB10. Analisando a evolução da concentração de CO é verificada uma baixa flutuação ao longo da experiência, com exceção do momento em que se deu início à alimentação da mistura PBFLB10. Contudo, com o decorrer da experiência a evolução da concentração de CO voltou à normalidade. Analisando o NO, este apresenta uma flutuação reduzida durante a combustão de 100% massa de *pellets*. Após a introdução da mistura PBFLB10 verifica-se uma maior flutuação da concentração de NO.

A concentração de HCl durante esta experiência apresenta um crescimento progressivo, contudo, verifica-se que a partir de um determinado período de tempo a concentração de HCl apresenta um decréscimo. No entanto, após o início da alimentação da mistura PBFLB10 volta-se a registar um crescimento progressivo da sua concentração, contudo, este crescimento acontece por um curto período de tempo, voltando a concentração de HCl a decrescer. Este decréscimo mantém-se até ao fim da experiência, mesmo depois de se voltar a alimentar 100% *pellets*, podendo este fenómeno estar relacionado com a adsorção do HCl por parte do cálcio (Ca) presente nas lamas biológicas.

As médias das concentrações de CO, NO e HCl obtidas durante a combustão da mistura PBFLB10 foram, respetivamente, 38.34, 133.05 e 8.28 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v de O<sub>2</sub>).

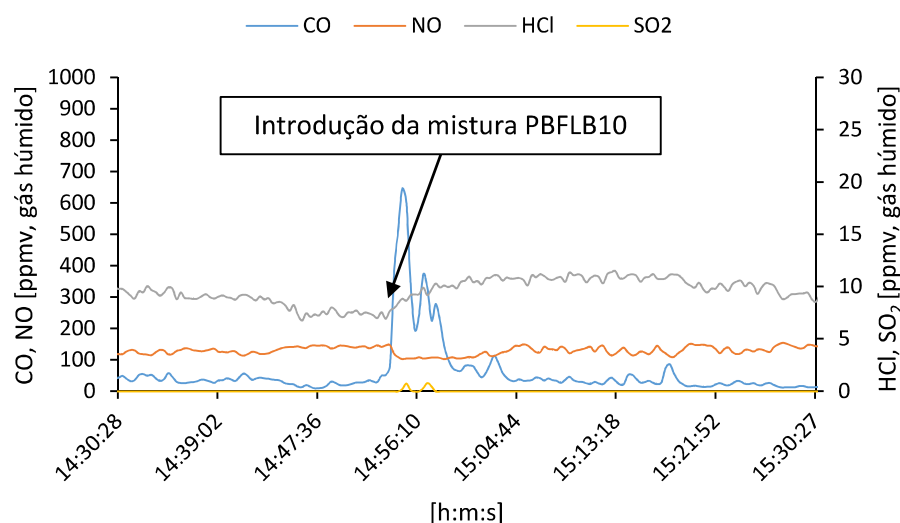


Figura 4.34 – Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa *pellets* de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas (mistura PBFLB10).

#### 4.3.7 Combustão de 90% massa *pellets* de finos (<1 mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura PFLB10)

Para esta experiência de combustão foi utilizado 90% massa de *pellets* proveniente de finos (<1 mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10% massa de lamas biológicas; a mistura tem referência PFLB10.

Através da análise da Figura 4.35, verifica-se que durante a combustão de 100% massa de *pellets* de finos e da mistura PFLB10, a evolução do perfil de temperaturas ao longo do tempo apresenta uma flutuação muito reduzida, significando que o reator de leito fluidizado está a operar em regime estacionário e que a introdução das lamas na alimentação não impõe mudanças no seu comportamento.

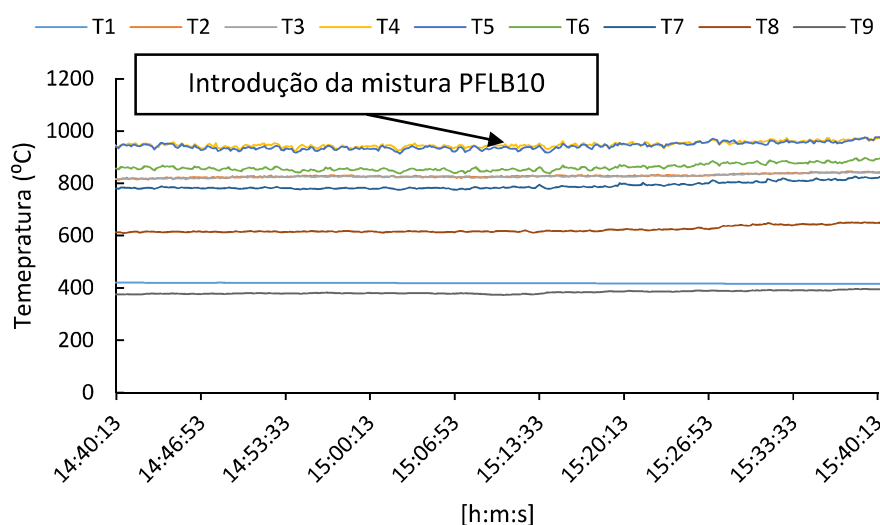


Figura 4.35 - Evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão 90% massa de *pellets* de finos de eucalipto com 10% massa de lamas biológicas (mistura PFLB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

Na Figura 4.36 está representado perfil longitudinal de temperaturas. Verifica-se que durante a combustão da mistura PFLB10, tal como observado na experiência anterior, a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.3m (localização T4), apresentando de seguida uma diminuição no espaço acima, como se tem verificado. A temperatura mais alta registada na zona do *freeboard* (T4) foi cerca de 968°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi de 837°C e de 374°C na exaustão (T9).

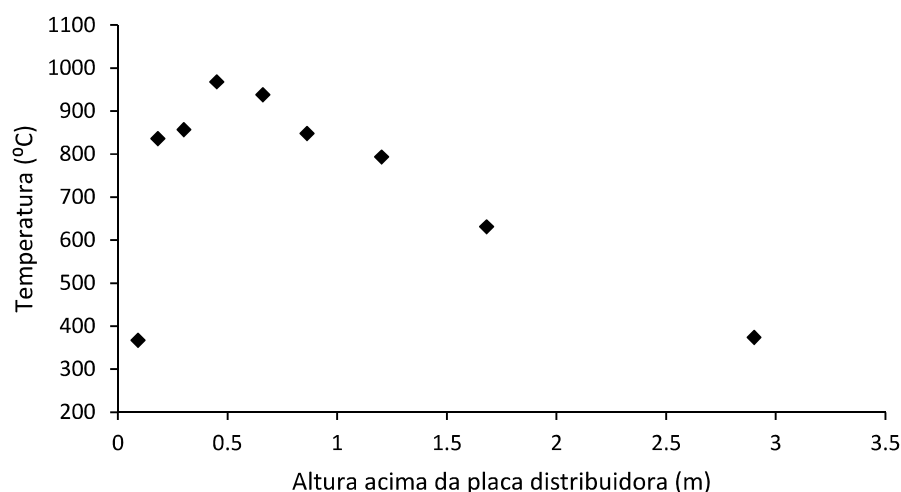


Figura 4.36 - Perfil longitudinal de temperaturas durante a combustão de 90% massa de *pellets* de finos de eucalipto com 10% massa de lamas biológicas (mistura PFLB10).

A Figura 4.37 apresenta a evolução da concentração das espécies presentes nos gases de exaustão ( $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ ) durante a combustão de 100% massa de *pellets* de finos e a Figura 4.38 a combustão da mistura PFLB10 ao longo do tempo. Ao analisar a evolução das espécies durante a combustão de 100% massa *pellets* de finos de eucalipto verifica-se uma flutuação de todas as espécies em torno de um valor médio. Contudo, após o início da alimentação da mistura verifica-se uma maior flutuação, quando comparado com a etapa anterior, está diretamente relacionada com a heterogeneidade existente na mistura dos *pellets* com as lamas biológicas. Os valores médios de concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão da mistura PFLB10 foram, respetivamente, 7%v, 13%v e 11%v.

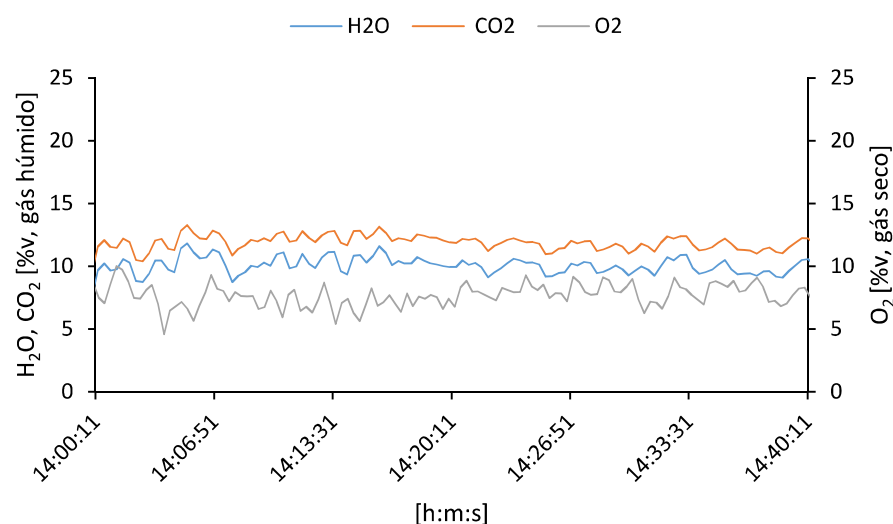


Figura 4.37 - Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$ , e  $O_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 100% massa de *pellets* finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual.



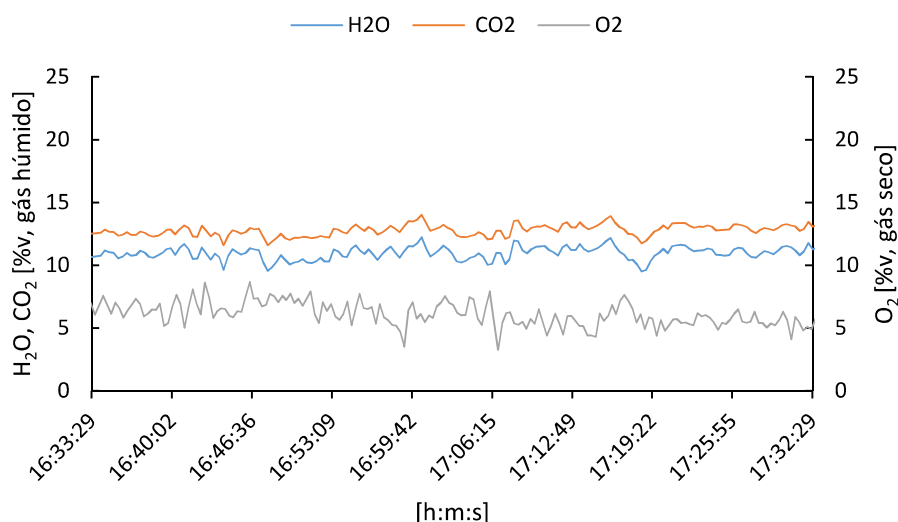


Figura 4.38 - Evolução da concentração de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , e  $\text{O}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90% massa *pellets* finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (mistura PFLB10).

