

Avaliação do Potencial da Valorização Energética de
Misturas de Resíduos de Madeira com Resíduos
Urbanos

João Pedro Lima Ferreira

Dissertação submetida para a obtenção do grau de
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

novembro de 2016

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projeto/Estágio do 2º ano do
Mestrado em Energias Sustentáveis

Candidato: João Pedro Lima Ferreira, N.º 1140169, 1140169@isep.ipp.pt

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



Orientação Científica: Nídia Sá Caetano, nsc@isep.ipp.pt

Supervisão: Daniela Tavares Silva, dsilva@inegi.up.pt

Mestrado em Energias Sustentáveis
Departamento de Engenharia Mecânica



novembro de 2016

A imaginação é mais importante que o conhecimento.

Albert Einstein

Agradecimentos

À minha orientadora Professora Nídia Sá Caetano, por todo o acompanhamento, pela profunda demonstração de sabedoria e disponibilidade para o esclarecimento de qualquer dúvida.

À Engenheira Daniela Tavares Silva, do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), por toda a ajuda, pela imprescindível motivação e apoio prestado.

Ao Engenheiro Vítor Ferreira, do INEGI por toda a ajuda que me prestou, tanto na montagem da instalação como na disponibilidade para a discussão de problemas, como motivação, apoio e companheirismo.

Ao Engenheiro João Sousa, pela cedência da caldeira e da peletizadora que possibilitaram a realização deste trabalho, e pela aquisição das matérias-primas essenciais para o seu desenvolvimento.

Ao Sr. António Alves pela cedência da caldeira e por ter despendido o seu tempo na transmissão de conhecimento prático sobre caldeiras.

Ao Clube Desportivo Feirense por ter cedido gratuitamente a relva utilizada nos testes e ensaios.

Ao INEGI, que gentilmente cedeu o espaço e equipamentos para realizar os ensaios.

Aos meus colegas, que me acompanharam durante estes dois anos de mestrado.

A todos os meus amigos, que estiveram ao meu lado nos melhores momentos da vida académica, seja em festas ou também dias de estudo.

Agradeço também a todos os meus familiares, que me apoiaram neste caminho ao longo destes anos académicos, pois também foram essenciais. À minha avó, que eu gostaria que estivesse presente neste momento, certamente está orgulhosa de mim.

Agradeço à Sara Reis Vila Cova, por todo o apoio prestado ao longo deste ano, pela compreensão e força transmitida que me ajudou a ultrapassar os momentos mais difíceis encontrados nesta caminhada.

Finalmente, o agradecimento especial aos meus fantásticos pais, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida e em particular ao longo destes anos académicos, pois sem eles nada disto era possível.

A todos vocês, um grande Obrigado.

Resumo

O recurso a equipamentos de queima de biomassa tem constituído, cada vez mais, uma opção para a obtenção de energia térmica a nível residencial por toda a Europa, sobretudo na Alemanha, na Itália e na Áustria. Também em Portugal, nos últimos anos, a procura por tais sistemas tem crescido consideravelmente, pelo que importa apostar no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e economicamente competitivas.

Atualmente, existem normas internacionais que estabelecem os requisitos para tais equipamentos, quantificando limites de emissões gasosas e valores mínimos de eficiência para equipamentos de queima de combustíveis sólidos para aquecimento ambiente e de água – em Portugal estes requisitos encontram-se especificados na norma *NP EN 12809: 2015, Caldeiras domésticas independentes que utilizam combustíveis sólidos com potência térmica nominal inferior ou igual a 50 kW*. Estas normas são regularmente discutidas e atualizadas, no sentido de desenvolver cada vez mais a certificação das diversas caldeiras. Analogamente, existem normas que regulamentam as especificações dos combustíveis sólidos derivados da biomassa para utilização doméstica – em Portugal, através da norma *NP EN 14961-1: Biocombustíveis sólidos. Especificações e classes de combustível*.

Neste contexto, o presente trabalho incide na avaliação experimental do potencial energético de misturas de resíduos de madeira com resíduos urbanos, nomeadamente, relva e borra de café, utilizadas numa caldeira doméstica onde foi instalado um queimador para péletes. Foi, pois, objetivo deste estudo, a averiguação do cumprimento da norma NP EN 12809: 2015 pela caldeira em estudo, no que respeita aos parâmetros rendimento da combustão e emissões de monóxido de carbono e, igualmente, avaliar o potencial de produzir péletes de misturas a partir de resíduos (serrim de pinho com borra de café ou serrim de pinho com relva) e testar o seu efeito no desempenho da referida caldeira, comparativamente à utilização de péletes de serrim de pinho comerciais.

Com estes propósitos em vista, foram definidas as proporções de serrim de pinho, borra de café e relva a utilizar em cada mistura e as mesmas foram produzidas recorrendo a uma peletizadora existente nas instalações do INEGI. Paralelamente, amostras das matérias-

primas selecionadas foram sujeitas a análise elementar, e de igual forma, determinou-se os correspondentes poder calorífico e teor de humidade.

Foram fabricados os diferentes péletes (100% borra de café; 65% borra de café com 35% serrim de pinho; 65% serrim de pinho com 35% relva; 90% serrim de pinho com 10% relva) os quais foram sujeitos a ensaios de queima na caldeira disponível (um equipamento antigo, cujo queimador foi substituído, de potência nominal desconhecida). Esses ensaios possibilitaram a avaliação do rendimento de combustão e, igualmente, o acompanhamento da variação da concentração de contaminantes nos gases de exaustão (monóxido e dióxido de carbono e oxigénio). De uma forma geral, os resultados obtidos foram promissores no que diz respeito à eficiência de queima, variando entre 70,5% e 87,2% (especialmente considerando que a caldeira não foi, especificamente, projetada para a queima de péletes), sendo, sobretudo, manifestamente positivos a nível das emissões gasosas monitorizadas.

Em suma, a caldeira em teste, que sofreu uma troca do seu queimador original para um adaptado à queima de biomassa, cumpre com os requisitos estabelecidos pela norma NP EN 12809: 2015 (rendimento superior a 73,5% e emissões de monóxido de carbono menores que 1%). Relativamente aos péletes produzidos, constatou-se que os que apresentaram melhor rendimento energético são os de 100% de borra de café, seguidos dos de 90% serrim de pinho com 10% de relva e, em termos de emissões de monóxido de carbono, os péletes de 65% serrim de pinho com 35% de relva são os que emitem uma menor concentração do referido gás.

Palavras-Chave

Biomassa, caldeiras, combustão, emissões gasosas, misturas de resíduos, péletes.

Abstract

Biomass has been an important resource all over Europe as a way to obtain thermal energy at residential scale, mainly in Austria, Germany and Italy. In recent years, also in Portugal, the look for systems to transform biomass into thermal energy as raise significantly, reason why is important to bet in its cost-effective development.

Currently, there are several international standards that establish the legal requirements for such equipment, quantifying gas emissions limits and the minimum efficiencies for equipment used for air and water heating via solid fuels combustion – for Portugal such requirements are the ones stablish in the international standard *NP EN 12 809: 2015, Residential independent boilers fired by solid fuel – Nominal heat output up to 50 kW*. Those standards are regularly discussed and updated, with the perspective of a better boiler certification process. Similarly, there are standards for regulate solid fuels derived from biomass for residential scale – for Portugal, *NP EN 14961-1: Solid biofuels. Fuel specifications and classes*.

In such context, the present work focus on the experimental evaluation of the energetic potential of mixtures of wood and urban wastes, namely, grass and spent coffee ground, in a residential boiler, where a pellet burner was, previously, installed. It was, then, a purpose of this study to verify if the used boiler could meet the NP EN 12 809: 2015 requirements in two parameters: efficiency and carbon monoxide emissions. Moreover, it was intended to evaluated the potential to produce pellets form mixtures wastes (pine sawdust with spent coffee ground or pine sawdust with grass) and to test the effects on the boiler performance, comparatively to its behaviour using regular and commercial wood pine sawdust pellets.

Having such goals in mind the amounts of pine sawdust, spent coffee ground and grass for each mixture were defined and pellets were produce with a pelletizer machine, at INEGI's facilities. Simultaneously, the ultimate analysis of the selected raw materials was determined and, similarly, their heating values, moisture and ashes content were determined.

Different kinds of pellets were produced (100% spent coffee ground; 65% spent coffee ground and 35% pine sawdust; 65% pine sawdust with 35% grass; 90% pine sawdust and

10% grass) and tested in the available boiler. Those lab tests allowed to evaluate the combustion efficiency by product, as well as, to follow its the gas emissions (carbon monoxide and dioxide) throughout the test. In general, the obtained results were promising in what respects to the combustion efficiency, ranging from 70,5% to 87,2% (especially if it is considered that the used boiler was not designed for biomass burning), but mostly, regarding the reduced levels of the tested contaminants released.

All things considered, the tested boiler, which had its burner modified, fulfils the requirements established in NP EN 12 809: 2015 (efficiency higher than 73,5% and carbon monoxide emissions lower than 1%). Regarding the produced pellets, it was verified that the ones with the best energy efficiency are the ones made only with spent coffee grounds, followed by 90% pine sawdust with 10% grass and, in respect to carbon monoxide emissions pellets made of 65% pine sawdust and 35% grass are the ones emitting lower levels of such gas.

Keywords

Boilers, biomass, combustion, gas emissions, pellets, waste mixtures.

Declaração

João Pedro Lima Ferreira declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas, com identificação da fonte.

03 de outubro de 2016

João Pedro Lima Ferreira

João Pedro Lima Ferreira

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1.1. <i>Metas para o destino de resíduos até 2020</i>	2
1.1.2. <i>Biomassa e resíduos</i>	3
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.3. CALENDARIZAÇÃO	6
1.4. ESTRUTURAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	7
2. ESTADO DA ARTE.....	9
2.1. COMBUSTÃO DE PÉLETES MULTIMATERIAIS	10
2.1.1. <i>Serrim e Borra de Café</i>	11
2.1.2. <i>Serrim e Ervas</i>	14
3. CARATERIZAÇÃO DE BIOMASSA.....	19
3.1. TEOR DE HUMIDADE.....	20
3.2. ANÁLISE ELEMENTAR.....	21
3.3. PODER CALORÍFICO	26
4. PRODUÇÃO DE PÉLETES.....	31
4.1. PREPARAÇÃO DAS MISTURAS	32
4.2. PELETIZADORA	33
4.3. CARATERIZAÇÃO DE PÉLETES	36
4.3.1. <i>Humidade dos Péletes</i>	36
4.3.2. <i>Poder Calorífico dos Péletes</i>	40
4.3.3. <i>Teor de Cinzas</i>	40
5. ENSAIOS DE COMBUSTÃO	45
5.1. CALDEIRA.....	45
5.1.1. <i>Sistema de Alimentação</i>	46
5.1.2. <i>Queimador</i>	47
5.1.3. <i>Câmara de Combustão</i>	48
5.1.4. <i>Controlador Eletrónico da Caldeira</i>	50
5.2. EMISSÕES GASOSAS E EFICIÊNCIA DA CALDEIRA	51
5.2.1. <i>Avaliação da Eficiência de Queima</i>	51
5.2.2. <i>Controlo de Emissões Gasosas</i>	52
5.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	53
5.3.1. <i>Sistema Hidráulico</i>	53
5.3.2. <i>Balança</i>	53

5.3.3.	<i>Sistema de Medição/Aquisição de Dados</i>	54
5.4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	55
5.4.1.	<i>Configuração da Instalação Experimental</i>	55
5.4.2.	<i>Procedimento experimental</i>	56
5.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.5.1.	<i>Queima de Péletes 100SP</i>	57
5.5.2.	<i>Queima de Péletes 100BC</i>	61
5.5.3.	<i>Queima de Péletes 65BC/35SP</i>	64
5.5.4.	<i>Queima de Péletes 65SP/35RV</i>	67
5.5.5.	<i>Queima de Péletes 90SP/10RV</i>	69
5.5.6.	<i>Discussão de Resultados</i>	71
6.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	75
ANEXO A	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE EM PÉLETES	85
ANEXO B	CARATERIZAÇÃO DA BIOMASSA	87
ANEXO C	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DE AMOSTRAS DE BIOMASSA ..	93
ANEXO D	CALIBRAÇÃO DO CAUDALÍMETRO	97
ANEXO E	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	99
ANEXO F	RESULTADOS DOS TESTES EFETUADOS	101
ANEXO G	NORMA NP EN 12809: 2015	113

Índice de Figuras

Figura 1	Destinos (diretos) dos RU	3
Figura 2	Sequência do Processo Produtivo de Péletes de Relva	15
Figura 3	Diagrama de Van Krevelen	25
Figura 4	Aparelho usado para determinar o PCS nas instalações do ISEP	27
Figura 5	Exemplo de uma amostra preparada para determinação do PCS	28
Figura 6	Peletizadora usada para a produção dos péletes, disponível nas instalações do INEGI33	
Figura 7	Pormenor da matriz (c) e do rolo (b) e sua montagem no interior da peletizadora (a).	34
Figura 8	Caldeira utilizada para a queima dos péletes.....	46
Figura 9	Reservatório de péletes e sistema de alimentação (parafuso sem-fim)	47
Figura 10	Representação do queimador. A-fornalha; B-grelha fixa; C-fornalha com grelha instalada; D-vista exterior do queimador	47
Figura 11	Câmara de combustão e tubos de fumo na caldeira utilizada na instalação.	48
Figura 12	Turbuladores existentes na caldeira: a) Zona de encaixe; b) Turbulador.....	49
Figura 13	Comando e controlador elétrico da caldeira.....	50
Figura 14	Analísadores utilizados para controlo das emissões gasosas	52
Figura 15	Caudalímetro utilizado nos ensaios.....	53
Figura 16	Balança utilizada para registo da massa de péletes consumidos pela caldeira	54
Figura 17	Medidores: A – Termopar na chaminé (temperatura de exaustão); B – Termopar na saída da caldeira; C – Placa de aquisição	54
Figura 18	Esquema da instalação do sistema de queima. A- Sistema de alimentação; B- Balança; C- Caldeira; D- Sistema de dissipação de calor; E- Sistema de aquisição de dados; F- Analísadores de gases; G – Sistema de exaustão (chaminé).....	55
Figura 19	100SP Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	58
Figura 20	100SP Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	60
Figura 21	100BC Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	62
Figura 22	100BC Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	63
Figura 23	65BC/35SP Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	65
Figura 24	65BC/35SP Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio.....	66
Figura 25	Escórias formada na queima das péletes 65SP/35RV	67

Figura 26	65SP/35RV Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio	68
Figura 27	90SP/10RV Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio	69
Figura 28	90SP/10RV Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio	71
Figura A.1	Analisador de Humidade	86
Figura E.1	Representação gráfica do programa utilizado	99
Figura E.2	Exemplo de visualização dos dados guardados pelo sistema de aquisição	100
Figura F.1	Curvas de Calibração – 100SP Ensaio 1	102
Figura F.2	Curvas de Calibração – 100SP Ensaio 2	103
Figura F.3	Curvas de calibração – 100BC Ensaio 2	105
Figura F.4	Curvas de calibração – 65BC/35SP Ensaio 1	107
Figura F.5	Curvas de calibração – 65BC/35SP Ensaio 2	108
Figura F.6	Curvas de Calibração – 65SP/35RV Ensaio 1	109
Figura F.7	Curvas de calibração – 90SP/10RV Ensaio 2	112
Figura G.1	Rendimento à potência térmica nominal	113

Índice de Tabelas

Tabela 1	Quantificação dos RU Produzidos Anualmente (10^3 t).....	2
Tabela 2	Calendarização do projeto.....	6
Tabela 3	Teor de humidade nas matérias-primas usadas e comparação com a literatura.....	20
Tabela 4	Composição elementar das matérias-primas usadas neste trabalho ^(a)	23
Tabela 5	Poder Calorífico Superior e Inferior das Matérias-Primas Usadas e sua Comparação com Dados da Literatura.....	29
Tabela 6	Designação dos péletes usados neste trabalho.....	36
Tabela 7	Determinação do teor de humidade nos péletes e comparação com a literatura.....	37
Tabela 8	Composição elementar dos péletes produzidos com uma única matéria-prima.....	39
Tabela 9	Composição elementar dos péletes de misturas.....	39
Tabela 10	Comparação do PCI dos péletes com os valores da literatura.....	40
Tabela 11	Determinação do teor de cinzas dos diversos tipos de péletes.....	42
Tabela 12	Caraterização dos péletes produzidos.....	43
Tabela 13	100SP Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas.....	58
Tabela 14	100SP Ensaio 1: Rendimento da caldeira.....	59
Tabela 15	100SP Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas.....	60
Tabela 16	100SP Ensaio 2: Rendimento da caldeira.....	61
Tabela 17	100BC Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas.....	62
Tabela 18	100BC Ensaio 1: Rendimento da caldeira com péletes 100BC Ensaio 1.....	62
Tabela 19	100BC Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas.....	63
Tabela 20	100BC Ensaio 2: Rendimento da caldeira.....	64
Tabela 21	65BC/35SP Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas.....	64
Tabela 22	65BC/35SP Ensaio 1: Rendimento da Caldeira.....	65
Tabela 23	65BC/35SP Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas.....	66
Tabela 24	65BC/35SP Ensaio 2: Rendimento da caldeira.....	66
Tabela 25	65SP/35RV Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas.....	68
Tabela 26	65SP/35RV Ensaio 1: Rendimento da caldeira.....	69
Tabela 27	65SP/35RV Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas.....	70
Tabela 28	90SP/10RV Ensaio 1: Rendimento da caldeira.....	70
Tabela 29	90SP/10RV Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas.....	71
Tabela 30	90SP/10RV Ensaio 2: Rendimento da caldeira.....	71
Tabela 31	Tabela resumo dos ensaios de queima.....	72
Tabela C.1	Cálculo do PCI Através do PCS.....	94
Tabela C.2	Composição mássica dos péletes produzidos.....	94
Tabela C.3	PCI dos diversos tipos de péletes utilizados.....	95
Tabela F.1	Cálculo dos valores médios – 100SP Ensaio 1.....	101

Tabela F.2	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 100SP Ensaio 1.....	101
Tabela F.3	Valores Lidos e Corrigidos – 100SP Ensaio 1.....	102
Tabela F.4	Dados para Calibração – 100SP Ensaio 1.....	102
Tabela F.5	Cálculo dos Valores Médios – 100SP Ensaio 2.....	102
Tabela F.6	Cálculo da Potência Nominal e Respetivo Rendimento – 100SP Ensaio 2.....	102
Tabela F.7	Valores Lidos e Corrigidos – 100SP Ensaio 2.....	103
Tabela F.8	Dados para Calibração – 100SP Ensaio 2.....	103
Tabela F.9	Cálculo dos Valores Médios – 100BC Ensaio 1.....	103
Tabela F.10	Cálculo da Potência Nominal e Respetivo Rendimento – 100BC Ensaio 1.....	104
Tabela F.11	Valores Lidos e Corrigidos – 100BC Ensaio 1.....	104
Tabela F.12	Cálculo dos valores médios – 100BC Ensaio 2.....	104
Tabela F.13	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 100BC Ensaio 2.....	105
Tabela F.14	Valores lidos e corrigidos – 100BC Ensaio 2.....	105
Tabela F.15	Dados para calibração – 100BC Ensaio 2.....	105
Tabela F.16	Cálculo dos valores médios – 65BC/35SP Ensaio 1.....	106
Tabela F.17	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 65BC/35SP Ensaio 1.....	106
Tabela F.18	Valores lidos e corrigidos – 65BC/35SP Ensaio 1.....	106
Tabela F.19	Dados para calibração – 65BC/35SP Ensaio 1.....	106
Tabela F.20	Cálculo dos valores médios – 65BC/35SP Ensaio 2.....	107
Tabela F.21	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 65BC/35SP Ensaio 2.....	107
Tabela F.22	Valores lidos e corrigidos – 65BC/35SP Ensaio 2.....	108
Tabela F.23	Dados para calibração – 65BC/35SP Ensaio 2.....	108
Tabela F.24	Cálculo dos valores médios – 65SP/35RV Ensaio 1.....	108
Tabela F.25	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 65SP/35RV Ensaio 1.....	109
Tabela F.26	Valores lidos e corrigidos – 65SP/35RV Ensaio 1.....	109
Tabela F.27	Dados para calibração – 65SP/35RV Ensaio 1.....	109
Tabela F.28	Cálculo dos valores médios – 90SP/10RV Ensaio 1.....	110
Tabela F.29	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 90SP/10RV Ensaio 1.....	110
Tabela F.30	Valores lidos e corrigidos – 90SP/10RV Ensaio 1.....	110
Tabela F.31	Cálculo dos valores médios – 90SP/10RV Ensaio 2.....	111
Tabela F.32	Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 90SP/10RV Ensaio 2.....	111
Tabela F.33	Valores lidos e corrigidos – 90SP/10RV Ensaio 2.....	111
Tabela F.34	Dados para calibração – 90SP/10RV Ensaio 2.....	111
Tabela G.1	Correção CO em Todos os Ensaios dos Tipos de Péletes.....	114
Tabela G.2	Ensaio 1 de 100BC Cálculo do CO ₂	115
Tabela G.3	90SP/10RV Ensaio 1: Cálculo do CO ₂	116
Tabela G.4	90SP/10RV Ensaio 2: Cálculo do CO ₂	116

Nomenclatura

A_i	– Fração do elemento na matéria-prima	(%)
A_{Total}	– Elemento na mistura final	(%)
c_p	– Calor específico da água	(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
H	– Humidade	(%)
H_i	– Fração de hidrogénio	(%)
h_{lv}	– Calor latente de vaporização	(kJ.kg ⁻¹)
M	– Fração de humidade	(%)
m_1	– Massa do gobelé	(g)
m_2	– Massa do gobelé com amostra húmida	(g)
m_3	– Massa do gobelé com amostra seca	(g)
$m_{ag,ev}$	– Massa de água evaporada	(g)
m_{am}	– Massa da amostra húmida	(g)
M_{ap}	– Massa de água presente	(g)
$M_{óleo}$	– Massa de óleo a adicionar	(g)
M_s	– Massa da matéria seca	(g)
M_t	– Massa total inicial	(g)
$\dot{m}_{água}$	– Caudal mássico de água	(kg.s ⁻¹)
\dot{m}_{comb}	– Caudal mássico de combustível	(kg.s ⁻¹)

\dot{m}	– Caudal mássico de água fornecido à caldeira nos ensaios	(kg.min ⁻¹)
$P_{\text{fornecida}}$	– Potência fornecida	(kW)
$P_{\text{útil}}$	– Potência útil	(kW)
Tempo	– Tempo de ensaio	(h)
$T_{\text{ent.}}$	– Temperatura de entrada da água na caldeira	(°C)
$T_{\text{exhaust.}}$	– Temperatura dos gases de exaustão	(°C)
$T_{\text{sai.H}_2\text{O}}$	– Temperatura de saída da água da caldeira	(°C)
x_i	– Fração da matéria-prima i na mistura final	(adimensional)
ΔT	– Diferença de temperatura	(K)
Δt	– Intervalo de tempo	(s)
η	– Rendimento	(%)

Abreviaturas

BC	– Borra de Café
CVR	– Centro de Valorização de Resíduos
GEE	– Gases de Efeito de Estufa
INEGI	– Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	– Instituto Superior de Engenharia do Porto
PCI	– Poder Calorífico Inferior
PCS	– Poder Calorífico Superior

RV – Relva

SP – Serrim de Pinho

1. Introdução

1.1. Contextualização

A gestão dos resíduos sólidos é uma prioridade das atuais políticas europeias e nacionais, por apresentar grande importância ambiental, social e económica, sendo colocada como o centro da “Economia Verde”. Presentemente, o objetivo principal para a valorização de resíduos é o de potenciar a utilização de recursos naturais de uma forma mais eficiente, reduzir os impactos ambientais associados à sua extração e utilização, criar novas oportunidades de negócio, com um consequente aumento do seu valor acrescentado, e simultaneamente potenciar a criação de novos postos de trabalho (PERSU, 2014).

Em 2010, na União Europeia (UE) foram produzidos cerca de 2,7 mil milhões de toneladas de resíduos, isto é, “*quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer*” (DL 73/2011), o que corresponde a $5,2 \text{ t} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. De todos os resíduos gerados, foram valorizados 53% e os restantes 47% foram eliminados, maioritariamente por deposição em aterro sanitário (COM, 2011; PERSU, 2014).

Os resíduos são considerados como uma grande valia do ponto de vista socioeconómico, sendo que a valorização dos resíduos produzidos globalmente na UE permitiria atingir receitas na ordem de 1,6 mil milhões de euros e uma poupança equivalente a 1,4 mil milhões de euros em gastos com importações anuais (COM, 2011).

Em concreto, os resíduos urbanos (RU) são, por definição, “os resíduos domésticos ou outros resíduos semelhantes, em razão da sua natureza ou composição, nomeadamente os provenientes do sector de serviços ou de estabelecimentos comerciais ou industriais e de unidades prestadoras de cuidados de saúde, desde que, em qualquer dos casos, a produção diária não exceda 1 100 L por produtor” (DL 239/97; DL 73/11).

De acordo com o relatório anual de resíduos urbanos nacional, publicado em 2015, observa-se a existência de uma tendência de decréscimo da sua produção, iniciada em 2010^a (com a diminuição de 13,6% na produção de RU), contrariada em 2014, ano em que foram produzidos, em Portugal, 4 719 mil toneladas de Resíduos Urbanos (Tabela 1), correspondendo este montante a um aumento de 2,3% face ao ano anterior (o que ilustra bem a incerteza associada à sua produção) (APA, 2015).

Tabela 1 Quantificação dos RU Produzidos Anualmente (10³ t) (APA, 2015)

Região	2011	2012	2013	2014
Portugal Continental	4 888	4 525	4 363	4 474
Região Autónoma da Madeira	124	114	106	110
Região Autónoma dos Açores	147	143	139	136
TOTAL	5 159	4 782	4 608	4 719
Variação face ao ano anterior	↓6%	↓7%	↓4%	↑2%

1.1.1. Metas para o destino de resíduos até 2020

A distribuição do destino dos resíduos urbanos no ano de 2014 foi a seguinte: 42% aterro, 19% incineração com recuperação de energia, 19% tratamento mecânico e biológico, 2% valorização orgânica, 9% tratamento mecânico e 9% valorização material (APA, 2015). Na Figura 1 é possível observar a distribuição dos destinos (diretos) dos RU entre os anos 2010 e 2014, em Portugal continental, destacando-se a continuada diminuição do recurso a aterro como destino final para os resíduos urbanos (APA, 2015).

^a RU produzidos em Portugal, no ano de 2010: 5 464 × 10³ t (APA, 2013).

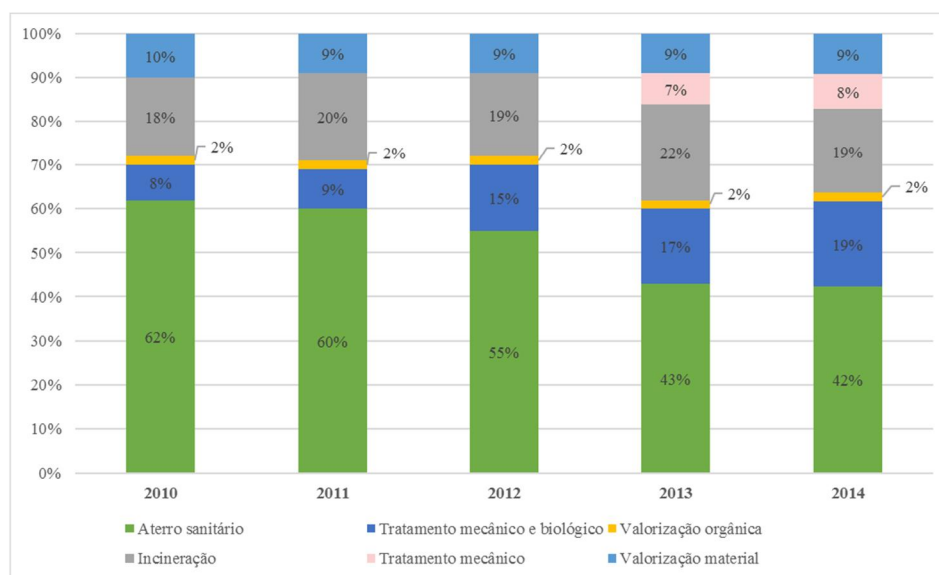


Figura 1 Destinos (diretos) dos RU (APA, 2015)

Face a esses valores, em termos de metas relativas aos resíduos urbanos, foram estabelecidas, para Portugal, as seguintes (CE, 2014; PERSU, 2014):

- Redução mínima da produção de resíduos por habitante em 7,6% em peso, relativo ao valor verificado em 2012, até 31 de dezembro de 2016;
- Redução mínima da produção de resíduos por habitante em 10% em peso, relativo ao valor verificado em 2012, até 31 de dezembro de 2020;
- Aumento mínimo global para 50% em peso, relativamente à preparação para reutilização e reciclagem de resíduos urbanos, até 31 de dezembro de 2020;
- Até 31 de dezembro de 2020 deverá ser garantida, a nível nacional, a reciclagem de, no mínimo, 70%, em peso dos resíduos de embalagens;
- Redução dos resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro para 35% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995, até julho de 2020.

