



ESTUDO DA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CDRC

ANDRÉ ALEXANDRE MOREIRA SILVA

julho de 2019

ESTUDO DA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CDR_c

André Alexandre Moreira Silva
1170069

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CDR_c

André Alexandre Moreira Silva
1170069

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação da Engenheira Nídia de Sá Caetano.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Nídia de Sá Caetano
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor André Mota
Investigador, Centro para a Valorização de Resíduos

Arguente

Doutora Maria Cândida Lobo Guerra Vilarinho
Professor Auxiliar, Universidade do Minho

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora e Professora Nídia de Sá Caetano, agradeço por todos os conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de dúvidas, pela orientação, sugestões e motivação ao longo deste trabalho, sem os quais a realização desta dissertação não teria sido possível.

Ao meu orientador no CVR, Doutor André Mota, agradeço pela disponibilidade demonstrada, pelas sugestões, conselhos e toda a ajuda facultada durante o projeto.

Agradeço ao CVR por facultar as instalações necessárias para a realização desta dissertação, a todos os seus colaboradores a ajuda, motivação e amabilidade, e em especial, aos Engenheiros Ricardo Campos e Pedro Ribeiro pela motivação prestada nos momentos mais necessitados e pelo apoio e disponibilidade demonstrada em todas as fases do presente trabalho.

A todos os meus amigos que acompanharam de perto o meu percurso, obrigada por todos os momentos partilhados, agradeço pelo apoio incondicional.

Finalmente, agradeço aos meus pais e restante família pelas oportunidades, pela confiança depositada, pelo infindável apoio, pela compreensão e, sem esquecer, pela paciência demonstrada ao longo de todo o meu percurso académico.

PALAVRAS CHAVE

Avaliação de ciclo de vida; Biocombustível sólido; Biomassa residual; Combustão; Combustível derivado de resíduos compactado (CDRc); Emissões dos gases de combustão; Podas de agricultura; Poder calorífico superior

RESUMO

A presente dissertação foi realizada no âmbito da Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio, que se enquadra no plano de estudos do Mestrado em Energias Sustentáveis, lecionado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Este trabalho integra-se no projeto de mobilização de biomassa de podas para valorização energética desenvolvido no centro para a valorização de resíduos (CVR), em parceria com outros centros de investigação portugueses e espanhóis para promover a produção de novos biocombustíveis.

Os resíduos florestais e de jardim representam fontes de biomassa lenho-celulósica com potencial interesse para a produção de combustível derivado de resíduos compactado (CRDc) que posteriormente pode ser usado quer para produzir energia em caldeiras, quer para produzir *biochar* e bio-óleo em sistemas de pirólise. A combustão em caldeiras obriga à utilização de CRDc certificado e em conformidade com as exigências legais, nomeadamente no que respeita aos teores de humidade e de cinzas, e ao poder calorífico. Também a presença de outros contaminantes está fortemente limitada, tendo em vista a garantia dos valores-limite de emissão (VLE) das emissões gasosas. Assim, configura-se como pertinente o estudo da viabilidade de valorização deste tipo de resíduos.

Os objetivos do presente trabalho recaíram especificamente sobre a vertente do estudo das emissões dos gases de combustão de uma caldeira alimentada com diversos tipos de combustíveis sólidos. Para esta vertente, foram utilizados briquetes comerciais (serrim) e briquetes provenientes de podas de biomassa, ambos os briquetes foram produzidos no CVR a partir de resíduos de biomassa florestal como serrim de pinho, poda de videira, poda de kiwi, poda de macieira, poda de oliveira e poda urbana. Para concretizar estes objetivos, procedeu-se à montagem da instalação experimental que, para além da caldeira, inclui vários componentes utilizados nas medições ao longo dos ensaios.

Numa primeira fase do trabalho foram realizados estudos nas biomassas acima descritas para obter um conhecimento sobre as biomassas. Esses estudos passaram pela determinação do teor de humidade, teor de cinzas, matéria volátil, carbono fixo, poder

calorífico e análise elementar dos combustíveis em estudo. No que diz respeito ao teor de humidade os valores variam entre os 9,5 e 19,5 % de humidade (poda urbana e poda de kiwi respetivamente), o teor de cinzas apresentam resultados entre os 0,8 e 5,1 % (serrim e poda de macieira), a matéria volátil apresentam valores entre os 78,7 e 83,7 % (poda de oliveira e serrim), no que diz respeito ao carbono fixo os valores variam na casa dos 15,5 e 17,6 % (serrim e podas de oliveira respetivamente), em relação ao poder calorífico inferior os valores variam entre os 14,7 e 18,6 MJ/kg (poda de macieira e serrim respetivamente) em contraste com os valores do poder calorífico superior que demonstram valores que oscilam entre os 15,8 e 18,6 MJ/kg (poda de macieira e poda de kiwi). Com este estudo realizado foi dado início à produção dos briquetes para a realização da combustão dos mesmos na caldeira. De seguida, foi criada um formulário de ensaio dos briquetes produzidos consoante a matéria-prima utilizada na sua produção. Assim a humidade, comprimento, massa, massa volúmica e área de secção foram fatores presentes nessa ficha. É de salientar que todos os briquetes produzidos na briquetadora foram concebidos da mesma maneira.

Seguidamente a atenção recaiu na vertente principal deste trabalho, a valorização de resíduos de biomassa pelo meio da combustão. Os ensaios realizados, foram divididos em três partes distintas: na primeira parte avaliou-se a caracterização do combustível sólido, ou seja, o caudal mássico do combustível, temperaturas, velocidade de escoamento, densidade, entre outros, considerando condições aproximadas de regime permanente. Na segunda etapa foi analisada a composição dos gases de combustão (O_2 , CO_2 , N_2 e H_2O). Por fim foram monitorizadas as emissões poluentes resultantes dos gases de combustão (CO , NO_x , *Partículas*, e *COT*), observando-se maior emissão de CO no ensaio com briquetes de serrim ($989 \text{ mg/m}^3 @ 6\% O_2$), uma maior emissão de NO_x nos ensaios com briquetes de podas de kiwi ($1140 \text{ mg/m}^3 @ 6\% O_2$), no que diz respeito as emissões de partículas as podas de kiwi apresentam maior emissão ($189 \text{ mg/m}^3 @ 6\% O_2$) e observa-se maior emissão de *COT* nas podas de oliveira ($301 \text{ mg/m}^3 @ 6\% O_2$). Em suma, as podas mais adequadas são as podas de vinha, podas de oliveira, podas urbanas, podas de macieira e podas de kiwi.

Por fim foi realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada de todo o processo que envolve a combustão de resíduos de biomassa na forma de briquetes, desde a etapa da poda até ao fim de vida de todo o processo. Portanto, foi desprezado o cultivo da biomassa neste estudo, assumindo já esse cultivo como realizado, dando apenas foco à poda da biomassa, bem como às restantes etapas. Nesta ACV foram considerados os recursos utilizados em cada etapa do processo, emissões resultantes e energia, com o intuito de compreender qual ou quais as etapas mais prejudiciais em todo o processo da atividade, o que veio a comprovar que a queima de resíduos de vinha ao ar livre é mais gravosa nas alterações climáticas (15 kg_{CO_2eq}), material particulado ($6,5 \text{ PM}_{2.5eq}$) e na formação fotoquímica de ozono ($18 \text{ kg}_{NMVOCeq}$), enquanto a combustão na caldeira do mesmo resíduo em forma de briquete apresenta agravantes na acidificação ($19,2 \text{ moles de } H_{eq}$) e na eutrofização ($66 \text{ moles de } N_{eq}$).

KEYWORDS

Agriculture pruning; Combustion; Emissions of combustion gases; Higher heating value; Life cycle analysis; Refuse derived fuel compacted (RDFc); Residual biomass; Solid biofuel

ABSTRACT

This dissertation was carried out within the scope of the Dissertation/Project/Internship Curricular Unit, which is part of the study plan of the Master Course in Sustainable Energies, lectured at *Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)*. This work is part of a project to valorize biomass pruning through energy recovery, and was developed at the Centre for Waste Valorisation (CVR) in partnership with other Portuguese and Spanish research centers, to promote the energetic valorization of new biofuels.

Forest and garden residues represent wood-cellulosic biomass sources with potential interest as raw material in the production of compacted Refuse Derived Fuel (FDRc), which can later be used to produce energy in boilers, or to produce biochar and bio-oil in pyrolysis systems. Combustion in boilers requires the use of certified CRDc and in accordance with legal requirements, in particular as regards moisture and ash content and calorific value. The presence of other contaminants is also heavily restricted in order to guarantee the emission limit values (VLE) of gaseous emissions. Thus, the study of viability in this type of waste recovery is relevant.

The objectives of this work are specifically focused on the study of flue gas emissions from a boiler with several types of solid fuels. Commercial briquettes (pine) and briquettes from biomass pruning were used for this purpose, both briquettes were produced in the CVR using forest biomass residues such as pine sawdust, grapevine, kiwi, apple, olive and urban pruning's. In order to achieve these objectives, the experimental installation which was set up, in addition to the boiler, included several components used in the measurements throughout the tests.

In a first stage of the work, studies were performed on biomasses described above to obtain a knowledge about biomass characteristics. These studies were fulfilled to determine the moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, calorific value and elemental analysis of the fuels under study. Then, the study proceeded with the production of briquettes that were used to perform the combustion in the boiler. A technical datasheet was created, to resume the characteristics (length, mass, density and section area) of each briquette type, allowing to analyze how different characteristics they have, depending on the raw material used. It should be noted that

all the briquettes were produced in the briquette machine using the same protocol. The following step was to perform the valorization of residual biomass through combustion.

In the first part of the tests, the solid fuel characterization, the fuel mass flow rate, temperatures, flowrate, density, among others, were evaluated considering near steady-state conditions. In the second stage, the composition of the flue gases (O_2 , CO_2 , N_2 and H_2O) was analyzed. Finally, the pollutant emissions resulting from the combustion gases (CO, NO_x , particles and TOC) were monitored, with a higher emission of CO in the test where sawmill briquettes were used, and a higher emission of NO_x , when the briquettes of kiwi pruning were used in the tests. In short, the most suitable pruning is vine pruning, olive pruning, urban pruning, apple pruning and kiwi pruning.