Na Figura 4.39, está representada a evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do tempo, durante a combustão de 100% massa de *pellets* de finos com transição para a alimentação da mistura PFLB10. Durante a fase inicial da experiência onde é apenas alimentado *pellets* de finos, verifica-se uma flutuação reduzida da concentração de  $\text{CO}$ . Contudo, ao efetuar a transição para a alimentação da mistura PFLB10, é registada uma maior flutuação da sua concentração.

Relativamente à evolução da concentração de  $\text{NO}$  ao longo do tempo, verifica-se que tal como o  $\text{CO}$ , antes do início da alimentação das lamas biológicas, este apresenta uma flutuação reduzida; contudo, após o início de alimentação da mistura verifica-se uma maior flutuação da concentração de  $\text{NO}$ . Embora haja uma maior variação, esta ocorre em torno de um valor médio.

A evolução da concentração de  $\text{HCl}$  durante esta experiência apresenta um comportamento semelhante aos referidos anteriormente, mostrando um crescimento progressivo durante um determinado período de tempo e, posteriormente um decréscimo na sua concentração. Contudo, após o início da alimentação da mistura PFLB10 o incremento do  $\text{HCl}$  não foi muito significativo, voltando a demonstrar um decréscimo até ao final da experiência.

Durante esta experiência, apenas se verificou uma pequena flutuação das emissões de  $\text{SO}_2$  no início da operação, obtendo-se de seguida valores de concentração reduzidos (<5ppmv).

As médias das concentrações durante a combustão da mistura PFLB10, para o  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  e  $\text{HCl}$  foram, respetivamente, 48, 125 e 6  $\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11%v  $\text{O}_2$ ).

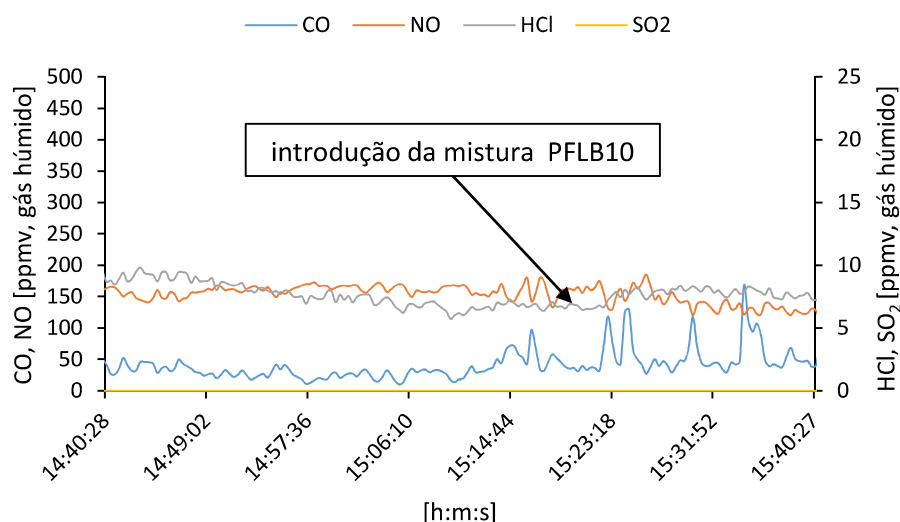


Figura 4.39 – Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90% massa de *pellets* finos (<1mm) da trituração de biomassa florestal residual com 10% massa lamas biológicas (PFLB10).

#### 4.3.8 Combustão de *pellets* Pinewells, *pellets* de casca (Tipo 1) de eucalipto, *pellets* de mistura de casca e folhas de eucalipto

Para a realização desta experiência de combustão foram utilizados três tipos de *pellets*, sendo estes: *Pellets* Pinewells (P1), *Pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) (P2) e *Pellets* de mistura casca e folhas de eucalipto (P3).

Na Figura 4.40 está representado o perfil de temperaturas ao longo do tempo em altura no reator de leito fluidizado. Verifica-se que as flutuações existentes no perfil de temperatura apresentam uma flutuação muito reduzida, mesmo após se ter efetuado a mudança de alimentação para a combustão de *pellets* de casca (Tipo 1), contudo, existe um ligeiro aumento da temperatura ao longo do tempo. Este aumento está diretamente relacionado com um aumento da velocidade de alimentação, de modo a manter uma condição de operação semelhante às experiências já realizadas.

Na Figura 4.41, estão representados os perfis de temperatura relativamente à combustão dos *pellets* P1, P2 e P3. Verifica-se que para os diferentes tipos de *pellets*, a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à sonda T5 começando depois a diminuir no espaço acima. A temperatura mais elevada durante a combustão de cada tipo de *pellet* na zona do *freeboard* (em T5) foi de 908°C para os *pellets* P1, 935°C para os *pellets* P2 e 931°C para os *pellets* P3. Relativamente às médias obtidas no interior do leito (T2) foram de 838°C para os *pellets* P1, 820°C para os *pellets* P2 e 837°C para os *pellets* P3. As médias obtidas na exaustão (T9) foram 345°C para os *pellets* P1, 382°C para os *pellets* P2 e 389°C para os *pellets* (P3).

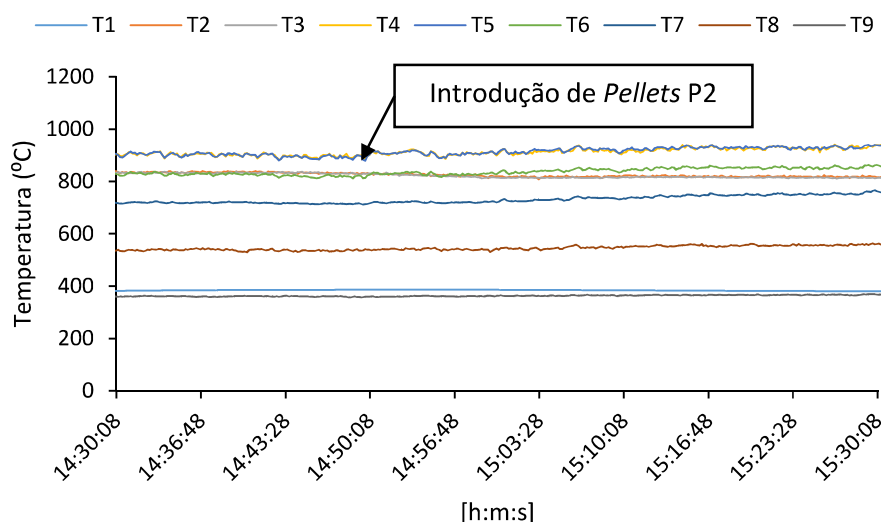


Figura 4.40 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) (*pellets* P2). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

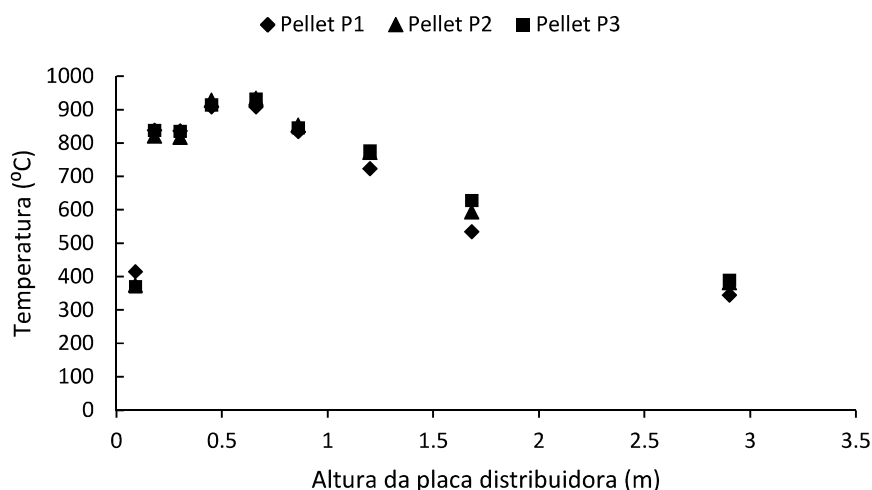


Figura 4.41 - Perfil longitudinal de temperatura durante a combustão de *pellets* Pinewells (*pellets* P1), *pellets* de casca de eucalipto (*pellets* P2) e *pellets* de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).

Na Figura 4.42 verifica-se que a evolução da concentração das espécies  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  ao longo do tempo, durante a combustão dos *pellets* P1, apresenta uma flutuação muito reduzida, no entanto, esta é superior à verificada no perfil de temperaturas. Aquando a adição dos *pellets* P2 verifica-se de imediato uma flutuação mais acentuada na concentração das espécies  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$ . Contudo, esta maior amplitude de flutuações na concentração das espécies não se reflete no perfil de temperatura, o qual apresenta uma temperatura relativamente uniforme.

Na Figura 4.43, está representada a evolução ao longo do tempo das espécies acima referidas durante a combustão dos *pellets* P3. Verifica-se que a transição da alimentação para

os *pellets* P3 não apresenta alterações no comportamento do perfil de temperatura. Contudo, relativamente à evolução das espécies  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ , verifica-se uma maior flutuação das mesmas, mas não representando um impacto no funcionamento do reator, visto que as temperaturas permanecem sempre em torno de um valor médio com flutuações muito reduzidas. Os valores médios de concentração  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  estão representados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores médios de concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  nos gases de exaustão, durante a combustão de *pellets* Pinewells (P1), *pellets* de casca de eucalipto (P2) e *pellets* de mistura casca e folhas de eucalipto (P3).

<i>Pellets</i>	$O_2\%v$	$CO_2\%v$	$H_2O\%v$
<b>P1</b>	9	12	9
<b>P2</b>	8	12.	10
<b>P3</b>	8	12	10

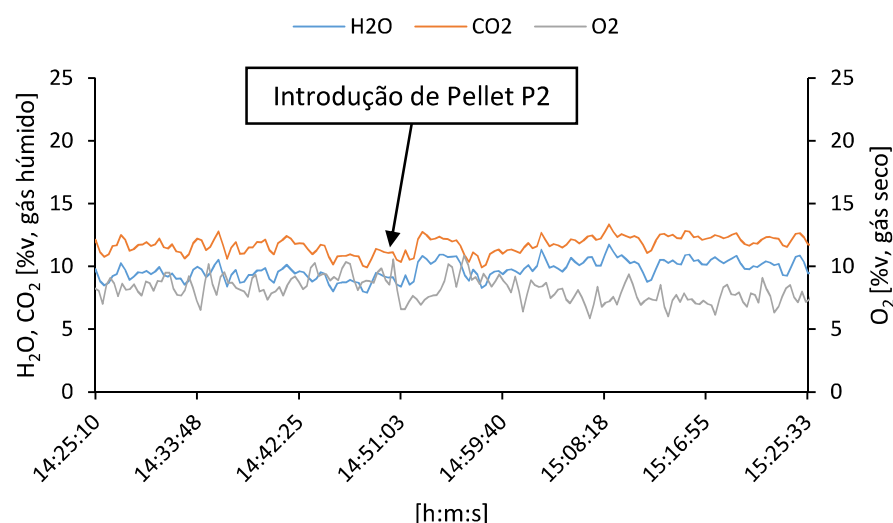


Figura 4.42 – Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de *pellets* certificados e transição para *pellets* casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).