1.1.2. Biomassa e resíduos

No sector dos resíduos urbanos, existem diversas tipologias de resíduos que podem ser usados como biocombustíveis, focando-se este trabalho, unicamente, nos sólidos e, em concreto na biomassa.

De acordo com a Diretiva 2009/28/CE, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, biomassa é “a fração biodegradável de produtos, resíduos

e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos” (Diretiva 2009/98/CE; DL 117/2010). A biomassa pode ser classificada de acordo com a sua origem, permitindo diferenciar e especificar as matérias-primas que a constituem com a maior precisão possível. Segundo a norma EN 14961-1^b, os biocombustíveis sólidos são divididos e classificados de acordo com as seguintes subcategorias:

- Biomassa de origem lenhosa;
- Biomassa de origem herbácea;
- Biomassa de origem frutícola;
- Combinações e misturas.

Nestas subcategorias é possível associar a biomassa lenhosa a árvores e arbustos, a biomassa herbácea a plantas com um tronco não lenhoso e com um ciclo de crescimento anual e a biomassa de origem frutícola aos frutos e aos subprodutos e resíduos do processamento industrial de fruta. Por sua vez, a expressão “combinações e misturas” é aplicada para designar os biocombustíveis sólidos constituídos por produtos de várias origens (Mendes, 2011). Estes englobam todos os produtos e resíduos provenientes da agricultura e silvicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.

A queima de biomassa na presença de ar (isto é, combustão), a temperaturas entre 800 e 1 000 °C, é utilizada com diferentes finalidades tais como a conversão da energia química contida na biomassa em energia elétrica, mecânica e térmica ou combinações destas, recorrendo, para tal, a variados equipamentos como fogões, fornalhas, caldeiras, turbinas a vapor ou turbo geradores, selecionados e dispostos sequencialmente dependendo do fim desejado. A combustão é realizada com excesso de ar atmosférico, e dela resulta calor, vapor de água, cinzas e emissões gasosas. Pode ser aplicada a qualquer tipo de biomassa, desde que esta possua teores de humidade inferiores a 50% (McKendry, 2002).

Os produtos de combustão obtidos estão, intrinsecamente, relacionados com a composição da biomassa, cujos três principais componentes (quando de origem vegetal) são, celulose, hemiceluloses e lenhina. Aproximadamente metade do peso de uma árvore é água, variando

^b EN 14961-1: 2010. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Requisitos gerais.

esse teor com o tipo de tecido e estado de crescimento. A outra metade é constituída por matéria seca, da qual 85% são materiais voláteis, 14,5% carbono e 0,5% cinzas (Oliveira, 2015). A composição deste tipo de biomassa também pode ser feita através do seu teor em compostos mais ou menos complexos e inclui lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros compostos (Jenkins *et al.*, 1998).

A biomassa (sólida), em comparação com os combustíveis fósseis, é caracterizada por apresentar maior teor de humidade, menor teor de cinzas, menor poder calorífico (tido como uma das maiores desvantagens, pois, em geral, não ultrapassa os 20 MJ.kg⁻¹), em contraste com alguns combustíveis fósseis (que apresentam valores superiores a 40 MJ.kg⁻¹), menos carbono e mais oxigénio, menor densidade e fiabilidade (Oliveira, 2015; Jenkins *et al.*, 1998).

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como propósito a avaliação do potencial da valorização energética de misturas densificadas de resíduos de madeira com resíduos urbanos (borra de café e relva). Para complemento do estudo, os produtos gerados serão caracterizados sob o ponto de vista químico, físico e térmico e a eficiência da sua combustão e consequentes emissões gasosas será analisada.

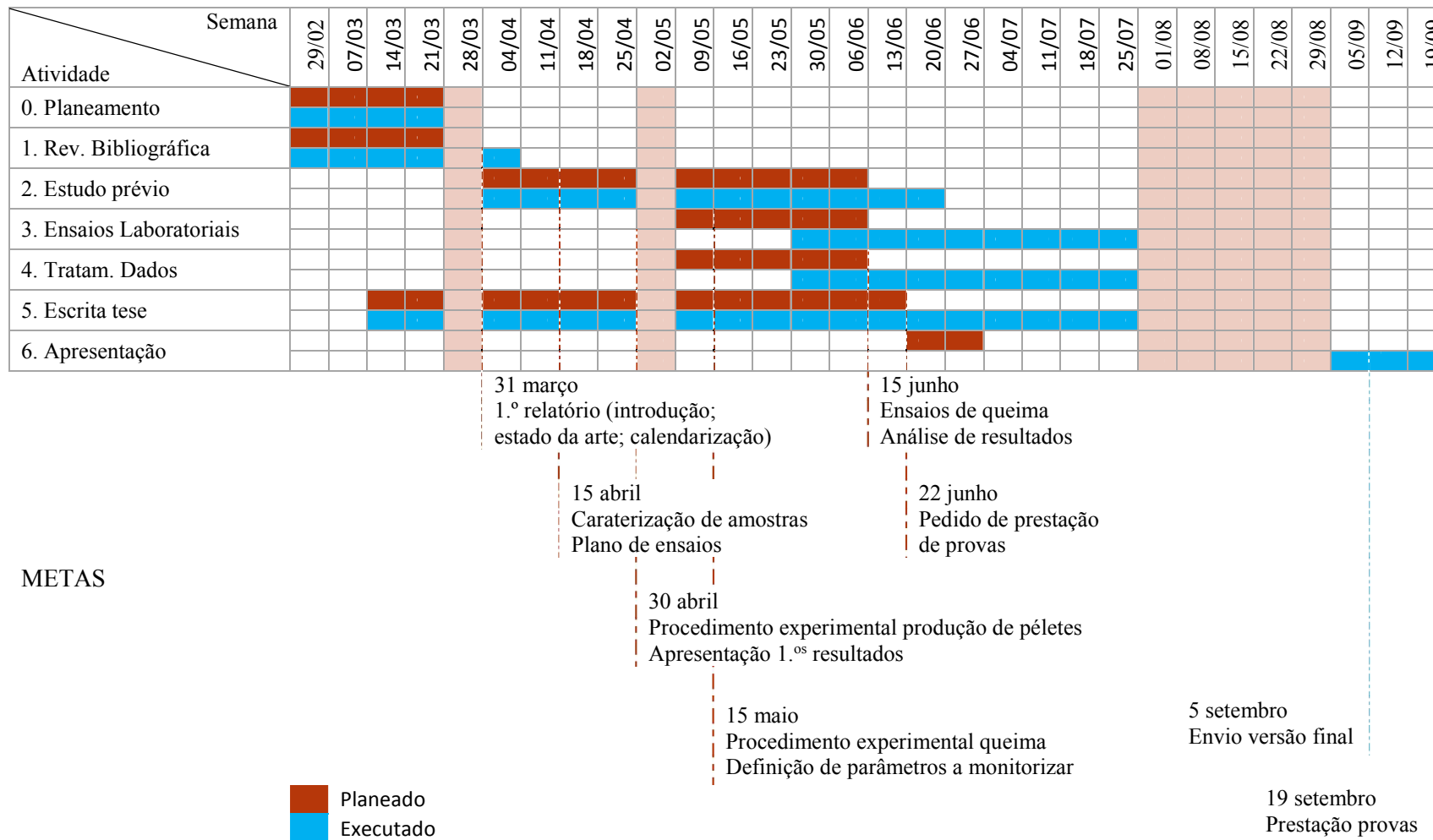
As atuais recomendações europeias vão no sentido de minimizar a quantidade de resíduos enviados para aterro, potenciando a sua valorização. Neste âmbito, este estudo visa analisar o potencial de utilizar resíduos orgânicos urbanos, especificamente, relva e borra de café, como fonte de energia térmica. Nesse contexto, pretende-se estudar a possibilidade de densificar esses resíduos com resíduos de serração – serrim – e comparar as suas propriedades físicas, químicas e térmicas com as dos péletes de madeira de pinho convencionais, certificados segundo a norma EN 14961-2^c, e as respetivas emissões gasosas geradas durante a sua combustão.

Durante o projeto foram produzidos péletes, com recurso a uma peletizadora existente no INEGI, com incorporação de relva e borras de café, em diferentes proporções. O comportamento desses produtos quando submetidos a combustão foi estudado, com medição dos teores de monóxido e dióxido de carbono.

^c EN 14961-2: 2011. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes de madeira para uso não industrial.

1.3. Calendarização

Tabela 2 Calendarização do projeto



1.4. Estruturação e Organização do Relatório

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos organizados de forma a, simultaneamente, explicitar o trabalho realizado e avaliar os resultados obtidos.

No capítulo 1 enquadra-se o tema, através da abordagem do tipo “funil” começando pela problemática dos resíduos e acabando no contexto energético da biomassa, e descrevem-se os principais objetivos a cumprir neste trabalho. Na sua sequência, o capítulo 2 refere-se ao estado da arte da combustão de péletes multimaterial.

No 3.º capítulo estabelece-se uma comparação de parâmetros entre cada uma das matérias-primas utilizadas para a produção dos péletes, com especial enfoque no poder calorífico, humidade e análise elementar.

No capítulo 4 apresentam-se os diversos parâmetros relativos à densificação de matéria-prima. Inicialmente, refere-se a seleção de misturas e a percentagem de resíduo usado em cada tipo de péletes e de seguida descreve-se o processo de produção de péletes nas instalações do INEGI, com todas as referências aos equipamentos e técnicas usadas. Posteriormente são descritos os parâmetros físicos, químicos e térmicos, tendo por base a análise elementar, teor de cinzas, humidade e poder calorífico, finalizando com a respetiva classificação de cada tipo de péletes produzidos.

Seguidamente, no capítulo 5, relata-se a componente prática do trabalho realizado, descrevendo-se a metodologia experimental aplicada, a apresentação dos materiais utilizados e a fundamentação do desenho da banca de ensaios e a sua respetiva descrição, por fim apresenta-se o tratamento de dados e a sua respetiva discussão.

Por último, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões deste trabalho, e tecem-se considerações a respeito da aplicação deste tipo de péletes num futuro próximo. Propõem-se alguns temas que permitam complementar este trabalho futuramente.

2. Estado da Arte

O aumento do efeito de estufa e, cada vez mais, o desaparecimento progressivo dos combustíveis fósseis têm impulsionado muitas indústrias a utilizar diversos recursos renováveis no âmbito de produção de energia “limpa”. Por outro lado, a atual política de gestão de resíduos tem como objetivo uma redução progressiva da quantidade de resíduos gerados, e para a sua eliminação, procuram-se novos métodos.

As fontes de biomassa para energia térmica, são, na sua maioria, combustíveis de madeira e seus derivados. Só em França, o consumo anual de madeira ascende aos 50 milhões de m³, representando mais de 95% do mercado total de madeira. Os toros de madeira apresentam diversas vantagens, tais como um preço relativamente baixo e a sua grande disponibilidade. Todavia, o elevado teor de humidade que apresentam, a conseqüente necessidade de secagem prévia à utilização, e ainda o espaço que exigem para o seu armazenamento, comprometem a sua utilização. Atualmente, em muitas salamandras comercialmente disponíveis surge, como recomendação do fabricante, o recurso a material com um teor de humidade igual ou inferior a 20% (Limousy *et al.*, 2015).

A dificuldade em manter os convencionais "toros" de madeira com reduzidos teores de humidade, para além da sua procura para fins tidos como mais nobres e mais rentáveis, tem levado à procura de soluções que permitam o aproveitamento de resíduos que não podem ser

reaproveitados ou reintroduzidos nos processos industriais. Como normalmente a granulometria destes resíduos é reduzida, criando inconvenientes ao seu manuseamento, procura-se compactá-los.

Com essa compactação, os péletes e os briquetes são fabricados sob pressão conferindo-lhes diversas propriedades, de entre as quais se destaca a diminuição da absorção de humidade quando expostos ao ar, mesmo quando armazenados num local com uma humidade relativa de 85% (Singh, 2004).

2.1. Combustão de Péletes Multimateriais

A realidade dos combustíveis alternativos está, cada vez mais, a desenvolver-se e, da mesma forma que o número de produtores de combustíveis sob a forma de péletes e briquetes está a aumentar, aumenta também a gama de potências e diversidade de salamandras, assim como a sua construção em função do combustível a que se destina (Ciesielczuk *et al.*, 2015).

Todavia, o recente aumento da representatividade do setor doméstico, no mercado de combustíveis compactados, impôs a identificação de novas fontes de biomassa (Limousy *et al.*, 2015), sendo estes resíduos, dada a taxa a que são gerados, uma fonte cujo interesse não deve ser descurado. Porém, muitos dos resíduos de biomassa apresentam múltiplos problemas que limitam a sua abrangente utilização enquanto fonte para produção de energia: elevado teor de humidade, baixa densidade a granel, reduzido poder calorífico ou baixo ponto de fusão de cinzas (Limousy *et al.*, 2015).

Com o propósito de superar esses inconvenientes, muitas opções têm sido propostas incluindo a densificação e a criação de misturas com o fim de obter combustíveis mais adequados (Lehtikangas, 2001; Limousy *et al.*, 2015). Várias equipas de investigação têm estudado a produção de diferentes péletes a partir de diversos resíduos agrícolas como bagaço de azeitona e ramos de poda de oliveira (Barbanera *et al.*, 2016); casca de arroz, casca ou fibras de coco; culturas energéticas como *Miscanthus* ou palha de cereais como por exemplo, cevada ou trigo (Carroll & Finnan, 2012; Liu *et al.*, 2014, Limousy *et al.*, 2015), cortiça (Nunes *et al.*, 2013); ou suas misturas – serrim/aparas de madeira e café (Limousy *et al.*, 2013; Limousy *et al.*, 2015); serrim e relvas (Gilbert *et al.*, 2009), a título de exemplo. As principais investigações visam a avaliação do desempenho de caldeiras domésticas que utilizam estes combustíveis e a sua comparação com diferentes normas europeias (Limousy *et al.*, 2015).

2.1.1. Serrim e Borra de Café

O café é um dos produtos agrícolas mais importantes no mundo e é a segunda mercadoria mais negociada depois do petróleo (Limousy *et al.*, 2013) e, de acordo com dados de 2004, o seu processamento gerou cerca de 6 milhões de toneladas de borra de café. Este é um resíduo sólido com partículas finas, com humidade elevada (de 80-85%); é rico em açúcares polimerizados em estruturas de celulose e hemiceluloses. Por outro lado, é considerado um resíduo altamente poluente, exigindo grandes quantidades de oxigénio para o degradar, pelo que, se a borra de café for descarregada para o meio ambiente, apresenta um considerável potencial de contaminação (Limousy *et al.*, 2013).

A borra de café, como combustível, foi já aplicada em caldeiras industriais, mais propriamente na indústria do café, devido ao seu elevado poder calorífico superior (PCS) que se encontra, aproximadamente, nas 5 000 kcal·kg⁻¹ (Limousy *et al.*, 2013), o que é um valor comparável com o de outros resíduos utilizados na queima no processo agroindustrial, ou mesmo com o da madeira de pinho (PCS de 4 841 kcal·kg⁻¹) (Telmo & Lousada, 2011).

Com base nos resultados publicados pela equipa de Li *et al.* (2014), a borra de café, produzida no refeitório de uma escola, foi considerada como matéria-prima biomássica adequada para compensar parte do consumo de energia do edifício afeto ao aquecimento. Com a preparação da bebida de café, é gerada uma quantidade considerável de resíduo, a borra de café, que constitui um desperdício atraente, pois pode ser usada para a produção de biocombustíveis devido ao seu elevado conteúdo orgânico (Li *et al.*, 2014). O objetivo do estudo destes autores foi o de investigar o potencial de produção de bioenergia a partir de borra de café, por pirólise, a duas taxas diferentes de aquecimento, 10 e 60 °C·min⁻¹. Durante o processo, foram identificadas três fases discretas de pirólise (representativas do comportamento térmico da amostra), a evaporação de água absorvida, reações de pirólise e o sólido residual decomposto. As propriedades térmicas dos produtos pirolíticos (biogás, bioóleo e biocarvão) foram examinados por meio de uma série de análises. Foi demonstrado que o dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) eram os principais compostos voláteis presentes no biogás produzido. Foi ainda comprovado que, na pirólise, a taxa de aquecimento tem efeitos positivos na composição elementar do bioóleo. A eficiência da pirólise foi estimada na ordem dos 77-85%, variabilidade que está associada ao teor de humidade da matéria-prima. Na análise do bioóleo, foram identificados compostos químicos como os ácidos palmítico e linoleico, indicando um grande potencial para a

produção do biodiesel. As taxas de aquecimento contribuem pouco para os efeitos da distribuição de produtos de pirólise. O rendimento líquido máximo de 66% em peso foi obtido a cerca de 630 °C. O potencial de recuperação de energia de aquecimento anual obtido recorrendo à combustão dos produtos de pirólise pode chegar a mais de 22 000 MJ, o que representa 6% do consumo de energia anual para o aquecimento do edifício da biblioteca. A utilização desta fonte de energia renovável possibilitaria não só a recuperação de energia, mas também, a poupança na emissão de 1 450 kg de CO₂ equivalente (Li *et al.*, 2014).

No trabalho de Ciesielczuk *et al.* (2015), foi avaliada a possibilidade de utilizar borra de café como forma de poupança de energia (por substituição da utilização de combustíveis fósseis) usando um processo de combustão. Para tal, foi analisada a sua qualidade em misturas com aparas de faia em proporções de 10 e 25% de borras de café, na forma de briquetes. Estes resíduos, se “frescos”, distinguem-se pelo elevado teor de humidade, no entanto, após a sua secagem, podem constituir um aditivo valioso para combustíveis alternativos. A borra de café aumenta o poder calorífico do combustível e reduz a dureza dos briquetes, o que contribui para uma diminuição da resistência à utilização nas salamandras, em concreto no transporte entre silo e queimador por meio de parafuso sem-fim. Neste mesmo estudo, verificou-se que a borra de café é um aditivo que vale a pena considerar devido a vários fatores: não há investimentos adicionais para a sua aplicação como um componente de biocombustível; só na Polónia, o potencial energético contido na borra de café produzida é de cerca de 2,3 PJ·ano⁻¹ o que corresponde a 1,16% da energia contida na biomassa produzida nesse país; os briquetes produzidos com a adição de borra de café têm um poder calorífico superior aos briquetes de madeira convencional e comparável com o do carvão fóssil betuminoso de fraca qualidade. Todos estes aspetos contribuem para o aumento da rentabilidade, quando estes resíduos são utilizados como fonte de energia, no entanto, a adição da borra de café numa quantidade de 25% resulta em briquetes com uma dureza significativamente inferior dificultando o seu armazenamento (Ciesielczuk *et al.*, 2015).

No trabalho de Jeguirim *et al.* (2014), foi avaliado o poder calorífico, o teor de cinzas, a densidade dos péletes, o teor de carbono fixo e análise elementar de péletes de borra de café pura e de uma mistura de borra de café com serrim. As análises termogravimétricas foram orientadas de modo a determinar a cinética de pirólise e características de combustão, a fim de estudar o desempenho dos péletes. Os resultados obtidos mostram que os péletes de borra de café têm características térmicas muito próximas das dos péletes de biomassa

convencional, como os de serrim. Também, ao misturar borra de café e serrim em percentagens iguais, verifica-se que os péletes atingem níveis superiores na sua classificação de requisitos padrão, sendo essas classificações essenciais para a venda dos péletes no mercado francês. Em relação à análise da degradação térmica, pode-se concluir que a borra de café e a sua mistura, seguem um comportamento normal no que se refere aos materiais lenho-celulósicos. Na comparação das características de combustão, os péletes apresentam uma reatividade mais elevada relativamente às misturas de borra de café e serrim, comportamento que pode estar relacionado com a estrutura heterogénea e interação mútua dos componentes individuais da borra de café e do serrim. Os parâmetros cinéticos de pirólise obtidos para os dois tipos de péletes apresentam uma concordância muito próxima com os encontrados na literatura para diferentes biomassas, o que permite concluir que a mistura borra de café/serrim pode constituir um biocombustível promissor para a produção de energia em aplicações industriais (Jeguirim *et al.*, 2014).

Em 2015, a equipa de Limousy, desenvolveu um estudo com borra de café e aparas de madeira (pinho) misturando-os em três proporções diferentes. Os testes de combustão foram realizados numa salamandra com rótulo “cinco estrelas”, num laboratório de investigação e desenvolvimento industrial, em França. As composições testadas foram: 20% (m/m) de borra de café com aparas de madeira de pinho; 50% (m/m) de borra de café com aparas de madeira de pinho; 100% aparas de madeira de pinho. Este estudo foi o primeiro que incidiu sobre o potencial de utilização de péletes de madeira comprimida como novo biocombustível para salamandras de lenha. Os resultados obtidos demonstraram que a combustão de péletes com borra de café apresenta um rendimento melhor face à queima de péletes de aparas de madeira de pinho (convencionais). No entanto, no que concerne à emissão de partículas e CO, verificou-se que estas aumentam com a incorporação de uma maior quantidade de borra de café por unidade de pélete. Este resultado, não deixa, contudo, de ser positivo já que as emissões de dióxido de carbono e o rendimento de combustão permitem a manutenção da classificação cinco estrelas *Flamme Verte*. Os autores concluíram que, a mistura de 20% de borra de café e 80% de pinho pode constituir um biocombustível promissor para a produção de energia em aplicação residencial (Limousy *et al.*, 2015).

O estudo anterior de Limousy *et al.* (2013) teve como objetivo a análise das propriedades térmicas e químicas, tais como poder calorífico, teor de cinzas, densidade dos péletes, carbono fixo e análise elementar, obtida a partir de misturas de biomassa, sendo analisada a biomassa

pura, para além das emissões de monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV), de acordo com as normas francesas. Estes testes de combustão foram efetuados numa caldeira de potência de 8-12 kW, da marca Ökofen. Neste estudo a preparação da amostra foi feita através de pó da borra de café (fornecido pela empresa Sotoco, que se encontra instalada no leste da França, mais propriamente em Mulhouse), que a equipa transformou em péletes com 6 mm de diâmetro e 15 a 25 mm de comprimento numa peletizadora KAHL 14/175. O primeiro objetivo deste estudo foi o de preparar um combustível de biomassa peletizado com propriedades próximas das estipuladas na norma NF EN 14961-6^d, sendo a humidade inicial da borra de café fixada em 12%, enquanto a de serrim de pinho foi fixada em 10%. Os resultados obtidos demonstraram que apesar do seu elevado poder calorífico inferior (PCI), o recurso a borra de café pura, como combustível, reduziu a eficiência da caldeira e proporcionou um aumento do nível de emissões de partículas e de gases. Porém, quando a borra de café foi misturada com serrim de pinho (50/50 em peso), os parâmetros de combustão (emissões de partículas e de gases, como a eficiência da caldeira) foram muito semelhantes aos obtidos com os péletes de madeira convencionais. Estes mesmos resultados mostraram que, o uso de borra de café pura numa caldeira proporciona um aumento da eficiência referente à combustão de outras biomassas. Também é possível concluir, que as caldeiras de péletes residenciais não estão adaptadas para a combustão de borra de café pura, contudo, o uso da borra em mistura pode ser atraente como forma de atingir a certificação pela referida norma NF EN 14961-2^e (Limousy *et al.*, 2013).

2.1.2. Serrim e Ervas

Cada vez mais, há necessidade de produzir combustíveis para aquecimento alternativos e renováveis. Muitas famílias têm optado pelo uso da energia solar, uma vez que é uma energia que se pode obter e captar de forma livre. No entanto, esta energia não está sempre disponível e, o seu armazenamento, para utilização quando necessária, é ainda dispendioso e difícil. Alternativamente, com uma máquina de fazer péletes, pode-se pensar em produzir a própria fonte de energia através de diversos materiais obtidos naturalmente, armazenando-a facilmente para utilização quando necessária.

^d NF EN 14961-6: Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes não lenhosas para uso não industrial.

^e NF EN 14961-2: Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes de madeira para uso não industrial.

Os péletes são, principalmente, oriundos de materiais de plantas que são, na sua maioria, descartados como resíduo, visto não integrarem a cadeia alimentar humana. Importa referir que estes mesmos materiais são selecionados a partir de produtos de alta qualidade para que os resultados sejam os melhores. Todavia, nem todos os materiais de plantas podem ser utilizados para fazer péletes de biomassa. As diversas matérias-primas com que se podem fazer péletes de biomassa de qualidade são, os talos de trigo, palha, talos de arroz, farelo de arroz, cascas de amendoim, resíduos de madeira de pinho, resíduos de milho, resíduos e pó de bambu, fibra de cânhamo (planta de *Cannabis*), resíduos de papel, entre outros materiais disponíveis para fazer uma boa peletização. Entre esses, tem-se comprovado que também a relva pode estar na origem de péletes, enquanto matéria-prima apropriada para o uso como combustível. A máquina de produção de péletes (peletizadora) não é perigosa para o meio ambiente e, portanto, é vista como a melhor maneira para reduzir os problemas de aquecimento global atual, bem como para ajudar a controlar a mudança climática em geral (GEMCO, 2016). De acordo com a GEMCO, a produção de péletes de relva ocorre em cinco passos (Figura 2):

- Primeiro é necessário recolher a relva cortada, sendo em seguida, exposta ao sol em camadas finas para que seque;
- Posteriormente, a relva é colocada num moinho onde é pré-aquecida, durante alguns minutos. Isto é efetuado para garantir que a relva, enviada para a peletizadora, contém pouca humidade, e, igualmente, para que se inicie a fundição de parte da lenhina da relva, permitindo a agregação dos sedimentos resultantes;
- Durante o terceiro passo procede-se ao ajuste do teor de humidade, o qual depende dos péletes acabados;
- No quarto passo os péletes são arrefecidos com ar frio, antes de serem armazenados;
- Por último, os pedaços de péletes defeituosos, que não foram utilizados, são recolhidos e guardados para utilização futura (GEMCO, 2016).



Figura 2 Sequência do Processo Produtivo de Péletes de Relva (GEMCO, 2016)

A equipa de Barbanera *et al.* (2016), investigou as melhorias das propriedades físicas e químicas de misturas constituídas por bagaço de azeitona e podas verdes de árvores de oliveira, usadas para a preparação de péletes, relativamente aos resíduos correspondentes. O bagaço de azeitona é um subproduto agroindustrial interessante que pode constituir uma matéria-prima com potencial para os produtos de biomassa densificada (Barbanera *et al.*, 2016). Neste trabalho foram analisadas péletes de bagaço de azeitona, produzido em sistemas de centrifugação de 2 fases (PH 2) e 3 fases (3 PH), a fim de avaliar a sua qualidade em termos dos principais parâmetros exigidos pela norma Europeia EN 17225-6^f (Barbanera *et al.*, 2016). A caracterização desses péletes demonstrou problemas importantes, pois o teor de azoto, a durabilidade e o teor de cobre, em péletes produzidos com os dois tipos de bagaço de azeitona testados, encontraram-se fora dos limites estabelecidos na norma. Para melhorar as propriedades dos péletes de bagaço de azeitona, estes autores investigaram a possibilidade de fabricar péletes a partir de uma mistura de bagaço de azeitona e poda de ramos de oliveiras. Nesta investigação concluiu-se que, ao adicionar podas de oliveiras, a composição química da mistura respeita os requisitos da norma em termos de durabilidade mecânica, teor de nitrogénio e teor de cobre, podendo-se, igualmente, aferir que a massa volúmica dos péletes é melhorada, o que permite uma redução dos custos de transporte e os custos de armazenamento (Barbanera *et al.*, 2016). Foram analisadas diversas misturas com diferentes proporções em peso daqueles materiais, com vista à determinação do efeito da composição da mistura nas propriedades dos aglomerados gerados. Neste estudo foi possível concluir que as propriedades físicas de todas as misturas estão em conformidade com os requisitos da norma. Em particular, as duas melhores misturas, em termos de características físicas, químicas e mecânicas, foram identificadas como sendo um combustível com potencial para aplicações de combustão e gaseificação: 75PR252 PH (75% ramos de poda e 25% de bagaço de azeitona da centrifugação de 2 fases) e 50PR503 PH (50% ramos de poda e 50% de bagaço de azeitona da centrifugação de 3 fases) (Barbanera *et al.*, 2016).