Finally, a simplified life cycle assessment (LCA) of the entire process involving the combustion of biomass residues in the form of briquettes was performed, from the pruning stage to the end of life of the whole process. Cultivation was not accounted for in this report, giving only focus on biomass pruning, as well as the remaining stages. In this LCA, the resources used in each stage of the process, resulting emissions and energy consumed were taken into account, in order to understand what was the most harmful in the whole process of the activity, having been shown that the outdoor burning of vine wastes is the most harmful in what concerns the impact categories climate change, as well as particulate matter and the photochemical formation of ozone, while combustion in the boiler of the same briquette wastes shows aggravating factors in acidification and eutrophication.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AFR	<i>Air to Fuel Ratio</i>
CVR	Centro para a Valorização de Resíduos
CDRc	Combustível derivado de resíduos compactados
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EIA	<i>United States Energy Information Administration</i>
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
EUBIA	<i>European Biomass Industry Association</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PTP	Pressão e Temperatura Padrão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
EJ	Exajoule
g	Gramma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
ktep	Milhares de toneladas equivalentes de petróleo
kW	Kilowatt
kWh/t	Kilowatt-hora por tonelada
mg	Miligramma
mm	Milímetro
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
p/p	Percentagem em peso
t	Tonelada
t/h	Tonelada por hora
t/m ³	Tonelada por metro cúbico
v/v	Percentagem em volume

Lista de Símbolos

\emptyset	Razão de equivalência
η	Rendimento
e	Excesso de ar
λ	Coeficiente de excesso de ar
ρ_i	Massa volúmica da espécie
Δh_R	Entalpia específica
Δh_s	Variação de entalpia sensível
Δt	Intervalo de tempo
h_f	Entalpia de formação
h_{fg}	Calor latente de vaporização
h_{prod}	Entalpia dos produtos
h_{rea}	Entalpia dos reagentes
m_{ar}	Massa de ar
m_{comb}	Massa de combustível
m_i	Quociente entre a massa da espécie
m_{tot}	Massa de todas as espécies presentes na mistura
M_i	Massa molar
\dot{m}	Caudal mássico
n_i	Quociente entre o número de moles da espécie
n_{tot}	Número de moles de todas as espécies presentes na mistura
\dot{Q}_{comb}	Potência térmica do combustível
$\dot{Q}_{útil}$	Potência térmica útil
r	Riqueza da mistura
x_i	Fração molar
y_i	Fração mássica de uma espécie química da mistura

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Al	Alumínio
Ad	Teor de cinzas
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cf	Carbono fixo
CH ₄	Metano
Cl	Cloro
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
Cp	Calor específico a pressão constante
Fe	Ferro
H	Hidrogénio
HAP	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
HC	Hidrocarbonetos
HCl	Ácido Clorídrico
H ₂ O	Água
K	Potássio
Mad	Teor de humidade
Mg	Magnésio
N	Azoto
Na	Sódio
NO	Óxido Nítrico
NO _x	Óxido de Azoto
NO ₂	Dióxido de Azoto
N ₂	Molécula de nitrogénio
O	Oxigénio
O ₂	Molécula de oxigénio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PM	Material Particulado
P _{ref}	Pressão de referência
S	Enxofre
Si	Silício
T	Temperatura
T _{ref}	Temperatura de referência

Zn**Zinco**

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO (DGEG (2019))	2
FIGURA 2 - CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA (DGEG, 2019)	2
FIGURA 3 - PERCENTAGEM DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS (IEA RENEWABLES, 2018)	3
FIGURA 4 - PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (DGEG, 2019)	4
FIGURA 5 - PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2016 (DGEG, 2019)	4
FIGURA 6 - PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2017 (DGEG, 2019)	5
FIGURA 7 - QUOTA DE ENERGIA ELÉTRICA, DA BIOMASSA E OUTRAS FONTES RENOVÁVEIS NA PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA RENOVÁVEL EM PORTUGAL, EM 2016 (DGEG, 2017)	10
FIGURA 8 - PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICOS DA BIOMASSA (ADAPTADO DE MCKENDRY, 2002B)	13
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO AR DE COMBUSTÃO (ADAPTADO DE MCGOWAN ET AL., 2010).	20
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MASSA DO MATERIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO. ADAPTADO DE: FERREIRA (2013).	27
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE COMBUSTÃO NOS DOIS MOMENTOS: FORNALHA E PERMUTADOR DE CALOR. ADAPTADO DE: QUAACK ET AL. (1999).	30
FIGURA 12 - ESTUFA LABORATORIAL VENTICELL 111	40
FIGURA 13 - BALANÇA KERN PLJ 6100	42
FIGURA 14 - FORNO MLM	42
FIGURA 15 - CADINHO COM TAMPA	43
FIGURA 16 - ANALISADOR LECO TRUSPEC CHN	45
FIGURA 17 - CALORÍMETRO LECO AC500	47
FIGURA 18 - MOINHO DE LÂMINAS RETSCH SM 200	49
FIGURA 19 - TIPOS DE BIOMASSA UTILIZADOS, ANTES E APÓS A TRITURAÇÃO	49
FIGURA 20 - BRIQUETADORA RUF	52
FIGURA 21 - ESQUEMA DA BRIQUETADORA RUF	53
FIGURA 22 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONITORIZAÇÃO DA COMBUSTÃO	50
FIGURA 23 - CALDEIRA ATMOS DC 25 SP	51
FIGURA 24 - ESQUEMA DA CALDEIRA COM A VISTA LATERAL E TRASEIRA	52
FIGURA 25 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA	52
FIGURA 26 - BALANÇA ADAM PW254	53
FIGURA 27 - CROMATÓGRAFO SIGNAL 3010	53
FIGURA 28 - ANALISADOR HORIBA PG 350E (ESQUERDA) E EQUIPAMENTO DADOLAB ST5 (DIREITA)	54
FIGURA 29 - ETAPAS DE UMA ACV	69
FIGURA 30 - SISTEMAS ENVOLVIDOS NA ACV	70
FIGURA 31 - DOIS TIPOS DE CENÁRIOS DIFERENTES NA ACV	71
FIGURA 32 - DIAGRAMA DE FLUXO CORRESPONDENTE A QUEIMA AO AR LIVRE (CENÁRIO 1)	74
FIGURA 33 - DIAGRAMA DE FLUXO DA COMBUSTÃO NUMA CALDEIRA (CENÁRIO 2)	74
FIGURA 34 - DADOS DO PROCESSO DE PODA NO CENÁRIO 1	75

FIGURA 35 - DADOS DA RECOLHA DA BIOMASSA DO CENÁRIO 1	76
FIGURA 36 - DADOS DA COMBUSTÃO AO AR LIVRE DO CENÁRIO 1	77
FIGURA 37 - DIAGRAMA DE FLUXO DO CENÁRIO 2 ONDE ESTÁ PRESENTE PODA, RECOLHA E SECAGEM DA BIOMASSA	77
FIGURA 38 - DADOS REFERENTES A RECOLHA NO CENÁRIO 2	78
FIGURA 39 - DADOS DA SECAGEM DA BIOMASSA NO CENÁRIO 2	78
FIGURA 40 - DIAGRAMA DE FLUXO CORRESPONDENTE AO PROCESSO DE BRIQUETES DO CENÁRIO 2	79
FIGURA 41 - DADOS REFERENTES AO PROCESSO DE TRITURAÇÃO NO CENÁRIO 2	79
FIGURA 42 - DADOS REFERENTES AO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO NO CENÁRIO 2	80
FIGURA 43 - DIAGRAMA DE FLUXO DA COMBUSTÃO DO CENÁRIO 2	80
FIGURA 44 - DADOS DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA CALDEIRA NO CENÁRIO 2	81
FIGURA 45 - RESULTADOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM AMBOS OS CENÁRIOS	82
FIGURA 46 - RESULTADOS DO MATERIAL PARTICULADO EM AMBOS OS CENÁRIOS	82
FIGURA 47 - RESULTADOS DA FORMAÇÃO FOTOQUÍMICA DE OZONO EM AMBOS OS CENÁRIOS	83
FIGURA 48 - RESULTADOS DA ACIDIFICAÇÃO DE AMBOS OS CENÁRIOS	83
FIGURA 49 - RESULTADOS DA EUTROFIZAÇÃO EM AMBOS OS CENÁRIOS	84

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA BIOMASSA	12
TABELA 2 - CONSTITUINTES LENHO-CELULÓSICOS DE ALGUNS TIPOS DE BIOMASSA (ADAPTADO DE MCKENDRY, 2002; ABBASI E ABBASI, 2010)	12
TABELA 3 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS BRIQUETES E PÉLETES (ADAPTADO DE VAN LOO E KOPPEJAN, 2008; WERTHER ET AL., 2000)	15
TABELA 4 - PARÂMETROS DE OPERAÇÃO TÍPICOS E PRODUTOS DOS PROCESSOS PIRÓLISE (ADAPTADO DE MCKENDRY, 2002B)	18
TABELA 5 - METODOLOGIA NOS ENSAIOS DE COMBUSTÃO	55
TABELA 6 - TEORES DE HUMIDADES UTILIZADOS NOS ENSAIOS	57
TABELA 7 - TEORES DE CINZAS NOS ENSAIOS	58
TABELA 8 - TEORES DE MATÉRIA VOLÁTIL	58
TABELA 9 - TEORES DE CARBONO FIXO DA BIOMASSA RESIDUAL	59
TABELA 10 - ANÁLISE ELEMENTAR DA BIOMASSA RESIDUAL	59
TABELA 11 - PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA RESIDUAL	60
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DOS BRIQUETES PRODUZIDOS COM A BIOMASSA RESIDUAL	61
TABELA 13 - CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE CADA UM DOS COMBUSTÍVEIS	62
TABELA 14 - COMPOSIÇÃO DO GÁS NA COMBUSTÃO	63
TABELA 15 - EMISSÕES NA COMBUSTÃO	64
TABELA 16 - EMISSÕES NA COMBUSTÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTÍVEL	66
TABELA 17 - FONTES, CARACTERÍSTICAS E EFEITOS NOCIVOS DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	93
TABELA 18 - PARÂMETROS DA BRIQUETADORA	95