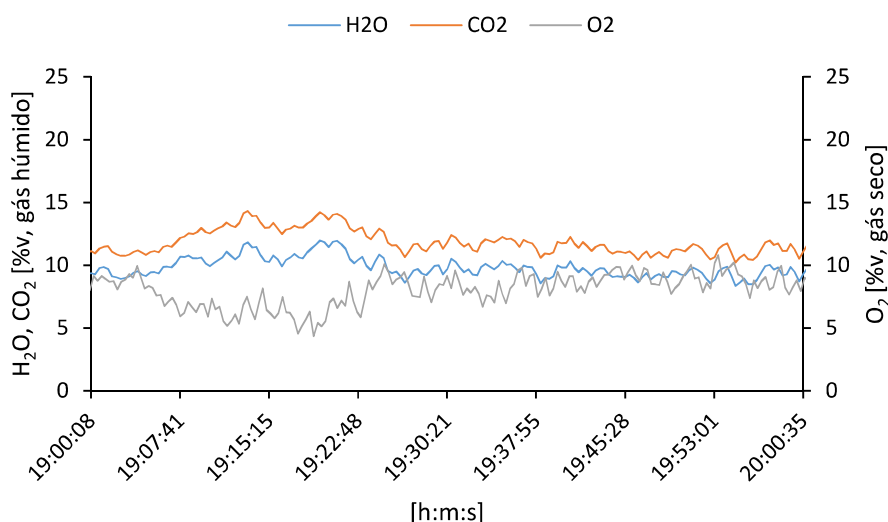


Figura 4.43 – Evolução da concentração de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de *pellets* de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).

Na Figura 4.44 está representada evolução da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  ao longo do tempo. Verifica-se que durante a combustão de *pellets* P1 a flutuação de todos os componentes é muito reduzida, conseguindo manter-se em torno de um valor médio, sendo este também reduzido. Após o início da alimentação dos *pellets* P2, verifica-se tanto um incremento na evolução de todos os componentes como, também, uma maior flutuação, sendo esta mais evidente na concentração de  $\text{CO}$ . Verifica-se também que após o início da alimentação dos *pellets* P2 a concentração de  $\text{HCl}$  apresenta um aumento progressivo ao longo do tempo. Contudo, analisando a Figura 4.45, é verificado um decréscimo ao longo do tempo, o qual se continua a verificar na Figura 4.46.

Na Figura 4.46 foi registada uma elevada flutuação da concentração de  $\text{CO}$ , estando esta relacionada com a presença de material fino. Este material fino é derivado destes *pellets* devido ao seu *stock* estar próximo do fim. A razão pela qual este material fino provoca uma elevada flutuação a nível de  $\text{CO}$ , deve-se à acumulação que ocorre no sem-fim. Quando este é alimentado ao reator de leito fluidizado a quantidade de material é superior à normal, provocando assim as flutuações registadas nas Figuras (Figura 4.45 e Figura 4.46).

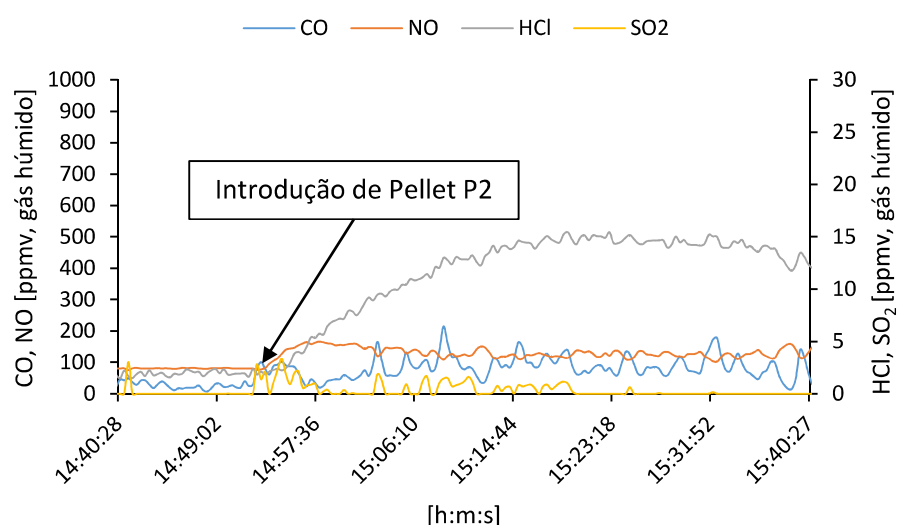


Figura 4.44 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de *pellets* Pinewells (P1), com transição para *pellets* casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).

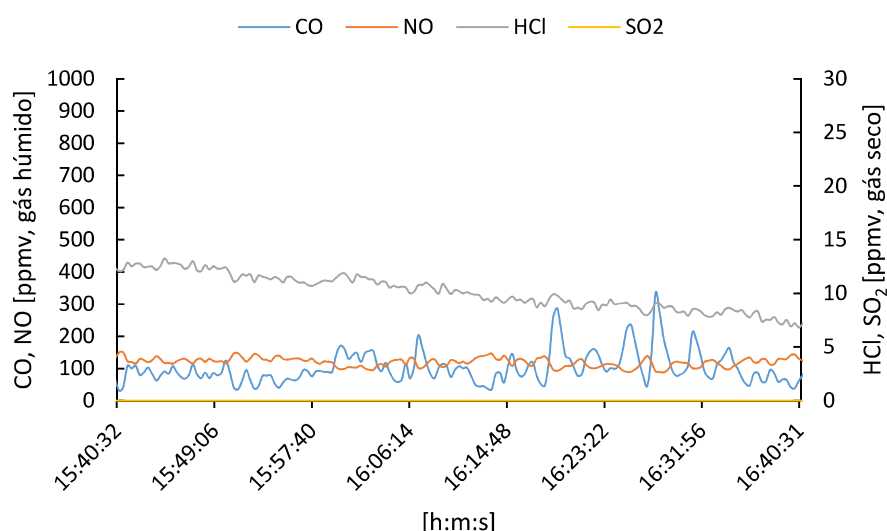


Figura 4.45 - Evolução da concentração de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) (P2).

Após a alimentação dos *pellets* P3, ao fim de um determinado período de tempo a flutuação da concentração de CO torna-se menos acentuada, apresentando valores mais constantes. Ao analisar a evolução do NO durante as várias transições de combustível, verifica-se um aumento da sua concentração aquando o início da alimentação de *pellets* P2, como verificado anteriormente. A alimentação dos *pellets* P3 no início apresentou valores inferiores de NO, no entanto, após um determinado período de tempo demonstrou uma flutuação em torno de valores médios observados durante a combustão de *pellets* de casca.

As médias das concentrações obtidas ao longo do tempo para cada tipo de *pellet* estão representadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores médios da concentração de CO, NO e HCl nos gases de exaustão, ao longo do tempo durante a combustão dos *pellets* Pinewells (P1), *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) (*pellets* P2) e *pellets* de casca e folhas de eucalipto (P3).

<i>Pellets</i>	CO	NO	HCl
mg·Nm <sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O <sub>2</sub> )			
<b>P1</b>	40	98	1
<b>P2</b>	231	130	10
<b>P3</b>	177	135	3

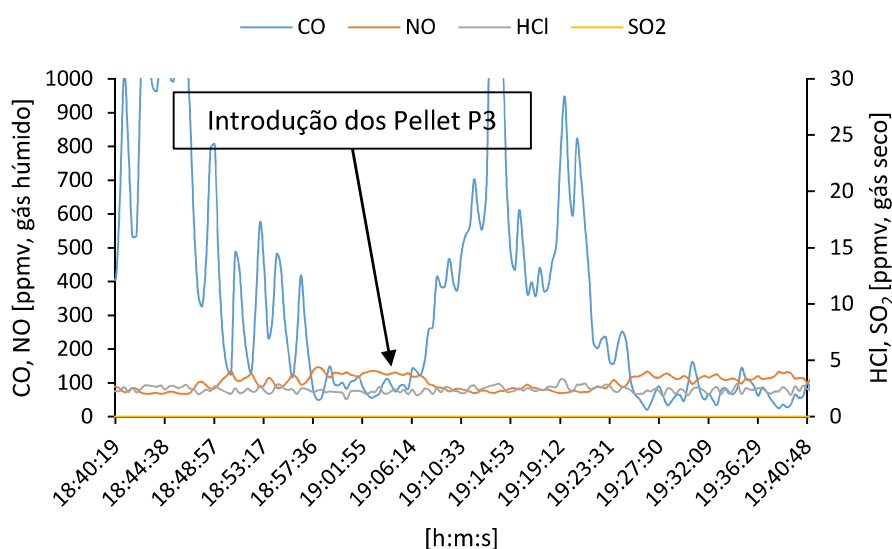


Figura 4.46 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo1) (*pellets* P2) com transição para *pellets* de mistura de casca e folhas de eucalipto (P3).

#### 4.3.9 Combustão de 95% massa *pellets* biomassa florestal residual e estilha com 5% massa lamas primárias (mistura PBFELP5)

Nesta experiência foram utilizados 90% massa de *pellets* de biomassa florestal residual e estilha com a adição de 5% massa de lamas primárias, com o objetivo de analisar a influência da utilização de lamas primárias como combustível secundário; a mistura tem referência PBFELP5.

Na Figura 4.47 está representada a evolução do perfil de temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 100% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha, e da combustão da mistura PBFELP5. Durante a combustão dos *pellets* de biomassa florestal e estilha, verifica-se uma flutuação muito reduzida do perfil de temperatura ao longo do tempo. Esta flutuação mantém-se mesmo após o início da alimentação da mistura PBFELP5. A flutuação observada ocorre em torno de um valor médio ao longo de toda a experiência. Sendo assim, após observado o perfil de temperaturas ao longo do tempo, averigua-se que

as lamas primárias não provocam alterações significativas no funcionamento do reator de leito fluidizado.

Na Figura 4.48, verifica-se que durante a combustão da mistura PBFELP5 a temperatura aumenta desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.3m acima do leito (localização da T4) diminuindo de seguida no espaço acima, como se tem verificado nas últimas experiências onde houve a combustão de *pellets*. A temperatura mais elevada monitorizada na zona do *freeboard* (em T4) foi cerca de 969°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi de 837°C e 374°C na exaustão (T9).