Num outro estudo realizado na Universidade de Vermont, foram testados três tipos de erva diferentes (*Panicum virgatum* – *switchgrass*; capim-amarelo, *Phalaris arundinacea* – *reed canarygrass*, e feno – *mulch hay*) em misturas com resíduos de madeira, em composições variáveis. Todas as ervas foram testadas em péletes a 100% e, conjuntamente, com resíduos

^f EN 17225-6: 2014. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes classificadas não lenhosas.

de madeira com composições de 25%, 12% e 6%. Uma amostra de péletes de 100% de serrim foi utilizada como base de controlo e serviu de comparação para os resultados provenientes das restantes péletes produzidos. Durante a peletização da relva, encontraram-se alguns problemas logísticos, como a dificuldade na sua agregação, contrariamente ao observado com péletes usuais de madeira ou até de misturas relva-madeira. As razões para este problema prendem-se com os baixos níveis de lenhina no material e com o elevado teor de humidade da relva. No que respeita à combustão, pode-se referir a quantidade de cinzas obtidas. Como seria de esperar o teor de cinzas dos péletes de 100% relva é elevado (4,3-6,7%), bastante superior ao de um pélete de madeira classificada com um grau de qualidade boa (<0,5%). Em relação às misturas com 25%, 12% e 6% de relva, evidentemente, foram obtidos teores de cinzas mais baixos do que com os péletes fabricados com 100% de relva. Comparando os péletes produzidos com os três tipos de relva, os de 100% *switchgrass* foram os que originaram um menor teor de cinzas (4,3%). No que diz respeito ao conteúdo energético, foi possível verificar que o dos péletes de *switchgrass* foi superior (2%) em relação ao dos péletes de madeira convencionais, ao passo que os de capim-amarelo apresentaram um valor energético inferior (menos 10% do que os de madeira) e os de *mulch hay* menor em 8% (Davis *et al.*, 2011). Os três tipos de relva continham concentrações significativamente mais elevadas de nitrogénio, enxofre e cloro do que a madeira. As elevadas concentrações de cloro no combustível podem estar na origem da emissão de gases corrosivos quando ocorre a combustão, podendo ter como consequência a deterioração do interior da caldeira, das condutas e da chaminé. Os resultados obtidos nestes testes de emissões foram os esperados, sendo que a relva contém altas concentrações de cinzas e nitrogénio, face à madeira, emitindo, por isso, níveis superiores de partículas e de NO_x. Das três qualidades de relva, a *switchgrass* foi a que produziu emissões mais baixas, tanto de partículas como NO_x. Palha e culturas energéticas (*energy grass*) podem ser peletizadas com sucesso, obtendo-se combustível densificado em vários formatos (briquetes, de grande diâmetro, “discos” ou blocos, e péletes de pequeno diâmetro). Estes materiais podem ser misturados em várias concentrações com aparas de madeira disponíveis para aumentar, globalmente, a qualidade do combustível. Da mesma maneira que em outros trabalhos, este obteve idêntico resultado, no que diz respeito à comercialização de péletes de relva pura: não devem ser vendidos para salamandras de aquecimento residencial a madeira, devido ao seu alto teor de cinzas e às respetivas emissões dos gases de combustão. Contudo, dada a energia que contêm, o seu uso em caldeiras maiores e sistemas de aquecimento projetados especificamente para a queima desses materiais (com grelhas de escoamento para as cinzas,

controle de ar e de emissões adequados, e com materiais resistentes à corrosão como o aço inoxidável) tem elevado potencial (Davis *et al.*, 2011).

O estudo elaborado pela equipa de Mani *et al.* (2006), teve como finalidade examinar propriedades mecânicas de palha de trigo, palha de cevada, palha de milho e *switchgrass*, tais como, forças de compressão, tamanhos das partículas e teores de humidade. Estas amostras de biomassa foram comprimidas com cinco níveis de força de compressão (1000, 2000, 3000, 4000 e 4400 N), três níveis de tamanho de partículas (3,2, 1,6 e 0,8 mm) e dois níveis de teor de humidade (12% e 15%, base húmida), para estabelecer dados de compressão e de relaxamento. A dimensão e massa de amostras comprimidas foi medida para calcular a massa volúmica dos péletes produzidos. O estudo concluiu que, a força de compressão, tamanho de partículas e teor de humidade, afetam significativamente a massa volúmica dos péletes, como aconteceu neste trabalho em relação aos péletes de palha de cevada, palha de milho e *switchgrass*. No entanto, diferentes tamanhos de partículas de palha de trigo não originaram nenhuma diferença relevante na massa volúmica dos péletes. Os dados de relaxamento foram analisados para determinar o módulo assintótico dos péletes de biomassa. Na palha de cevada obteve-se o maior módulo assintótico de entre toda a biomassa, indicando que os péletes feitos de palha de cevada foram mais rígidos do que os restantes. O módulo assintótico aumenta linearmente com o aumento da pressão de compressão. A equipa desenvolveu um modelo linear simples para relacionar o módulo assintótico com a pressão de compressão máxima (Mani *et al.*, 2006).

Do anteriormente exposto, justifica-se o interesse que o estudo da possibilidade de peletizar, isoladamente ou em conjunto, biomassa residual lenhocelulósica de natureza diversa, tem despertado na comunidade técnico-científica, e que motivou a realização do trabalho apresentado nesta dissertação.

3. Caraterização de Biomassa

O conhecimento da composição da biomassa é de grande importância para o projeto térmico de um sistema de queima, e ainda para prever as emissões gasosas daí decorrentes (Basu, 2013).

Do exposto no capítulo anterior, sabe-se que a biomassa contém um vasto número de compostos orgânicos, humidade, e uma pequena parte de impurezas inorgânicas, conhecidas por cinzas. Os compostos orgânicos compreendem 4 elementos químicos principais: carbono (C), oxigénio (O), hidrogénio (H) e nitrogénio (N), podendo conter, ainda que em menores proporções, enxofre (S) e cloro (Cl). Relativamente, à fração inorgânica, a presença de metais alcalinos, como o potássio, ou de cloro, pode originar graves problemas de aglomeração, *fouling* (sujamento) ou corrosão nas caldeiras (Basu, 2013).

No trabalho realizado no âmbito desta dissertação foram usadas três biomassas distintas, serrim de pinho, borra de café seca ao ar, e relva, cuja composição importa conhecer para avaliar a sua adequabilidade como matéria-prima para a produção de péletes a utilizar para combustão.

3.1. Teor de Humidade

A determinação do teor de humidade na matéria-prima, é um ponto fulcral para a produção de péletes, na medida em que importa reconhecer a necessidade de adicionar ou remover água do material, a fim de obter péletes com uma estrutura física consistente, e passíveis de ser armazenados e transportados.

A determinação do teor de humidade pode ser realizada através de dois procedimentos, sendo eles baseados na gravimetria. Neste trabalho foram aplicados às matérias-primas estes dois procedimentos, para determinar o teor de humidade dos péletes produzidos (ver seção 4.3.1 Humidade dos Péletes). O método gravimétrico convencional consiste na pesagem da amostra em bruto e após sucessivos ciclos de secagem em estufa, a 105 °C, e arrefecimento em exsiccador, até peso constante, sendo utilizada a variação de massa para determinar a perda de água. Os equipamentos usados neste método são uma balança analítica e uma estufa, ou uma balança de humidades, tendo-se seguido o procedimento descrito no Anexo A para a realização dos testes. Alternativamente pode ser usada uma balança de humidades, que é uma balança que inclui uma câmara de secagem, sendo calculado automaticamente o teor de humidade do material colocado na câmara durante um determinado período a uma temperatura previamente fixada.

Todavia, ainda que tendo testado com várias amostras, os resultados provenientes dos dois procedimentos eram bastante divergentes. Por esta razão e, uma vez que a duração deste trabalho não permitiu efetuar diferentes testes, optou-se por considerar apenas os resultados provenientes do método gravimétrico convencional, (Tabela 3):

Tabela 3 Teor de humidade nas matérias-primas usadas e comparação com a literatura

Amostras	Massa (g)		Humidade (%)	
	Húmida	Seca	Resultado obtido	Literatura
Serrim	5,7	4,9	14,0	10 ^(a) ; 8,87 ^(d) ; 10,09 ^(e)
Borra de Café	19,1	17,7	7,3	8,1 ^(b) ; 11,78 ^(h)
Relva	4,3	3,9	9,3	8 ^(c) ; 9 ^(f) ; 6,43 ^(g)

^(a) Kraiem *et al.*, 2016; ^(b) Li *et al.*, 2014; ^(c) Mani *et al.*, 2006; ^(d) Kong *et al.*, 2013; ^(e) Zhang *et al.*, 2016; ^(f) Evanick e Bura, 2011; ^(g) Gilbert *et al.*, 2009; ^(h) Limousy *et al.*, 2013.

Os resultados apresentados na Tabela 3 permitem concluir que a matéria-prima com maior teor de humidade é o serrim de pinho (14,0%), seguido da relva (9,3%) e, por fim, a borra de café (7,3%). Comparando estes resultados com os valores da literatura, constatou-se que, de maneira geral, são próximos entre si, excetuando-se o serrim no qual se obtiveram valores mais elevados do que os encontrados na literatura. Este fato pode ser justificado pelo modo de acondicionamento da matéria-prima (exposto às condições ambientais) e/ou pela sua proveniência (ex. Kong *et al.* (2013) testaram serrim de abeto e não de pinho).

Deste modo, dada a variabilidade obtida, e de forma a uniformizar o procedimento de fabrico de péletes, conhecendo exatamente o teor de humidade, as 3 matérias-primas foram secas previamente à sua utilização.

3.2. Análise Elementar

Como referido, o conhecimento da composição das matérias-primas é essencial para projetar o equipamento de queima, nomeadamente o sistema de depuração dos gases daí provenientes, bem como, numa etapa mais precoce, antecipar problemas relacionados com a produção de péletes a partir destas matérias-primas.

De acordo com Basu (2013), a biomassa, e em particular a celulose, têm quantidades muito elevadas de O (oxigénio) e H (hidrogénio), o que está na origem de poderes caloríficos inferiores. Isto pressupõe que é possível antever um elevado poder calorífico do material sempre que o teor destes dois elementos for menor, ou seja, sempre que o teor de C seja o mais elevado. Relativamente ao S, a sua presença no combustível permite antecipar que, ao ser queimado, ocorrerão emissões de óxidos de enxofre – gases que potenciam a acidificação e a eutrofização.

A determinação da análise elementar foi realizada pelo Centro para a Valorização de Resíduos (CVR), com intuito de conhecer a composição das três matérias-primas utilizadas na produção dos péletes (Boletins de Análise no Anexo B).

Como for mencionado anteriormente, a biomassa é essencialmente constituída por átomos de carbono, sendo, portanto, o carbono o elemento mais abundante como se comprova pelos resultados fornecidos pelo CVR, e apresentado na Tabela 4. Em concreto, e no que concerne aos valores obtidos na análise elementar

Como foi mencionado anteriormente, a biomassa é essencialmente constituída por átomos de carbono, sendo, portanto, o carbono o elemento mais abundante, como se comprova pelos resultados fornecidos pelo CVR, e apresentados na Tabela 4. Em concreto, e no que concerne aos valores obtidos na análise elementar Tabela 4 os resultados referentes à borra de café diferem dos apresentados na literatura. Refira-se, todavia, que é conhecida a relação entre a quantidade de carbono (C) e as condições de torrefação à qual o material foi sujeito (Tsai & Liu, 2013). A borra de café utilizado no decurso deste trabalho proveio de diversas unidades do setor HORECA^g pelo que não conhecido nem o tipo de café (espécie), nem a marca ou as condições de torrefação.

^g HORECA: Hotéis, Restaurantes e Cafés.

Tabela 4 Composição elementar das matérias-primas usadas neste trabalho^(a)

Parâmetro	Unidades (m/m)	Serrim		Borra de café		Relva	
		Experimental ^(b)	Literatura	Experimental ^(b)	Literatura	Experimental ^(b)	Literatura
C	%	42,6	45,2 ^(c) ; 47,1 ^(d) ; 46,0 ^(e) ; 47,6 ^(f)	38,9	61,13 ^(d) ; 54,4 ^(g) ; 59,5 ^(h)	42	41,3 ⁽ⁱ⁾ ; 47,7 ^(j) ; 47,37 ^(k)
H	%	7,44	6,3 ^(c) ; 6,1 ^(d) ; 6,2 ^(e) ; 6,1 ^(f)	8,55	8,99 ^(d) ; 7,1 ^(g) ; 7,3 ^(h)	6,73	5,86 ⁽ⁱ⁾ ; 5,9 ^(j) ; 6,61 ^(k)
N	%	0,08	0,1 ^(c) ; <0,1 ^(d) ; 0,5 ^(e) ; <0,1 ^(f)	1,43	2,91 ^(d) ; 2,4 ^(g) ; 2,5 ^(h)	2,9	0,6 ⁽ⁱ⁾ ; 1 ^(j) ; 0,62 ^(k)
S	%	<0,2	0 ^(c) ; <0,01 ^(d) ; <0,01 ^(e) ; <0,01 ^(f)	<0,2	0,37 ^(d) ; 0,1 ^(g) ; 0 ^(h)	0,37	0,06 ⁽ⁱ⁾ ; 0,1 ^(j) ; 1,43 ^(k)
O^(l)	%	49,88	48,4 ^(c) ; 46,8 ^(d) ; 47,3 ^(e) ; 46,3 ^(f)	51,12	26,6 ^(d) ; 36,1 ^(g) ; 30,7 ^(h)	48	52,2 ⁽ⁱ⁾ ; 45,3 ^(j) ; 43,97 ^(k)

^(a) Resultados expressos em base seca; ^(b) Valores obtidos pelo CVR – Centro de Valorização de Resíduos; ^(c) Gil *et al.*, 2010; ^(d) Jeguirim *et al.*, 2014; ^(e) Garcia-Maraver *et al.*, 2014; ^(f) Limousy *et al.*, 2015; ^(g) Li *et al.*, 2014; ^(h) Silva *et al.*, 1998; ⁽ⁱ⁾ Wang *et al.*, 2014; ^(j) Masnadi *et al.*, 2015; ^(k) Yang *et al.*, 2014; ^(l) Obtido por diferença.

Relativamente às duas outras matérias-primas, os resultados experimentais são similares aos apresentados em estudos anteriores. Salienta-se, no entanto, que não foram encontradas referências quanto ao tipo de “relva” utilizada, que será, provavelmente, uma mistura da família *Poaceal* (nome comum: gramíneas) – Géneros *Agrostis*, *Festuca*, *Poa* e *Lolium* – distintas porém dos géneros / espécies mais usados em estudos energéticos referidos na literatura, como a *Panicum vingatum* ou a *Phalaris anundinacea* (nome comum: capim amarelo) ou mesmo o *Miscanthus*.

Com exceção da relva, os teores de enxofre medidos encontravam-se a\baixo do limite de deteção do aparelho. No caso da relva, importará, futuramente, avaliar as emissões de óxidos de enxofre que se possam formar no processo de combustão (fora do âmbito deste estudo).

Resumindo, constatou-se que o serrim é o que contém o teor de carbono mais elevado (embora muito próximo da relva); por sua vez (de acordo com os resultados obtidos) o teor de hidrogénio é mais elevado na borra de café, ao passo que a relva é, de entre as três matérias-primas usadas neste estudo, aquela que apresenta um maior teor de nitrogénio e de enxofre.

Com base na análise elementar apresentada, é possível determinar as razões O:C e H:C e, recorrendo ao diagrama de Van Krevelen (Kim *et al.*, 2003; McKendry, 2002), prever o comportamento dos materiais em termos de poderes caloríficos (Figura 3). Em concreto, e segundo este mesmo diagrama, uma razão O:C elevada implica um menor poder calorífico superior (PCS), significa isto que, importa, do ponto de vista energético, selecionar matérias-primas com teores de H superiores.

Analisando as razões O:C e H:C determinadas para o serrim e para a relva (Figura 3), verifica-se que os valores obtidos neste trabalho e os da literatura são coerentes. Pelo contrário, no que concerne à borra de café, os valores obtidos diferem dos de estudos anteriores, o que não é de estranhar face à diferença nos teores de C e O (relativamente aos da bibliografia) apresentada na Tabela 4 e já comentada.

Mediante esta disparidade de resultados, questionou-se se o valor do teor de carbono não acarretará um erro (derivado das condições de amostragem^h ou, eventualmente um erro na

^h Contaminação da amostra; teor de humidade demasiado elevado (por exemplo).

determinaçãoⁱ). Neste sentido, novamente comparando com os valores da literatura, considerou-se a possibilidade de inverter os teores de carbono com os de oxigênio (marcado na Figura 3 com BC*). Ao registar, no gráfico, BC* verifica-se uma maior proximidade com os valores da literatura, comprovando o mencionado.

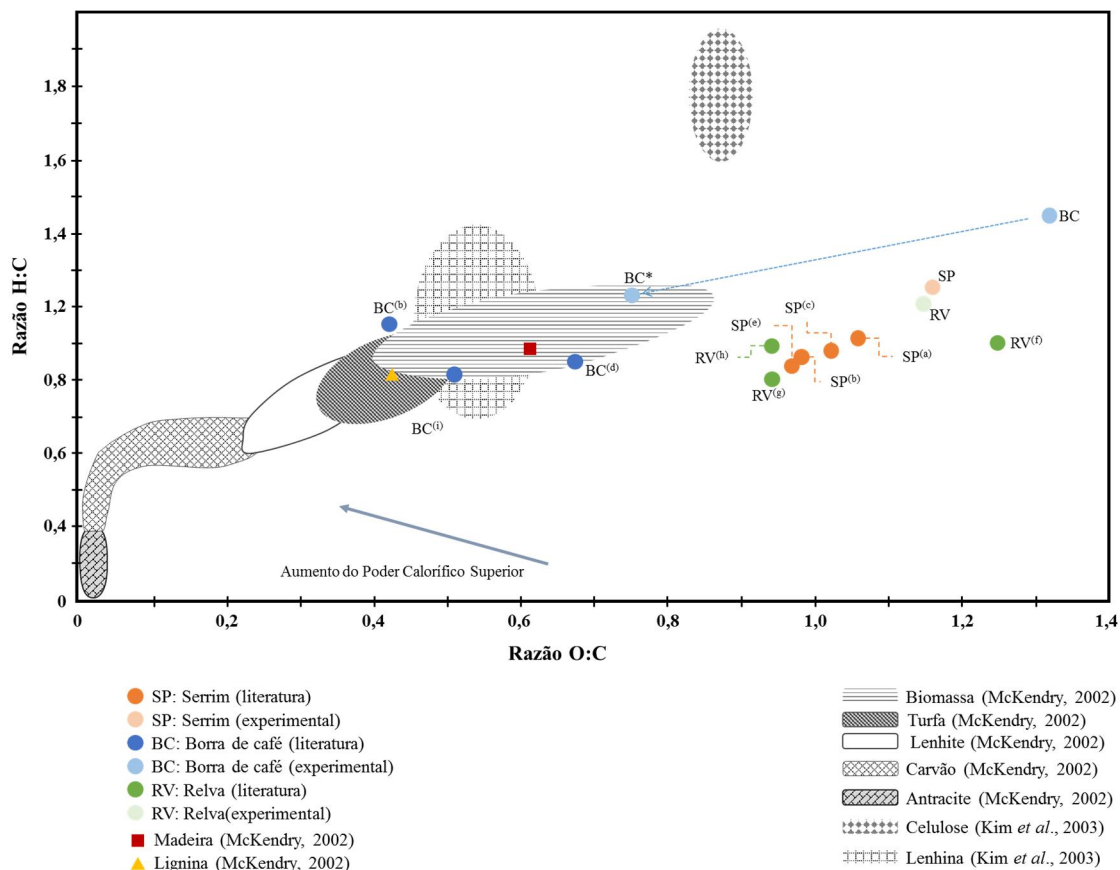


Figura 3 Diagrama de Van Krevelen (adaptado de McKendry, 2002 e Kim *et al.*, 2003)

Relativamente à relação entre as razões O:C e H:C e o PCS, para as diferentes matérias-primas, é de esperar que a relva e o serrim apresentem um valor próximo, enquanto a borra de café deverá apresentar um poder calorífico superior distinto. No caso desta matéria-prima, ao considerar os valores obtidos é de esperar um PCS inferior ao das outras duas amostras; todavia, no caso BC* o valor de PCS seria superior (face às outras duas amostras) conforme esperado pela análise dos valores teóricos.

Ainda pela análise do referido gráfico, é possível antecipar a maior ou menor facilidade para produção de péletes, isto porque, e de acordo com Basu (2013), uma matéria-prima com

ⁱ Face ao longo período exigido pelo laboratório externo para a realização dos testes (aproximadamente 4 semanas), não houve oportunidade para pedir uma contra-análise.

maior teor de lenhina terá uma maior capacidade de agregação, já que esta, por elevação da temperatura, operará como um ligante natural no processo de densificação se a temperatura da matéria-prima for elevada para o intervalo 50-150 °C, verificando-se uma modificação do comportamento (“amaciar”) da lenhina existente. Quando as partículas de biomassa são comprimidas, formam-se ligações físicas estáveis entre elas. Posteriormente, quando arrefecida, a lenhina endurece, mantendo as partículas coesas. Assim sendo, é expectável que o serrim de pinho e a relva apresentem teores de celulose superiores (de acordo com Basu (2013), 40 a 44% de celulose e 18 a 25% de lenhina). Por seu lado, a borra de café deveria ter um nível de lenhina superior (conforme determinado por Ballesteros *et al.* (2014), 12,40% de celulose e 23,90% de lenhina), correspondente a BC*.

3.3. Poder Calorífico

O Poder Calorífico Superior (PCS) é definido como a quantidade de calor libertado por unidade de massa ou volume de combustível (inicialmente a 25 °C), uma vez que é queimado e os produtos são retornados a uma temperatura de 25 °C. Este poder calorífico inclui o calor latente de vaporização da água, e cada material tem um PCS diferente.

Em relação ao Poder Calorífico Inferior (PCI), também conhecido como o valor calorífico líquido, este é definido como a quantidade de calor libertado totalmente pela combustão do material, quantidade essa específica à qual se retira o calor de vaporização da água nos produtos de combustão (Basu, 2013).

No caso específico das caldeiras, a temperatura dos gases de escape resultantes da combustão de uma caldeira, geralmente, situa-se na gama dos 120 – 180 °C. Os produtos de combustão raramente são arrefecidos para a temperatura inicial do combustível, que é geralmente inferior à temperatura de condensação de vapor. Sendo assim, o calor latente de vaporização deste componente nunca é recuperado. O calor disponível utilizado na caldeira é um valor mais baixo, que é menor do que a energia química armazenada no combustível. A relação existente entre o PCS e o PCI é dada pela equação (1) (Basu, 2013):

$$PCI = PCS - h_{lv} \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (kJ \cdot kg^{-1}) \quad (1)$$

Sendo:

H, Teor de hidrogénio (%).

M, Teor de humidade (%).

h_{lv} , Calor latente de vaporização ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

O calor latente de vaporização da água, quando a temperatura de referência é $100\text{ }^\circ\text{C}$, é $2\,260\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Uma bomba calorimétrica é o equipamento usado para determinar o poder calorífico superior de uma substância. É um aparelho isolado termicamente do meio ambiente, e muito utilizado nos laboratórios para estudar a quantidade de calor trocado entre dois ou mais corpos a temperaturas diferentes, não existindo troca de calor entre o mesmo e o meio ambiente. Existem vários formatos de calorímetro, mas todos são constituídos, basicamente, por um recipiente de paredes finas que é envolvido por outro recipiente fechado de parede mais grossas e isolantes, sendo por isso evitada a entrada e saída de calor.

O equipamento usado neste estudo, designado por Termómetro Calorimétrico de Precisão (Parr 6 772) foi usado em conjunto com o Calorímetro Semimicro (Parr 6725), existente nas instalações do ISEP. Este conjunto é constituído por um termómetro de precisão, uma câmara de combustão, um motor (confere movimento ao agitador), um leitor de temperatura, uma caixa de ignição e um agitador, que serve para alcançar o equilíbrio térmico mais rapidamente (Figura 4).



Figura 4 Aparelho usado para determinar o PCS nas instalações do ISEP

Este método baseia-se na queima do produto, iniciada pela ignição provocada por uma corrente elétrica que é fornecida pelos fios de fusíveis, na presença de uma atmosfera rica em oxigênio.

Para a análise de cada tipo de produto, o primeiro passo é a preparação da amostra, que passa pela sua pesagem e introdução no equipamento. Durante a preparação da amostra, esta é colocada num cadinho, sendo este fixado a um suporte onde se coloca o fio condutor e metade de uma “pastilha” de ácido benzoico (Figura 5). Posteriormente, o conjunto é introduzido num cilindro, denominado de câmara de combustão, que após ser devidamente fechado, é pressurizado com oxigênio.



Figura 5 Exemplo de uma amostra preparada para determinação do PCS

Esta análise tem uma duração total aproximada de 25 minutos, sendo que, 15 minutos são para a determinação do PCS da amostra, propriamente dito, e os primeiros 10 minutos para preparação da amostra.

Este processo foi aplicado às três matérias-primas em estudo: serrim de pinho, borra de café e relva. Após esta determinação, e recorrendo à equação (1), pode-se, então, converter o PCS em PCI, estando os resultados apresentados na Tabela 5. Nesta tabela, também se apresentam os valores referidos na literatura. Os cálculos realizados para essa conversão encontram-se descritos no Anexo C.

A todas as misturas preparadas para a produção de péletes foram adicionados 10% de óleo vegetal de girassol (em relação à massa total da mistura) (ver 4.1 Preparação das Misturas).

Como o PCI do óleo vegetal não foi determinado, utilizou-se o valor obtido experimentalmente por Mehta e Anand (2009) – (37 080 kJ·kg⁻¹).

Tabela 5 Poder Calorífico Superior e Inferior das Matérias-Primas Usadas e sua Comparação com Dados da Literatura

Amostra	PCS (kJ·kg ⁻¹)		PCI (kJ·kg ⁻¹)	
	Medido	Calculado	Literatura	
Serrim de pinho	19429,6	17916,1	17600 ^(b) ; 17800 ^(c) ; 16900 ^(d)	
Borra de café	21100,3	19361,1	21755,78 ^(a) ; 18110 ^(b) ; 17520 ^(c)	
Relva	16588,1	15220,6	16268,0 ^(e) ; 17999,8 ^(f) ; 19255,4 ^(g)	

^(a) Li *et al.*, 2014; ^(b) Jeguirim *et al.*, 2014; ^(c) Limousy *et al.*, 2013; ^(d) Rabaçal *et al.*, 2013; ^(e) Wang *et al.*, 2014; ^(f) Masnadi *et al.*, 2015; ^(g) Yang *et al.*, 2014.

No que concerne à Tabela 5, analisando os valores obtidos concluiu-se que a matéria-prima que apresentava um maior poder calorífico era a borra de café, seguida pelo serrim de pinho e, finalmente pela relva. Comparando estes valores com os resultados existentes na literatura (Li *et al.*, 2014, Jeguirim *et al.*, 2014 e Limousy *et al.*, 2013), constatou-se que o valor do PCI é concordante e, de acordo com Zuorro e Lavecchia (2012), o poder calorífico da borra de café, excede, em cerca de 20%, o de madeiras “duras” (árvores folhosas) e da maioria dos resíduos agrícolas. No que respeita ao valor do PCI da borra de café calculado neste trabalho, obteve-se um valor superior ao das outras duas matérias-primas, comprovado e comentado pelo diagrama de Van Krevelen, para BC* (Figura 3).

Para o serrim de pinho, o valor obtido foi apenas ligeiramente superior ao encontrado na literatura, facto que pode ser justificado pelo modo de acondicionamento da matéria-prima (exposto às condições ambientais) e/ou pela sua origem (ex.: Kong *et al.* (2013), em que foi utilizado serrim de abeto).

4. Produção de Péletes

Os diversos processos de combustão de materiais de biomassa são complexos por três razões: (1) o combustível tem uma composição físico-química diversificada; (2) a combustão dá-se num ambiente que não é controlado e; (3) o teor de humidade, densidade e heterogeneidade dos diversos materiais cria um efeito negativo sobre a eficácia da combustão.

Para melhorar o comportamento dos materiais usados como combustível, recorreu-se à sua densificação, que proporciona um aumento da sua homogeneidade e permite que uma maior variedade de materiais lenho-celulósicos seja utilizada como combustível.

Os péletes de biomassa podem ser usados em fornos com grelha de combustão ou em leito fluidizado, oferecendo também vantagens tais como um mais fácil armazenamento e transporte, menor poluição, menores níveis de partículas e maiores valores de potência de aquecimento. Oferecem as mesmas vantagens para automação e otimização que os combustíveis derivados do petróleo, mas com a diferença que este combustível consegue uma maior eficiência de combustão e uma menor quantidade de resíduos de combustão (cinzas), para além de reduzir as emissões de GEE (Gil *et al.*, 2010).

Tal como referido anteriormente, as matérias-primas escolhidas para a produção de péletes foram o serrim de pinho (SP), a borra de café (BC) e a relva (RV).

4.1. Preparação das Misturas

A matéria-prima, antes de ser utilizada, foi previamente seca numa estufa a uma temperatura de 105 °C, durante 24 h, de forma a remover a maior parte da humidade nela presente.

Para se começar a peletizar é fundamental preparar previamente a matéria-prima. Neste caso, o primeiro passo foi a pesagem da(s) matéria(s)-prima(s), e só em seguida se adicionou a quantidade de óleo vegetal alimentar necessário para proporcionar uma melhor agregação das matérias-primas utilizadas (tendo em consideração que a humidade final dos péletes deve ser inferior a 10%), e procedeu-se à mistura da(s) matéria(s)-prima(s) (visto que não existia nenhuma misturadora disponível, promoveu-se uma homogeneização de forma manual, tentando-se que os diferentes materiais ficassem tão misturados quanto possível).