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento energético	1
1.2	Objetivos	5
1.3	O Centro para a Valorização de Resíduos (CVR)	6
1.4	Estrutura e Organização do relatório.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Biomassa	9
2.2	Vantagens e desvantagens da biomassa.....	11
2.3	Propriedades da biomassa	12
2.4	Tecnologias de conversão da biomassa	13
2.4.1	Processos físicos	14
2.4.2	Processos físico-químicos	15
2.4.3	Processos bioquímicos	15
2.4.3.1	Hidrólise	16
2.4.3.2	Fermentação	16
2.4.3.3	Digestão anaeróbia	16
2.4.4	Processos termoquímicos	16
2.4.4.1	Liquefação.....	17
2.4.4.2	Pirólise	17
2.4.4.3	Gasificação	18
2.4.5	Combustão	18
2.4.5.1	Conceitos e princípios da combustão	19
2.4.5.2	Termoquímica	21
2.4.5.2.1	Frações mássicas e molares	21
2.4.5.2.2	Concentrações mássicas e molares.....	22
2.4.5.2.3	Estequiometria	22
2.4.5.2.4	Entalpia de formação	24
2.4.5.2.5	Entalpia de reação, entalpia de combustão e entalpia absoluta	25
2.4.5.2.6	Poder calorífico	26
2.4.5.3	Estágios de combustão	26
2.4.5.3.1	Ignição	27
2.4.5.3.2	Secagem	28
2.4.5.3.3	Combustão do resíduo sólido carbonoso.....	28

2.4.5.4	Poluentes resultantes da combustão	28
2.4.5.5	Análise do processo de combustão	30
2.4.5.5.1	Fornalha	30
2.4.5.5.2	Permutador de calor	31
3	CARATERIZAÇÃO DA BIOMASSA E PRODUÇÃO DE BRIQUETES.....	39
3.1	Caracterização da biomassa	39
3.1.1	Teor de humidade	39
3.1.2	Teor de cinzas.....	41
3.1.3	Teor de matéria volátil	42
3.1.4	Carbono fixo	43
3.1.5	Análise elementar	44
3.1.5.1	Teor de Carbono (C).....	45
3.1.5.2	Teor de Oxigénio (O).....	45
3.1.5.3	Teor de Hidrogénio (H)	45
3.1.5.4	Teor de Azoto (N).....	45
3.1.5.5	Teor de Enxofre (S)	46
3.1.5.6	Teor de Cloro (Cl)	46
3.1.6	Poder calorífico	46
3.1.7	Massa volúmica aparente (ou a granel)	47
3.1.8	Teor de metais alcalinos.....	47
3.1.9	Razão celulose/lenhina.....	48
3.2	Produção e caracterização de briquetes.....	48
3.2.1	Preparação das misturas	48
3.2.2	Briquetadora	50
3.2.2.1	Pré-tratamento	50
3.2.2.2	Briquetagem	51
3.2.2.3	Pós-tratamento.....	51
4	ENSAIOS DE COMBUSTÃO	49
4.1	Procedimento experimental	49
4.2	Instalação experimental.....	50
4.2.1	Caldeira.....	51
4.2.2	Balança	53
4.2.3	Cromatógrafo	53
4.2.4	Analisador dos gases de combustão	54
4.3	Metodologia dos ensaios	54
4.4	Avaliação da eficiência da caldeira	55

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
5.1	Propriedades da biomassa residual	57
5.1.1	Teor de humidade da biomassa residual.....	57
5.1.2	Teor de cinzas da biomassa residual	58
5.1.3	Teor de matéria volátil da biomassa residual.....	58
5.1.4	Teor de carbono fixo da biomassa residual.....	59
5.1.5	Análise elementar da biomassa residual	59
5.1.6	Poder calorífico da biomassa residual	60
5.2	Propriedades dos briquetes produzidos	60
5.3	Caraterização dos efluentes gerados na combustão	62
5.4	Composição do gás de combustão.....	62
5.5	Emissões de poluentes no gás de combustão.....	63
5.6	Comparação entre dois estudos	66
6	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	69
6.1	Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)	73
6.2	Modelação.....	74
6.3	Resultados.....	81
7	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	85
7.1	CONCLUSÕES.....	85
7.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	87
	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	89
	ANEXOS	93
	ANEXO A. FONTES, CARACTERISTICAS E EFEITOS NOCIVOS DOS POLUENTES ATMOSFERICOS MAIS COMUNS	93
	ANEXO A.1. Parâmetros da briquetadora	95

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento energético
- 1.2 Objetivos
- 1.3 O Centro para a Valorização de Resíduos (CVR)
- 1.4 Estrutura e Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, apresenta-se um enquadramento da situação energética atual no Mundo e em Portugal. Apresentam-se, ainda, os objetivos do trabalho e a organização da dissertação.

1.1 Enquadramento energético

Os combustíveis fósseis, desde a revolução industrial, desempenham um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico, social e económico. Presentemente estes recursos mantêm a sua posição dominante nos sistemas energéticos globais, sendo as fontes mais utilizadas para satisfazer a procura energética a nível mundial. Todavia têm vários impactos negativos agregados na Natureza, sendo uma das fontes dominantes de poluição, distribuída pelo mundo de forma não uniforme, originando dependências a nível energético em vários países, e contribuindo para o aumento do efeito de estufa. Como consequência, estes fatores desencadearam no mundo a busca de fontes energéticas alternativas, sobretudo as fontes de energia renovável, que têm como principais vantagens a emissão reduzida de gases responsáveis pelo efeito de estufa e o facto de serem fontes inesgotáveis de energia obtidas da Natureza, conduzindo a uma redução da dependência de combustíveis fósseis.

Segundo o relatório anual *International Energy Outlook 2017* (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2017), estima-se que o consumo mundial de energia aumente cerca de 28% entre 2015 e 2040. Os países que não pertencem à OCDE apresentam um consumo de energia superior, com uma tendência crescente, sendo justificada pelo crescimento da população e desenvolvimento económico dos países. Estima-se um aumento de 41% no consumo de energia nos países não pertencentes à OCDE, contrastando com o aumento de 9% nos países pertencentes a essa organização.

A evolução do balanço energético nacional, representada na Figura 1, segundo estudos realizados pela DGEG (2019), em 2017, continua a evidenciar o peso das importações de energia (27,71 Mtep, megatoneladas equivalente de petróleo), exibindo um aumento de 8,1% face a 2016. Por outro lado, a produção doméstica apresentou uma diminuição de 12,7% face ao ano anterior, situando-se nos 5,19 Mtep.

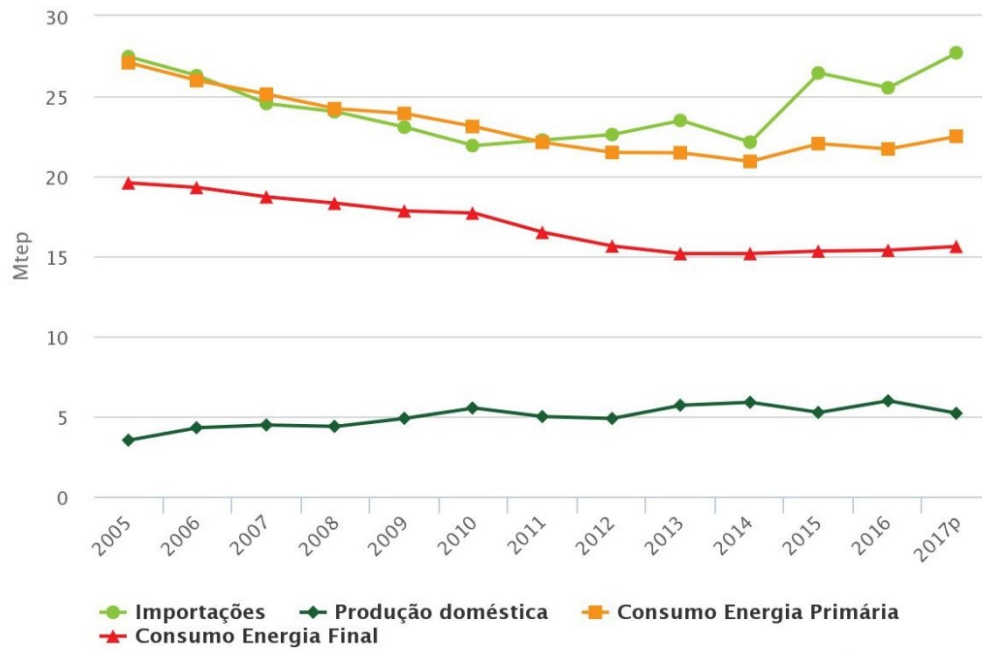


Figura 1 - Evolução do balanço energético (DGEG (2019))

No que ao consumo de energia diz respeito, verificou-se que, em 2017, o consumo de energia final cresceu 1,2% relativamente a 2016. Na Figura 2, observa-se que o consumo de energia primária também aumentou (+3,7%) face ao ano anterior, essencialmente devido à subida do consumo de gás natural e de carvão. No que toca ao consumo de energia primária por via da fonte energética, o petróleo e derivados permanecem a fonte energética mais utilizada, representando 40,2% do consumo de energia primária em 2017, seguindo-se o gás natural com 24,2%, o carvão com 14,4%, a biomassa com 12,6% e a energia elétrica com 7,0%.