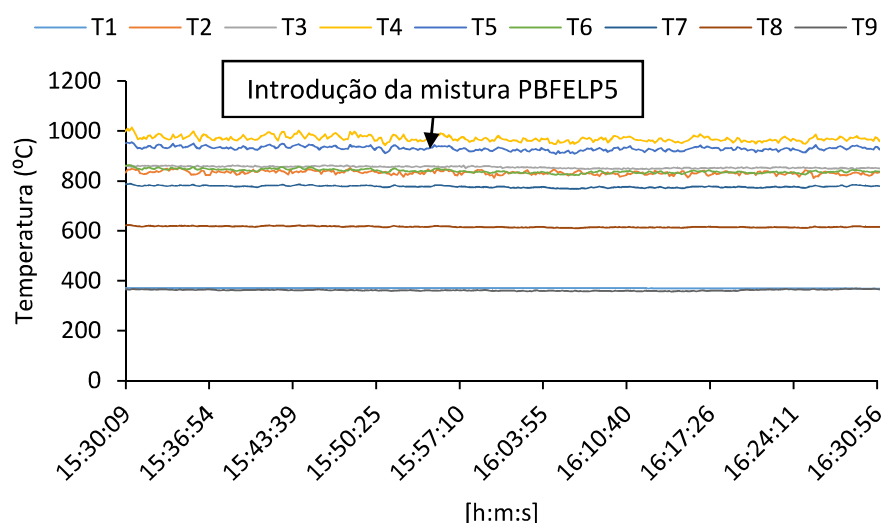


Figura 4.47 - Evolução da temperatura ao longo do tempo durante a combustão de 95% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha com 5% massa de lamas primárias (mistura PBFELP5). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

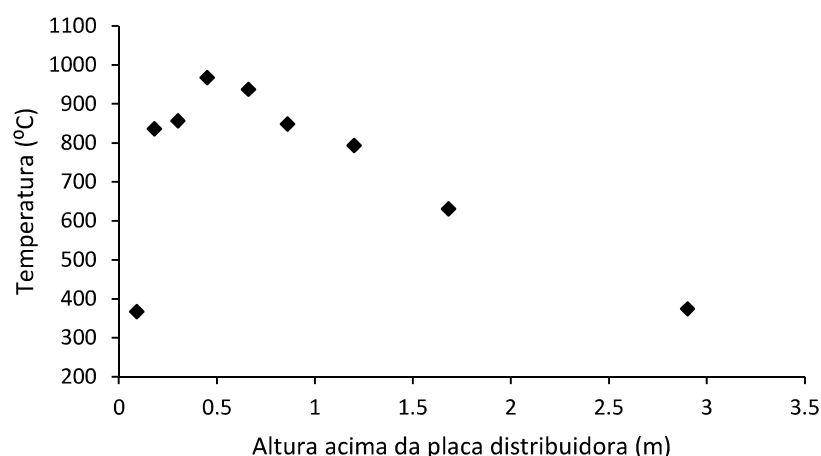


Figura 4.48 - Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante a combustão de 95% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha com 5% massa de lamas primárias (PBFELP5).



Ao analisar as espécies  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  representadas na Figura 4.49, verifica-se uma maior flutuação da evolução das espécies, quando comparado com o perfil de temperaturas analisado anteriormente. Porém, esta flutuação apresenta um comportamento muito reduzido, significando que o reator de leito fluidizado está a operar em regime estacionário. Após o início da alimentação da mistura PBFELP5 não são verificadas alterações na evolução das espécies  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Os valores médios de concentração de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  durante a combustão da mistura PBFELP5 foram, respetivamente, 8%v, 10%v e 12%v.

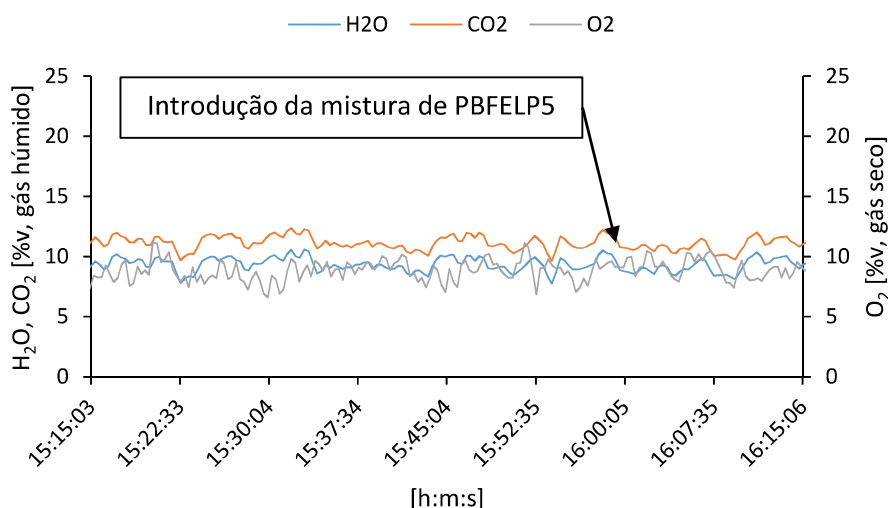


Figura 4.49 – Evolução da concentração de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  nos gases de exaustão ao longo do tempo, durante a combustão de 90% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha com 10% massa de lamas biológicas (mistura PBFELP5).

A Figura 4.50 apresenta a evolução ao longo do tempo da concentração de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{SO}_2$  durante a combustão de 100% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha. A evolução da concentração de  $\text{CO}$  apresenta uma flutuação pouco acentuada. Após a introdução da mistura PBFELP5, não é verificado um impacto significativo na sua evolução, contrariamente ao que se tem verificado nas experiências anteriores, uma vez que quando eram adicionadas as misturas de *pellets* com lamas biológicas, estas promoviam uma flutuação mais acentuada nas concentrações de  $\text{CO}$  e  $\text{NO}$ . Relativamente ao  $\text{NO}$ , este apresenta flutuação reduzida da sua evolução, antes e após o início da alimentação da mistura, mantendo um comportamento semelhante ao do início da operação.

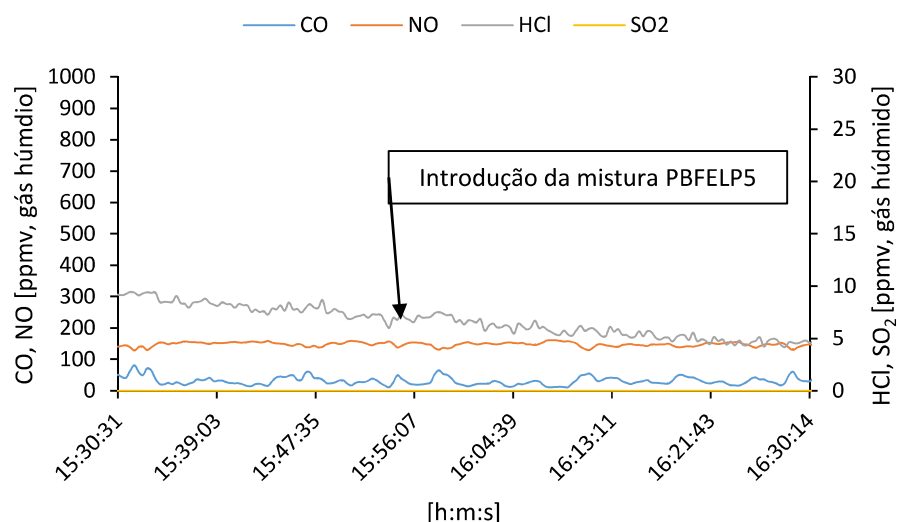


Figura 4.50 – Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão, ao longo do tempo durante a combustão de 95% massa de *pellets* de biomassa florestal e estilha com 5% massa de lamas primárias (mistura PBFELP5).

A evolução da concentração de HCl demonstra um comportamento semelhante ao verificado em experiências anteriores, apresentando um crescimento progressivo e mostrando de seguida um decréscimo. No entanto, ao adicionar a mistura PBFELP5, não é verificado um aumento da evolução de HCl, contudo, verifica-se um decréscimo mais acentuado da sua concentração.

Os valores médios de concentração obtidos para o CO, NO e HCl durante a combustão da mistura de PBFELP5 foram, respetivamente, 80, 148 e 5 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>).

#### 4.3.10 Combustão de 90% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa lamas biológicas (mistura PC2LB10)

Para a realização desta experiência foram utilizados 90% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa de lamas biológicas; a mistura tem referência PC2LB10.

Através da análise da evolução das temperaturas ao longo do tempo (Figura 4.51), verifica-se uma flutuação muito reduzida da temperatura, sendo isto resultado de um bom funcionamento do reator de leito fluidizado. Após o início da alimentação da mistura PC2LB10 não são verificadas alterações na evolução do perfil de temperaturas.

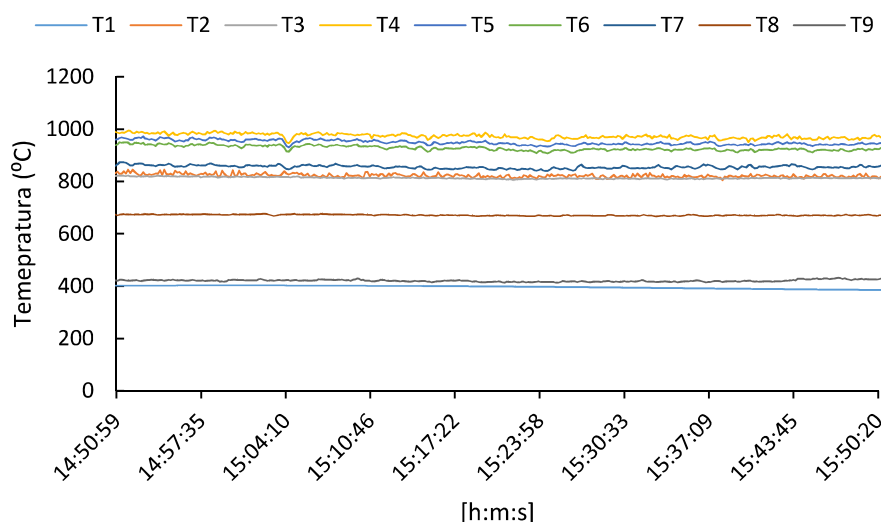


Figura 4.51 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 90% massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

A Figura 4.52, representa o aumento da temperatura durante a combustão da mistura PC2LB10, desde o interior do leito (T2) até à região do *freeboard* a cerca de 0.3m acima da superfície do leito (localização da T4), demonstrando de seguida um decréscimo no espaço acima, devido à presença do permutador de calor. A temperatura mais elevada ocorreu na zona do *freeboard* (em T4) a cerca de 953°C, enquanto que a temperatura média no interior do leito (T2) foi de 830°C e de 431°C na exaustão (T9).