Através de sucessivos testes foi possível concluir que com 10% da massa total em óleo vegetal adicionado à mistura, os péletes tornavam-se mais rígidos e mais compactos, visto que, como referido, o óleo vegetal opera como ligante ou complemento à lenhina normalmente presente nestas espécies vegetais.

Como durante o processo de peletização são atingidas temperaturas elevadas e próximas dos 100 °C, ocorre evaporação de alguma água existente nas misturas, pelo que este facto tem de ser tomado em consideração aquando da determinação da humidade da mistura. Para essa determinação é necessário saber qual o valor da humidade existente em cada tipo de matéria-prima, pelo que se recorreu às equações 2 e 3:

$$M_{ap} = \frac{M_t \times H}{100} \quad (g) \quad (2)$$

$$M_s = M_t - M_{ap} \quad (g) \quad (3)$$

Onde:

M_{ap} , Massa de água no material (g)

H, Humidade inicial da matéria (%)

M_t , Massa total inicial (g)

M_s , Massa de matéria seca (g)

Adicionalmente, através da equação 4, é possível determinar a quantidade de massa de óleo que é necessário adicionar à mistura:

$$M_{\text{óleo}} = M_t \times 0,1 \text{ (g)} \quad (4)$$

Onde:

$M_{\text{óleo}}$, Massa de óleo a adicionar (g)

4.2. Peletizadora

Os péletes usados neste trabalho foram produzidos numa peletizadora existente no INEGI (Laizhou Chengda Machinery Co., Ltd, modelo KL150B/C) (Figura 6), ou adquiridos em superfícies comerciais, optando-se, neste caso por marcas que tivessem o selo EN-Plus (segundo a norma NP EN 14961-2).



Figura 6 Peletizadora usada para a produção dos péletes, disponível nas instalações do INEGI

A alimentação de mistura à peletizadora foi efetuada manualmente, sendo introduzida numa espécie de funil cónico. Na parte inferior do local onde é colocada a mistura encontra-se uma matriz e um rolo, como é apresentado na Figura 7. A matriz tem forma circular e os orifícios nela existente têm 6 mm de diâmetro; enquanto o rolo, através de movimentos rotacionais em torno de um eixo, permite que a matéria-prima seja compactada e direcionada para os diversos orifícios ocorrendo, então, a formação de péletes por um processo de extrusão. Estes

rolos podem ser ajustados à matriz, por meio de dois parafusos existentes na parte exterior superior, possibilitando ajustar a força exercida pelo rolo sobre a matriz.



Figura 7 Pormenor da matriz (c) e do rolo (b) e sua montagem no interior da peletizadora (a)

Caraterísticas da Peletizadora

- Potência (P) 4 000 W
- Tensão elétrica (U) 380 V
- Capacidade de produção (Q) 100-150 kg·h⁻¹

Sempre que se iniciou um processo de peletização foi necessário verificar se a peletizadora estava completamente limpa, para garantir a inexistência de vestígios de material diferente, que podiam contaminar as novas amostras. Seguidamente, e depois de ter homogeneizado a mistura para a produção de péletes, introduziu-se uma quantidade significativa desta mistura na calha de alimentação, sem que fosse ultrapassada a altura dos rolos – este processo pressupõe que se adicione matéria-prima à peletizadora em intervalos de tempo de cerca 15 segundos (verificou-se que, desta forma, os péletes adquiriam uma rigidez, consistência e dimensão similares às dos péletes comerciais).

Para a escolha das proporções de cada uma das matérias-primas na produção de péletes, teve-se em linha de conta a literatura da especialidade (Limousy *et al.*, 2015) e as análises efetuadas à matéria-prima (Tabela 4).

Será de esperar que os péletes de borra de café possam exceder os valores limite para alguns parâmetros estabelecidos na legislação em vigor, nomeadamente ao nível das emissões gasosas e teor de cinzas. Todavia, o PCI deste resíduo (Tabela 5) é superior ao do serrim de pinho, pelo que interessa maximizar o teor de borra de café nos péletes de mistura destes compostos, do ponto de vista de aproveitamento energético. Conjugando estas duas informações planeou-se a produção de péletes de misturas de serrim de pinho (SP) e borra de café (BC), com teor superior desta biomassa residual.





Relativamente às misturas contendo relva, existiu, no decorrer do trabalho, alguma dificuldade em obter esta matéria-prima. Paralelamente, do ponto de vista térmico, a relva possui um elevado potencial de produção de cinzas e de escórias derivadas à presença de compostos alcalinos. Devido a estes fatos, planeou-se a produção de péletes com menor percentagem de relva, relativamente à de serrim de pinho.

Na Tabela 6, encontra-se a codificação atribuída aos diferentes tipos de péletes (e que será utilizada) ao longo do texto, assim como, a respetiva imagem.

Resumindo, ao longo deste trabalho foram produzidos 3 tipos de péletes, nomeadamente, 100% de borra de café, 65% de borra de café com 35% de serrim e 65% de serrim com 35% de relva. Foram ainda utilizados péletes comerciais (certificados com o selo de qualidade *ENplus A1*), assumindo-se uma composição de 100% de serrim de pinho.

Durante a queima dos péletes 65SP/35RV observou-se uma elevada produção de cinzas (conforme esperado pela análise ao teor de cinza) o que impossibilitou a realização do ensaio. Desta forma, uma nova composição foi selecionada e testada – 10% relva e 90% serrim (ver Capítulo 5).

Tabela 6 Designação dos péletes usados neste trabalho

Composição (% m/m)	Designação	Aspetto
100% Serrim Pinho	100SP	
100% Borra Café	100BC	
65% Borra Café + 35% Serrim Pinho	65BC/35SP	
65% Serrim Pinho + 35% Relva	65SP/35RV	
90% Serrim Pinho + 10% Relva	90SP/10RV	

4.3. Caraterização de Péletes

4.3.1. Humidade dos Péletes

O método gravimétrico foi aplicado para determinar a humidade nos péletes que foram fabricados com a combinação das 3 matérias-primas anteriormente analisadas, tal como descrito no capítulo anterior (3.1 Teor de Humidade).

A biomassa é caracterizada por elevados teores de água o que, do ponto de vista energético, é prejudicial pois implica um consumo energético adicional para a sua evaporação (Basu, 2013), pelo que importa quantificá-la.

Tabela 7 Determinação do teor de humidade nos péletes e comparação com a literatura

Designação	Massa (g)		Humidade (% m/m)	
	Inicial	Final	Resultados obtidos	Literatura
100SP	21,6	21,1	2,3	11,78 ^(a) ; 7 ^(b) ; 8,2 ^(c)
100BC	22,9	21,1	7,9	7,90 ^(a) ; 10,7 ^(b) ; 8,1 ^(f)
65BC/35SP	31,1	29	6,8	6,65 ^(a) ; 9,41 ^(b) ;
65SP/35RV	23,4	21,9	6,4	8,53 ^(c) ; 5,89 ^(d) ; 11,2 ^(e)
90SP/10RV	27,0	25,6	5,2	8,25 ^(c) ; 6,04 ^(d) ; 11,89 ^(e)

^(a) Jeguirim *et al.*, 2014; ^(b) Skreiberg *et al.*, 2011; ^(c) Jong *et al.*, 2003; ^(d) Ryu *et al.*, 2006; ^(e) Carroll *et al.*, 2012; ^(f) Li *et al.*, 2014

Em termos de teor de humidade, constatou-se que em todos os péletes este se encontra abaixo dos 10%, conforme exigido para certificação. Os péletes que possuem maior teor de humidade são os 100BC e os que possuem menor são os 100SP. Este parâmetro não tem grande relevância na rejeição ou seleção de um tipo de pélete, pois não depende apenas da matéria-prima a usar mas também do seu controlo durante o processo de produção, sendo possível aumentar ou diminuir a percentagem de humidade, tal como foi verificado na seção 4.1 Preparação das Misturas.

Conforme descrito no capítulo anterior (Capítulo 3), foi possível avaliar a composição elementar dos péletes que foram fabricados com a combinação das 3 matérias-primas selecionadas, através da seguinte equação (5):

$$A_{Total} = \sum x_i \times (A_i) \quad (\%) \quad (5)$$

Onde:

A_{Total} , Quantidade de elemento presente na mistura final (%);

x_i , Fração da matéria-prima i na mistura final (adimensional);

A_i , Fração do elemento na matéria-prima i (%).

É possível observar, nas Tabela 8 e Tabela 9, os resultados da composição elementar determinada para os péletes usados nos ensaios de queima (Capítulo 5).

O carbono e o oxigênio são os elementos em maior abundância, fator este que está em concordância com os diversos estudos publicados na literatura. Relativamente ao elemento hidrogênio, a sua percentagem é baixa e não varia muito nos vários tipos de péletes, embora aqueles que possuam um maior teor de H correspondam àqueles em que foi usada uma maior percentagem de borra de café. Da mesma forma, o nitrogênio e o enxofre estão presentes em maior quantidade nos péletes que têm na sua constituição borra de café e relva, comparativamente aos péletes de serrim de pinho.

Tabela 8 Composição elementar dos péletes produzidos com uma única matéria-prima

Parâmetro	Unidade	100SP		100BC	
		Experimental	Literatura	Experimental	Literatura
C	%	42,60	45,2 ^(a) ; 47,1 ^(b) ; 46,0 ^(c)	38,90	54,4 ^(d) ; 61,13 ^(b) ; 61,1 ^(h)
H	%	7,44	6,3 ^(a) ; 6,1 ^(b) ; 6,2 ^(c)	8,55	7,1 ^(d) ; 8,99 ^(b) ; 9,9 ^(h)
N	%	0,08	0,1 ^(a) ; <0,1 ^(b) ; 0,5 ^(c)	1,43	2,4 ^(d) ; 2,91 ^(b) ; 2,9 ^(h)
S	%	<0,20	0 ^(a) ; <0,01 ^(b) ; <0,01 ^(c)	<0,20	0,1 ^(d) ; 0,37 ^(b) ; 0,4 ^(h)
O	%	49,88	48,4 ^(a) ; 46,8 ^(b) ; 47,3 ^(c)	51,12	36,0 ^(d) ; 26,6 ^(b) ; 26,6 ^(h)

^(a) Gil *et al.*, 2010; ^(b) Jeguirim *et al.*, 2014; ^(c) Garcia-Maraver *et al.*, 2014; ^(d) Li *et al.*, 2014; ^(h) Limousy *et al.*, 2015.

Tabela 9 Composição elementar dos péletes de misturas

Parâmetro	Unidade	35SP/65BC		10RV/90SP		35RV/65SP	
		Experimental	Literatura	Experimental	Literatura	Experimental	Literatura
C	%	40,20	56,38 ^(h) ; 50,98 ⁽ⁱ⁾	42,54	51,09 ^(e) ; 48,81 ^(f) ; 51,83 ^(g)	42,39	50,57 ^(e) ; 46,34 ^(f) ; 51,16 ^(g)
H	%	8,16	7,99 ^(h) ; 6,59 ⁽ⁱ⁾	7,37	6,36 ^(e) ; 7,92 ^(f) ; 5,23 ^(g)	7,19	6,36 ^(e) ; 7,47 ^(f) ; 5,31 ^(g)
N	%	0,96	1,89 ^(h) ; 2,0 ⁽ⁱ⁾	0,36	0,22 ^(e) ; - ^(f) ; 0,36 ^(g)	1,07	0,22 ^(e) ; - ^(f) ; 0,44 ^(g)
S	%	<0,20	0,26 ^(h) ; 0,14 ⁽ⁱ⁾	<0,20	0,024 ^(e) ; - ^(f) ; 0,12 ^(g)	<0,20	0,024 ^(e) ; - ^(f) ; 0,13 ^(g)
O	%	50,68	33,39 ^(h) ; 40,25 ⁽ⁱ⁾	49,73	42,31 ^(e) ; 37,95 ^(f) ; 42,38 ^(g)	49,35	41,86 ^(e) ; 37,08 ^(f) ; 42,83 ^(g)

^(e) Kraiem *et al.*, 2016; ^(f) Ryu *et al.*, 2006; ^(g) Jong *et al.*, 2003; ^(h) Limousy *et al.*, 2015; ⁽ⁱ⁾ Skreiberg *et al.*, 2011.

4.3.2. Poder Calorífico dos Péletes

O PCI dos péletes foi determinado por cálculo, tendo como base os valores previamente determinados para o PCS das matérias-primas (Tabela 5) e para o óleo vegetal (Metta e Anand, 2009). Os valores determinados neste trabalho encontram-se na Tabela 10, bem como os valores da literatura. Para o cálculo do PCI foram usadas as composições mássicas que estão apresentadas no Anexo C.

Tabela 10 Comparação do PCI dos péletes com os valores da literatura

Designação	PCI (kJ/kg)	
	Valor Calculado	Valor da Literatura
100SP	17109,9	17600 ^(b) ; 17800 ^(c) ; 16900 ^(d)
100BC	21309,0	21755,78 ^(e) ; 18110 ^(b) ; 17520 ^(c)
65BC/35SP	20849,2	17910 ^(a) ; 17618 ^(f) ; 18526 ^(g)
65SP/35RV	19137,7	15766 ^(h) ; 18313 ⁽ⁱ⁾
90SP/10RV	19750,3	16399 ^(h) ; 18699 ⁽ⁱ⁾

^(a) Limousy *et al.*, 2013 (Mistura 50BC/50SP); ^(b) Jeguirim *et al.*, 2014; ^(c) Limousy *et al.*, 2013; ^(d) Rabaçal *et al.*, 2013; ^(e) Li *et al.*, 2014; ^(f) Limousy *et al.*, 2013; ^(g) Skreiberg *et al.*, 2011; ^(h) Ryu *et al.*, 2006; ⁽ⁱ⁾ Carroll *et al.*, 2012.

Analisando a Tabela 10 verifica-se que os valores calculados se encontram, de uma maneira geral, dentro (ou ligeiramente acima) das gamas dos valores da literatura. Este fato justifica-se pela adição do óleo vegetal à mistura, que incrementa tenuemente este parâmetro, dado o seu PCI elevado. Das várias misturas produzidas, aquela que possui maior PCI é a 100BC, correspondendo o menor valor aos péletes comerciais de 100SP. De forma genérica, as misturas que contêm borra de café são aquelas que possuem um maior PCI, comparativamente com as misturas de relva com serrim.

4.3.3. Teor de Cinzas

O método para a determinação do teor de cinzas totais utiliza o calor produzido num forno (mufla) onde ocorre a destruição total da matéria-prima (neste caso, péletes). Este processo é idêntico ao da determinação convencional do teor de humidade, com diferença na temperatura e no equipamento utilizado para a queima, uma mufla que suporta temperaturas

até 1 100 °C. Para determinação deste parâmetro foram utilizados os equipamentos disponíveis no ISEP (procedimento experimental descrito no Anexo B).

A obtenção do teor de cinzas, foi possível através da equação (6):

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{(m_{c+ac}-m_c)}{(m_{c+a}-m_c)} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

onde:

m_c , massa do cadinho (g);

m_{c+a} , massa do cadinho com a amostra original (g);

m_{c+ac} , massa do cadinho com a amostra calcinada (g).

Tabela 11 Determinação do teor de cinzas dos diversos tipos de péletes

Pélete	Massa de Amostra Húmida, m_a (g)	Humidade Pélete (%)	Massa Amostra Seca (g)	Massa Cadinho, m_c (g)	Massa Final, m_{c+ac} (g)	Massa Cinzas (g)	Teor de Cinzas (%)	Teor Médio de Cinzas (%)
100SP	5,2968	2,31	5,1744	27,6328	27,6633	0,0305	0,5758	0,5648
	5,5986		5,4693	27,2875	27,3185	0,0310	0,5537	
100BC	5,4129	7,86	4,9874	27,1828	27,2746	0,0918	1,5112	1,5158
	5,6103		5,1693	27,3270	27,4223	0,0953	1,5204	
65BC/35SP	5,1127	6,75	4,7676	32,4328	32,5023	0,0695	1,3594	1,1816
	5,2105		4,8588	25,4250	25,4773	0,0523	1,0037	
65SP/35RV	5,4135	6,41	5,0665	32,4418	32,7483	0,3065	6,0495	5,8740
	5,4451		5,0961	26,7645	27,0549	0,2904	5,6985	
90SP/10RV	5,3869	5,19	5,2625	27,1801	27,2925	0,1124	2,0865	2,3137
	5,4747		5,3482	25,3921	25,5312	0,1391	2,5408	

Na Tabela 11 é possível analisar a percentagem de cinzas contidas nos péletes dos vários materiais, constatando-se que esse mesmo teor de cinzas depende essencialmente da matéria-prima incorporada nos péletes, pelo que é superior em todas as amostras que contém relva. Assim, e como expectável, os péletes com relva apresentam um teor de cinza superior aos péletes normalizados de serrim de pinho.

Comparativamente com os valores referidos na norma para certificação de péletes, no que concerne a este parâmetro constatou-se que a mistura 65SP/35RV está fora dos limites aí estipulados. Por seu lado, os péletes 90SP/10RV encontram-se dentro da classe EN B (teor máximo de cinzas 3%). Os péletes 100BC e 65BC/35SP apresentam teores de cinzas inferiores a 1,5%, valor esse correspondente à classificação *ENplus* A2 na certificação. Assim, é possível concluir que todos os péletes poderiam ser certificados – segundo o parâmetro teor de cinzas – exceto os péletes de 65SP/35RV que estão completamente excluídos para os fins deste estudo – queima para obtenção de energia térmica.

Em suma, para as diferentes tipologias de péletes produzidas, apresentam-se na tabela seguinte a sua caracterização em termos de teor humidade, teor de cinzas e poder calorífico inferior:

Tabela 12 Caracterização dos péletes produzidos

Parâmetro	100SP	100BC	65BC/35SP	65SP/35RV	90SP/10RV
Teor de humidade (%)	7,86	2,31	6,75	6,41	5,19
Teor de cinzas (%)	0,53	1,56	1,10	5,50	2,13
PCI (MJ·kg⁻¹)	17,10	21,30	20,80	19,10	19,70

5. Ensaaios de Combustão

Após o fabrico dos péletes pelo processo descrito anteriormente, interessa conhecer as emissões gasosas geradas aquando da sua combustão. Estes ensaios, permitirão quantificar as emissões de CO, CO₂ e O₂, de forma a verificar se é possível cumprir os limites de emissão impostos por regulamentos como a norma NP EN 12809: 2015. Paralelamente, avaliou-se se a caldeira a gásóleo adaptada com um queimador para péletes cumpre os limites de emissão e se possui uma eficiência atingível por uma caldeira a biomassa.

5.1. Caldeira

Os ensaios de combustão dos péletes foram realizados numa caldeira a gásóleo (Figura 8) existente nas instalações do INEGI, mais propriamente no Laboratório de Combustão, sendo que esta foi adaptada para a queima de péletes.

Esta caldeira é constituída por diferentes módulos, os quais se passam a citar:

- Sistema de alimentação;
- Queimador;
- Câmara de combustão;
- Controlador da caldeira;

De seguida será apresentado cada um destes elementos de uma forma pormenorizada.



Figura 8 Caldeira utilizada para a queima dos péletes

5.1.1. Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação da caldeira era constituído por um pequeno reservatório de péletes e por um parafuso sem-fim acionado por um motor eléctrico a ele acoplado. O parafuso sem-fim, encontrava-se envolvido por uma tubagem, e possuía 720 mm de diâmetro e 1 360 mm de comprimento. Devido a problemas observados durante a sua montagem (encravamento e/ou entupimento) este foi montado na horizontal, conforme se observa na Figura 9.

O funcionamento do motor eléctrico acionava o movimento do parafuso sem-fim, que fazia o transporte dos péletes desde o reservatório até ao queimador da caldeira. Este movimento era controlado pelo sistema de controlo. O débito médio do alimentador em funcionamento contínuo era de $24,44 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, correspondendo a uma potência térmica de aproximadamente 118,80 kW (se alimentado por péletes 100SP).



Figura 9 Reservatório de péletes e sistema de alimentação (parafuso sem-fim)

5.1.2. Queimador

O queimador da caldeira é horizontal, sendo constituído por uma grelha fixa e um ventilador que fornecia o ar necessário à combustão dos péletes (Figura 10). Na parte superior do queimador existia uma abertura pela qual eram alimentados os péletes.



Figura 10 Representação do queimador. A-fornalha; B-grelha fixa; C-fornalha com grelha instalada; D-vista exterior do queimador

5.1.3. Câmara de Combustão

A câmara de combustão, tinha uma geometria cilíndrica, sendo construída em aço e revestida por um isolamento térmico, de forma a minimizar as perdas térmicas para o exterior. Dentro desse corpo cilíndrico existia um outro cilindro, concêntrico a este, de menores dimensões (fornalha), onde se dava o desenvolvimento da combustão propriamente dita.

Os gases de combustão produzidos embatiam na parte posterior deste cilindro, sendo obrigados a inverter o seu escoamento, reentrando nos tubos de fumo instalados à volta do cilindro interior. Esta caldeira específica contava com 14 tubos de fumos, dispostos axialmente na caldeira, com um diâmetro de 41,5 mm e um comprimento de 420 mm (Figura 11).



Figura 11 Câmara de combustão e tubos de fumo na caldeira utilizada na instalação.

Em cada um dos tubos de fumo existia um turbulador helicoidal, instalado longitudinalmente, tendo como função aumentar a turbulência dos gases e maximizar a transferência de calor entre os gases de combustão e o fluido de aquecimento. Esta estrutura

auxilia a criação de um regime turbulento nos gases de combustão, potenciando os coeficientes de transferência de calor desta corrente, nomeadamente o seu coeficiente de convecção, e conseqüentemente, promove um aquecimento mais célere. Adicionalmente também tem como função a limpeza de incrustações que possam existir no interior dos tubos (Figura 12).



Figura 12 Turbuladores existentes na caldeira: a) Zona de encaixe; b) Turbulador

Os gases de combustão, após passarem por estes tubos de fumo, serão encaminhados até um coletor. Neste coletor existe uma conduta de 186 mm de diâmetro que encaminha os gases para o exterior (Sistema de Exaustão).

No espaço intersticial entre o cilindro exterior e os tubos de fumo e a fornalha encontra-se a água que irá ser aquecida pelos gases de combustão.

Durante a realização deste trabalho não foi possível determinar a volumetria da caldeira, bem como outras características estruturais, tais como pressão e temperatura máxima de serviço.

5.1.4. Controlador Eletrônico da Caldeira

O controlador da caldeira, da marca Naturela, modelo NPBC V3M-1, é eletrônico e o seu objetivo principal é automatizar e otimizar o desempenho da caldeira, assegurando as condições de segurança que esta dispõe. Certos parâmetros do controlador podem ser alterados pelo utilizador com auxílio ao comando eletrônico (Figura 13).



Figura 13 Comando e controlador elétrico da caldeira

A caldeira pode funcionar em dois modos distintos: manual ou automático. O controlador permite definir programas (diários) para automatizar a operação do sistema. Com esta função pode-se programar o início e o fim da operação, bem como a temperatura máxima atingida.

A velocidade do ventilador e o caudal de péletes também podem ser controlados pelo utilizador, dependendo do nível de potência desejado. A maioria dos parâmetros já vêm programados de fábrica. Existem 3 níveis de potência de funcionamento, também já programados, que o utilizador pode, porém, manipular, dependendo da potência pretendida.

Neste trabalho foi utilizado o nível 3 da queima, selecionado no controlador, pois é neste nível que se considera que a queima estabiliza e se realiza a um nível constante. A configuração usada para este mesmo nível foi de 3 segundos para operação do parafuso sem-fim num ciclo de 30 segundos, em que o ventilador funciona a 60% da sua potência máxima. Com esta configuração obteve-se uma potência fornecida de 13,2 kW (referente aos péletes de serrim, 100SP).

5.2. Emissões Gasosas e Eficiência da Caldeira

5.2.1. Avaliação da Eficiência de Queima

A eficiência de uma caldeira é um dos parâmetros mais importantes para o utilizador, já que se pretende que a caldeira opere a uma elevada potência, mas com consumos de combustível mínimos – ou seja, procura-se uma maior eficiência, para o aquecimento desejado. Todavia, ainda que a eficiência energética deva ser máxima, importa tomar atenção às emissões de gases poluentes (como CO₂ e CO), pois só desta forma se conseguem conciliar importantes benefícios económicos e ambientais.

A eficiência da combustão é um parâmetro interessante para a avaliação do comportamento da caldeira na queima de diferentes combustíveis. O rendimento térmico da combustão, η , pode ser definido através da razão entre o calor transferido para a água e a potência térmica fornecida pelo combustível (equação 7).

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{fornecida}}} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

O cálculo da potência útil, que corresponde ao calor efetivamente transferido para a água, é obtido através da equação 10:

$$P_{\text{útil}} = \dot{m}_{\text{água}} \times cp \times \Delta T \quad (kW) \quad (8)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{água}}$, Caudal mássico de água (kg·s⁻¹);

cp , Calor específico da água (kJ·kg⁻¹·K⁻¹) = 4,22 kJ·kg⁻¹·K⁻¹;

ΔT , Diferença de temperaturas entre a saída e entrada da água na caldeira (K).

O caudal mássico de água usado nos ensaios de queima da caldeira, variou entre 6 e 7 kg·min⁻¹, o que corresponde a caudais mássicos de 360 a 420 kg·h⁻¹. A variação de temperatura é obtida pela diferença entre a temperatura da água que sai da caldeira (quente) e a temperatura da água de entrada, que vem da rede.

O caudal mássico de combustível (\dot{m}_{comb}) consumido pela caldeira é dado pela razão entre a quantidade de massa de péletes consumidos e a duração do ensaio de queima, conforme a equação 9:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{m (kg)}{\Delta t (s)} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (9)$$

Com o caudal mássico de combustível fornecido à caldeira, é possível determinar a potência fornecida ($P_{fornecida}$), conforme a equação 10:

$$P_{fornecida} = \dot{m}_{comb} \times PCI \quad (\text{kW}) \quad (10)$$

5.2.2. Controlo de Emissões Gasosas

A medição das emissões gasosas foi efetuada com analisadores de gases, da marca Signal Instruments, modelo ADC MGA-3000 e Servomex model 570 A (Figura 14), que se encontram permanentemente ligados à caldeira através de uma sonda. Estes analisadores de gases, medem as concentrações de CO, CO₂ e O₂ presentes nos gases de exaustão da caldeira.



Figura 14 Analisadores utilizados para controlo das emissões gasosas

Estes aparelhos apresentam um monitor para cada gás analisado, permitindo visualizar, em tempo real, os valores de emissão correspondentes. A concentração de CO é expressa em partes por milhão (ppm) enquanto a de CO₂ é obtida em percentagem. Todos estes equipamentos encontravam-se ligados a um sistema de aquisição de dados, com o qual se fazia o registo das diferentes concentrações num computador.

Antes de se iniciar a combustão é necessário verificar se os aparelhos se encontram calibrados para garantir leituras fiáveis. No caso de estes apresentarem um desfasamento (ou seja, caso se encontrem descalibrados) é necessário proceder à sua calibração. Estes equipamentos específicos encontravam-se calibrados quando obtidos valores de 2 500 ppm de CO e 13% de CO₂ (de acordo com a sua concentração em garrafas de gás utilizadas para calibração). Quando se dá por terminado o ensaio em questão, os dados que foram recolhidos

pelo sistema de aquisição de dados são guardados em formato *MS Excel*, registrando os valores de CO e de CO₂, obtidos ao longo do ensaio de combustão, a uma taxa de aquisição de 1 Hz (1 ponto por segundo).

5.3. Equipamentos Utilizados nos Ensaio

5.3.1. Sistema Hidráulico

O sistema hidráulico é composto por uma tubagem que conecta água da rede à caldeira. Nesta tubagem estão instalados um conjunto de instrumentos de medida, nomeadamente termopares e um caudalímetro, o que permite a leitura de temperaturas de entrada e saída da caldeira e do caudal do fluido de aquecimento. Adicionalmente, existe uma válvula de regulação, colocada a montante do caudalímetro, que possibilita a regulação do caudal de alimentação de água à caldeira.

O caudalímetro usado é da marca Omega, modelo FPR 304 Low-Flow Meter e, como referido, é aplicado para medição do caudal de água, tendo sido previamente calibrado, tal como indicado no Anexo D.

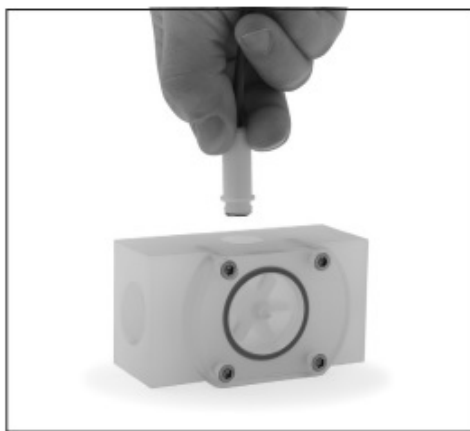


Figura 15 Caudalímetro utilizado nos ensaios

5.3.2. Balança

Para avaliar o consumo de péletes, foi necessário recorrer a uma balança, de modo a monitorizar os caudais mássicos de péletes alimentados à caldeira durante os ensaios.