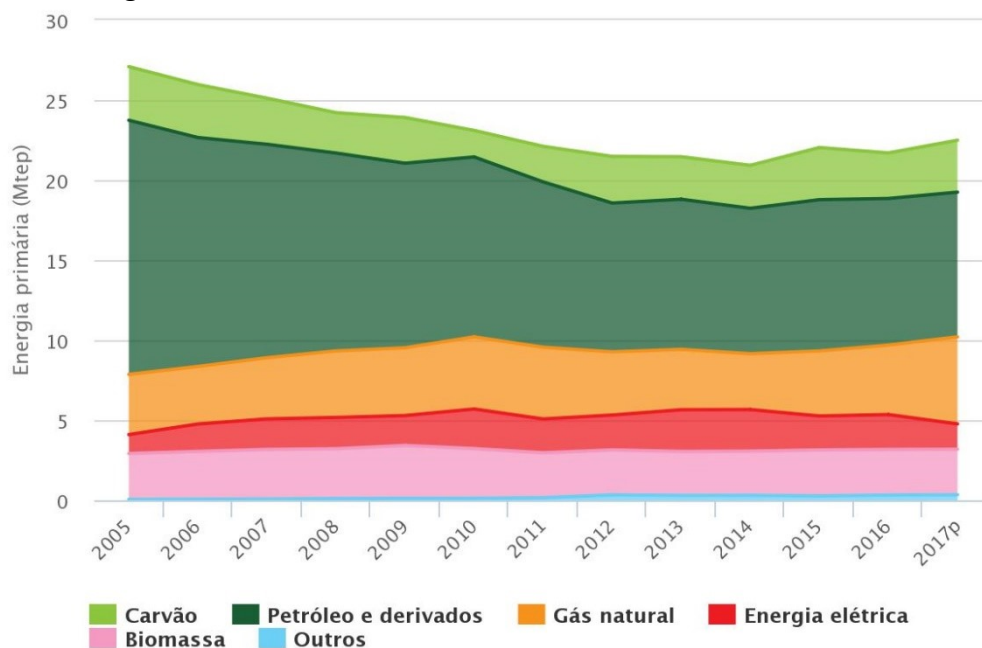


Figura 2 - Consumo de energia primária (DGEG, 2019)

Com a procura de novas opções de produção de energia, face ao desenvolvimento atual, a energia renovável está no centro de uma transição para um ecossistema menos intensivo em carbono e mais sustentável. A energia de fontes renováveis cresceu rapidamente nos últimos anos, acompanhada por fortes reduções de custos para a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, em particular. O setor de eletricidade continua a ser o ponto mais promissor para as energias renováveis, com o crescimento exponencial da energia solar fotovoltaica e eólica nos últimos anos, e com uma contribuição significativa da energia hidroelétrica. Mas, a eletricidade corresponde apenas a um quinto do consumo global de energia, e o papel da energia de fontes renováveis nos setores de transporte e aquecimento continua a ser crítico para a transição energética.

As fontes renováveis de energia têm um crescimento mais rápido no setor elétrico, como demonstra a Figura 3; forneceram quase 30% da energia em 2023, perante os 24% em 2017. Durante este período, as energias de fontes renováveis deverão refletir mais de 70% do crescimento global de eletricidade, liderado pela energia solar, seguido pela energia eólica, a energia hidroelétrica e a bioenergia. As fontes renováveis de energia nos transportes têm a menor contribuição dos três setores, com uma cota mínima de 3,4% em 2017 e prevista de 3,8% em 2023. Embora consigam expandir-se em quase um quinto durante o período previsto, as fontes renováveis de energia cobrem apenas uma pequena parte de todos os setores.

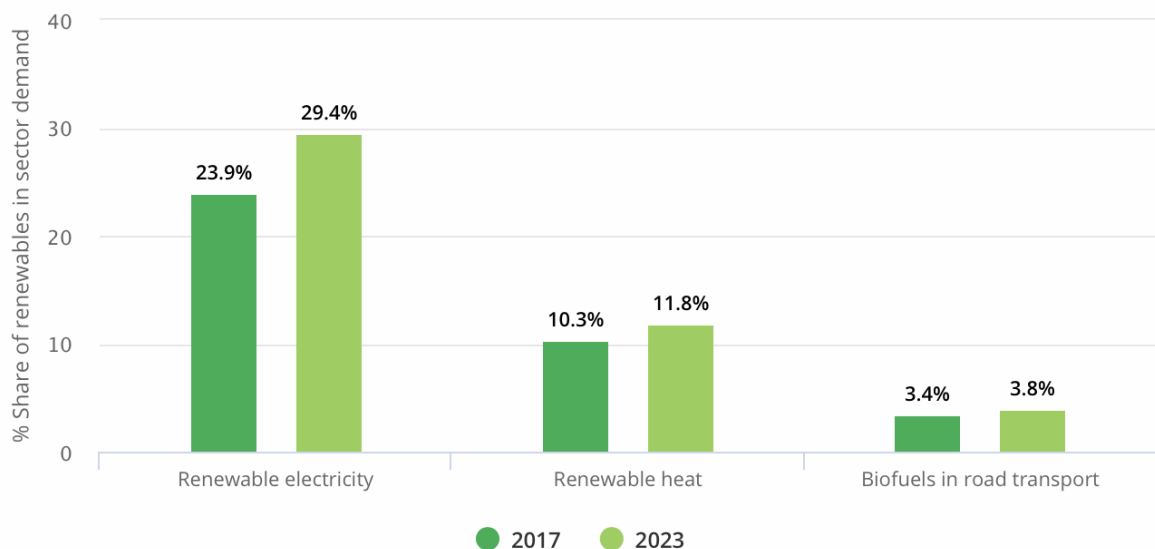


Figura 3 - Percentagem das energias renováveis (IEA Renewables, 2018)

Em Portugal no ano de 2016, a produção de energia renovável situou-se nos 5 089 ktep, em que, cerca de 55% tiveram origem na biomassa. Os biocombustíveis foram responsáveis por cerca de 6% da produção de energia renovável e o solar térmico por 1.7%. Na Figura 4, observa-se uma diminuição na produção de energia elétrica em 2017, devido à seca ocorrida nesse ano levando a uma quebra de 55,7% na produção hídrica.

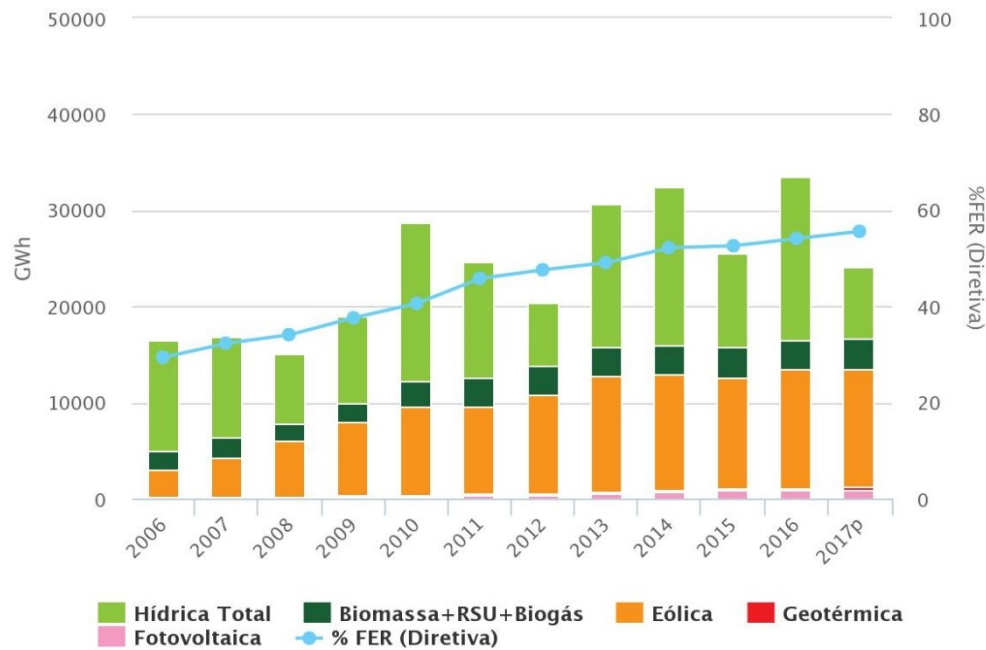


Figura 4 - Produção anual de energia renovável (DGEG, 2019)

Na Figura 5 e Figura 6, comparando a produção anual de energia elétrica entre os anos de 2016 e 2017, verifica-se que no ano de 2017 a produção por fontes renováveis registou uma descida face a 2016 (61,9% em 2016 para 45,5% em 2017). Esta diferença deveu-se à diminuição da componente hídrica, que passou de um peso de 31,3% em 2016 para 14,1% em 2017, na produção total da eletricidade.

Analisando a produção de energia elétrica por fonte renovável em 2017, constatou-se que a produção eólica foi responsável por 50,8% da energia elétrica produzida, seguindo-se a componente hídrica (31,1%), a biomassa (13,2%), a fotovoltaica (4%) e a geotérmica (0,9%).

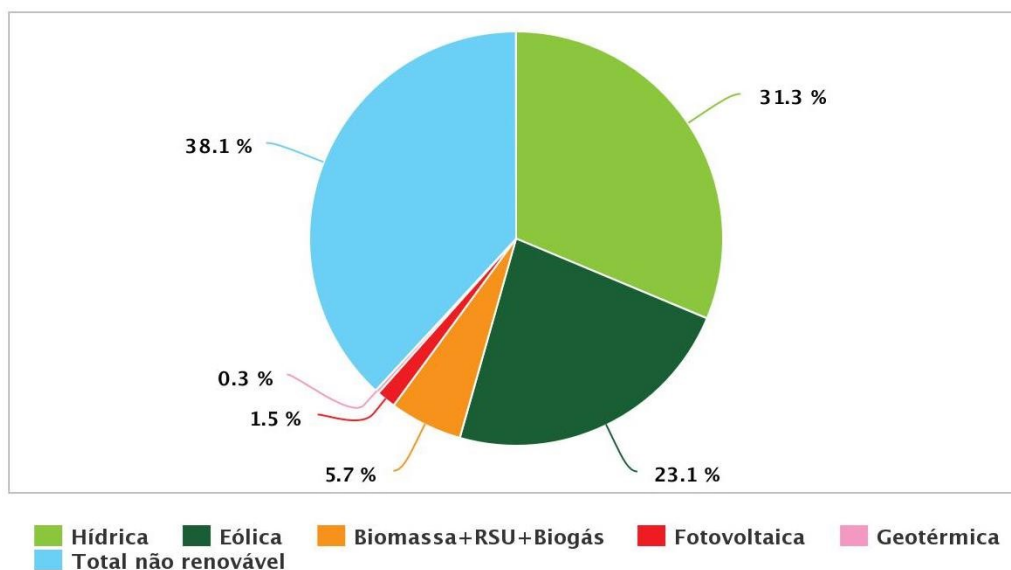


Figura 5 - Produção anual de energia elétrica em 2016 (DGEG, 2019)