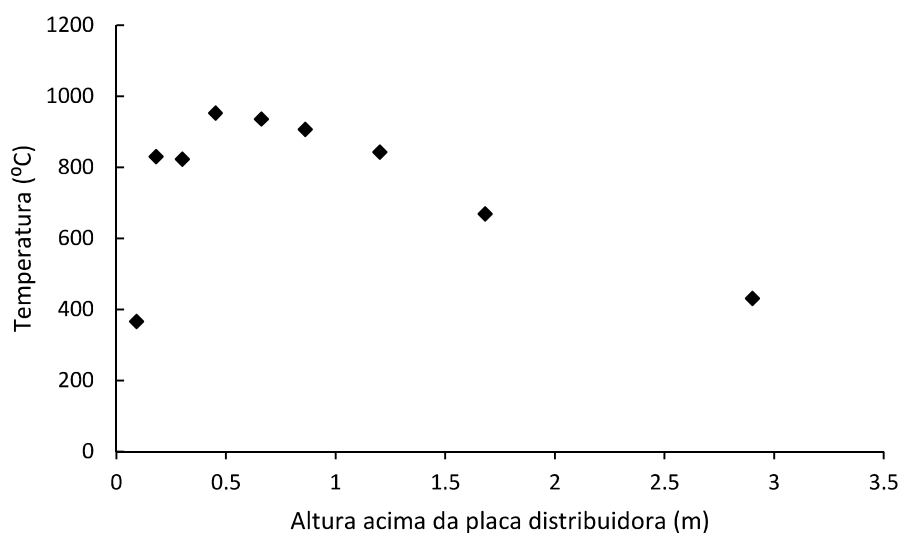


Figura 4.52 - Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante combustão de 90% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10).

Na Figura 4.53 está representada a evolução das espécies  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ , durante a combustão de apenas *pellets* de casca de eucalipto. Verifica-se que a existência de uma

flutuação muito reduzida, contudo, sendo esta superior à variação verificada nas temperaturas. Ao analisar a evolução do  $O_2$  durante esta etapa da experiência, existe momentos onde ocorre uma flutuação mais acentuada. É também de referir que durante esta experiência de combustão, os valores de concentração de  $O_2$  foram inferiores aos registados nas experiências anteriores.

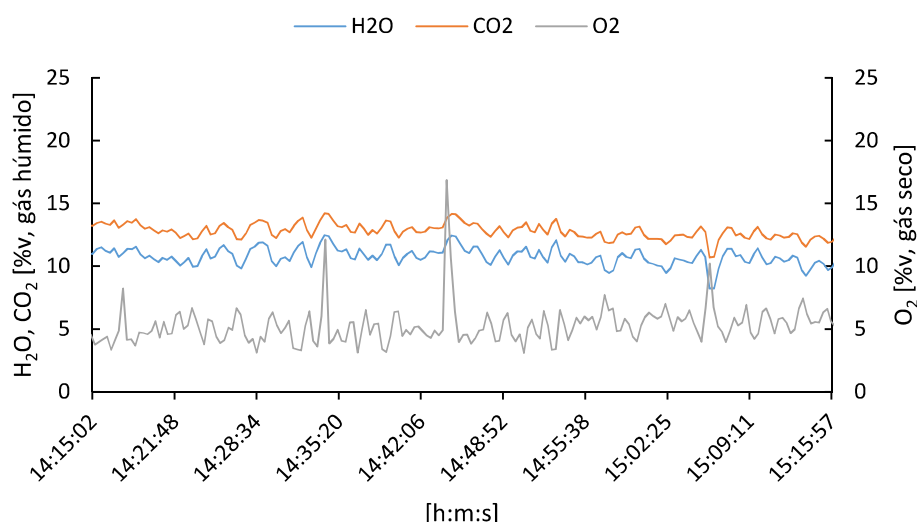


Figura 4.53 – Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$  nos gases de exaustão, ao longo do tempo ao durante a combustão de 100% massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2).

Na Figura 4.54, verifica-se que a após o início da alimentação da mistura PC2LB10, não houve alterações significativas na concentração das espécies.

Durante a combustão da mistura PC2LB10, os valores médios de concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ , foram, respetivamente, 5%v, 13%v e 11%v.

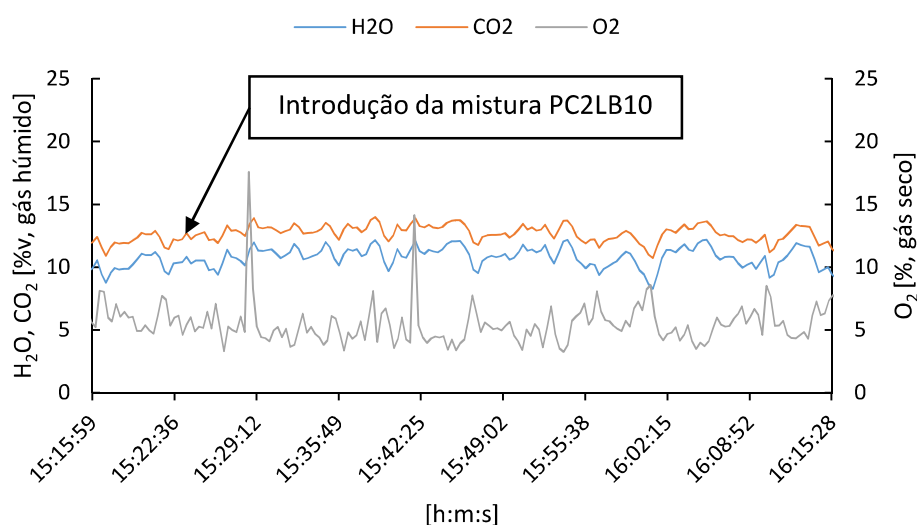


Figura 4.54 – Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e nos gases de exaustão, ao longo do tempo ao durante a combustão de 90% massa pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10).

Nas Figuras (*Figura 4.55* e *Figura 4.56*), estão representadas as evoluções das concentrações de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub> ao longo do tempo, durante a combustão dos pellets de casca e da mistura PC2LB10, respetivamente. Durante a combustão de apenas pellets de casca de eucalipto (Tipo 2) verifica-se uma flutuação muito reduzida em torno de um valor médio, mantendo um perfil constante relativamente às emissões de CO. Para além deste perfil constante, a concentração de CO apresenta valores muito reduzidos quando comparado às experiências anteriores. Contudo, estes valores foram obtidos com uma concentração de oxigénio mais reduzida em comparação com as experiências realizadas anteriormente. O início da alimentação da mistura PC2LB10, resulta numa maior variabilidade da concentração de CO, contudo mantendo sempre uma flutuação em torno de um valor médio reduzido.

A concentração de NO durante a combustão de 100%massa de casca de eucalipto (Tipo 2), apresenta uma flutuação muito reduzida. Contudo, após a introdução da mistura PC2LB10, verifica-se uma maior flutuação da sua concentração, estando este fator relacionado com a heterogeneidade existente na mistura de *pellets* com lamas biológicas.

Relativamente à evolução da concentração de HCl ao longo do tempo, durante a combustão de 100%massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2). Verifica-se um aumento progressivo, no entanto, quando comparado com experiências anteriores, onde houve a combustão de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1), os valores médios obtidos para o HCl durante esta etapa foram superiores aos registados anteriormente. Após o início da alimentação da mistura PC2LB10, verifica-se um aumento na evolução da concentração de HCl. No entanto, ao fim de um período de tempo a evolução da concentração de HCl apresenta um decréscimo não muito acentuado até ao final da experiência.

As médias das concentrações de CO, NO, HCl e SO<sub>2</sub>, durante a combustão da mistura PC2LB10 foram, respetivamente, 14, 120, e 55 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>).

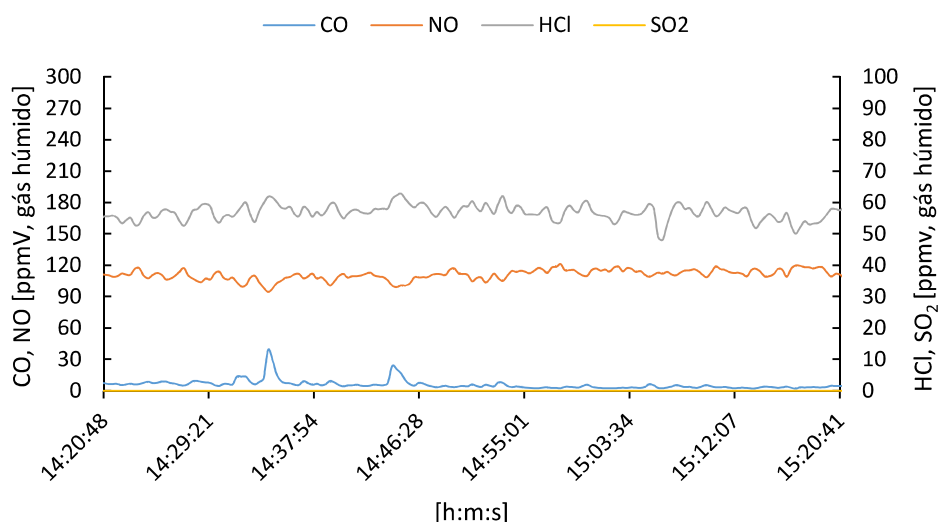


Figura 4.55 – Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão durante a combustão de 100% massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2).

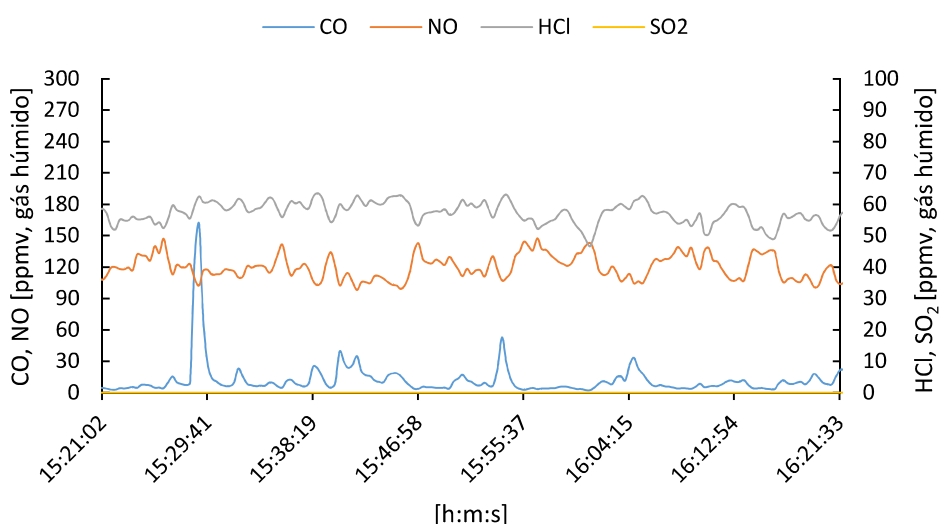


Figura 4.56 - Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão durante a combustão de 90% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 10% massa de lamas biológicas (mistura PC2LB10).