Antes de colocar a caldeira em ignição, o silo de péletes é carregado com uma quantidade de combustível suficiente para a ignição do combustível e arranque do ensaio, sendo a massa total registada manualmente, no decorrer do ensaio, em intervalos de tempo pré-estabelecidos.



Figura 16 Balança utilizada para registo da massa de péletes consumidos pela caldeira

5.3.3. Sistema de Medição/Aquisição de Dados

O sistema de medição e aquisição de dados (Figura 17) consiste num computador equipado com duas placas de aquisição que leem sinais elétricos provenientes dos equipamentos de medida (termopar, caudalímetro e analisadores de gases). Através de um programa (DasyLab – interface gráfica no Anexo E), os sinais lidos são convertidos para os valores das grandezas que se pretendia medir (temperatura de entrada e saída do fluido de aquecimento, temperatura de exaustão, caudal do fluido e emissões gasosas, respetivamente).



Figura 17 Medidores: A – Termopar na chaminé (temperatura de exaustão); B – Termopar na saída da caldeira; C – Placa de aquisição

Durante a realização dos ensaios, este sistema permitia gravar os valores obtidos de cada um desses parâmetros, a uma taxa de aquisição de 1 Hz (1 ponto por segundo).

5.4. Metodologia Experimental

5.4.1. Configuração da Instalação Experimental

A configuração da instalação é, seguidamente, detalhada em cada um dos equipamentos e componentes que a constituem (Figura 18), sendo enumeradas e justificadas as alterações e melhorias e explicado o funcionamento da caldeira.

Configuração da instalação

A instalação experimental utilizada foi montada no Laboratório de Combustão, nas instalações do INEGI, e integra os seguintes componentes:

- Sistema de alimentação (Figura 18,A), composto por um depósito e um parafuso sem-fim (para transporte de péletes entre o depósito e o queimador), colocados sobre uma balança (Figura 18,B);
- Caldeira (Figura 18, C), que inclui o sistema de ignição, o queimador, a câmara de combustão e o permutador de calor;
- Sistema de dissipação de calor (Figura 18,D), formado por um circuito de água da rede que permite a dissipação do calor gerado pela caldeira;
- Sistema de aquisição de dados (Figura 18,E) e de controlo da caldeira, através de um computador;
- Sistema de análise de gases (Figura 18,F) e;
- Sistema de exaustão (Figura 18,G), correspondente a uma conduta de exaustão.

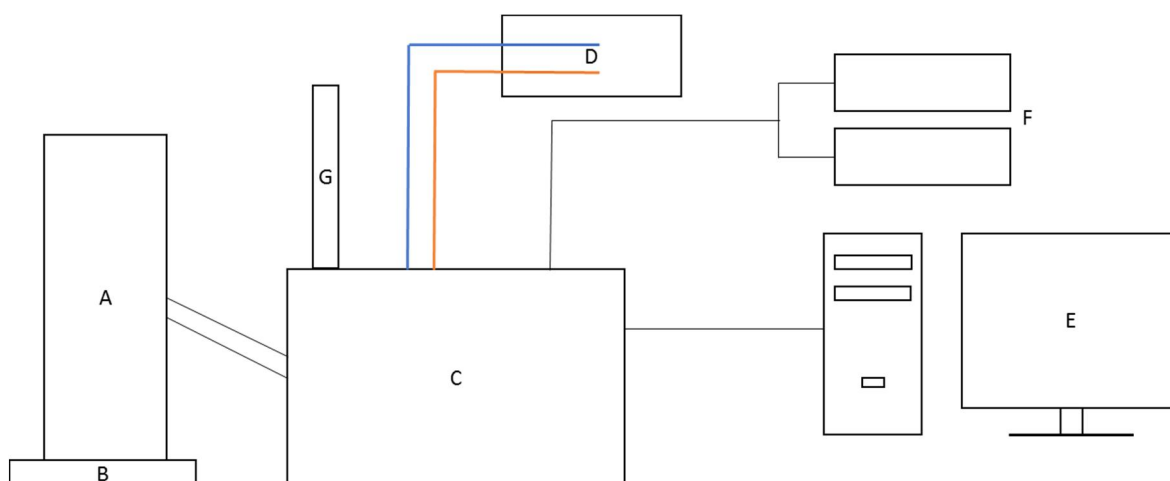


Figura 18 Esquema da instalação do sistema de queima. A- Sistema de alimentação; B- Balança; C- Caldeira; D- Sistema de dissipação de calor; E- Sistema de aquisição de dados; F- Analisadores de gases; G – Sistema de exaustão (chaminé)

5.4.2. Procedimento experimental

Para iniciar o estudo do comportamento da caldeira, e quantificar os parâmetros desejados, começou-se por fixar o caudal de combustível alimentado à caldeira. Este requisito assegura que o ensaio seja realizado a uma potência nominal constante, condição tida como ideal. O procedimento adotado é o descrito nos seguintes passos:

- a) Encher/verificar se o sistema de alimentação tem péletes para alimentar a caldeira e tarar a balança;
- b) Ligar o controlador da caldeira;
- c) Abrir a válvula de água da rede;
- d) Ligar o sistema de alimentação durante um determinado tempo, até que a grelha tenha péletes suficientes para iniciar a ignição;
- e) Passar o programa do controlador para automático e deixar que este atinja o nível 3, que foi pré-estabelecido e ajustado como programa para realização dos ensaios (a velocidade do ventilador de combustão deve ser regulada para 60% da potência máxima e o caudal de alimentação de péletes à caldeira fornecidas pelo parafuso sem-fim com três segundos em andamento e 27 segundos parado);
- f) Verificar se a carga alimentada ao queimador se encontra em ignição;
- g) Iniciar a contabilização do tempo de ensaio e registar a massa inicial de péletes existente no reservatório;
- h) Arrancar o sistema de leitura e registo dos diferentes parâmetros (caudais e temperaturas);
- i) Ligar os analisadores dos gases de combustão;
- j) Registar a massa de péletes existente no reservatório e o respetivo tempo de ensaio;
- k) Repetir este procedimento, até que se ajuste o estado estacionário, isto é, quando a temperatura de exaustão esteja sensivelmente constante;
- l) Desligar o sistema de aquisição de dados;
- m) Desligar o sistema de alimentação e deixar o ventilador e o sistema de água da rede em funcionamento, para que haja uma maior e mais rápida dissipação do calor.

5.5. Resultados e Discussão

Os ensaios realizados visaram dois objetivos diferentes: 1) determinar a potência útil da caldeira em utilização (desempenho do equipamento) em função dos diferentes péletes testados e, 2) quantificar as emissões de alguns poluentes libertados para o meio ambiente e averiguar o cumprimento da legislação em vigor, específica para a tipologia de equipamento. Desta forma, procura-se, igualmente, validar a possibilidade de recorrer a uma caldeira a gásóleo alterada para queima de péletes.

Para tal, efetuou-se um conjunto de testes laboratoriais que se descrevem neste capítulo, onde se inclui, ainda, as condições de teste e as limitações ao funcionamento do equipamento, bem como, os resultados obtidos e a sua discussão, nomeadamente, no que se refere às emissões gasosas, rendimento e temperatura dos gases de exaustão.

Refira-se ainda que, todos os ensaios em que não foram testados péletes 100SP, foram iniciados com péletes comerciais e apenas após se atingir o estado estacionário foram alimentados péletes das misturas a testar. Este fato deveu-se à limitada disponibilidade de matérias-primas (borra de café, serrim e relva).

5.5.1. Queima de Péletes 100SP

Em primeiro lugar testaram-se péletes comerciais, certificados com a classificação *ENplus A2*, para as quais se apresenta, seguidamente, a análise a dois ensaios laboratoriais.

- 100SP | Ensaio 1

Na Figura 19 é possível observar a evolução da temperatura dos gases de combustão e a potência útil da caldeira, ao longo do tempo de ensaio. Verifica-se um significativo aumento da temperatura dos gases de exaustão até estabilização a uma temperatura da ordem dos 140 °C, acompanhado pelo aumento da potência útil até cerca de 12 kW. Na mesma figura é possível observar que, tanto a temperatura como a potência, têm variações bruscas, em iguais momentos, o que é inerente ao funcionamento do sistema de alimentação da caldeira, nomeadamente à periodicidade de entrada de péletes pré-estabelecida.

Após o minuto 26 do ensaio (Figura 19), a caldeira entra em estado estacionário, considerando-se (para análise) os valores a partir daí recolhidos para avaliação da combustão (essa estabilização foi garantida para todos os ensaios de queima).

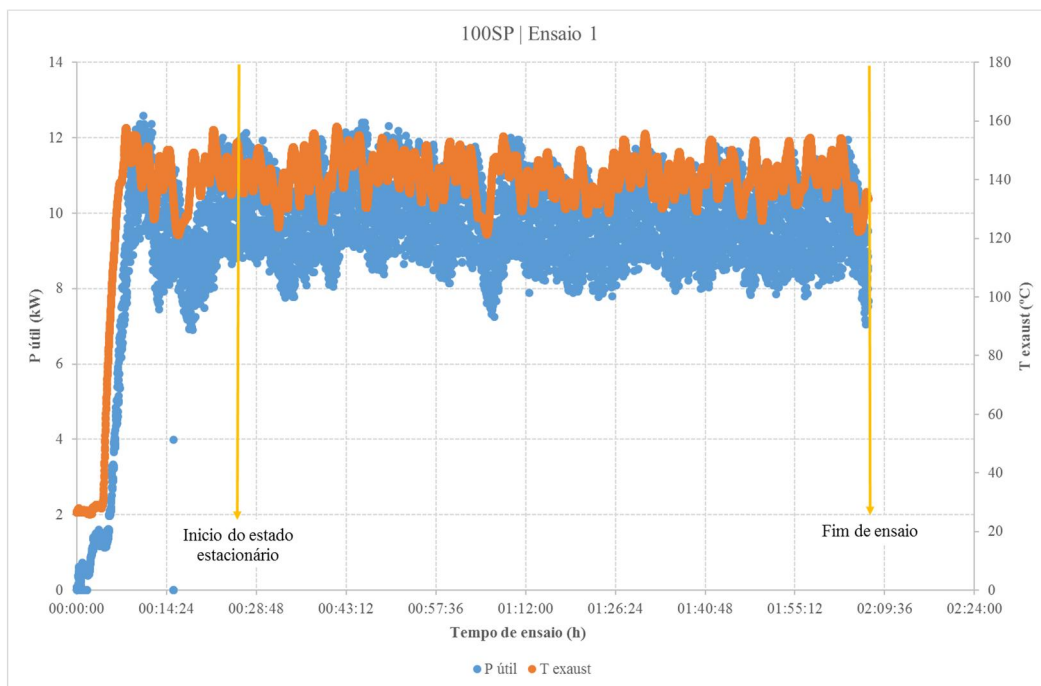


Figura 19 100SP | Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

No que respeita às emissões gasosas, com a Tabela 13 é possível ter uma estimativa dos valores (médios) atingidos em termos do teor de monóxido e dióxido de carbono e de oxigénio^j e compará-los com os valores limite estipulados na norma NP EN 12809:2015^k.

Tabela 13 100SP | Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	100SP Ensaio 1	NP EN 12809
CO (ppm)	2399,1 (= 0,24%)	< 1% ^l
CO₂ (%)	5,3	n.d.
O₂ (%)	15,7	n.d.

De acordo com o valor médio obtido para o teor de monóxido de carbono neste ensaio, verifica-se que, em média, este é significativamente inferior ao limite imposto pela Norma.

^j Os aparelhos de medição, no final de cada ensaio de queima, foram corrigidos os valores dos gases de emissão (Anexo F).

^k NP EN 12 809:2015: Caldeiras domésticas independentes que utilizam combustíveis sólidos com potência térmica nominal inferior ou igual a 50 kW. Requisitos e métodos de ensaio.

^l 1% = 10 000 ppm

Posteriormente à análise dos gases de combustão, pode-se, a partir da potência útil e temperatura dos gases, determinar o rendimento de operação da caldeira com os péletes 100SP^m.

De acordo com a Norma NP EN 12809: 2015, para uma potência nominal de 11,0 kW, a caldeira deverá operar com um rendimento de 73,5%ⁿ. Observando os resultados da Tabela 14 verifica-se que, para este ensaio, a caldeira operou, em média, com uma maior eficiência.

Tabela 14 100SP | Ensaio 1: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	11,06	NP EN 12809
P útil (kW)	9,79	
Rendimento (%)	88,5	73,5

- 100SP | Ensaio 2

Para averiguar a reprodutibilidade do ensaio, em termos de parâmetros analisados, realizou-se um segundo ensaio, que seguiu o mesmo procedimento que o anterior e cujos parâmetros analisados se mantiveram.

Observando a Figura 20, verifica-se que, neste segundo ensaio, a caldeira atingiu o estado estacionário ao fim de, aproximadamente, 30 minutos depois da ignição da caldeira. Durante este ensaio, a média da temperatura dos gases de combustão foi mais elevada, rondando os 168 °C (ou seja, cerca de 26 °C superior à do primeiro ensaio realizado com este tipo de péletes). Como todos os parâmetros internos controláveis foram mantidos iguais, supõe-se que o desvio na temperatura média dos gases de exaustão se deveu a circunstâncias exteriores (em concreto, como não se encontrava instalado qualquer tipo de ventilador de extração de gases de combustão e dado que o ventilador de combustão não possuía potência suficiente para vencer a perda de carga existente a jusante, os gases não eram expelidos da caldeira). Este fato influenciou, principalmente, o tempo de residência dos gases de combustão no interior da caldeira, sempre que as condições ambientais eram adversas, obrigando os gases de combustão a permanecerem por um período mais longo na caldeira, reduzindo a temperatura dos gases de exaustão.

^m Cálculos para determinação do rendimento encontram-se no Anexo F.

ⁿ Ver gráfico Potência térmica nominal vs Rendimento, no Anexo G, extraído da Norma NP EN 12809:2015.

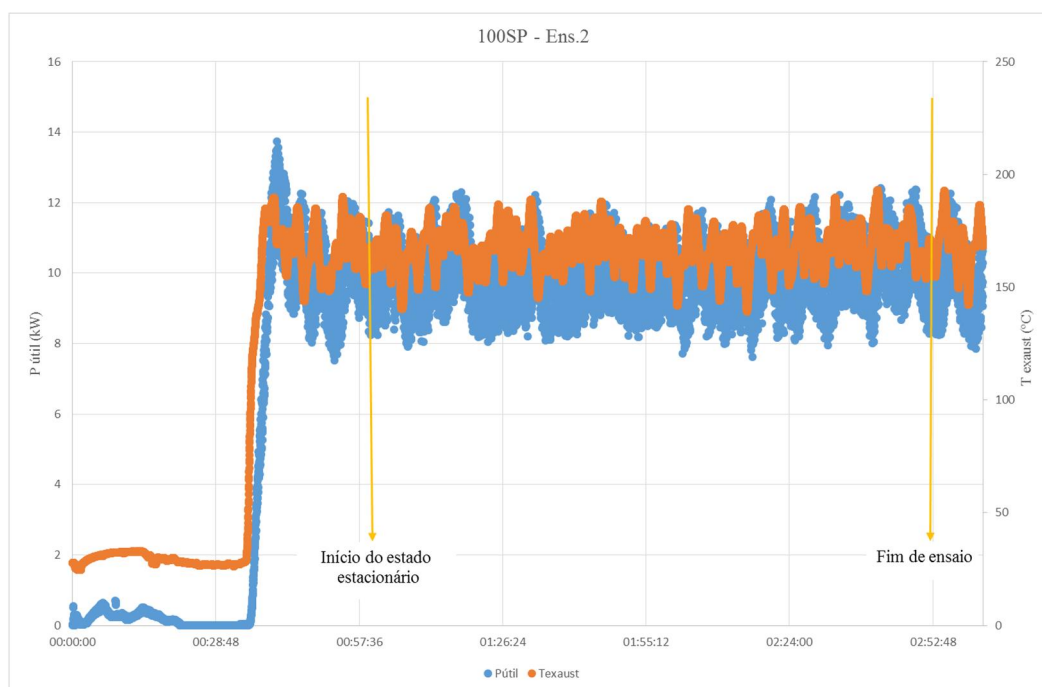


Figura 20 100SP | Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Relativamente aos gases analisados (Tabela 15), os resultados dos dois ensaios são similares^o e, novamente, as emissões de CO não excederam o limite máximo definido pela Norma NP EN 12 809: 2015.

Tabela 15 100SP | Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	100SP Ensaio 2	NP EN 12 809
CO (ppm)	2171,0 (= 0,22 %)	< 1%
CO₂ (%)	4,8	n.d.
O₂ (%)	15,9	n.d.

Neste ensaio, o rendimento da caldeira demonstrou, em média, ser 2,5% inferior, face ao teste anterior (Tabela 14), porém, esta diferença é pouco significativa dada a variabilidade inerente ao combustível e, apesar deste decréscimo, o rendimento foi superior ao mínimo estabelecido pela norma NP EN 12 809.

^o O aparelho de CO₂ neste ensaio evidenciou uma descalibração significativa, todavia, os valores apresentados foram alvo de correção e os cálculos são apresentados no Anexo F.

Tabela 16 100SP | Ensaio 2: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	11,49	NP EN 12809
P útil (kW)	9,88	
Rendimento (%)	86,0	

5.5.2. Queima de Péletes 100BC

Para esta mistura, também foram realizados dois ensaios, tendo-se observado a sua reprodutibilidade. Os ensaios foram realizados em dois dias diferentes, com o propósito de averiguar a possibilidade de os gases de exaustão atingirem a mesma temperatura, mantendo as condições de queima.

- 100BC | Ensaio 1

Observando o gráfico da Figura 21, é possível verificar que, em diversos pontos, existem quebras notórias, tanto a nível da temperatura dos gases de combustão, como da potência útil. Verificou-se, ainda, que sempre que um dos parâmetros diminuía o outro acompanhava essa tendência, e que, em situação inversa o fenómeno se mantinha. Esse fato poderá estar relacionado com o sistema de alimentação (intermitência do processo), bem como com a inexistência de ventilador no sistema de extração instalado, tornando a extração dos gases dependente das condições ambientais externas, o que influenciava diretamente o rendimento da caldeira.

Pela análise do gráfico da Figura 21, é possível saber que, em média, a temperatura dos gases de exaustão rondava os 192 °C, sendo gerada uma potência útil de 10,93 kW. Relativamente aos gases analisados (Tabela 17), as emissões de CO não excederam o limite máximo definido pela norma. Em relação ao CO₂, este teve de ser estimado por cálculo, dado que ocorreu um problema com o analisador que registava o seu valor, durante o período de ensaio (o método de cálculo para a sua determinação encontra-se descrito no Anexo G).

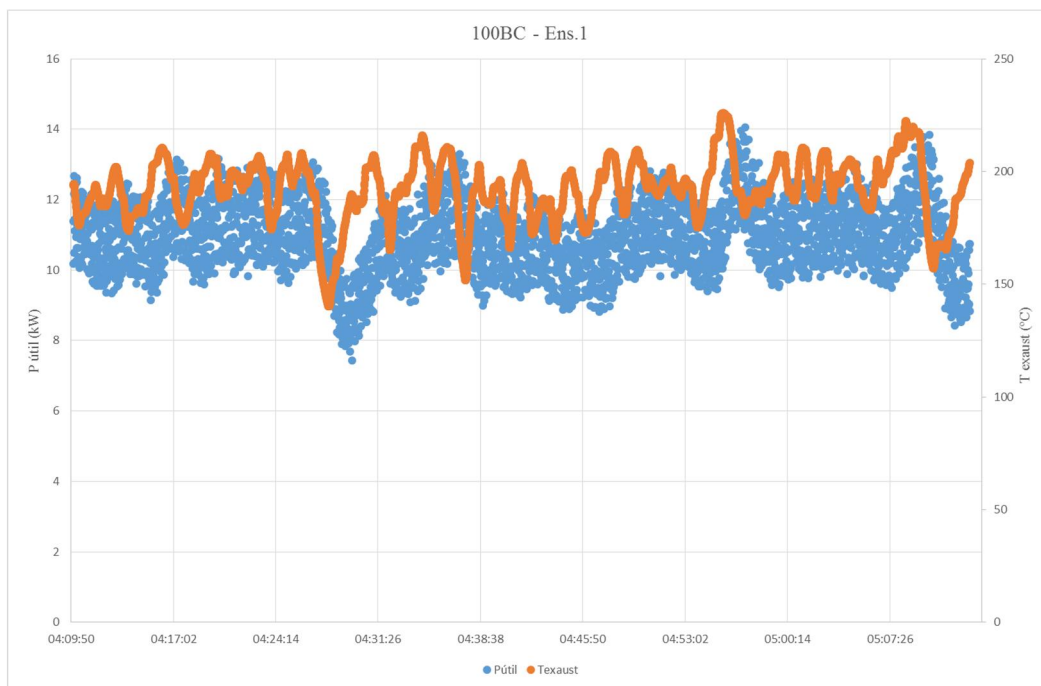


Figura 21 100BC | Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Tabela 17 100BC | Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	100BC Ensaio 1	NP EN 12809
CO (ppm)	7049,5 (= 0,705%)	< 1%
CO ₂ (%)*	4,8	n.d.
O ₂ (%)	15,9	n.d.

* Valor estimado

De acordo com a norma, a caldeira deveria operar com um rendimento mínimo de 73,5% (para a potência nominal). Visto que se obteve um rendimento de 85,6% pode-se dizer que a caldeira se encontrava a operar em melhores condições do que as mínimas exigidas.

Tabela 18 100BC | Ensaio 1: Rendimento da caldeira com péletes 100BC | Ensaio 1

		NP EN 12809
P nominal (kW)	12,77	
P útil (kW)	10,93	
Rendimento (%)	85,6	73,5

- 100BC | Ensaio 2

Com base na Figura 22 é possível concluir que, neste ensaio, a temperatura dos gases de exaustão tem um valor médio de 204,3 °C e a caldeira tem uma potência útil de 10,89 kW, muito idênticas às do ensaio anterior (100BC | Ensaio 1). Com base nos dois gráficos (Figura

21 e Figura 22) pôde-se concluir que se deu uma queima estável para as condições normais aplicadas estando os resultados de acordo com o esperado.

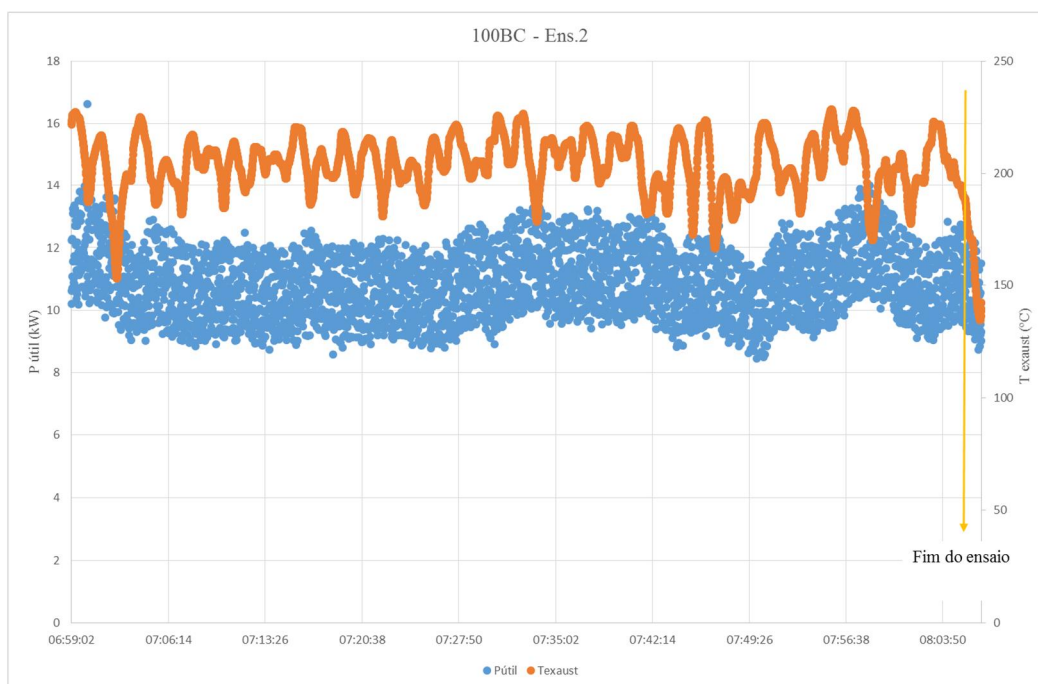


Figura 22 100BC | Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Neste ensaio, relativamente ao anterior, observa-se uma leve discrepância no teor de CO nos gases de exaustão (diferença de 0,2%).

Tabela 19 100BC | Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	100BC Ensaio 2	NP EN 12809
CO (ppm)	9023,1 (= 0,90%)	< 1%
CO ₂ (%)	4,9	n.d.
O ₂ (%)	16,1	n.d.

Em termos de rendimento da caldeira, é possível verificar que em ambos os ensaios são idênticos: para uma potência nominal de 12,79 kW a caldeira deve operar com um rendimento de 73,5%^P. Analisando os resultados da Tabela 18 e Tabela 20 verifica-se que, em ambos os casos, a caldeira operou com uma melhor eficiência, relativamente ao mínimo imposto pela norma.

^P Ver gráfico Potência térmica nominal vs Rendimento, no Anexo G, extraído da Norma NP EN 12809: 2015.

Com este ensaio comprova-se a viabilidade de utilizar péletes de borra de café (100BC) para obtenção de energia térmica visto todos os parâmetros analisados se encontrarem dentro dos limites estabelecidos (quer a nível de emissões, quer a nível de rendimento). Igualmente, no que diz respeito ao teor de cinzas, à análise elementar e ao PCI, os péletes 100BC estão dentro dos limites da norma para certificação de péletes.

Tabela 20 100BC | Ensaio 2: Rendimento da caldeira

		NP EN 12809
P_{nominal} (kW)	12,79	
P_{útil} (kW)	10,89	
Rendimento (%)	85,2	73,5

5.5.3. Queima de Péletes 65BC/35SP

Como referido anteriormente, foram produzidos péletes com mistura de borra de café e serrim de pinho, na proporção 65% e 35% (m/m), com o propósito de minimizar o eventual impacto ambiental decorrente da queima de péletes formadas unicamente por borra de café. Foi utilizada a mesma metodologia que nos ensaios anteriores. Assim, e tal como para as duas tipologias de péletes já analisadas, foram analisados a potência útil atingida, a temperatura dos gases de combustão, os teores de CO, CO₂ e O₂ e, o correspondente rendimento térmico de combustão dos péletes 65BC/35SP.

- 65BC/35SP | Ensaio 1

Uma vez mais, para análise dos resultados de queima, apenas se considerou o intervalo de tempo a partir do qual a potência útil e a temperatura dos gases de exaustão atingiram um valor sensivelmente constante (cerca de 90 min, Figura 23). No que respeita à temperatura dos gases de exaustão, foi atingido um valor médio de 122 °C, e uma potência útil média de 7,26 kW. Em termos de emissões gasosas (

Tabela 21), e conforme esperado face aos resultados obtidos para péletes apenas de borra de café, ao reduzir o seu teor de borra nos péletes, conseguem-se resultados favoráveis, em termos de concentração de monóxido de carbono, isto é atingem-se valores inferiores ao limite imposto pela norma.

Tabela 21 65BC/35SP | Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	65BC/35SP Ensaio 1	NP EN 12809
CO (ppm)	6878,8 (= 0,69%)	< 1%
CO₂ (%)	3,5	n.d.
O₂ (%)	15,8	n.d.

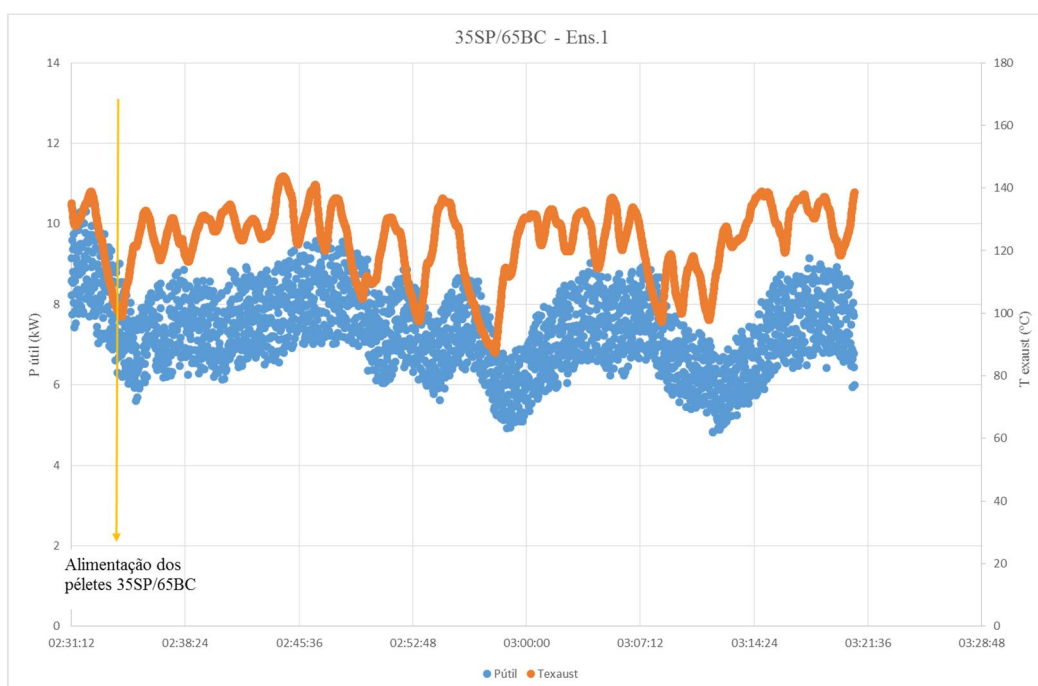


Figura 23 65BC/35SP | Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

O rendimento da caldeira (Tabela 22), quando testada com pèletes de mistura borra de café e serrim de pinho, apresentou um rendimento 1,1% inferior ao exigido pela norma (73,5%).