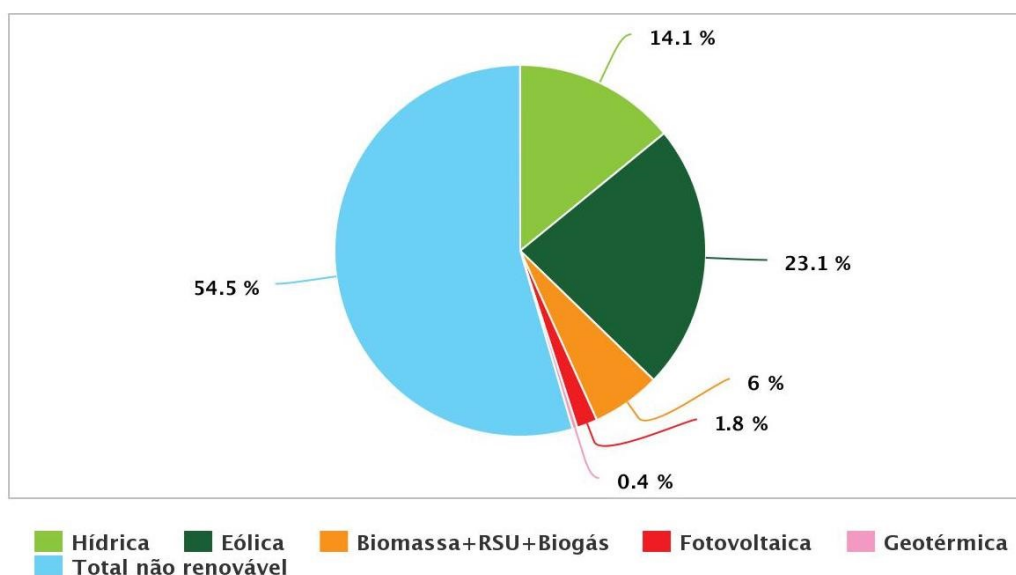


Figura 6 - Produção anual de energia elétrica em 2017 (DGEG, 2019)

A bioenergia é uma das principais opções para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e substituir os combustíveis fósseis, é uma fonte de energia atípica, devido à sua diversidade e interligações com muitas outras áreas tecnológicas e políticas. Por outro lado, a disponibilidade e o uso, da biomassa estão ligados a vários setores da economia. Essa conexão traz vantagens e desvantagens, por um lado, existem muitas oportunidades para obter benefícios além da produção de energia, em contraste a implementação destes sistemas pode entrar em conflito com interesses políticos e financeiros.

A nível mundial cerca de 13% do total de energia primária diz respeito a bioenergia, no uso tradicional de biomassa (cozinhar e aquecimento doméstico) é responsável por quase 8%. No que diz respeito à utilização da bioenergia através do uso moderno, engloba 5% dessa energia, é uma fonte de energia renovável importante, visto que, a sua contribuição para o consumo final de energia de todos os setores é maior do que a eólica e solar fotovoltaica combinadas, mesmo quando o uso tradicional da biomassa não é considerado. Em 2015 foram consumidos cerca de 13 EJ (Exajoule, 10×10^{17} J) de bioenergia para fornecer calor, correspondendo a 6% do consumo global de calor. Com o passar dos anos a bioenergia demonstra um crescimento não muito expressivo, cerca de 2% ano, oriundo de novos apoios e medidas políticas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como propósito o estudo da valorização de resíduos de biomassa como matéria-prima para a produção de CDRc (combustível derivado de resíduos compactado). Os produtos gerados para esta valorização serão caracterizados sob o ponto de vista químico, físico e térmico e a eficiência da sua combustão e consequentes emissões gasosas serão analisadas. Será ainda estudada a influência da composição e granulometria das matérias-primas na qualidade do CDRc, bem como,

avaliados os consumos energéticos que os mesmos produzem, por fim, será elaborada uma análise custo-benefício.

Durante o projeto foram produzidos briquetes, com recurso a uma briquetadora existente no CVR (Centro para a Valorização de Resíduos), com incorporação de podas urbanas, vinha, oliveira, macieira e kiwi. Foi estudado o comportamento desses produtos quando submetidos a combustão.

1.3 O Centro para a Valorização de Resíduos (CVR)

O CVR - Centro para a Valorização de Resíduos é uma instituição privada sem fins lucrativos que presta serviços de investigação, análise científica e aplicação de soluções reais na área da valorização de resíduos. Independentemente da área da atividade industrial, o CVR tem as competências necessárias para apoiar projetos e iniciativas relacionadas com uma ampla gama de resíduos industriais contribuindo para o desenvolvimento de novos processos para a gestão destes resíduos explorando quer o potencial energético quer o potencial material dos mesmos. Entre as diversas áreas de investigação praticadas no CVR destaca-se a recuperação de metais a partir de resíduos que os contenham em quantidades apreciáveis e que fazem destes bons candidatos para a recuperação de metais por metalurgia extrativa, assim como na área da incorporação de resíduos como materiais para a construção civil como por exemplo o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos contendo resíduos industriais tal como na incorporação de resíduos na produção de clínquer. Toda a atividade do Centro visa contribuir para a eficiente e eficaz gestão e valorização de resíduos, diminuindo ou anulando o seu impacto ambiente.

1.4 Estrutura e Organização do relatório

Este relatório está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução da dissertação onde se faz uma contextualização e uma referência aos objetivos do trabalho, assim como a organização do relatório. No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte sobre o tema em questão, fazendo referência há biomassa em geral, as vantagens e desvantagens do uso da mesma, propriedades da biomassa prestando atenção há sua composição elementar, as tecnologias de conversão de biomassa e por fim especificando um desses métodos que foi o utilizado nesta dissertação que é o processo de combustão. O terceiro e quarto capítulo corresponde ao desenvolvimento do trabalho, neles encontra-se uma caracterização da biomassa que foi utilizada neste trabalho, bem como, a produção e caracterização dos briquetes produzidos através das podas provenientes da biomassa, na segunda parte do desenvolvimento do trabalho foi dada especial atenção aos ensaios de combustão onde consta a instalação experimental utilizada durante os mesmos ensaios, metodologia

seguida para a realização dos mesmos, bem como uma avaliação da eficiência da caldeira. No quinto capítulo é onde esta apresentado a discussão e análise de resultados desta dissertação dando um especial foco as análises de resultados da combustão utilizando os briquetes de serrim e de podas da biomassa. No sexto capítulo encontra-se uma avaliação de ciclo de vida simplificada, capaz de avaliar qual a etapa que provoca mais emissões. Por fim, no último capítulo são reunidas as principais conclusões resultantes deste estudo e as propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Biomassa
- 2.2 Vantagens e desvantagens da biomassa
- 2.3 Propriedades da biomassa
- 2.4 Tecnologias de conversão da biomassa

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

Conforme consta no Decreto-lei no 127/2013 de 30 de agosto, a biomassa é definida como *“produtos que consistem, na totalidade ou em parte, numa matéria vegetal proveniente da agricultura ou da silvicultura que pode ser utilizada como combustível para efeitos de recuperação do seu teor energético, bem como os seguintes resíduos quando utilizados como combustível:*

- *Matéria-prima vegetal resultante de atividades nos domínios da agricultura e da silvicultura;*
- *Resíduos vegetais da indústria de transformação de produtos alimentares, se o calor gerado for recuperado;*
- *Resíduos vegetais fibrosos da indústria de pasta virgem e de produção de papel, se forem coincinerados no local de produção, e se o calor gerado for recuperado;*
- *Matérias-primas de cortiça;*
- *Resíduos de madeira, com exceção dos que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes ou revestimento incluindo, em especial, resíduos de madeira deste tipo provenientes de obras de construção e demolição.”*

Assim, numa breve definição, a biomassa é a matéria orgânica disponível numa base renovável que pode ser utilizada como fonte de energia, agrupando-se em quatro grupos: floresta, agricultura, indústria e resíduos urbanos e industriais. Apresenta ainda o detalhe de poder ser convertida em combustível gasoso (podendo ser biogás), líquidos (como o biodiesel ou etanol) ou sólidos (como os *pellets* ou briquetes), o que não acontece com as restantes fontes de energia renovável.

A utilização da biomassa para gerar energia não provoca um aumento líquido das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, por outras palavras, a sua utilização não contribui para as mudanças climáticas, considerando-se neutra, no que diz respeito às emissões. Acresce ainda que o seu uso para a produção de bioenergia permite eliminar resíduos que criam certos riscos ambientais. A biomassa tem inúmeras utilidades energéticas como produção de eletricidade, fornecimento de calor para instalações industriais, aquecimento e arrefecimento de edifícios e combustível para veículos (Carneiro & Ferreira, 2012).

O uso da biomassa para produzir energia começou a despertar interesse quando as reservas de combustíveis fósseis convencionais apresentaram uma diminuição,

obrigando um uso maior das fontes de energia renovável. Apesar da emissão de gases de efeito de estufa e de óxidos de enxofre serem moderados vai de encontro às medidas políticas discutidas no que toca a melhoria da sustentabilidade ambiental, relativamente ao processo de produção de energia. Além disso, reduz a dependência energética externa proveniente de outros países e cria novas oportunidades de emprego (Carneiro & Ferreira, 2012).

Em 2009, a produção de eletricidade utilizando fontes de biomassa representou 1,2% da eletricidade total gerada em todo o mundo e com uma participação de 6,3% de toda a eletricidade renovável. Destes, cerca de 71% foram obtidos a partir de biomassa sólida, 16,8% de biogás e biomassa líquida e 12,2% de resíduos sólidos urbanos (RSU) (Carneiro & Ferreira, 2012).

Atualmente, o consumo de energia primária no mundo, proveniente da biomassa, é cerca de 10%, sendo a quarta fonte mais utilizada no Mundo, a seguir ao petróleo, ao carvão e ao gás natural (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2017). Com o avanço dos anos, o interesse no uso da biomassa para fins energéticos é cada vez maior, essencialmente motivado por questões políticas e ambientais.