#### 4.3.11 Combustão de 95% massa *pellets* de casca (Tipo 2) com 5% massa lamas primárias (mistura PC2LP5)

Nesta experiência os combustíveis utilizados na mistura foram 95% massa de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) com 5% massa de lamas primárias; a mistura tem referência PC2LP5.

Na Figura 4.57 está representada a evolução das temperaturas ao longo do tempo em varias localizações em altura ao longo do reator, durante a combustão da mistura PC2LP5.

Verifica-se que a flutuação existente na evolução da temperatura ao longo do tempo é muito reduzida, o que representa um bom funcionamento do reator de leito fluidizado.

O aumento da temperatura ao longo do reator ocorre de forma muito semelhante ao verificado na experiência anterior (secção 4.3.10), onde a temperatura aumenta desde o interior do leito T2 até à zona do *freeboard* (localização T5) (Figura 4.58), onde de seguida é demonstrado um decréscimo das temperaturas nas restantes localizações. A temperatura máxima monitorizada na zona do *freeboard* (em T5) foi cerca de 970°C, sendo que a temperatura média no interior do leito (T2) foi 838°C e de 390°C na exaustão (T9).

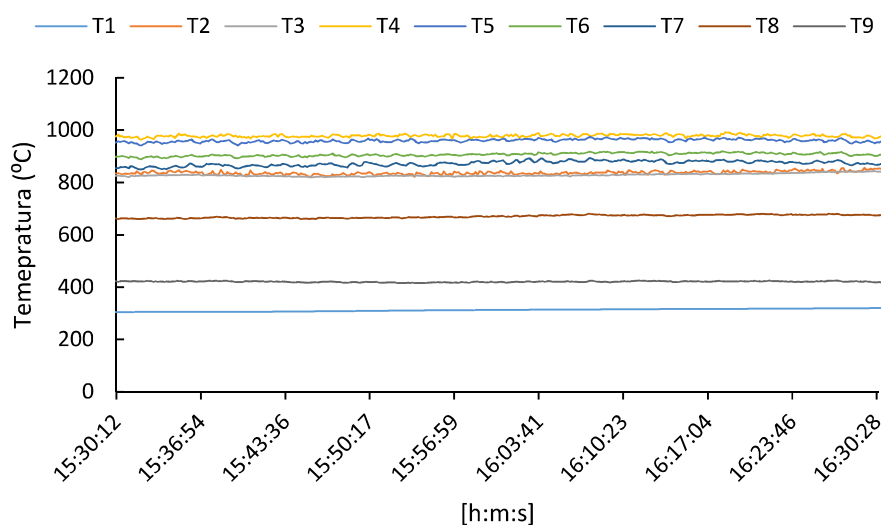


Figura 4.57 - Evolução das temperaturas ao longo do tempo durante a combustão de 95% massa de *pellets* de casca (Tipo 2) com 5% massa de lamas primárias (mistura PC2LP5). Localização dos pontos de medição da temperatura acima do distribuidor de ar primário (base do leito): T1 – 0.09 m, T2 – 0.18 m, T3 – 0.30 m, T4 – 0.45 m, T5 – 0.66 m, T6 – 0.86 m, T7 – 1.20 m, T8 – 1.68 m, T9 – 2.90 m.

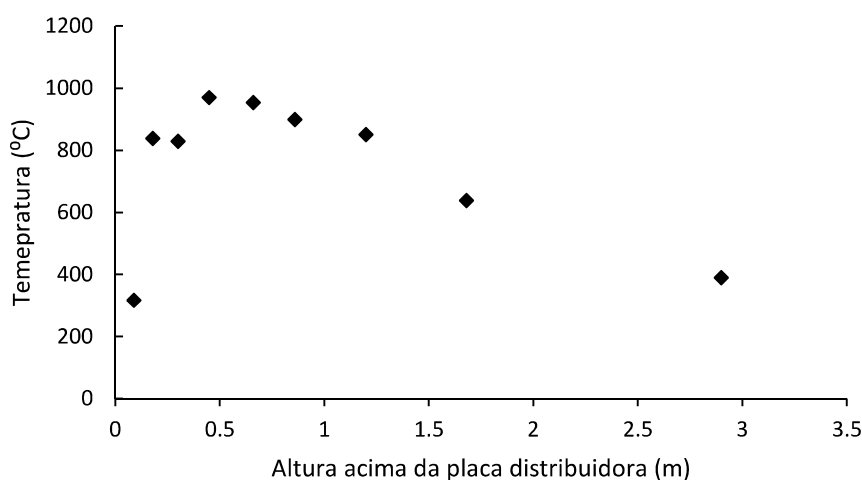


Figura 4.58 – Perfil longitudinal de temperaturas em altura durante combustão de 95% massa de *pellets* de casca (Tipo 2) com 5% massa de lamas primárias (mistura PC2LP5).

A Figura 4.59 representa a evolução das espécies  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ , durante a combustão da mistura PC2LP5. Verifica-se uma flutuação muito reduzida de todas as espécies em torno de um valor médio, como seria de esperar, uma vez que a análise do perfil de temperaturas demonstra um bom funcionamento do reator de leito fluidizado. Durante a combustão da mistura PC2LP5, tal como verificado na experiência anterior, a combustão ocorreu com valores de concentração de  $O_2$  reduzidos. As médias da concentração de  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  durante a combustão da mistura PC2LB10 foram, respetivamente, 5%v, 13%v e 11%v.

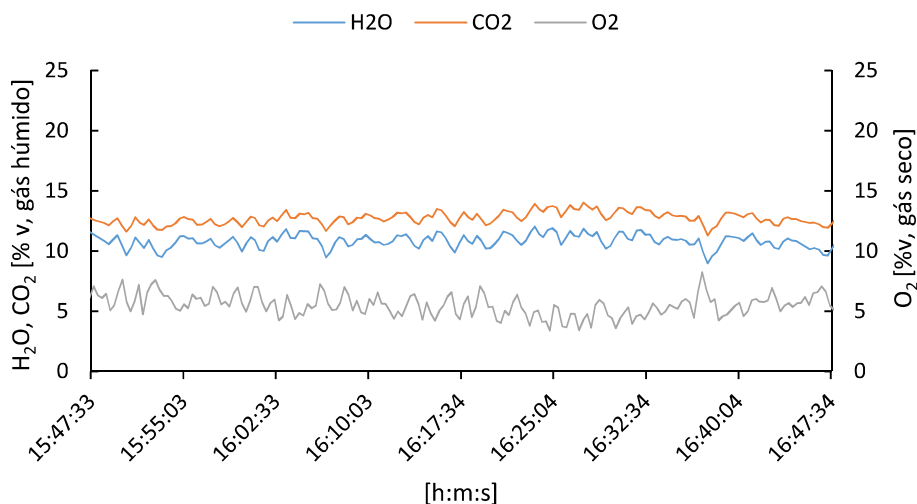


Figura 4.59 – Evolução da concentração de  $H_2O$ ,  $CO_2$  e  $O_2$ , nos gases de exaustão durante a combustão de 95% massa de *pellets* de casca (Tipo 2) com 5% massa de lamas primárias (mistura PC2LP5).

A Figura 4.60 apresenta a evolução da concentração de  $CO$ ,  $NO$ ,  $HCl$  e  $SO_2$  ao longo do tempo. Ao analisar a evolução  $CO$ , este demonstra uma flutuação mais acentuada no início da combustão de *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2), no entanto com o decorrer do tempo verifica-se que estas flutuações começam a atenuar diminuindo, também, o seu valor médio. Ao analisar a evolução do  $HCl$ , esta mostra um crescimento progressivo durante um período de tempo, apresentando de seguida um decréscimo na sua concentração.

Relativamente ao  $NO$ , a sua concentração apresenta uma flutuação pouco acentuada em torno de um valor médio. Com a introdução da mistura PC2LP5 (Figura 4.61) não são verificadas alterações significativas na sua concentração.

Durante a combustão da mistura é verificado um decréscimo na concentração de  $HCl$  presente nos gases de exaustão, mantendo sempre uma flutuação pouco acentuada, este decréscimo mantém-se até ao final da experiência.

As médias das concentrações de  $CO$ ,  $NO$ ,  $HCl$  e  $SO_2$  durante a combustão da mistura PC2LP5 foram, respetivamente, 10, 109 e 53  $mg \cdot Nm^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11%v  $O_2$ ).



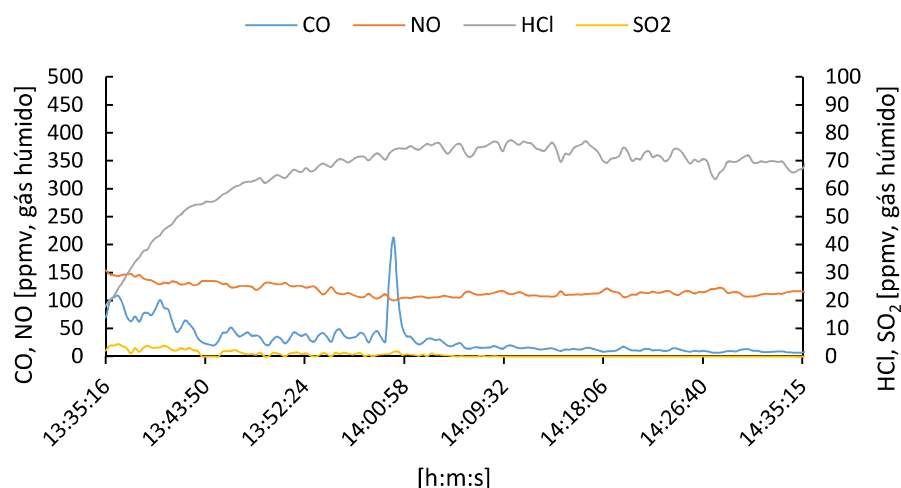


Figura 4.60 Evolução da concentração de NO, CO, HCl e SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão durante combustão de 100% massa *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2).

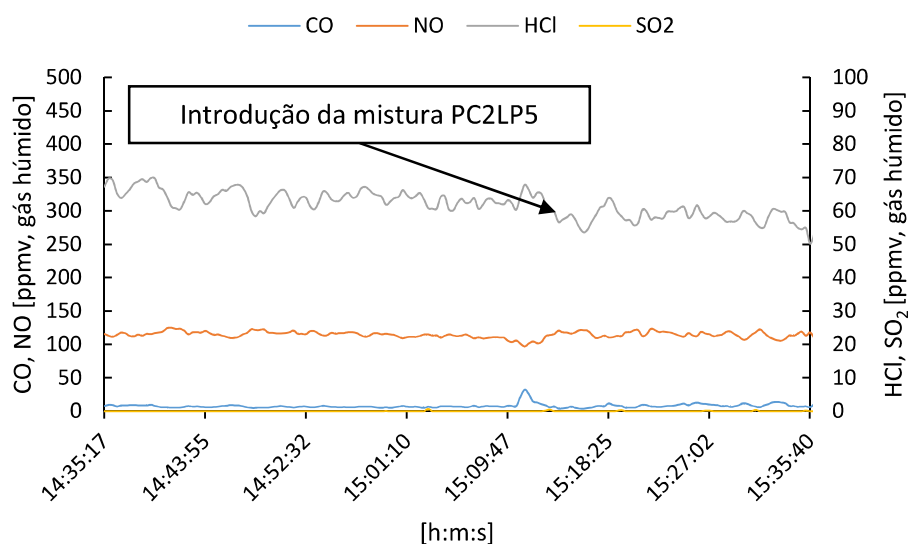


Figura 4.61 - Evolução da concentração CO, NO, HCl, SO<sub>2</sub> nos gases de exaustão durante a combustão de 95% massa de *pellets* de casca (Tipo 2) com 5% massa de lamina primárias (mistura PC2LP5).