Tabela 22 65BC/35SP | Ensaio 1: Rendimento da Caldeira

P nominal (kW)	9,99	Norma 12 809
P útil (kW)	7,26	
Rendimento (%)	72,7	73,5

- 65BC/35SP | Ensaio 2

Quanto ao segundo ensaio realizado com esta tipologia de pèletes, atingiu-se, em média, uma temperatura dos gases de exaustão de 156 °C. Em termos de potência útil, esta alcançou os 8,85 kW (em média).

Como esperado face aos resultados do ensaio anterior, as emissões gasosas avaliadas (Tabela 23) são inferiores ao limite máximo imposto pela norma que regulamenta a tipologia de caldeiras e combustíveis em causa. Em termos de rendimento de operação (Tabela 24), a diferença face ao legislado foi, neste ensaio 7% inferior ao imposto.

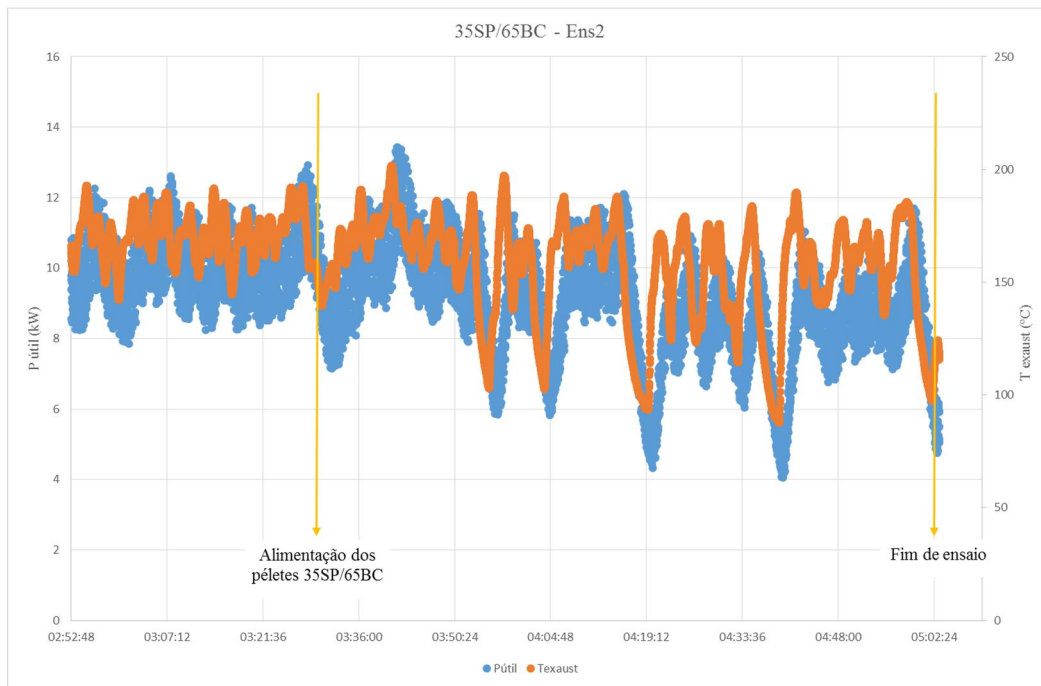


Figura 24 65BC/35SP | Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Tabela 23 65BC/35SP | Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	65BC/35SP Ensaio 1	Norma NP EN 12 809
CO (ppm)	5483,1 (= 0,55%)	< 1%
CO₂ (%)	8,2	n.d.
O₂ (%)	16,1	n.d.

Tabela 24 65BC/35SP | Ensaio 2: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	12,96	NP EN 12809
P útil (kW)	8,85	
Rendimento (%)	68,3	73,5

Nestes ensaios em que foram queimados pèletes 65BC/35SP, foi patente uma maior amplitude na variação da temperatura dos gases de exaustão, do que nos ensaios anteriores.

5.5.4. Queima de Péletes 65SP/35RV

No ensaio realizado com os péletes do tipo 65SP/35RV, verificou-se que, logo após a substituição dos péletes normalizados (100SP) por estes, a caldeira acusou dificuldades na queima, chegando ao ponto de se desligar. Por este facto, interrompeu-se o ensaio e abriu-se a caldeira de forma a averiguar qual a origem do problema. Constatou-se, então, a formação de um aglomerado de escórias (Figura 25) resultantes da fusão das cinzas originadas durante a queima, na zona do queimador, o que levou a caldeira a desligar-se. Deste modo, procedeu-se à sua limpeza para, seguidamente, testar outra mistura com esta matéria-prima.



Figura 25 Escórias formada na queima das péletes 65SP/35RV

Regra geral, as cinzas de biomassa são constituídas por sais alcalinos com baixos pontos de fusão (Madeira, 2011), facto que será tanto mais significativo quanto mais elevado for o teor de cinzas do material. Conjugando esta informação com o teor de cinzas apresentado na caracterização destes péletes (seção 4.3.2), podemos dizer que era expectável que o teor de cinzas produzido durante a queima das péletes 65SP/35RV fosse superior a 3%, o limite máximo estipulado na norma NP EN 14 961-2.

Mediante o sucedido, excluiu-se a realização de um segundo ensaio, já que era de esperar o mesmo resultado, com a conseqüente necessidade de paragem, desmontagem e limpeza da caldeira. Todavia, como solução para este problema (isto é, para evitar que o ensaio seja interrompido) propõe-se recorrer a um ventilador de potência superior, que possibilite o arrastamento das cinzas para a câmara de combustão, sem que estas se aglomerem em

demasia; contudo, esta solução teria como desvantagem a necessidade de aumentar a frequência da remoção de cinzas acumuladas na câmara de combustão.

- 65SP/35RV | Ensaio 1

Seguidamente apresentam-se os resultados do ensaio comentado anteriormente. Conforme se pode observar na Figura 26, cerca de 20 min após o início da alimentação dos péletes a testar, o comportamento da caldeira modificou-se subitamente, verificando-se um súbito decréscimo da potência útil e da temperatura dos gases de exaustão.

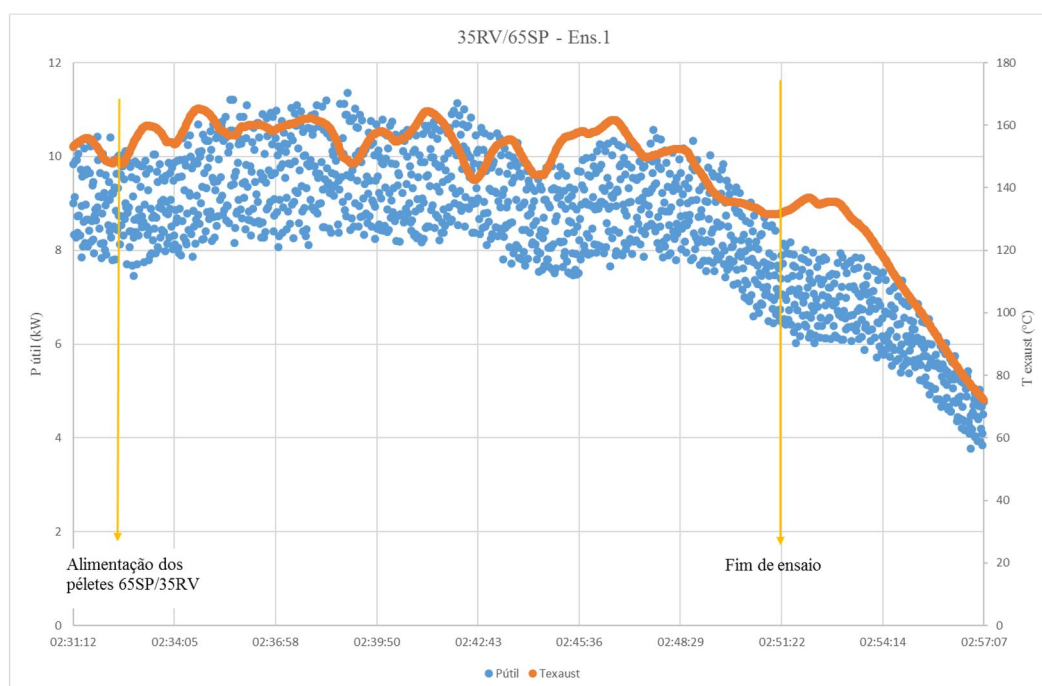


Figura 26 65SP/35RV | Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Apesar do sucedido, em termos de emissões gasosas, e durante o tempo que durou o ensaio, verificou-se que o teor médio de CO era bastante inferior ao imposto pela norma. Da mesma forma, os níveis de CO₂ são muito similares aos obtidos com os péletes comerciais (Tabela 25).

Tabela 25 65SP/35RV | Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	65SP/35RV Ensaio 1	NP EN 12809
CO (ppm)	3201,2 (= 0,32%)	< 1%
CO ₂ (%)	5,5	n.d.
O ₂ (%)	15,2	n.d.

Relativamente ao rendimento (Tabela 26), embora inferior ao atingido com os péletes normalizadas 100SP, em que se obtiveram rendimentos entre 86 e 88% (valores médios,

respetivamente no Ensaio 1 e 2), é superior ao valor indicado pela norma para a potência nominal atingida.

Tabela 26 65SP/35RV | Ensaio 1: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	12,04	NP EN 12809
P útil (kW)	8,94	
Rendimento (%)	74,2	73,5

5.5.5. Queima de Péletes 90SP/10RV

Tal como foi referido anteriormente, de forma a ultrapassar o problema verificado no anterior ensaio (com o péletes 65SP/35RV), reduziu-se a proporção de relva nos péletes para valores próximos dos 10% (90SP/10RV).

- 90SP/10RV | Ensaio 1

Como se pode observar na Figura 27, o ensaio com péletes 90SP/10RV ocorreu a um nível constante e bastante aceitável, durante, aproximadamente, 80 min, sem que nenhuma quebra ou problema fosse observado a nível de emissões ou da deposição de cinzas no queimador. Desta forma, foi possível terminar o ensaio, tendo a temperatura dos gases de exaustão atingido, em média, 188 °C e, em termos de potência útil, sido alcançados 10,88 kW.

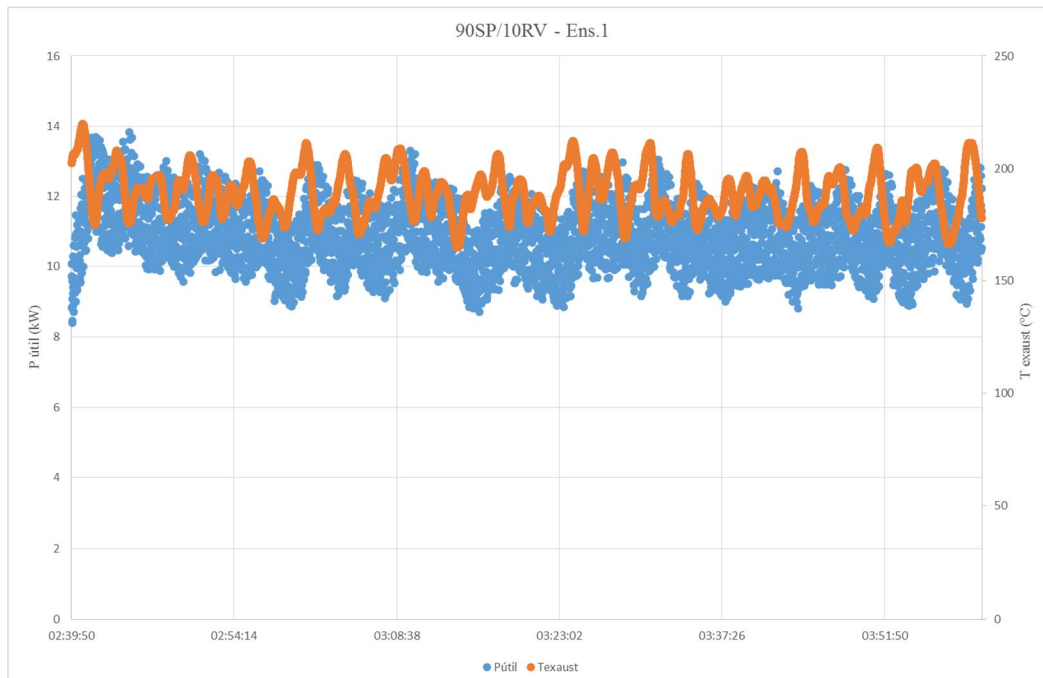


Figura 27 90SP/10RV | Ensaio 1: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Tal como no Ensaio 1 com péletes 100BC, neste ensaio foi igualmente preciso determinar o teor de CO₂ por cálculo (Anexo G). Analisando os dados (Tabela 27), é possível verificar que os valores se encontram de acordo com os obtidos noutros ensaios e, em relação ao valor médio de CO nos gases de combustão este encontra-se dentro da gama imposta pela norma.

Tabela 27 65SP/35RV | Ensaio 1: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	65SP/35RV Ensaio 1	NP EN 12809
CO (ppm)	3112,6 (= 0,31%)	< 1%
CO₂ (%)	5,3	n.d.
O₂ (%)	15,4	n.d.

Em relação ao rendimento obtido para a caldeira com os péletes em estudo, foi possível obter um rendimento acima do mínimo imposto pela norma (73,5%) e igual a 81,2% (Tabela 28).

Tabela 28 90SP/10RV | Ensaio 1: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	13,40	NP EN 12809
P útil (kW)	10,88	
Rendimento (%)	81,2	73,5

- 90SP/10RV | Ensaio 2

O segundo ensaio realizado com os péletes 90SP/10RV foi realizado durante 115 min, com o objetivo de verificar se o problema das cinzas ocorrido no ensaio com os péletes 65SP/35RV persistia. Como é possível observar na Figura 28, o ensaio dá-se a um nível constante, idêntico ao observado durante o ensaio 1. Não se tendo, novamente, detetado quaisquer problemas com o nível de cinzas produzido comprova-se que esta composição poderá ser uma opção válida para produção de péletes com inclusão de relva. Ao nível das temperaturas dos gases de exaustão e da potência útil os resultados obtidos nos 2 ensaios são muito próximos entre si, fixando-se nos valores médios de 196,8 °C e 10,47 kW, respetivamente.

Em termos de emissões gasosas, verificou-se que o teor médio de CO (Tabela 29) foi bastante inferior ao imposto pela norma.

No que diz respeito ao rendimento, obteve-se um valor superior ao indicado pela norma, embora inferior ao atingido com os péletes normalizadas 100SP (87%, Tabela 30).

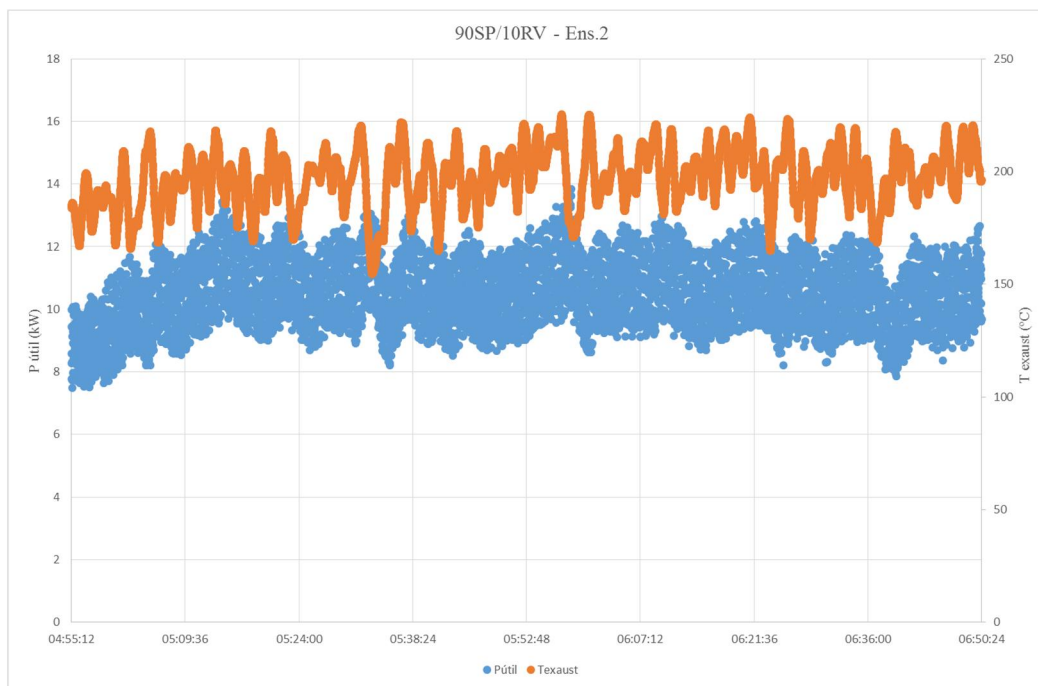


Figura 28 90SP/10RV | Ensaio 2: Potência útil (kW) e temperatura de exaustão (°C) ao longo do tempo de ensaio

Tabela 29 90SP/10RV | Ensaio 2: Emissões gasosas corrigidas

Gases de combustão	90SP/10RV Ensaio 2	NP EN 12809
CO (ppm)	3972,1 (= 0,40%)	< 1%
CO ₂ (%)	4,5	n.d.
O ₂ (%)	16,2	n.d.

Tabela 30 90SP/10RV | Ensaio 2: Rendimento da caldeira

P nominal (kW)	12,82	NP EN 12809
P útil (kW)	10,47	
Rendimento (%)	81,6	73,5

5.5.6. Discussão de Resultados

Em suma, e de uma forma generalizada, os resultados obtidos demonstraram-se promissores no que respeita à utilização e inclusão de resíduos urbanos para a produção de péletes e sua utilização para obtenção de energia térmica, à escala residencial.

Por um lado, comprova-se que caldeiras a gasóleo (ainda bastante utilizadas pelo país, sobretudo em áreas distantes de redes de gás canalizado) podem ser alteradas a fim de utilizar um distinto tipo de combustível, nomeadamente, resíduos biomássicos. Desta solução advêm poupanças económicas para o seu utilizador (face aos elevados preços de mercado

praticados, a nível nacional, para os combustíveis fósseis) além da significativa redução de emissões de gases de efeito de estufa a inerentes ao gasóleo (e restantes combustíveis fósseis).

Adicionalmente, a comprovada possibilidade de recorrer a resíduos abundantes no país, é uma mais-valia em termos ambientais e de recuperação de um potencial energético que, atualmente, é, normalmente, desperdiçado com o seu envio para aterro, conferindo ainda uma minimização do terreno necessário para sua acomodação.

Em concreto no que confere às formas de resíduos testados – serrim de pinho, borra de café e relva – os resultados obtidos são muito interessantes do ponto de vista energético e ambiental (Tabela 31), e diretamente comparáveis com os normalmente atingíveis por caldeiras projetadas para a queima de péletes de madeira:

Tabela 31 Tabela resumo dos ensaios de queima

Parâmetro	Tipos de Péletes			
	100SP	100BC	65BC/35SP	90SP/10RV
P nominal (kW)	11,28	12,78	11,48	13,11
P útil (kW)	9,84	10,91	8,06	10,68
Rendimento (%)	87,2	85,4	70,5	81,4
CO (%)	0,2	0,8	0,6	0,3
CO₂ (%)	5,0	4,9	5,8	4,9
O₂ (%)	15,8	16,0	15,9	15,8

Ainda que não diretamente comparáveis dadas as múltiplas diferenças entre as condições de teste e, inclusive, dos próprios equipamentos utilizados, pode-se referir que os resultados estão em concordância com os de estudos anteriores.

A título de exemplo refere-se que, no estudo de Limousy *et al.* (2013), os autores demonstraram que a eficiência de combustão com péletes de pinho (90,80%) é superior à alcançada com péletes de borra de café (86,30%), da mesma forma que o obtido neste estudo. Por sua vez, as emissões de CO apresentadas pela referida equipa são, igualmente, superiores no caso dos péletes de borra de café, verificando-se, contudo, uma diferença menos acentuada (0,01% para serrim de pinho e 0,17% para borra de café); por sua vez, Kraiem *et al.* (2016), demonstram que (e da mesma forma que neste estudo) o nível de emissões de CO diminui com a redução do teor de borra de café nos péletes (0,31% para 100% borra de café e 0,06% para mistura serrim de pinho com borra de café).

No que concerne à relva, não foram encontrados, na literatura, estudos referentes às espécies aqui consideradas nem tão pouco a resultados relativos à eficiência da queima ou das emissões gasosas provenientes. Por esta razão, não se tecem quaisquer comentários comparativos. Salienta-se, contudo que, dada a abundância deste tipo de resíduo (uma vez superados os problemas decorrentes da formação de elevados níveis de cinzas e de escórias ou inclusive, da corrosão de materiais) e face aos rendimentos atingidos e reduzidos teores de emissões, a produção e utilização de péletes com relva poderá ser um tema de estudo a aprofundar.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Este trabalho teve como principais objetivos, o estudo do comportamento, do ponto de vista energético, de uma caldeira a gásóleo em que o queimador foi substituído por um queimador a péletes, alimentada com péletes de misturas de biomassa proveniente de resíduos urbanos.

A realização deste trabalho permitiu avaliar o potencial da valorização energética de resíduos biomássicos, utilizando a referida caldeira. Apresentam-se de seguida as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

Neste trabalho selecionaram-se as matérias-primas a testar (serrim de pinho, borra de café e relva), tomando em consideração a sua disponibilidade e valor comercial, tendo em vista a possibilidade de valorização e proporcionar um destino mais adequado do que a simples deposição em aterro.

Recorrendo a uma peletizadora, produziram-se péletes de 4 tipos: 100% borra de café (100BC); 65% borra de café com 35% serrim de pinho (65BC/35SP); 65% serrim de pinho com 35% relva (65SP/35RV) e; 90% serrim de pinho com 10% de relva (90SP/10RV). Com

o propósito de obter péletes mais consistentes, em termos mecânicos, foi adicionado óleo vegetal a todas as misturas na proporção 10% óleo : 90% biomassa (% m/m).

Os ensaios de queima realizados seguiram a norma NP EN 12809:2015, destinada à certificação de equipamentos para aquecimento de água recorrendo a combustíveis sólidos, com uma potência de até 50 kW.

Apesar de ter sido possível peletizar todas as misturas definidas, salienta-se que o ensaio de queima com a mistura 65SP/35RV ficou inviabilizado pela elevada geração de cinzas e sua fusão (escórias), depositadas na zona do queimador, concluindo-se assim pela inadequação desta composição para a formulação de péletes para queima em caldeira deste tipo.

Dada a sua distinta composição, e conforme se verificou, os rendimentos da caldeira alimentada pelos diferentes tipos de péletes apresentaram diferenças entre si, cumprindo, de uma maneira geral, os valores impostos pela norma NP EN12809: 2015. Os péletes que permitiram uma maior eficiência da caldeira (média dos dois ensaios) foram os de 100SP (87,2%), seguidos pelos 100BC (85,4%), 90SP/10RV (81,4%) e, por último, os 65BC/35SP (70,5%) que, inclusive, ficam 3% abaixo do mínimo imposto pela norma (ou seja, não cumpre com o requisito rendimento mínimo).

Em relação às emissões dos gases de combustão (avaliadas em estado estacionário), pode-se concluir que todos os ensaios se encontram dentro do limite imposto pela norma NP EN 12809:2015, sendo que os péletes que contêm serrim são os que originam uma menor percentagem de CO (em ordem crescente do maior teor de serrim para o menor), observando-se uma diferença significativa (aumento de 71,6%) entre as péletes de 100SP e 100BC. Para se alcançar uma redução deste parâmetro, um conjunto de testes adicionais teriam de ser realizados mas recorrendo-se à manipulação do teor de comburente (ar) alimentado à combustão (relembra-se que, neste trabalho, as condições foram mantidas constantes para os ensaios e definidas pela programa selecionado para operação da caldeira).

Em suma:

- Existe de facto, um interesse na produção das misturas testadas, a fim de aproveitar o elevado potencial energético inerente e de minimizar o envio de resíduos para aterro;
- Dada a sua composição e estrutura química, as matérias-primas selecionadas (serrim de pinho, borra de café e relva) são peletizáveis, sendo, contudo necessário adicionar um ligante (no caso, óleo vegetal, que poderá também ser residual);

- A caldeira testada cumpre com o regulamento, no que respeita às emissões e eficiência, quando nela são utilizados péletes de resíduos biomássicos;
- Os péletes multimaterial poderão constituir um produto com interesse para aplicação em equipamentos de aquecimento à escala residencial.

6.2. Trabalhos Futuros

A elaboração desta dissertação permitiu retirar um conjunto de conclusões, contudo, também possibilitou a identificação de aspetos que importa analisar e melhorar em trabalhos futuros.

Em relação às matérias-primas escolhidas, sugere-se a realização de idêntico estudo, mas recorrendo a outras proporções (por exemplo, 50BC/50SP ou 90BC/10RV) de forma a averiguar o efeito da alteração da composição nas emissões gasosas e na eficiência térmica da caldeira. De igual modo, poderia contabilizar-se o efeito da adição de novos componentes, tais como retardantes de chama, avaliando a durabilidade do processo de combustão, ou de outros ligantes. Por outro lado, poder-se-ia estudar, de forma mais pormenorizada, o potencial da utilização de misturas dos resíduos aqui selecionados com outros, como resíduos florestais ou espécies arbustivas, peletizando-os e avaliando-os, do ponto vista térmico e das emissões gasosas.

Em termos de produção de péletes, poderá ter interesse para desenvolvimentos futuros, a inclusão um sistema de preparação da matéria-prima, mais especificamente, a inclusão de um sistema de homogeneização da mistura ou mesmo, a automatização da alimentação das misturas à peletizadora, que possibilite a introdução, controlada da quantidade de matéria-prima pois isto proporcionaria melhorias na qualidade dos péletes produzidos bem como uma maior velocidade de produção.

Relativamente ao sistema de queima utilizado, sugere-se a inclusão de um ventilador adicional, de forma a auxiliar a remoção dos gases de combustão do interior da caldeira, com o intuito de assegurar uma combustão mais controlada e eficiente. Paralelamente, a aquisição de um equipamento que contabilize o material particulado originado pelo processo de queima dos diferentes péletes utilizados, seria uma mais-valia para estes estudos dada a relevância e impacto que este parâmetro tem na saúde humana e animal e no ambiente (ainda que não seja estipulado um valor limite na norma).

A realização dos ensaios de combustão numa caldeira especificamente projetada para queima de péletes, seria, igualmente, um estudo a desenvolver, a fim de aferir uma queima mais controlada e eficiente e comparar o funcionamento geral dessa caldeira com a aqui testada.

Referências Bibliográficas

APA (2013). Agência Portuguesa do Ambiente. *Resíduos Urbanos. Relatório Anual 2012*. Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. Departamento de Resíduos. 42 pp. (acedido em agosto 2016 em <http://apambiente.pt/index.php>).

APA (2015). Agência Portuguesa do Ambiente. *Resíduos Urbanos. Relatório Anual 2014*. Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. Departamento de Resíduos. 42 pp. (acedido em julho 2016 em <http://apambiente.pt/index.php>).

Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A. & Mussatto, S. I. (2014). *Chemical, Functional and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin*. Food Bioprocess Technology 7: 3493-3503.

Barbanera, M., Lascaro, E., Stanzone, V., Esposito, A., Altieri, R. & Bufacchi, M. (2016). *Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree pruning*. Renewable Energy 88: 185-191.

Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Segunda edição Academic Press, Boston.

Carroll, J.P. & Finnan, J. (2012). *Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws*. Biosystems Engineering 112(2): 151-159.

CE (2014). *Revista Ambiente para os Europeus*. Comissão Europeia. (Consultado em abril de 2016 em http://ec.europa.eu/environment/news/efe/articles/2014/08/article_20140805_01_pt.htm).

Ciesielczuk, T., Karwaczynska, U., Sporek, M. (2015). *The possibility of disposing of spent coffee ground with energy recycling*. Journal of Ecological Engineering 16(4): 133-138.

COM (2011) 571 final, *Roadmap to a Resource Efficient Europe*: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European Commission, Brussels, 20.9.2011.