Na Figura 7, apresenta-se a contribuição da energia elétrica proveniente da biomassa e de outras fontes renováveis (onde se inclui a solar térmica e a geotermia de baixa entalpia) na produção nacional de energia renovável no ano de 2016, podendo verificar-se que 60,5% da produção provém da biomassa. Ainda, é possível analisar a participação das várias formas de biomassa disponíveis, tais como lenha e resíduos florestais, pellets e briquetes, biogás, biocombustíveis líquidos e outras (onde inclui-se uma fração dos resíduos sólidos urbanos), na produção de energia renovável a nível nacional no ano de 2016.

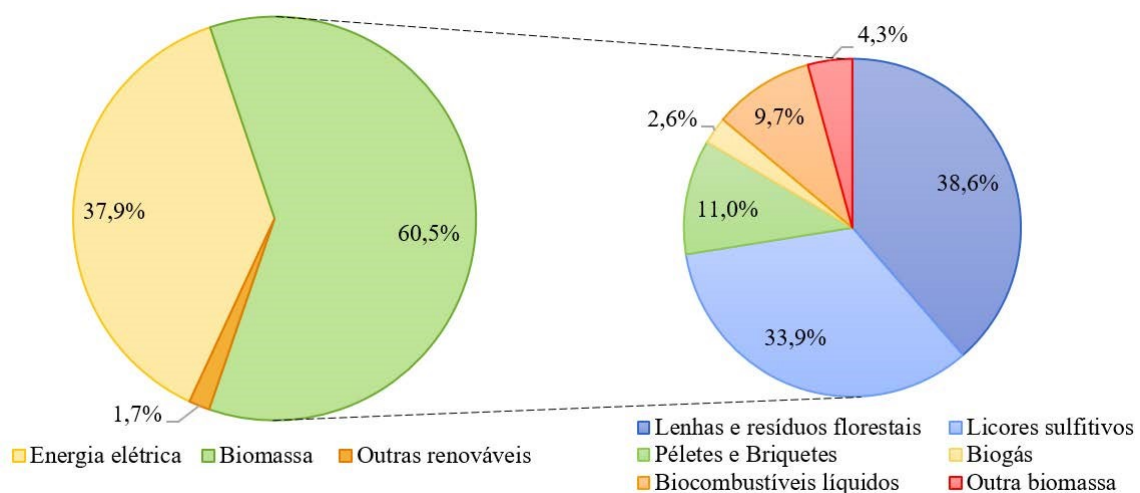


Figura 7 - Quota de energia elétrica, da biomassa e outras fontes renováveis na produção anual de energia renovável em Portugal, em 2016 (DGEG, 2017)

2.2 Vantagens e desvantagens da biomassa

A biomassa já era usada de várias formas, mesmo antes de se falar sobre a sua eficiência energética e como fonte de energia renovável.

A disponibilidade da biomassa como combustível sempre foi uma das principais vantagens para o seu uso, mas como todos os combustíveis também apresenta algumas desvantagens. A quantidade de carbono libertado para a atmosfera é um dos contribuintes para as mudanças climáticas, sendo a biomassa um combustível capaz de reduzir uma parte natural do ciclo do carbono, ao contrário do petróleo e outros combustíveis fósseis, visto que, o único carbono que é libertado para a atmosfera é o que foi absorvido pelas plantas durante o seu ciclo de vida. Quanto mais usarmos a biomassa para produzir energia, menos dependemos dos combustíveis fósseis. A biomassa é uma matéria-prima em abundância, tornando-se uma fonte de combustíveis mais prontamente disponível. A energia da biomassa é frequentemente proveniente dos resíduos que apodrecem nos aterros sanitários, o que reduz a contaminação de habitats locais, originando uma redução das áreas necessárias para criar aterros sanitários.

Contudo a biomassa apresenta custos de extração, apesar de serem menores do que a maioria dos tipos de combustíveis fósseis, geralmente excedem os de muitas outras formas de energia renovável. Em alguns casos, considera-se que os projetos de biomassa não valem o preço de conclusão, especialmente quando estão disponíveis alternativas de energia solar, água e vento. Além disso, o custo do equipamento utilizado na extração também é um fator, como o transporte da biomassa.

Embora os combustíveis de biomassa sejam renováveis, reduzem massivamente as áreas habitáveis disponíveis para dezenas de espécies levando à sua extinção. Este é um fator importante que impede o uso de combustíveis de biomassa em larga escala, uma vez que os esforços de reposição podem não ser capazes de acompanhar a quantidade de combustível necessária. Embora a biomassa seja neutra em carbono, ela não é completamente limpa; a queima de madeira e outras plantas produzem outras emissões além do carbono, estes podem poluir o ambiente local, mesmo que os efeitos não sejam tão drásticos quanto podem ser os dos combustíveis fósseis. Contudo, as biomassas não são tão eficientes quanto os combustíveis fósseis processados, como o petróleo e a gasolina. Na verdade, o biodiesel e biocombustíveis equivalentes são frequentemente combinados com pequenas quantidades de combustíveis fósseis para torná-los mais eficazes, por sua vez, reduz a eficácia desses biocombustíveis como um meio de reduzir o uso de recursos de combustíveis fósseis. Na Tabela 1, apresenta-se uma síntese das vantagens e desvantagens do uso da biomassa.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso da biomassa

Vantagens	Desvantagens
Diminuição de dependência dos combustíveis fósseis	Custos elevados
Neutra em emissões de dióxido de carbono	Efeitos nefastos nos ecossistemas naturais (desflorestação)
Matéria prima abundante	Emissões de partículas para o ecossistema
Redução dos desperdícios da biomassa	Matéria-prima ineficiente em comparação com os combustíveis fósseis

2.3 Propriedades da biomassa

A biomassa é constituída, essencialmente, por celulose, hemicelulose, lenhina, lípidos, proteínas, açúcares simples, amido, água, hidratos de carbono e cinzas (Khan, de Jong, Jansens, & Spliethoff, 2009). Os três primeiros tipos são os principais integrantes da biomassa e incluem cerca de metade da matéria da planta produzida por fotossíntese, representando a fonte orgânica renovável mais abundante da Terra (Abbasi & Abbasi, 2010). Na Tabela 2 apresenta-se a percentagem típica de hemicelulose, celulose e lenhina de biomassa (Abbasi & Abbasi, 2010; McKendry, 2002a).

Tabela 2 - Constituintes lenho-celulósicos de alguns tipos de biomassa (adaptado de McKendry, 2002; Abbasi e Abbasi, 2010)

Exemplos de Biomassa	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Lenhina (%)	Cinzas (%)
Cascas de nozes	25-30	25-30	30-40	NA
Espigas de milho	35	45	15	1.36
Palha de arroz	24	32.1	18	NA
Palha de trigo	26-32	29-35	16-21	NA
Palha de cevada	24-29	31-34	14-15	5-7
Palha de aveia	27-38	31-37	16-19	6-8
Palha de centeio	27-30	33-35	16-19	2-5
Bambu	15-26	26-43	21-31	1.7-5
Centeio (folha)	15.8	21.3	2.7	NA
Centeio (semente)	25.7	26.7	7.3	NA
Resíduos de banana	14.8	13.2	14	11.4
Madeira de folhosas	24-40	40-55	18-25	NA
Madeira de resinosas	25-35	45-50	25-35	NA

Relativamente à composição química típica da biomassa, o carbono e o oxigénio juntos representam mais de 90% da massa, sendo os restantes 10% dos elementos, o hidrogénio, azoto, cloro e enxofre. Importa referir que, apesar da sua reduzida presença, na composição da biomassa, o azoto é um elemento essencial para o crescimento das plantas (Khan et al., 2009).

As principais propriedades que influenciam o desempenho da biomassa enquanto combustível, na escolha do processo de conversão energético mais adequado são: o poder calorífico, o teor de humidade, a massa volúmica, a quantidade de matérias voláteis, quantidade de carbono fixo, o teor de cinzas, o teor de metais alcalinos e a razão de celulose/lenhina (Ferreira, Paiva, & Pinho, 2013). Seguidamente, serão abordadas cada uma das propriedades supramencionadas.

2.4 Tecnologias de conversão da biomassa

A biomassa, após aplicação do correspondente tratamento, pode ser transformada em três formas de energia: eletricidade, energia calorífica ou combustível. Devido à sua elevada variabilidade, são diversos os processos de transformação da biomassa em energia, sendo necessário escolher o adequado de acordo com o tipo de biomassa e o tipo de aplicação térmica, a disponibilidade da matéria-prima e essencialmente a forma de energia pretendida no final do processo. A conversão da biomassa pode ocorrer através de processos físicos, físico-químicos, termoquímicos e bioquímicos, tal como é possível observar na Figura 8 – refira-se que o gráfico da Figura 8 foi elaborado com base em várias fontes da literatura (Abbasi & Abbasi, 2010; McKendry, 2002b).

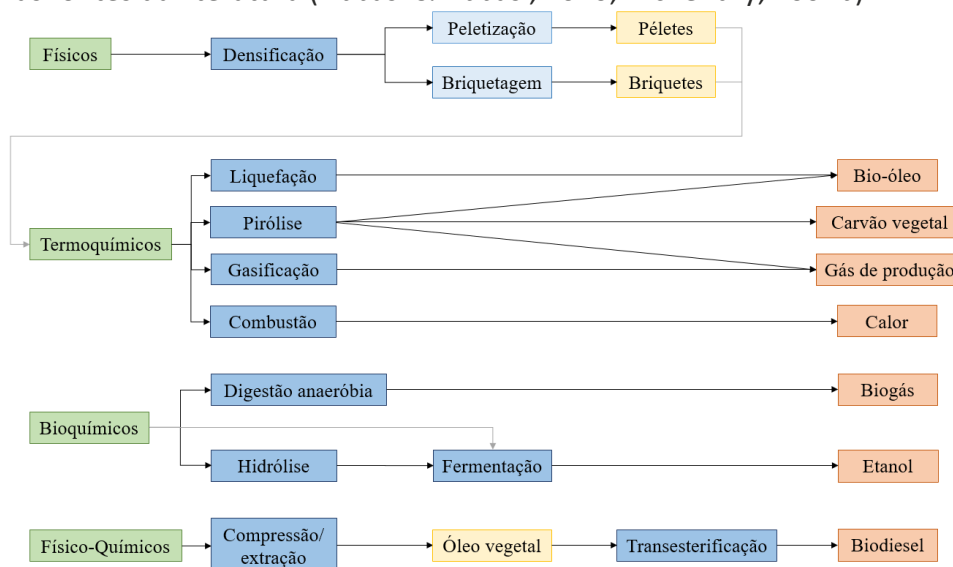


Figura 8 - Processos de conversão energéticos da biomassa (adaptado de Abbasi & Abbasi, 2010; McKendry, 2002b)

2.4.1 Processos físicos

No que diz respeito a este tipo de processo, não é considerado exatamente um processo de conversão energética da biomassa, uma vez que atua apenas fisicamente sobre toda a biomassa. Os processos físicos, tendo como matéria-prima o serrim, resíduos florestais, estão associados a todas as etapas primárias da transformação da biomassa, como o corte, a moagem da palha, a secagem, a densificação, entre outros (Werther et al., 2000).