#### 4.4 Comparação do perfil longitudinal de temperaturas

Durante a realização das várias experiências de combustão de diferentes misturas, a evolução da temperatura ao longo do reator demonstrou um perfil semelhante (Figura 4.62).

A análise do perfil longitudinal de temperatura ao longo do reator mostra que para as diferentes experiências a temperatura mais elevada ocorre na região do *freeboard* acima do leito, e que reflete o comportamento típico da combustão de biomassa tal como referido na secção 4.3.1. Este comportamento resulta do facto de a biomassa ser alimentada na superfície do leito, região esta onde acaba por ocorrer a libertação de uma fração significativa dos

voláteis, como é reconhecido neste tipo de reatores. Os voláteis libertados nessa região vão sendo oxidados à medida que se misturam com o oxigénio proveniente do leito, e se deslocam ao longo do *freeboard*, resultando destas reações exotérmicas a geração de uma quantidade significativa de energia térmica que promove o aumento da temperatura dos gases de combustão, e, portanto, desta região do reator.

A região do reator que revelou maior amplitude de temperatura para as diferentes experiências foi também no *freeboard*, e na região onde as temperaturas são mais elevadas, isto é, nas localizações T5 e T6. Estas diferenças de temperatura poderão estar relacionadas com a composição da mistura de biomassa e com a forma como partículas de diferentes tipos de biomassa/lamas se decompõem e reagem em diferentes locais do reator, por exemplo leito ou *freeboard*; por exemplo, partículas maiores e mais densas terão tendência a reagir na região do leito, enquanto partículas mais finas e menos densas terão tendência a sofrer decomposição termoquímica na zona de alimentação, na superfície do leito e consequentemente ser oxidadas nessa região. Este comportamento traduz-se em zonas diferenciadas de libertação de energia térmica e consequentes diferenças no perfil longitudinal de temperatura.

Importa referir que, no leito é possível realizar um maior controlo da temperatura mediante a inserção de um conjunto de permutadores de calor (sondas arrefecidas a água), de forma a garantir que a temperatura no leito não atinge valores superiores a 850°C, e dessa forma prevenir a existência de processos de fusão de cinzas e desfluidização do leito.

A existência de um permutador que possuía como fluido de refrigeração a água, é a razão pela qual a temperatura das sondas T7 e T8 apresenta uma média de valores muito aproximada.

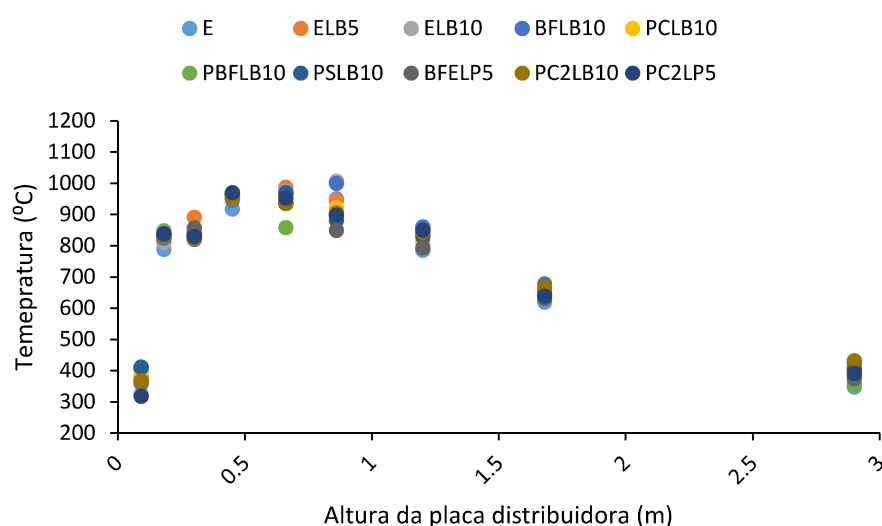


Figura 4.62 - Comparação da evolução da temperatura ao longo do reator durante a combustão da mistura de biomassa com lamas.

#### 4.5 Comparação dos resultados obtidos com a legislação portuguesa sobre emissão de poluentes gasosos

Neste trabalho, foi utilizada a Portaria 677/2009 como referência para avaliação do cumprimento dos requisitos legais de emissão de poluentes gasosos, nomeadamente CO e NO (expresso como NO<sub>2</sub>) durante a combustão de biomassa na instalação de leito fluidizado à escala piloto.

Foi realizada também uma comparação entre os valores de concentração de HCl nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das diferentes misturas, embora os valores de emissão para este poluente não estejam regulamentados na Portaria 677/2009 para instalações de combustão de biomassa.

Na Figura 4.63 são apresentados os valores médios de concentração de CO nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das diferentes misturas de biomassa. Quando comparado com a legislação verifica-se que só numa situação os valores de concentração de CO excedem os valores limite indicados na Portaria 677/2009. Nesse caso, tal resultado deve-se a questões que poderão estar relacionadas com as características físicas das partículas de biomassa florestal residual, que por estar na forma de estilha e conter frações de casca de eucalipto misturada, promoviam irregularidades na alimentação de combustível e que se refletiram em valores elevados de concentração de CO. Durante a combustão de pellets, e suas misturas com lamas, os valores de concentração de CO estão significativamente abaixo do valor limite de CO, o que reflete a qualidade do combustível no desempenho do sistema de conversão de energia. Importa que, para além de ser um poluente, o CO é também um indicador de eficiência de combustão, em termos de conversão de carbono; uma baixa concentração de CO significa uma elevada eficiência de conversão de carbono em CO<sub>2</sub>.

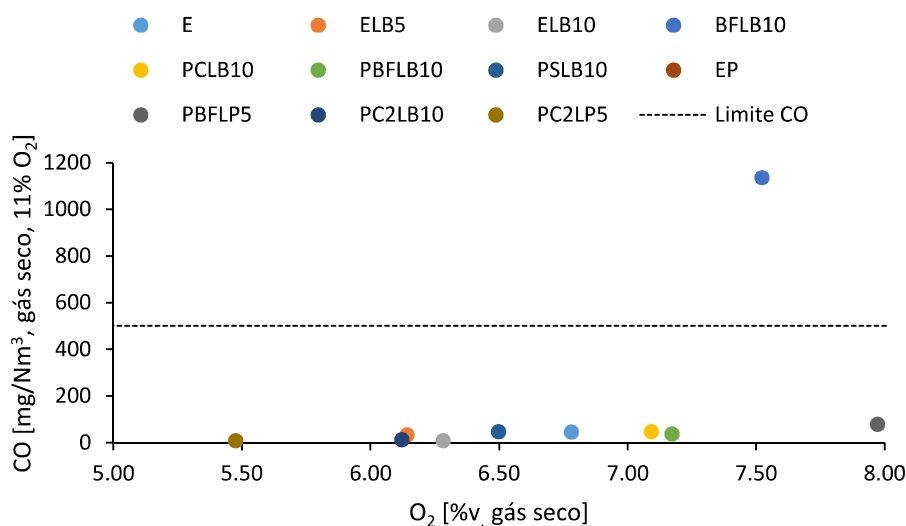


Figura 4.63 – Valores de concentração de CO nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das misturas de biomassa, e sua comparação com o limite de concentração (500 mg·Nm<sup>-3</sup>) de CO nos gases de exaustão de acordo com a Portaria 677/2009 (linha a tracejado)[27].

Na Figura 4.64 são apresentados os valores de concentração de NO, expresso como NO<sub>2</sub> (Portaria 677/2009) nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das misturas de biomassa. Verifica-se que os valores de concentração de NO, expresso como NO<sub>2</sub>, se encontram abaixo do valor limite de concentração imposto pela Portaria 677/2009.

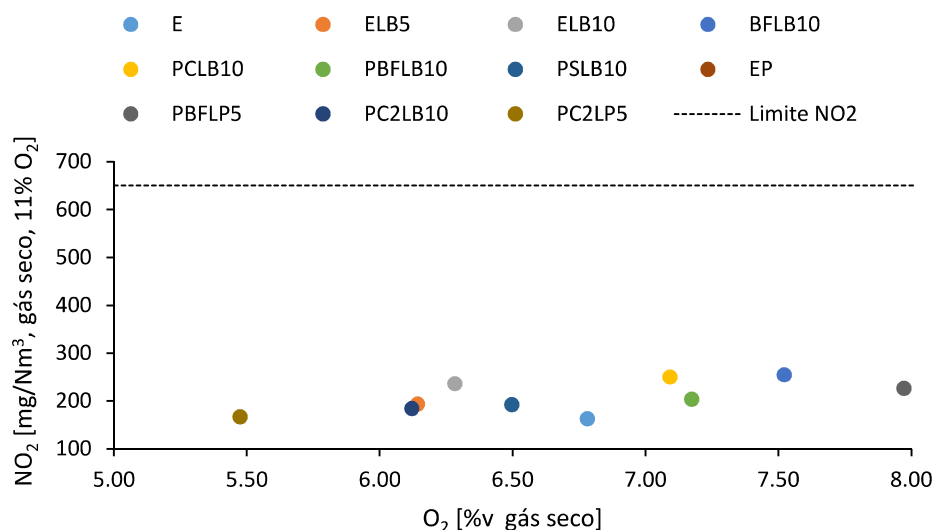


Figura 4.64 – Figura 4.65 – Valores de concentração de NO, expresso como NO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão durante as experiências de combustão das misturas de biomassa, e sua comparação com o limite de concentração (650 mg·Nm<sup>-3</sup>) de NO, expresso como NO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão de acordo com a Portaria 677/2009 (linha a tracejado).

Relativamente à concentração de SO<sub>2</sub>, nos gases de exaustão, verifica-se que durante as experiências de combustão das misturas de biomassa, os valores de concentração estão tipicamente abaixo de 6 mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>) e portanto abaixo do valor limite de concentração imposto pela Portaria 677/2009, que é 600mg·Nm<sup>-3</sup> (gases secos, corrigido a 11%v O<sub>2</sub>)).