Davis, C., Cook, A., Agnew, C., Gammie, J., Anderson, K., Brooks, C., McKinstry, M. & Rainville, R. (2011). *Technical Assessment of Grass Pellets as Boiler Fuel in Vermont. Final Report*. A Report by the Vermont Grass Energy Partnership. BEREC, Montpelier.

Evanick, S. & Bura, R., 2011. *The effect of biomass moisture content on bioethanol yields from steam pretreated switchgrass and sugarcane bagass*. Bioresource Technology, 102(3): 2651-2658.

Garcia-Maraver, A., Zamorano, M., Fernandes, U., Rabaçal, M. & Costa, M. (2014). *Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler*. Fuel 119: 141-152.

GEMCO (2016) Energy Machinery Co., Ltd (consultado em abril 2016 em <http://www.pelletmillsolution.com/biomass-materials/Grass-Pellet-Production-Plant.html>).

- Gil, M.V., Oulego, P., Casal, M.D., Pevida, C., Pis, J.J. & Rubiera, F. (2010). *Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends*. *Bioresource Technology* 101(22): 8859-8867.
- Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V. & Swithenbank, J. (2009). *Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops*. *Fuel* 88(8): 1491-1497.
- Jeguirim, M., Limousy, L. & Dutournie, P. (2014). *Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass*. *Chemical Engineering Research and Design* 92(10): 1876-1882.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R. & Miles, T.R. (1998). *Combustion properties of biomass*. *Fuel Processing Technology* 54(1-3): 17-46.
- Jong W., Pirone A. & Wójtowicz M. A. (2003). *Pyrolysis of Miscanthus Giganteus and wood pellets: TG-FTIR analysis and reaction kinetics*. *Fuel* 82: 1139-1147.
- Kim, S., Kramer, R. W. & Hatcher, P. G. (2003). *Graphical Method for Analysis of Ultrahigh – Resolution Broadband Man Spectra of Natural Organix Malter, the Van Krevelen Diagram*. *Analytical Chemistry* 75(20): 5336-5344.
- Kong, L., Xiong, Y., Tiau, S., Li, Z., Liu, T. & Luo, R. (2013). *Intertwining action of additional fiber in preparation of waste sawdust for biofuel pellets*. *Biomass and Bioenergy* 59: 151-157.
- Kraiem N., Lajili M., Limousy L., Said R. & Jeguirim M. (2016). *Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc*. *Energy* 107: 409-418.
- Kraiem, N., Lajili, M., Limousy, L., Said, R., Jeguirim, M. (2016). *Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc*. *Energy* 107: 409-418.
- Lehtikangas, P. (2001). *Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark*. *Biomass and Bioenergy* 20(5): 351-360.
- Li, X., Strezov, V. & Kan, T. (2014). *Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 110: 79-87.
- Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié P., Kraiem, N., Lajili, M. & Said, R. (2013). *Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets*. *Fuel* 107: 323-329.
- Limousy, L., Jeguirim, M., Labbe, S., Balay, F. & Fossard, E. (2015). *Performance and emissions characteristics of compressed spent coffee ground/wood chip logs in a residential stove*. *Energy for Sustainable Development* 28: 52-59.
- Liu, Z., Quek, A. & Balasubramanian, R. (2014). *Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their hydrochars*. *Applied Energy* 113: 1315-1322.

- Madeira, J.P.R. (2011). *Formação e Emissão de Partículas numa Caldeira Doméstica Alimentada a Pellets*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre e Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Mani, S., Tabil, L.G. & Sokhansanj, S. (2006). *Effects of compressive force, size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*. Biomass and Bioenergy 30(7): 648-654.
- Masnadi, M. S., Grace, J. R., Bi, X. T., Lim, C. J., Ellis, N., Li, Y. H. & Watkinson, A. P. (2015). *From coal towards renewables: Catalytic/synergistic effects during steam co-gasification of switchgrass and coal in a pilot-scale bubbling fluidized bed*. Renewable Energy 83: 918-930.
- McKendry, P. (2002). *Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies*. Bioresource Technology 83(1): 47-54.
- Mendes, C. (2011). *Normas e Qualidade dos Biocombustíveis Sólidos*. Workshop “Biocombustíveis Sólidos – Produção, Qualidade e Utilização no Mercado de Calor, Centro de Biomassa para a Energia. 10 de março de 2011.
- Mehta, P.S. & Anand K. (2009). *Estimation of a Lower Heating Value of Vegetable Oil and Biodiesel Fuel*. Energy & Fuels 23(8): 3893-3898.
- Nunes, L.J.R., Matias, J.C.O. & Catalão, J.P.S. (2013). *Energy recovery from cork industrial waste: Production and characterization of cork pellets*. Fuel 113: 24-30.
- Oliveira, C.M. (2015). *Biomassa Briquete Woodpellets*. Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. Brasil.
- PERSU (2014). *PERSU 2020, Plano estratégico para os Resíduos Urbanos*. Versão de trabalho prévia à consulta pública e à Avaliação Ambiental Estratégica. Proposta de Plano – Auscultação das entidades envolvidas.
- Rabaçal, M., Fernandes, U. & Costa, M. (2013). *Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones*. Renewable Energy 51: 220-226.
- Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates E N., Sharifi V. N. & Swithenbank J. (2006). *Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size*. Fuel 85: 1039-1046.
- Silva, M.A., Nebra, S.A., Silva, M.J.M. & Sanchez, C.G. (1998). *The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry*. Biomass and Bioenergy 14(5/6): 457-467.
- Singh, R.N. (2004) *Equilibrium moisture content of biomass briquettes*. Biomass and Bioenergy 26(3): 251-253.
- Skreiberg A., Skreiberg Ø., Sandquist J. & SØrum L. (2011). *TGA and macro-TGA characterisation of biomass fuels and fuel mixtures*. Fuel 90: 2182-2197.
- Telmo, C. & Lousada, J. (2011). *Heating values of wood pellets from different species*. Biomass and Bioenergy 35(7): 2634-2639.
- Tsai, W. T. & Liu, S. C. (2013). *Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 102: 47-52.

- Wang, Y., Shao, Y., Maticic, D. M., Whalen, J. K. (2014). *Recycling of switchgrass combustion ash in cement: Characteristics and pozzolanic activity with chemical accelerators*. Construction and Building Materials 73: 472-478.
- Yang, Z., Sarkar, M., Kumar, A., Tumuluru, J., S., Huhnke, R., L. (2014). *Effects of torrefaction and densification on switchgrass pyrolysis products*. Bioresource Technology 174: 266-273.
- Zhang, Y., Zhang, Z., Zhu, M., Cheng, F. & Zhang, D. (2016). *Interactions of coal gauge and pine sawdust during combustion of their blends studied using differential thermogravimetric analysis*. Bioresource Technology 214: 396-403.
- Zuorro, A. & Lavecchia, R. (2012). *Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy*. Journal of Cleaner Production 34: 49-56.

Normas e Legislação

DL 239/97, Decreto-Lei n.º 239/97 de 9 de setembro, Diário da República n.º 208, 1ª série, Ministério do Ambiente.

DL 117/2010, Decreto-lei n.º 117/2010 de 25 de outubro, Diário da República n.º 207, 1ª série, Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento.

DL 73/11, Decreto-lei n.º 73/2011 de 17 de junho, Diário da República n.º 116, 1ª série, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.

Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 abril 2009. Promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Jornal Oficial da União Europeia de 5.6.2009. pp. L 140/16-L 140/62.

EN 14961-1: 2010. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Requisitos gerais.

EN 14961-2: 2011. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes de madeira para uso não industrial.

EN 14961-6: 2012. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes não lenhosas para uso não industrial.

EN 17225-6: 2014. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classes de combustível. Péletes classificadas não lenhosas.

NP EN 12809: 2015. Caldeiras domésticas independentes que utilizam combustíveis sólidos e/ potência térmica nominal inferior ou igual a 50 kW. Requisitos e métodos de ensaio.

Anexo A Determinação do Teor de Humidade em Péletes

A determinação do teor de humidade de uma amostra sólida é feita com base no método gravimétrico. O procedimento analítico pode ser realizado da forma convencional, usando uma balança analítica, uma estufa e um exsiccador, ou usando uma balança de humidades.

A.1. Procedimento Convencional de Determinação do Teor de Humidade

Neste procedimento deve-se:

- a) Pesar o gobelé (limpo e seco) vazio na balança (m_1);
- b) Colocar a amostra no gobelé;
- c) Pesar o gobelé com a amostra (antes de submetida a secagem) (m_2);
- d) Colocar o gobelé com a amostra na estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C;
- e) Retirar o gobelé com a amostra seca da estufa e aguardar o seu arrefecimento num exsiccador;
- f) Pesar o gobelé com a amostra seca (m_3);
- g) Repetir etapas d) a f) até peso constante.

O teor de humidade é determinado pela relação entre a massa de água evaporada e a massa da amostra original, de acordo com a equação (A.1):

$$H = \frac{m_{ag,ev}}{m_{am}} = \frac{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_1)}{m_2 - m_1} \times 100 \text{ [%]} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

H, Humidade (%);

m_1 , Massa do gobelé vazio (g);

m_2 , Massa do gobelé com a amostra húmida (g);

m_3 , Massa do gobelé com a amostra seca (g);

$m_{ag,ev}$, Massa de água evaporada (g);

m_{am} , Massa da amostra húmida (g).

A.2. Determinação do Teor de Humidade com Balança de Humidades

Neste procedimento usou-se uma balança de humidades (OHAUS, MB200), representada na Figura A.1.



Figura A.1 Analisador de Humidade

Este equipamento foi projetado para medir de forma rápida e eficaz o teor de humidade, sendo possível definir a temperatura de secagem e o tempo para o ensaio. Nos ensaios realizados, utilizou-se uma temperatura de 105 °C e 15 minutos de aquecimento. O analisador integra um modo de auto secagem, que possibilita a determinação, automaticamente, do conteúdo de humidade. Podem ser utilizadas amostras de 0 a 200 g, e tem capacidade de leitura de 0,1% ou 0,01 g. Para determinação do teor de humidade através deste analisador, seguiram-se os seguintes passos:

- a) Colocar um vidro de relógio (limpo e seco) no interior do aparelho;
- b) Fechar o aparelho e tarar o vidro de relógio;
- c) Seguidamente, colocar a amostra no vidro de relógio e fechar o equipamento;
- d) Clicar em “Start” e aguardar a determinação do teor de humidade;
- e) Ao fim do tempo definido, registar o valor de humidade explícito no visor do equipamento.

Anexo B Caraterização da Biomassa

A caraterização da biomassa selecionada para a produção dos péletes usados neste trabalho engloba a determinação da composição elementar e do teor de cinzas.

B.1. Determinação da Composição Elementar da Biomassa

Nesta seção deste anexo apresentam-se os boletins de análise referentes à caraterização elementar de relva (B.1), borra de café (B.2) e serrim de pinho (B.3). A análise foi realizada pelo CVR, em amostras pré-preparadas para peletização.

B.1. Relatório de Análise n.º: LCR/216/2016

B.2. Relatório de Análise n.º: LCR/217/2016

B.3. Relatório de Análise n.º: LCR/218/2016



Relatório de Análise N^o: LCR / 216 / 2016

Cliente : INEGI - Instituto Eng. Mecânica Gestão Industrial
Morada : Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias, 400
4200- 465 Porto

Amostra N^o : LCR / 216 / 2016
Requisição n^o : Email de 02-06-2016
Ref.^a da amostra : Amostra 1

Data da recepção : 06-06-2016
Início da análise : 06-06-2016
Fim da análise : 27-06-2016

ANÁLISE QUÍMICA

Parâmetros	Métodos Analíticos	Especificação 1	Especificação 2	Resultados
Carbono (B.S.)(%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	42,6
Azoto (B.S.)(%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	0,08
Hidrogénio (B.S.) (%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	7,44
Enxofre (B.S.) (%)^{*#}	M.I.	—	—	<0,2

Especificação 1 -

Especificação 2 -

M.I.-Método interno; B.S.= Base seca; 1 - A determinação de carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de humidade, matéria volátil e cinzas

A apresentação de um resultado com o símbolo (<), é identificado como sendo inferior ao Limite de Quantificação para esse parâmetro, pelo método indicado.

O ensaio assinalado com [#] não está incluído no âmbito da acreditação

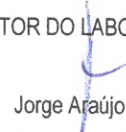
O ensaio assinalado com * foi subcontratado e não é acreditado.

O ensaio assinalado com ** foi subcontratado e é acreditado.

A RESPONSÁVEL TÉCNICA


Irene Morais

O DIRECTOR DO LABORATÓRIO


Jorge Araújo

Campus de Azurém da
Universidade do Minho,
Edif. 10
4800-058 Guimarães
Telefone: 253 510 020
Fax: 253 510 029
<http://www.cvresiduos.pt>
N.º Contribuinte 505 812 657

DATA DE EMISSÃO 27-06-2016



Relatório de Análise Nº: LCR / 217 / 2016

Cliente : INEGI - Instituto Eng. Mecânica Gestão Industrial
Morada : Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias, 400
4200- 465 Porto

Amostra Nº : LCR / 217 / 2016
Requisição nº : Email de 02-06-2016
Ref.ª da amostra : Amostra 2

Data da recepção : 06-06-2016
Início da análise : 06-06-2016
Fim da análise : 27-06-2016

ANÁLISE QUÍMICA

Parâmetros	Métodos Analíticos	Especificação 1	Especificação 2	Resultados
Carbono (B.S.) (%)#	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	38,9
Azoto (B.S.) (%)#	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	1,43
Hidrogénio (B.S.) (%)#	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	8,55
Enxofre (B.S.) (%)#	M.I.	—	—	<0,2

Especificação 1 -

Especificação 2 -

M.I.=Método interno; B.S= Base seca; 1 - A determinação de carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de humidade, matéria volátil e cinzas

A apresentação de um resultado com o símbolo (<), é identificado como sendo inferior ao Limite de Quantificação para esse parâmetro, pelo método indicado.

O ensaio assinalado com # não está incluído no âmbito da acreditação

O ensaio assinalado com * foi subcontratado e não é acreditado.

O ensaio assinalado com ** foi subcontratado e é acreditado.

A RESPONSÁVEL TÉCNICA

Irene Morais

O DIRECTOR DO LABORATÓRIO

Jorge Araújo

Campus de Azurém da
Universidade do Minho,
Edif.10
4800-058 Guimarães
Telefone: 253 510 020
Fax: 253 510 029
<http://www.cvresiduos.pt>
N.º Contribuinte 505 812 657



Relatório de Análise Nº: LCR / 218 / 2016

Cliente : INEGI - Instituto Eng. Mecânica Gestão Industrial
Morada : Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias, 400
4200- 465 Porto

Amostra Nº : LCR / 218 / 2016
Requisição nº : Email de 02-06-2016
Ref.ª da amostra : Amostra 3

Data da recepção : 06-06-2016
Início da análise : 06-06-2016
Fim da análise : 27-06-2016

ANÁLISE QUÍMICA

Parâmetros	Métodos Analíticos	Especificação 1	Especificação 2	Resultados
Carbono (B.S.)(%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	42,0
Azoto (B.S.)(%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	2,90
Hidrogénio (B.S.) (%)[#]	M.I.; Analisador Elementar TruSpec CHN	—	—	6,73
Enxofre (B.S.) (%)^{**}	M.I.	—	—	0,37

Especificação 1 -

Especificação 2 -

M.I.=Método interno; B.S= Base seca; 1 - A determinação de carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de humidade, matéria volátil e cinzas

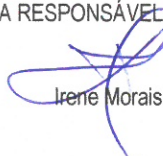
A apresentação de um resultado com o símbolo (<), é identificado como sendo inferior ao Limite de Quantificação para esse parâmetro, pelo método indicado.

O ensaio assinalado com [#] não está incluído no âmbito da acreditação

O ensaio assinalado com * foi subcontratado e não é acreditado.

O ensaio assinalado com ** foi subcontratado e é acreditado.

A RESPONSÁVEL TÉCNICA


Irene Morais

O DIRECTOR DO LABORATÓRIO


Jorge Araújo

Campus de Azurém da
Universidade do Minho,
EdL 10
4800-058 Guimarães
Telefone: 253 510 020
Fax: 253 510 029
<http://www.cvresiduos.pt>
N.º Contribuinte 505 812 657

B.2. Determinação do Teor de Cinzas da Biomassa

Na determinação do teor de cinzas foi usada uma Mufla (Nabertherm). As etapas utilizadas para este procedimento foram as seguintes:

- a) Colocar os cadinhos vazios na mufla a uma temperatura de 150 °C, durante cerca de 25 minutos, para que seja removida a humidade (água);
- b) Retirar os cadinhos da mufla e colocá-los no exsiccador para estabilizar à temperatura ambiente, sem entrada de ar;
- c) Após estabilizar, utilizar uma balança analítica para pesagem dos cadinhos (m_c) e dos cadinhos com as amostras (m_{c+a}) a testar, com auxílio de uma pinça;
- d) Colocar os cadinhos outra vez na mufla, mas agora à temperatura desejada. Para que seja efetuada a combustão completa da amostra (carbonização completa) foi selecionada uma temperatura de 550 °C e uma duração do ensaio de 2 horas;
- e) Depois de concluído o ensaio, arrefecer os cadinhos de porcelana e colocá-los no exsiccador para estabilizar a temperatura;
- f) Pesar e registar os valores relativos à massa de cadinho juntamente com a massa de cinzas (m_{c+ac}).

O teor de cinzas determina-se através da equação (6):

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{(m_{c+ac} - m_c)}{(m_{c+a} - m_c)} \times 100 \quad (\%) \quad (\text{B.1})$$

onde:

m_c , massa do cadinho (g);

m_{c+a} , massa do cadinho com a amostra original (g);

m_{c+ac} , massa do cadinho com a amostra calcinada (g).

Anexo C Determinação do Poder Calorífico de Amostras de Biomassa

Conforme exposto anteriormente, o Poder Calorífico Inferior (PCI) pode ser calculado a partir do Poder Calorífico Superior (PCS) que pode ser determinado experimentalmente.

C.1. Determinação do Poder Calorífico Superior de uma Amostra de Biomassa

Neste anexo apresenta-se o procedimento usado para determinar experimentalmente o PCS de uma amostra de biomassa, usando uma bomba calorimétrica (Parr 6755) e o termómetro de precisão (Parr 6722).

- a) Tarar o cadinho;
- b) Pesar a amostra (no cadinho tarado);
- c) Introduzir o valor da massa da matéria-prima no programa do aparelho;
- d) Colocar o cadinho com a amostra no suporte;
- e) Colocar o fio condutor no suporte e, subsequentemente, meia pastilha de ácido benzoico;
- f) Fechar a bomba e apertar a válvula;
- g) Pressurizar a bomba, lentamente, com oxigénio (até 30 bar);
- h) Colocar a bomba no equipamento;
- i) Iniciar a análise;
- j) Verificar o relatório obtido com a apresentação de resultados.

A determinação do PCS da amostra é realizada de acordo com a equação (A.2):

$$PCS_{final} = \frac{PCS_{amostra} \times m_{amostra} + PCS_{ác.benzoico} \times m_{ác.benzoico}}{m_{final}} \quad (cal \cdot g^{-1}) \quad (C.1)$$

Sendo que PCS_{final} é o valor obtido através da consulta do relatório gravado no calorímetro e $PCS_{ác.benzoico}$ é conhecido (valor de referência), e é igual a 26 424,82 kJ·kg⁻¹.

C.2. Determinação do Poder Calorífico Inferior de uma Amostra de Biomassa

Para o cálculo do PCI foi necessário recorrer à equação (C.2):

$$PCI = PCS - h_{lv} \left(\frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right) \quad (C.2)$$

Com os dados obtidos experimentalmente foi obtido o valor do poder calorífico superior (PCS) e em alguns casos na literatura, sendo preciso converter esse valor em poder calorífico inferior (PCI).

Para a conversão do PCS em PCI utilizaram-se os valores de percentagem de humidade (M) e de hidrogénio (H) das diferentes matérias-primas, apresentados na Tabela C.1.

Matéria-prima	PCS (kJ/kg)	M (%)	H (%)	PCI (kJ/kg)
Serrim	19 429,56	14,04	7,44	17 916,12
Borra de café	21 100,26	9,3	8,55	19 361,09
Relva	16 589,55	7,33	6,73	15 220,59

Para a produção dos péletes foi adicionado cerca de 10% (m/m) de óleo vegetal. A composição global dos péletes em cada um dos constituintes encontra-se descrita na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Designação do Pélete	Borra de Café (%)	Serrim (%)	Relva (%)	Óleo (%)
65BC/35SP	58,5	31,5	-	10,0
65SP/35RV	-	58,5	31,5	10,0
90SP/10RV	-	81,0	9,0	10,0
100BC	90,0	-	-	10,0

Depois de se obter as percentagens de cada matéria-prima para cada tipo de péletes é necessário, calcular o seu PCI, através da seguinte fórmula:

$$PCI_{amostra} = \sum(x_i \times (PCI_i)) \quad (C.3)$$

Aplicando a expressão obtém-se os valores do PCI para cada uma das péletes produzidas.

Tabela C.3 **PCI dos diversos tipos de péletes utilizados**

Péletes	PCI (kJ/kg)
100SP	17 109,90
100BC	21 309,00
90SP/10RV	19 750,33
65BC/35SP	20 849,23
65SP/35RV	19 137,72

Anexo D Calibração do Caudalímetro

O caudalímetro foi calibrado na caldeira das instalações do INEGI, para que as condições de calibração fossem as mais próximas dos ensaios, utilizando-se a água como fluido de calibração. Uma vez que a instalação tinha a válvula a montante do caudalímetro, neste caso era a torneira de água de rede, esta foi regulada para diferentes posições para se obter vários caudais.

Durante todo o processo de calibração a temperatura do fluido foi monitorizada mantendo-se constante em aproximadamente 18/19 °C.

Para a calibração seguiu-se o seguinte procedimento:

- Regular a válvula para uma dada posição e deixar estabilizar o caudal;
- Iniciar o sistema de aquisição de sinal de modo a adquirir a tensão que corresponde ao caudal imposto;
- Contabilizar o tempo que demora a encher um recipiente previamente pesado, com auxílio de um cronómetro;
- Parar o sistema de aquisição e pesar o recipiente com o fluído;
- Repetir o procedimento de a) a d) para diferentes regulações da válvula (diferentes caudais).

Com vários ensaios de calibração, foi possível obter a reta de calibração apresentada:

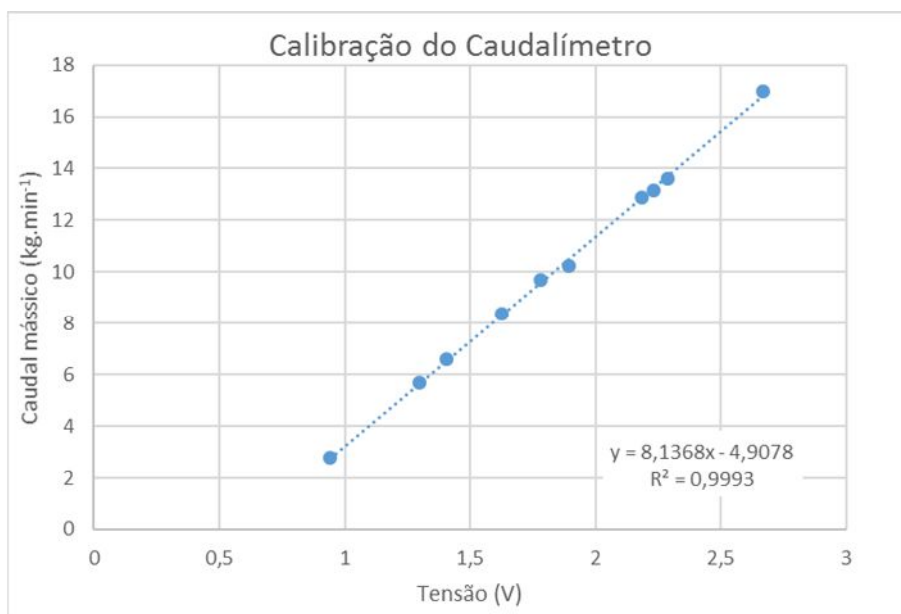


Figura D.1 Reta de calibração do caudalímetro

Anexo E Sistema de Aquisição de Dados

Como foi referido na seção (5.3.3 Sistema de Medição/Aquisição de Dados) o programa com que os dados foram lidos e adquiridos foi o DasyLab. Na Figura E.1 pode-se observar a representação do esquema total desde a aquisição dos sinais provenientes dos diferentes equipamentos até à leitura/registo dos diferentes parâmetros pretendidos (temperaturas, caudais e emissões gasosas). O Programa foi preparado com base num diagrama de blocos de programação simples e intuitiva:

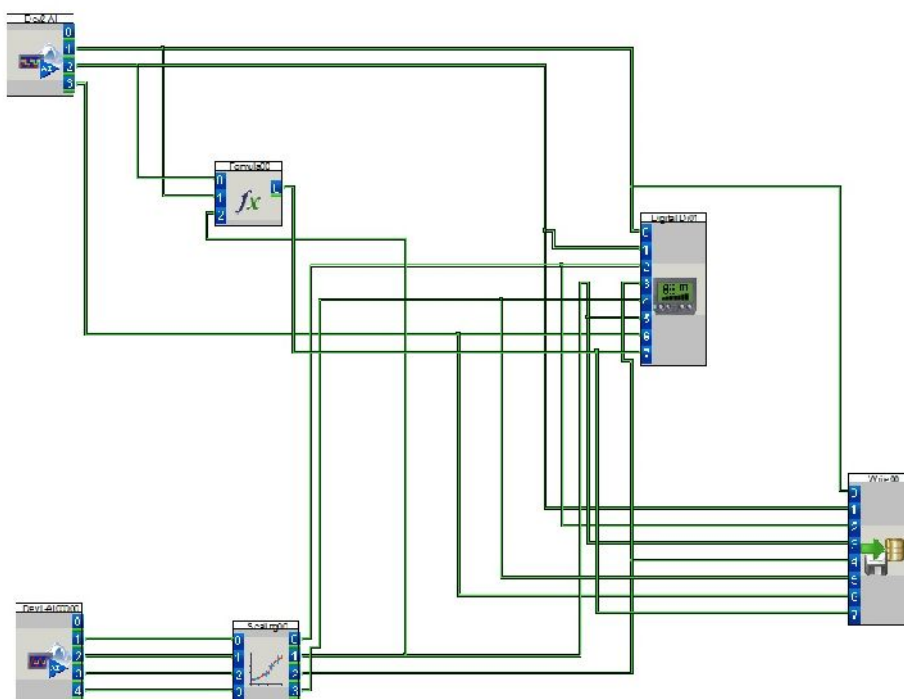


Figura E.1 Representação gráfica do programa utilizado

Em cada ensaio de queima distinto, no bloco mais a direita era necessário criar e nomear sempre um novo ficheiro, para registar todos os valores e guardá-los.

Com o programa em fase de funcionamento era possível visualizar no écran a representação da Figura E.2, em que era possível observar a leitura, em tempo real, de todos os parâmetros que estavam a ser registados na folha de *MS Excel*.



Figura E.2 Exemplo de visualização dos dados guardados pelo sistema de aquisição

Anexo F Resultados dos testes efetuados

Para cada ensaio realizado foram calculados, através da folha Excel fornecida pelo sistema de aquisição de dados, os valores médios obtidos no ensaio. Foi efetuado o cálculo da potência nominal e do rendimento. Para os ensaios com os péletes 100SP os resultados foram os seguintes:

- 100SP | Ensaio 1

Tabela F.1			Cálculo dos valores médios – 100SP Ensaio 1				
Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg·min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exaust. (°C)	P _{útil} (kW)
01:27:26	22,05	42,75	1719,8	6,79	5,3	141,68	9,79

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na Tabela F.2:

Tabela F.2		Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 100SP Ensaio 1			
mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P _{útil} (kW)	
0,16	5	300	9,13		
0,26	8	480	9,27		
0,50	13	780	10,97		
0,60	16	960	10,69		
0,74	19	1140	11,11		
1,06	27	1620	11,20		
1,18	30	1800	11,22		
1,32	34	2040	11,07		
1,64	42	2520	11,14		
PCI péletes (kJ·kg ⁻¹)		17 109,90	Média	11,06	9,79
			Rendimento (%) =	88,5%	

Para corrigir os valores de concentração de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas Tabelas e Figuras que se seguem.

Neste ensaio o aparelho tinha sido calibrado no início do ensaio para o valor de CO₂ e O₂, mas efetuou-se a correção para os valores de CO.