Na Figura 8, apenas se representou o processo de densificação, sendo possível observar que os seus produtos finais constituem a matéria-prima dos processos termoquímicos, consistindo, na conversão intermédia da biomassa num produto final com características mais adequadas para a queima. Tal como exposto anteriormente, a biomassa, no seu estado natural, apresenta várias desvantagens como combustível, sendo a principal a nível energético, observada no processo de combustão. Como referido anteriormente, este combustível apresenta alto teor de humidade, geometria irregular e variável e, quando comparado com os combustíveis fósseis convencionais, reduzida massa volúmica aparente, reduzida densidade energética e composição química mais complexa (Almeida, Ferreira, Marques, Paiva, & Pinho, 2013; Ferreira et al., 2013). A densificação é, então, um processo essencial de compactação da biomassa, que consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligantes ou tratamento térmico.

Como exemplos de processos de densificação destacam-se a peletização e a briquetagem. Estes processos envolvem interações entre as partículas que constituem a biomassa, sendo influenciados pelas características da matéria-prima após o destroçamento (teor em humidade e distribuição das partículas) e pelas variáveis do próprio processo. Permitem melhorar as propriedades físicas da biomassa sólida, transformando-a num material densificado e com geometria regular, facilitando o manuseamento e diminuindo os custos de transporte e armazenamento (Diana Almeida, Edmundo Marques, & João Monney Paiva, 2016; Ferreira et al., 2013). Para além disto, estes processos provocam um aumento do valor do PCI da biomassa e possibilitam uma combustão mais uniforme, com menor emissão de partículas para a atmosfera (Da Silva, Yamaji, De Barros, Da Róz, & Nakashima, 2015; Werther et al., 2000).

O processo de briquetagem será abordado com maior detalhe, visto que vai ser o processo de densificação dos combustíveis sólidos a utilizar nos ensaios de queima da presente dissertação. Nesta fase, considerou-se relevante fazer uma distinção entre os briquetes e os pellets, uma vez que são produtos resultantes de processos muito semelhantes.

Os briquetes variam bastante na sua dimensão e forma, apresentando, na maioria das vezes, uma geometria cilíndrica e uma dimensão superior aos péletes (LOVEJOY, 2009). O processo de peletização exibe algumas vantagens face à briquetagem, incluindo uma maior gama de teor de humidade admissível da biomassa e uma maior produção. Por outro lado, a peletização utiliza um processo mais exigente, tanto ao nível do tratamento da biomassa antes do processo (corte, moagem e prensagem) como dos equipamentos requeridos. O processo de briquetagem apresenta, deste modo, custos de investimento e de operação mais reduzidos, bem como equipamentos menos sofisticados (Khan et al., 2009; Werther et al., 2000). Na Tabela 3, apresenta-se uma síntese das propriedades e características dos produtos de densificação supramencionados (Loo & Koppejan, 2008; Werther et al., 2000).

Tabela 3 - Comparação das características dos briquetes e péletes (adaptado de Van Loo e Koppejan, 2008; Werther et al., 2000)

	Briquetes de madeira	Péletes de madeira
Diâmetro [mm]	40 - 120	4 - 10
Comprimento [mm]	< 400	< 5 vezes o diâmetro
Massa volúmica de partículas [t/m³]	> 1,00	> 1,12
Teor humidade admissível [%]	10 - 15	10 - 20
Teor de cinzas após combustão (base seca)	≤ 1,5	< 0,7
Produção [t/h]	1 - 1,5	4 - 6
Energia consumida [kWh/t]	40 - 50	80 - 90

2.4.2 Processos físico-químicos

Os processos físico-químicos de conversão consistem, inicialmente, numa compressão ou prensagem de matérias vegetais diversas (compressão mecânica), seguida da extração de óleos vegetais, para posterior transformação química, por exemplo, através do processo de transesterificação. Este processo tem como produto final o biodiesel e consiste numa reação química onde os óleos vegetais, mais propriamente os triglicerídeos que os constituem, reagem com um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador. O processo mais comum é a transesterificação alcoólica por via catalítica básica, ácida ou enzimática (Ho, Ng, & Gan, 2016; Srivastava & Prasad, 2000).

2.4.3 Processos bioquímicos

Enquanto os processos termoquímicos conseguem converter em energia a maioria dos componentes orgânicos da biomassa, os processos bioquímicos convertem os compostos derivados das proteínas, lípidos, polissacarídeos, etc. Estes processos são

caracterizados pela utilização de agentes biológicos, como enzimas, bactérias e outros microrganismos, para converter a biomassa em açúcares e aminoácidos e, posteriormente, em biocombustíveis líquidos ou gasosos (Abbasi & Abbasi, 2010; Zhang, Xu, & Champagne, 2010). Neste grupo estão incluídos os processos de hidrólise, fermentação e digestão anaeróbia, caracterizados de seguida.

2.4.3.1 Hidrólise

A hidrólise é a decomposição da biomassa lenho-celulósica, composta por polissacarídeos, em açúcares mais simples e solúveis para eventual fermentação, pela ação de enzimas ou de reagentes químicos ácidos ou bases.

2.4.3.2 Fermentação

A fermentação é o processo biológico em que os açúcares provenientes da hidrólise são convertidos em etanol, com libertação de CO₂, por intermédio de microrganismos (leveduras). A fermentação é a tecnologia mais empregue a nível mundial para a produção de etanol (McKendry, 2002b).

2.4.3.3 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é a conversão da biomassa em biogás por intermédio de bactérias num ambiente sem oxigénio (Cantrell, Ducey, Ro, & Hunt, 2008; McKendry, 2002b).

2.4.4 Processos termoquímicos

Em relação à conversão da biomassa pela via termoquímica, existem quatro tecnologias principais, como a liquefação, a pirólise, a gasificação e a combustão, permitindo a obtenção de energia sob a forma de combustível ou de calor. Estes processos envolvem a conversão da energia química armazenada na biomassa, através de processos térmicos, que envolvem o aquecimento da biomassa na presença de diferentes concentrações de oxigénio (Abbasi & Abbasi, 2010; Loo & Koppejan, 2008).

2.4.4.1 Liquefação

A liquefação é um processo de conversão da biomassa em produtos de matriz líquida, utilizando baixas temperaturas, compreendidas entre 250 e 350 °C, e altas pressões na gama de 100 a 200 bar, geralmente com uma elevada pressão parcial de hidrogénio e na presença de um catalisador. Deste método, resulta maioritariamente um combustível em fase líquida, o bio-óleo, o qual, pode ser transformado num combustível líquido para os motores de combustão interna ou usado diretamente na produção de eletricidade ou calor (Loo & Koppejan, 2008).

2.4.4.2 Pirólise

A pirólise é um processo de degradação térmica da biomassa que ocorre na ausência de oxigénio, do qual podem resultar produtos distintos: carvão vegetal (carbonizado, resíduo sólido carbonoso), bio-óleo, *biochar*, biogás e gás de produção (também designado de gás de síntese ou *syngas*). A fração de cada produto é função da temperatura de operação, do tempo de residência, da taxa de aquecimento e, em menor escala, da pressão de operação (Demirbas, Balat, & Balat, 2009; Zhang et al., 2010). A pirólise pode ser dividida em três subgrupos, pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise flash. Na pirólise lenta, a obtenção de *biochar* é o objetivo principal, obtendo-se maiores rendimentos deste produto em comparação com o bio-óleo. Os processos de pirólise lenta podem ser divididos em pirólise lenta convencional e torrefação. Na carbonização atingem-se temperaturas de cerca de 400 °C, enquanto que na pirólise lenta convencional atingem-se temperaturas de cerca de 600 °C, e tem sido aplicada principalmente para a produção de *biochar*. Na pirólise convencional, os tempos de residência dos gases são da ordem dos minutos (normalmente entre os 5 e os 30 minutos), visto que, na carbonização, são aplicados longos tempos de residência, de horas ou até dias, com velocidades de aquecimento muito baixas. A pirólise rápida é um processo que ocorre a elevadas temperaturas, sendo que a biomassa é rapidamente aquecida, favorecendo a produção de produtos líquidos e gasosos. Os processos de pirólise rápida produzem cerca de 60-75% (p/p) de bio-óleo líquido, 15-25% (p/p) de carvão sólido e 10-20% (p/p) de gases não condensáveis, dependendo da matéria-prima utilizada. Os tempos de residência aplicados são da ordem dos segundos (0,5 a 10 s, normalmente <2 s) e as velocidades de aquecimento são muito elevadas (>10 a 200 °C/s). Esta tecnologia pode ter custos de investimento relativamente baixos e elevada eficiência energética em comparação com outros processos, principalmente quando realizada em pequena escala. O processo de pirólise *flash* caracteriza-se por temperaturas ainda mais elevadas do que a pirólise rápida (superiores a 1000 °C), por velocidades de aquecimento também mais elevadas e tempos de residência mais baixos (< 0,5 s), resultando em rendimentos de bio-óleo muito altos, que podem atingir até 75-80% (p/p). Deste modo, a produção de bio-óleo a partir de pirólise de biomassa é

tipicamente realizada através de pirólise *flash* (Di Blasi, 2008; McKendry, 2002b; Zhang et al., 2010).

Na Tabela 4 encontra-se o resumo das principais condições operacionais para os diferentes tipos de pirólise.