Relativamente ao HCl, embora os valores de concentração nos gases de exaustão não estejam regulamentados na Portaria 677/2009 para instalações de combustão de biomassa, foi realizada uma comparação entre os valores obtidos nas diferentes experiências. Para além de ser um poluente atmosférico, o HCl tem muita relevância no contexto da operação dos sistemas de combustão de biomassa, pois é reconhecido o seu papel ativo em fenómenos de corrosão de superfícies metálicas expostas aos gases de combustão. Verificou-se que nas experiências onde foram utilizados como combustível os pellets de casca de eucalipto (PC22LB10, PC2LP5 e PCLB10) os valores de concentração de HCl nos gases de exaustão são superiores ao observado para as outras misturas de biomassa.

Neste contexto, importa desenvolver metodologias de operação e misturas de biomassa que possam mitigar os efeitos adversos do Cl na biomassa sobre as emissões de poluentes

gasosos como o HCl, e portanto sobre os Ecossistemas, e também sobre os equipamentos de conversão de energia, como por exemplo, fenómenos de corrosão.

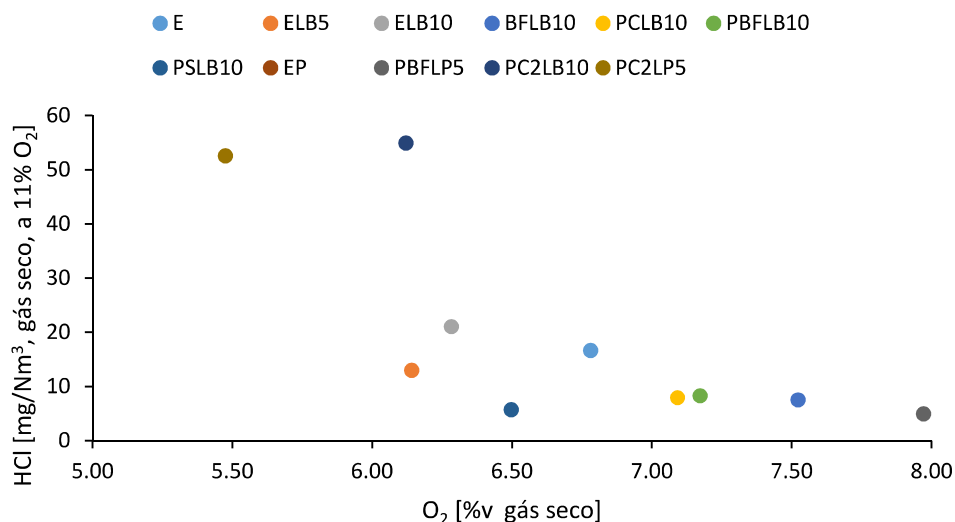


Figura 4.66 – Comparação da concentração de HCl nos gases de exaustão para as diferentes experiências de combustão.

#### 4.6 Aspeto das condutas de exaustão do reator de leito fluidizado após a realização das experiências de combustão

Após cada experiência de combustão foi realizada a limpeza e manutenção da instalação de combustão. Durante esta operação de limpeza foi registado o estado das condutas de exaustão, sondas de deposição e paredes do reator.

Nas experiências onde o combustível utilizado foi somente biomassa florestal residual, estilha de eucalipto, ou *pellets* de casca de eucalipto, verificou-se uma pequena quantidade de cinzas depositadas nas condutas de exaustão do reator de leito fluidizado, quando comparado com o que sucedeu aquando da combustão de misturas de biomassa florestal com lamas biológicas ou lamas primárias. De facto, a introdução das lamas, primárias ou secundárias (biológicas), mesmo em pequena percentagem em massa (5 a 10%) na mistura combustível, promoveu um incremento significativo da quantidade de cinza depositada nas condutas (Figuras Figura 4.67 e Figura 4.68). Este resultado explica-se em resultado do relativamente elevado conteúdo de cinza apresentado pelas lamas (Figura 4.1, Tabela 4-1).

Das várias experiências de combustão realizadas, aquelas onde se verificou uma maior acumulação de cinzas foi durante a combustão de misturas contendo lamas primárias (e.g., Figura 4.68).



Figura 4.67 – Conduto de exaustão e de ligação do reator de leito fluidizado ao ciclone, após combustão das misturas: a) 90%massa biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas; b) 90%massa *pellets* de biomassa florestal residual com 10%massa lamas biológicas.



Figura 4.68 - Conduto de exaustão do reator de leito fluidizado após combustão da mistura composta por 95%massa *pellets* casca de eucalipto com 5%massa lamas primárias.

## 5 Conclusão

A tecnologia de leito fluidizado borbulhante possuiu uma elevada flexibilidade para operar com diversos tipos de combustíveis e com elevados teores de humidade. Sendo assim, trata-se de uma boa alternativa para contribuir para eliminação dos resíduos provenientes da indústria da pasta do papel, ao contrário das outras alternativas disponíveis, como a deposição em aterros ou compostagem.

Com base nas experiências realizadas, verificou-se que durante a combustão de *pellets* e estilha de eucalipto as temperaturas ao longo do tempo apresentaram sempre flutuações muito reduzidas com exceção da combustão de biomassa florestal residual. As espécies  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$  apresentaram uma flutuação superior à verificada no perfil de temperaturas, contudo, apresentaram um perfil constante resultando assim num bom funcionamento do reator de leito fluidizado.

Durante a combustão das misturas onde era utilizada a estilha de madeira de eucalipto, verificou-se que as emissões de HCl e NO foram mais elevadas durante a combustão da mistura ELB10 com  $21 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $O_2$ ) e  $154 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $O_2$ ), respetivamente. Nas experiências onde as misturas utilizadas continham *pellets*, os valores mais elevados das emissões de HCl foram registados durante a combustão da mistura *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 2) (PC2LB10) com  $55 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $O_2$ ). Já a experiência onde foi registada uma maior emissão de NO foi durante a combustão da mistura com *pellets* de casca de eucalipto (Tipo 1) (PCLB10) com  $164 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$  (gases secos, corrigido a 11% de  $O_2$ ).

A introdução das misturas de combustíveis com as lamas biológicas não apresentou alterações no funcionamento do reator de leito fluidizado. No entanto, a concentração de HCl demonstrava um aumento progressivo após a introdução das misturas de combustíveis. Após um período de tempo começava-se a verificar um decréscimo da concentração de HCl ao longo do tempo. Este decréscimo deve-se à presença das lamas biológicas na mistura, uma vez que estas são ricas em cálcio, o que pode promover a adsorção de HCl. A concentração de NO também demonstrou um aumento devido à introdução das lamas, estando este aumento relacionado com o elevado teor de azoto presente nas lamas biológicas. Também foi verificado uma maior flutuação da concentração de NO nas misturas onde havia mistura de *pellets* com lamas biológicas. Esta maior flutuação poderá estar relacionada com a heterogeneidade da mistura realizada.

A combustão das misturas com lamas primárias não apresentou alterações no comportamento do perfil de temperaturas e da evolução das espécies ao longo do tempo. No entanto, após a sua introdução é verificado um decréscimo mais acentuado das emissões de HCl, do que o observado durante a combustão das misturas com lamas biológicas.





## Referências

- [1] N. Y. Wood, “Energy and Environmental Profile of the U . S . Pulp and Paper Industry,” *Renew. Energy*, no. December, 2005.
- [2] E. Commission, “Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry December 2001,” *Pap. Ind.*, no. December, 2001.
- [3] D. Gavrilescu, “Energy from biomass in pulp and paper mills,” *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 7, no. 5, pp. 537–546, 2008.
- [4] CELPA - Associação da indústria Papeleira, “Boletim Estatístico - Indústria Papeleira Portuguesa,” *J. Chem. Inf. Model.*, pp. 1–144, 2014.
- [5] P. Bajpai, *Management of Pulp and Paper Mill Waste*. Springer International Publishing, 2015.
- [6] A. C. Caputo and P. M. Pelagagge, “Waste to energy plant for paper insdustry sludges disposal: technical econonomic study,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 81, pp. 265–283, 2001.
- [7] K. Holmgren, “Waste incineration in Swedish municipal energy systems,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 92, no. August, pp. 237–246, 2006.
- [8] A. Suri and M. Horio, *Solid Biomass Combustion*, vol. 4. 2010.
- [9] Frank Rosillo-Calle; Peter de Groot; Sarah L. Hemstock; Jeremy Woods, *The Biomass Assessment Handbook*. Earthscan, 2007.
- [10] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, and H. Spliethoff, “Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 1, pp. 21–50, 2009.
- [11] K. Jaap and S. van Loo, Eds., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, vol. 1. Earthscan, 2015.
- [12] J. Werther and T. Ogada, “Sewage sludge combustion,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 55–116, 1999.
- [13] H. Cui, Y. Ninomiya, M. Masui, H. Mizukoshi, T. Sakano, and C. Kanaoka, “Fundamental behaviors in combustion of raw sewage sludge,” *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 1, pp. 77–83, 2006.
- [14] L. Rosendahl, Ed., *Biomass combustion science, technology and engineering*. Woodhead Publishing, 2013.
- [15] E. J. Anthony, “Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 239–268, 1995.
- [16] D. Erik, Ed., *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. CRC Press, 2013.
- [17] B. Leckner, “Co-combustion - A summary of technology,” *Therm. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 5–40, 2007.

- [18] J. Van Caneghem, A. Brems, P. Lievens, C. Block, P. Billen, I. Vermeulen, R. Dewil, J. Baeyens, and C. Vandecasteele, “Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, no. 4, pp. 551–582, 2012.
- [19] M. A. Matos, “Apontamentos de Conversão de Energias Convencionais.” Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2011.
- [20] T. Ogada and J. Werther, “Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed Release and combustion of the volatiles,” *Fuel*, vol. 75, no. 5, pp. 617–626, 1996.
- [21] D. Shin, S. Jang, and J. Hwang, “Combustion characteristics of paper mill sludge in a lab-scale combustor with internally cycloned circulating fluidized bed,” *Waste Manag.*, vol. 25, no. 7, pp. 680–685, 2005.
- [22] N. Skoglund, L. Båfver, J. Fahlström, E. Holmén, and C. Renström, “Fuel design in co-combustion of demolition wood chips and municipal sewage sludge,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 141, pp. 196–201, 2015.
- [23] C. Santos, “Secagem e co-combustão de lamas em leito fluidizado,” Tese de mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, 2012.
- [24] L. Batistella, V. Silva, R. C. Suzin, E. Virmond, C. A. Althoff, R. F. P. M. Moreira, and H. J. José, “Gaseous emissions from sewage sludge combustion in a moving bed combustor,” *Waste Manag.*, vol. 46, pp. 430–439, 2015.
- [25] S. N.Oka, *Fluidized Bed Combustion*, vol. 30, no. 1. Marcel Dekker, 2004.
- [26] L. A. D. C. Tarelho, “Apontamentos de Conversão de Energias Renováveis.” Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 2013.
- [27] “Portaria n.º677/2009.” Diário da Republica 1ªSerie N.º 119-23 de Junho de 2009, pp. 4112–4116.