Tabela F.3 Valores Lidos e Corrigidos – 100SP | Ensaio 1

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
5,3	1719,8	15,7	5,3	1589,4	15,7

Tabela F.4 Dados para Calibração – 100SP | Ensaio 1

Padrão		CO ₂	CO
0	0	0	-0,01
13,24	2489,7	13,24	2850

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

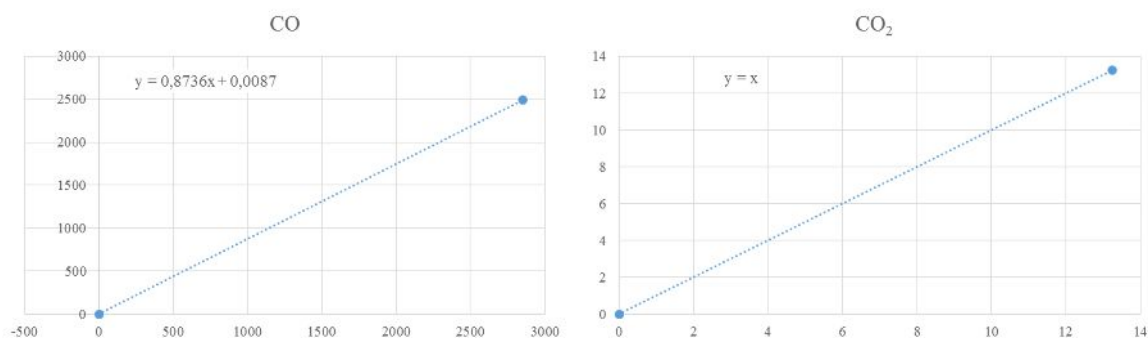


Figura F.1 Curvas de Calibração – 100SP | Ensaio 1

- 100SP | Ensaio 2

Tabela F.5 Cálculo dos Valores Médios – 100SP | Ensaio 2

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	Pútil (kW)
01:52:00	23,96	42,23	1750,8	7,76	9,82	167,71	9,88

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.6 Cálculo da Potência Nominal e Respetivo Rendimento – 100SP | Ensaio 2

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,52	12	720	12,36	
0,30	8	480	10,69	
0,38	10	600	10,84	
0,56	14	840	11,41	
0,60	14	840	12,22	
0,32	9	540	10,14	
0,18	4	240	12,83	
0,12	3	180	11,41	
PCI péletes (kJ/kg)	17 109,90	Média	11,49	9,88
Rendimento (%) =			86,0%	

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

Tabela F.7 Valores Lidos e Corrigidos – 100SP | Ensaio 2

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
9,82	1750,75	14,44	4,84	1384,04	16,0

Tabela F.8 Dados para Calibração – 100SP | Ensaio 2

Padrão	CO ₂	CO	O ₂
0	0	0	-0,03
10	2489,7	21	19

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

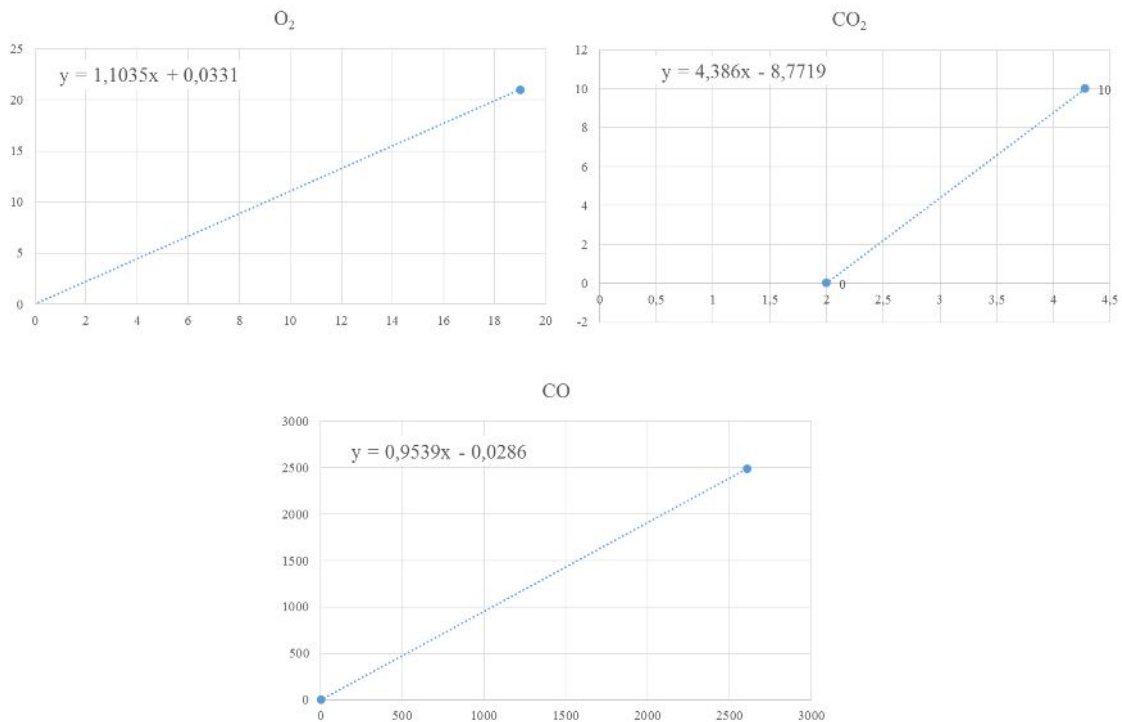


Figura F.2 Curvas de Calibração – 100SP | Ensaio 2

Para os ensaios com os péletes 100BC:

- 100BC | Ensaio 1

Tabela F.9 Cálculo dos Valores Médios – 100BC | Ensaio 1

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	Pútil (kW)
01:03:00	25,10	43,97	4467,64	8,31	-	192,17	10,93

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.10 Cálculo da Potência Nominal e Respetivo Rendimento – 100BC | Ensaio 1

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,24	7	420	12,18	
0,16	5	300	11,36	
0,39	10	600	13,85	
0,22	7	420	11,16	
0,28	8	480	12,43	
0,22	5	300	15,63	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90		Média Rendimento (%) = 12,77 85,6%	10,92

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

O CO₂, neste caso o aparelho não está a funcionar e foi feito através de cálculo como é possível observar no Anexo G Norma NP EN 12809: 2015.

Tabela F.11 Valores Lidos e Corrigidos – 100BC | Ensaio 1

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
-	4467,64	15,93	4,75	4467,64	15,93

Com os aparelhos calibrados não foi necessário recorrer a nenhuma curva de calibração nem corrigir nenhum valor, somente calcular o valor de CO₂.

- 100BC | Ensaio 2

Tabela F.12 Cálculo dos valores médios – 100BC | Ensaio 2

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	Pútil (kW)
01:06:00	24,97	48,04	5430,88	6,77	4,52	204,32	10,89

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.13 Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 100BC | Ensaio 2

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,13	4	240	11,54	
0,36	9	540	14,21	
0,32	9	540	12,63	
0,13	4	240	11,54	
0,19	5	300	13,50	
0,15	4	240	13,32	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90		Média 12,79	10,89
			Rendimento (%) =	85,1%

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

Tabela F.14 Valores lidos e corrigidos – 100BC | Ensaio 2

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
4,52	5430,88	15,0	4,96	5470,24	16,15

Tabela F.15 Dados para calibração – 100BC | Ensaio 2

Padrão	CO ₂	CO
0	0	-0,14
10	250	9,26

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

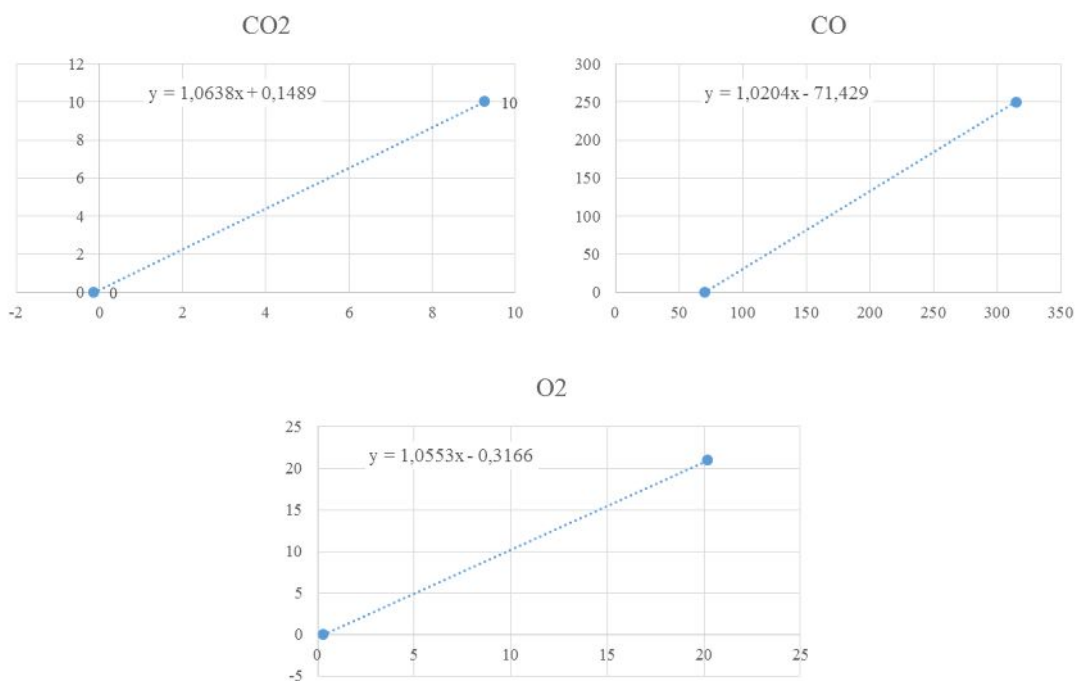


Figura F.3 Curvas de calibração – 100BC | Ensaio 2

Para os ensaios de 65BC/35SP:

- 65BC/35SP | Ensaio 1

Tabela F.16 Cálculo dos valores médios – 65BC/35SP | Ensaio 1

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m}_i (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	P _{útil} (kW)
00:46:36	21,96	37,86	5018,50	6,56	3,45	122,72	7,26

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.17 Cálculo da potência nominal e respectivo rendimento – 65BC/35SP | Ensaio 1

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,26	8	480	11,29	
0,42	14	840	10,42	
0,64	25	1500	8,89	
0,98	32	1920	10,64	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90	Média	9,99	7,26
		Rendimento (%) =	72,7%	

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

Tabela F.18 Valores lidos e corrigidos – 65BC/35SP | Ensaio 1

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
3,45	5018,50	15,8	3,45	4471,15	15,8

Os aparelhos de CO₂ e O₂ estavam calibrados e assim foi só necessário calibrar o CO.

Tabela F.19 Dados para calibração – 65BC/35SP | Ensaio 1

Padrão	CO
0	-0,01
2489,7	2850

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

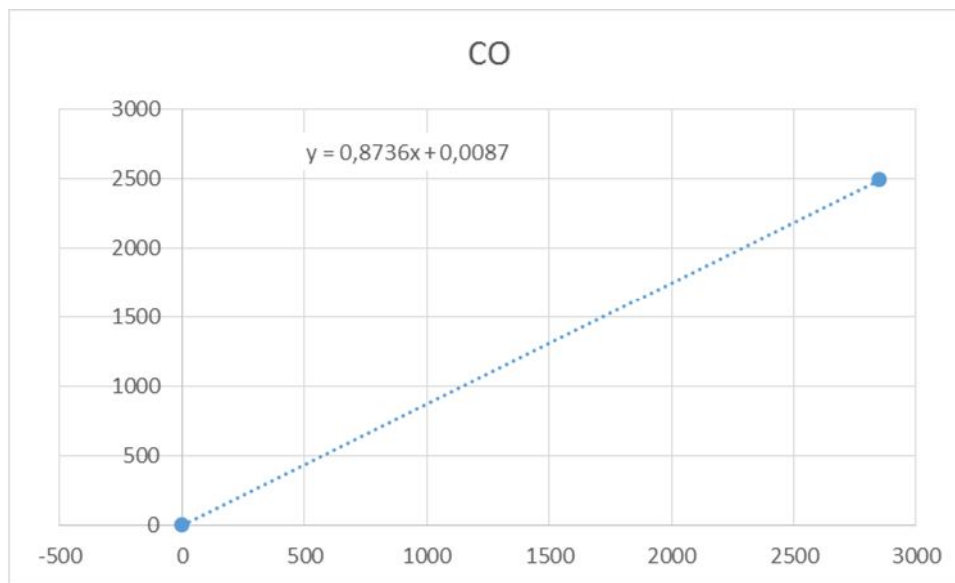


Figura F.4 Curvas de calibração – 65BC/35SP | Ensaio 1

- 65BC/35SP | Ensaio 2

Tabela F.20 Cálculo dos valores médios – 65BC/35SP | Ensaio 2

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	P _{útil} (kW)
01:32:00	23,67	40,05	3820,5	7,75	3,86	155,58	8,85

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.21 Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 65BC/35SP | Ensaio 2

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P _{útil} (kW)
0,50	13	780	13,36	
0,50	13	780	13,36	
0,40	11	660	12,64	
0,52	14	840	12,91	
0,18	5	300	12,51	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90		Média 12,96	8,85
			Rendimento (%) =	68,3%

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

Tabela F.22 Valores lidos e corrigidos – 65BC/35SP | Ensaio 2

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
3,86	3820,5	14,58	8,16	3358,4	16,12

Tabela F.23 Dados para calibração – 65BC/35SP | Ensaio 2

Padrão			CO ₂	CO	O ₂
0	0	0	2	0,03	-0,03
10	2489,7	21	4,28	2610	19

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

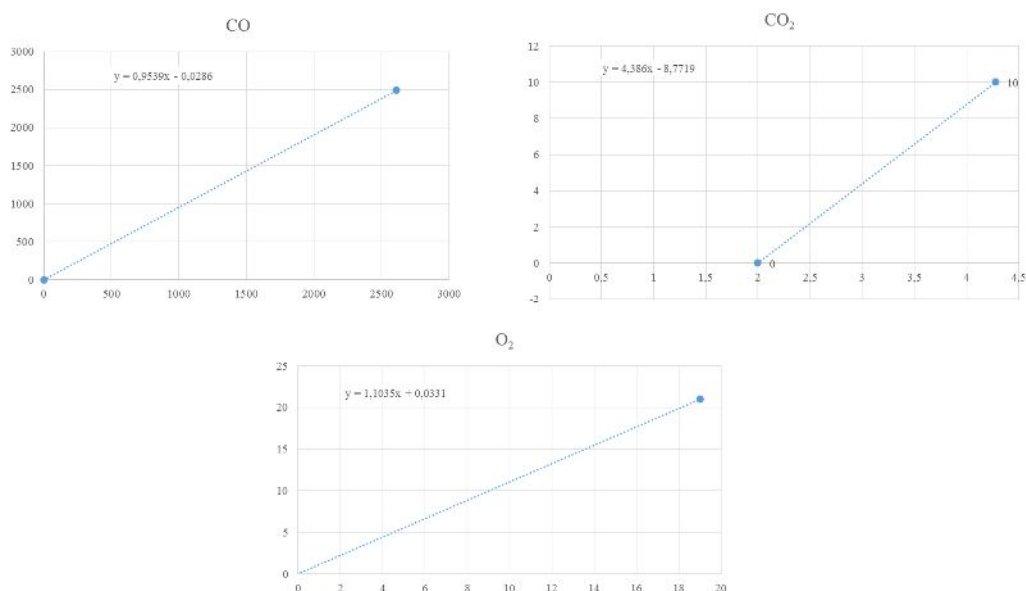


Figura F.5 Curvas de calibração – 65BC/35SP | Ensaio 2

Para o ensaio com péletes 65SP/35RV:

- 65SP/35RV | Ensaio 1

Tabela F.24 Cálculo dos valores médios – 65SP/35RV | Ensaio 1

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m}_i (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	Pútil (kW)
00:29:14	22,19	40,90	2551,1	6,86	4,11	151,36	8,94

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.25 Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 65SP/35RV | Ensaio 1

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,24	6	360	12,76	
0,44	12	720	11,70	
0,38	10	600	12,12	
0,40	11	660	11,60	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90		Média 12,04	8,94
			Rendimento (%) = 74,2%	

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras.

Tabela F.26 Valores lidos e corrigidos – 65SP/35RV | Ensaio 1

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
4,11	2551,1	15,23	5,54	2320,9	15,23

O aparelho de O₂ estava calibrado por isso isento a ser corrigido o valor.

Tabela F.27 Dados para calibração – 65SP/35RV | Ensaio 1

Padrão	CO ₂	CO
0	0	0,009
10	2489,7	2640

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

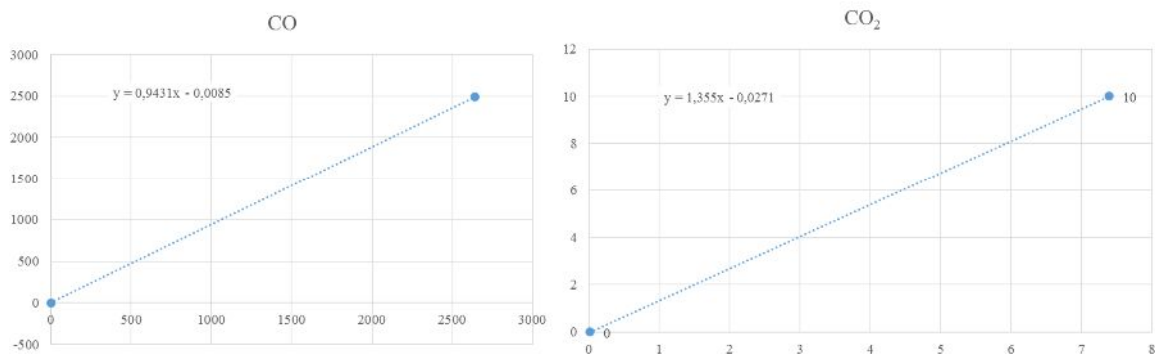


Figura F.6 Curvas de Calibração – 65SP/35RV | Ensaio 1

Por último os ensaios de 90SP/10RV:

- 90SP/10RV | Ensaio 1

Tabela F.28 Cálculo dos valores médios – 90SP/10RV | Ensaio 1

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m}_i (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	Pútil (kW)
01:19:00	25,1	43,9	2182,7	8,31	-	188,51	10,88

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.29 Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 90SP/10RV | Ensaio 1

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P útil (kW)
0,34	9	540	12,44	
0,32	9	540	11,70	
0,50	11	660	14,96	
0,58	14	840	13,64	
1,10	28	1680	12,93	
0,94	22	1320	14,06	
1,28	30	1800	14,04	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,9	Média	13,40	10,88
		Rendimento (%) =	81,2%	

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras. Este foi um dos ensaios que sofreu a avaria do aparelho de CO₂ em que não foi possível registrar os valores, pois isso foi outra vez calculado como está descrito no Anexo G – Tabela G.3. Os outros dois aparelhos estavam calibrados, foram ambos calibrados antes da realização do mesmo.

Tabela F.30 Valores lidos e corrigidos – 90SP/10RV | Ensaio 1

Lido		Corrigido			
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
-	2182,7	15,39	5,29	2182,7	15,39

- 90SP/10RV | Ensaio 2

Tabela F.31 Cálculo dos valores médios – 90SP/10RV | Ensaio 2

Tempo	Tent. (°C)	Tsai. H ₂ O (°C)	CO (ppm)	\dot{m} (kg.min ⁻¹)	CO ₂ (%)	T exhaust. (°C)	P _{útil} (kW)
01:55:00	24,82	47,02	2405,6	6,77	-	196,85	10,47

Para a determinação da potência nominal, foi preciso registrar a massa de péletes fornecida à caldeira em intervalos de tempo, como é possível observar na seguinte Tabela:

Tabela F.32 Cálculo da potência nominal e respetivo rendimento – 90SP/10RV | Ensaio 2

mpéletes (kg)	Tempo (min)	Tempo (s)	P nominal (kW)	P _{útil} (kW)
0,22	5	300	14,48	
0,30	8	480	12,34	
0,46	12	720	12,62	
0,34	9	540	12,44	
0,78	21	1260	12,23	
PCI péletes (kJ/kg)	17109,90		Média 12,82 Rendimento (%) = 81,6%	10,47

Para corrigir os valores de CO₂, CO e O₂ é necessário calibrar os equipamentos e depois realizar os seguintes cálculos apresentados nas seguintes Tabelas e Figuras. Este foi um dos ensaios em que ocorreu a avaria do aparelho de CO₂ pelo que não foi possível registrar os valores, motivo pelo qual foi outra vez calculado conforme descrito no Anexo G – Tabela G.4. Os outros dois aparelhos estavam descalibrados e foi preciso corrigir o seu valor.

Tabela F.33 Valores lidos e corrigidos – 90SP/10RV | Ensaio 2

Lido			Corrigido		
CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)
-	2405,6	15,05	4,52	2383,3	16,2

Tabela F.34 Dados para calibração – 90SP/10RV | Ensaio 2

Padrão	CO ₂	CO
0	0	70
250	21	315

Para a calibração foi necessário traçar estas retas de calibração para corrigir os valores.

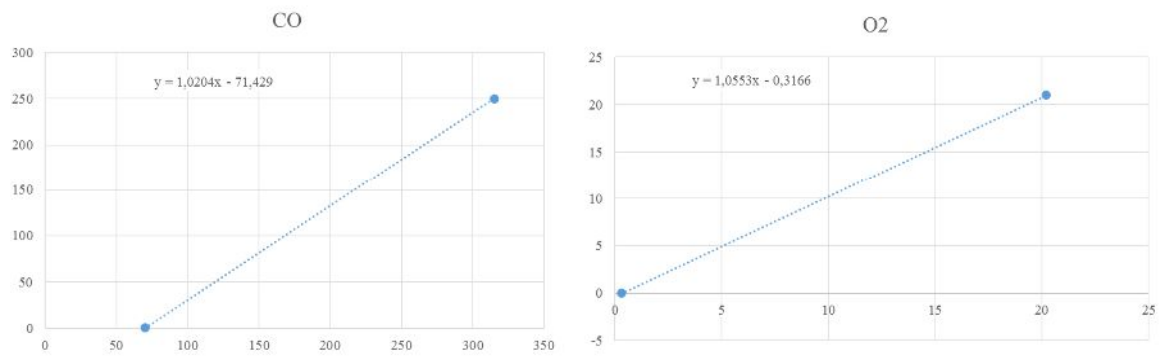


Figura F.7 Curvas de calibração – 90SP/10RV | Ensaio 2

Anexo G Norma NP EN 12809: 2015

G.1 Determinação de Rendimento da Caldeira

Para a determinação do rendimento à potência nominal usou-se o gráfico da Figura G.1:

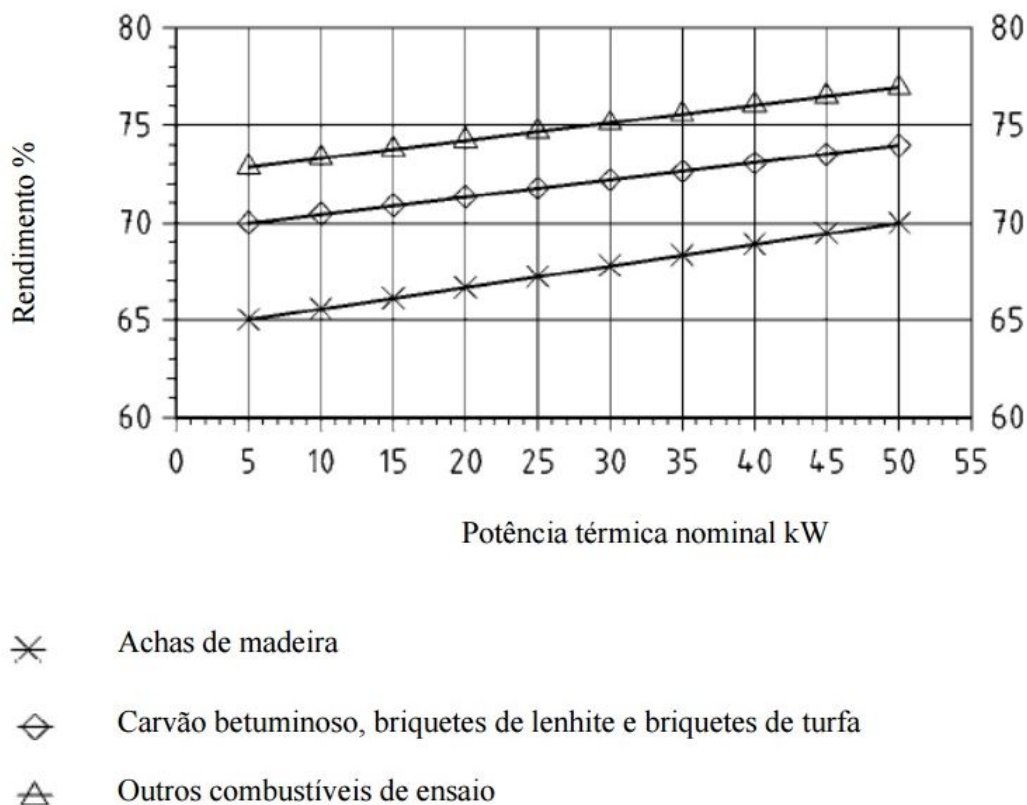


Figura G.1 Rendimento à potência térmica nominal

G.2 Determinação das Emissões de Monóxido de Carbono

De acordo com esta norma, é possível saber as emissões de monóxido de carbono.

No Ponto 6.7 desta norma diz-se: “A *concentração média de monóxido de carbono nos produtos da combustão, medida em conformidade com A.4.7, calculada com base em 13 % de oxigénio (O₂), deve ser inferior ou igual ao valor declarado pelo fabricante e não deve ser superior a 1,0 %.*”

Em alguns países existe legislação nacional que estabelece limites para os níveis máximos de concentração de monóxido de carbono nas condições de combustão lenta ou reduzida, nestes casos deve ser medido o nível de monóxido de carbono durante o ensaio de combustão lenta de acordo com A.4.8 para os aparelhos vendidos nesses países.

G.3 Correção do Teor de CO

Para a determinação da correção do teor de CO a partir de 13 % de oxigénio foi calculado do seguinte modo:

1. O valor médio do teor de monóxido de carbono (CO_{avg}) deve ser calculado como a média de todos os valores de CO registados pelo equipamento durante toda a duração o ensaio.
2. O valor CO_{avg} deve ser convertido em CO com base num teor de oxigénio normalizado ($O_{2normalizado}$) dos produtos da combustão, por uma das equações seguintes.

$$CO_{teor} = CO_{avg} \times \frac{21 - O_{2normalizado}}{21 - O_{2avg}} \quad (G.1)$$

ou

$$CO_{teor} = CO_{avg} \times \frac{CO_{2max}}{CO_{2avg}} \times \frac{21 - O_{2normalizado}}{21} \quad (G.2)$$

Cálculo do CO de todos os ensaios de queima para a correção a partir de oxigénio 13%, é resumido na seguinte tabela:

Tabela G.1 Correção CO em Todos os Ensaio dos Tipos de Péletes

Tipologia	CO correção (ppm)
100SP	2399,1
	2171,0
100BC	7049,5
	9023,8
65BC/35SP	6878,8
	5483,1
65SP/35RV	3201,2
90SP/10RV	3112,6
	3972,1

G.4 Cálculo do CO_{2,max}

Para o cálculo do CO_{2,max} quando não foi possível medir com o aparelho dos gases de exaustão, foi usado a seguinte equação:

$$CO_{2,max} = \frac{1}{[1+m_s+A \times (\frac{79}{21})]} \times 100 \quad (G.3)$$

Calcular os valores de A e m_s utilizando as seguintes fórmulas:

$$A = 1 + \left(\frac{m_h}{4}\right) - \left(\frac{m_o}{2}\right) + m_s \quad (G.4)$$

$$m_s = \left(\frac{12}{32}\right) \times \left(\frac{s}{c}\right) \quad (G.5)$$

Onde:

$$m_h = 12 \times \left(\frac{h}{c}\right) \quad (G.6)$$

$$m_o = \left(\frac{12}{16}\right) \times \left(\frac{o}{c}\right) \quad (G.7)$$

Para o ensaio 1 de 100BC a determinação do CO_{2,max} foi a seguinte:

Tabela G.2		Ensaio 1 de 100BC Cálculo do CO ₂	
Ensaio 100BC		Obtido	Previsto
		O ₂	CO ₂
		15,93	4,75
Análise elementar			
Base seca		CO _{2,max}	19,68
%C	42,6	A	1,085
%O	49,88	ms	0
%h	7,44	mh	2,10
%S	0	mo	0,88

Agora para o ensaio 1 de 90SP/10RV foi a seguinte:

Tabela G.3 90SP/10RV | Ensaio 1: Cálculo do CO₂

Ensaio 90SP/10RV		Obtido	Previsto
		O ₂	CO ₂
		15,39	5,29
Análise elementar			
Base seca		CO _{2,max}	19,78
%C	42,54	A	1,08
%O	50,09	ms	0
%h	7,37	mh	2,08
%S	0	mo	0,88

Para finalizar o ultimo cálculo efetuado para o CO₂, foi para o Ensaio 2 de 90SP/10RV apresentado na seguinte Tabela:

Tabela G.4 90SP/10RV | Ensaio 2: Cálculo do CO₂

Ensaio 90SP/10RV		Obtido	Previsto
		O ₂	CO ₂
		16,2	4,52
Análise elementar			
Base seca		CO _{2,max}	19,78
%C	42,54	A	1,08
%O	50,09	ms	0
%h	7,37	mh	2,08
%S	0	mo	0,88