Tabela 4 - Parâmetros de operação típicos e produtos dos processos pirólise (adaptado de McKendry, 2002b)

	Pirólise lenta	Pirólise rápida	Pirólise flash
Temperatura da pirólise [°C]	277 – 677	577 – 977	777 - 1026
Velocidade de aquecimento [K.s⁻¹]	0,1 – 1,0	10 – 200	> 1000
Tamanho das partículas [mm]	5,0 – 50,0	< 1,0	< 0,2
Tempo de residência dos sólidos [s]	450 – 550	0,5 – 10,0	< 0,5
Rendimento do Bio-óleo [%]	30,0	50,0	75,0
Rendimento em Biochar [%]	35,0	20,0	12,0
Rendimento em Biogás [%]	35,0	30,0	13,0

2.4.4.3 Gasificação

A gasificação é o processo de decomposição térmica de um material sólido, rico em carbono, num combustível gasoso, através da oxidação parcial a temperaturas na ordem dos 800 a 1100 °C. Este processo ocorre na presença de baixa concentração de oxigénio, inferior à da combustão (tipicamente cerca de 35% da concentração da combustão completa). O principal produto deste processo é o gás de síntese, sendo constituído maioritariamente por H₂, CO, CO₂, CH₄ e hidrocarbonetos leves. Ao contrário da combustão, cujo objetivo é a geração de calor, na gasificação o intuito é formar produtos gasosos que podem ser usados diretamente na combustão ou armazenados para outras aplicações (McKendry, 2002b; Zhang et al., 2010).

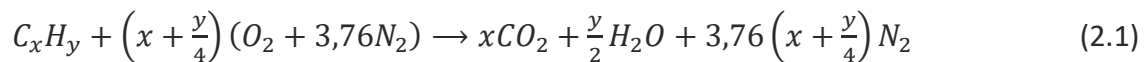
2.4.5 Combustão

A combustão é o processo mais utilizado e mais direto da conversão da biomassa em energia útil, sendo, na sua essência, uma reação exotérmica rápida de oxidação de um combustível. Contudo, de um ponto de vista tecnológico, os fenómenos deste processo apresentam elevada complexidade, sendo o seu estudo do domínio de três ramos da ciência, a Química, a Termodinâmica e a Aerodinâmica. O processo de combustão depende tanto da aplicação da combustão como das propriedades do combustível, nomeadamente o teor de humidade, o tamanho de partícula, a composição elementar e imediata e o poder calorífico (Loo & Koppejan, 2008; Quaak et al., 1999).

2.4.5.1 Conceitos e princípios da combustão

Antes da análise das várias etapas existentes no processo da combustão, considerou-se relevante introduzir alguns princípios e conceitos necessários à compreensão do mesmo. Para uma descrição completa da combustão é necessário conhecer a equação química referente ao processo. Primeiramente, importa referir que, durante a combustão, existe conservação da massa, pelo que o número de átomos de cada elemento é o mesmo, tanto nos reagentes como nos produtos.

Nesta fase inicial, considera-se o combustível um hidrocarboneto simples, C_xH_y , e o comburente o ar atmosférico, sendo composto, simplificado, por 21% de O_2 e 79% de N_2 (v/v). Se nos produtos da combustão aparecerem moléculas combustíveis, como por exemplo monóxido de carbono, hidrogénio e hidrocarbonetos, a combustão diz-se incompleta. Em contrapartida, se todo o combustível for queimado, ou, por outras palavras, quando todos os elementos presentes no combustível (C, H, S, etc.) se combinam com o oxigénio do ar, produzindo produtos finais quimicamente estáveis, a combustão diz-se completa. A quantidade mínima de ar que fornece o O_2 necessário e suficiente para a combustão completa designa-se ar teórico, sendo, neste caso, a mistura ar/combustível conhecida por mistura estequiométrica. Atendendo a todos os conceitos introduzidos, a equação estequiométrica da reação de combustão entre um hidrocarboneto simples e o ar atmosférico é dada pela equação 2.1.



Na prática, a combustão completa não é conseguida a menos que a quantidade de ar seja superior à quantidade teórica, uma vez que a mistura ar/combustível não é perfeitamente homogénea, devido às características da fornalha, do queimador e do escoamento.

A quantidade de ar realmente fornecida ao processo é expressa em termos de percentagem de ar teórico. Para isso definiram-se parâmetros que são frequentemente utilizados na análise da combustão: a razão AC , sendo a razão entre a massa de ar e a massa do combustível; a razão CA , inverso do parâmetro anterior; e a riqueza da mistura r , definida pelo quociente entre AC estequiométrica e AC real. Deste modo, se $r = 1$ a combustão é neutra, sendo a mistura ar/combustível estequiométrica; se $r > 1$ a combustão é redutora, sendo a mistura rica e existindo excesso de combustível; e se $r < 1$ a combustão é oxidante, sendo a mistura pobre e existindo excesso de ar. No caso geral da combustão em fornalhas, as misturas são predominantemente pobres, empregando-se o conceito de excesso de ar e , definido na equação 2.2 (McGowan, Brown, Bulpitt, & Walsh, 2010). Contudo, a determinação prática do excesso de ar é realizada por intermédio da medição da composição dos gases de combustão, em base seca.

$$e = \frac{1-r}{r} * 100 \quad (2.2)$$

Apesar da combustão dever processar-se com excesso de ar, para garantir a queima do combustível, importa referir que quanto maior o valor do excesso de ar, menor o comprimento da chama e menores as temperaturas da corrente de gases de combustão, diminuindo a energia térmica disponível.

Na Figura 9, apresenta-se a dependência da temperatura na câmara de combustão com o ar de combustão, identificando a zona da combustão incompleta, a zona ótima e a zona inconveniente, dado a temperatura dos gases ser muito reduzida (zona da combustão a baixa temperatura). O valor ótimo do excesso de ar depende, assim, da fornalha, do combustível e do sistema de combustão, sendo que, valores típicos para a queima de madeira em caldeiras sofisticadas encontram-se na gama de 160 a 250% (Quaak et al., 1999).

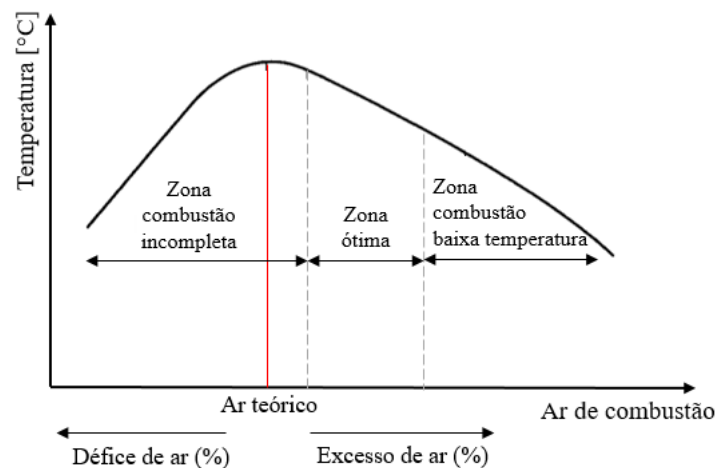
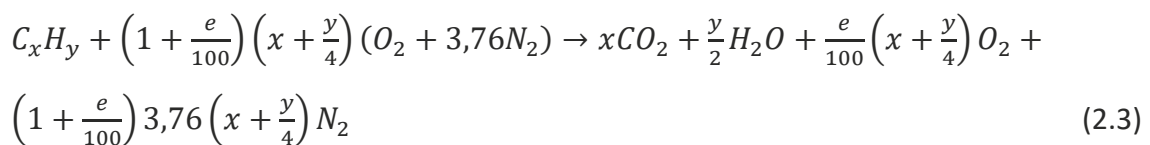


Figura 9 - Representação gráfica da temperatura em função do ar de combustão (Adaptado de McGowan et al., 2010).

Introduzindo, agora, o conceito de excesso de ar, a reação de combustão oxidante completa de um hidrocarboneto simples é dada pela equação 2.3.



Contudo, na prática, a combustão oxidante não é completa, mas incompleta, como veremos no caso apresentado na presente dissertação. Neste tipo de combustão, os produtos de combustão, para além de CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 , ainda incluem CO , NO_x , H_2 , hidrocarbonetos não queimados e partículas sólidas.

2.4.5.2 Termoquímica

Para que ocorra uma combustão deve existir uma mistura com, pelo menos, duas espécies químicas conhecidas por combustível e oxidante. Ao combustível corresponde a matéria que possui acumulada energia química passível de ser convertida em calor e/ou luz e ao oxidante a matéria que possui na sua constituição o elemento Oxigénio (normalmente ar atmosférico) e que é responsável pela oxidação exotérmica. Para que seja possível realizar os cálculos necessários à avaliação teórica da proporção de ambas as partes, a composição desta mistura deve ser caracterizada através de frações mássicas e/ou molares das espécies químicas que a constituem.

2.4.5.2.1 Frações mássicas e molares

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

$$y_i = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (2.4)$$

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

$$x_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \quad (2.5)$$

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

$$m_i = n_i * M_i \quad (2.6)$$

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

$$m_{tot} = \sum_{j=1}^N n_j * M_j \quad (2.7)$$

2.4.5.2.2 Concentrações mássicas e molares

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

$$[X_i] = \frac{n_i}{V} \quad (2.8)$$

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

$$\rho_i = \frac{m_i}{V} \quad (2.9)$$

2.4.5.2.3 Estequiometria

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

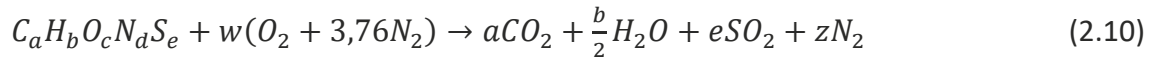
De forma genérica, pode definir-se um processo de combustão pela seguinte reação:



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

Da combustão ideal e estequiométrica de um hidrocarboneto em oxigénio resultam espécies químicas completamente oxidadas que correspondem a moléculas de CO_2 e H_2O .

Deste modo, é possível escrever a reação genérica de combustão da madeira em ar tendo em conta os elementos O, N e S na sua constituição:



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

$$w = a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + e \quad (2.11)$$

O fator z depende diretamente de w e diz respeito à quantidade de azoto que está presente na reação sem reagir:

$$z = w * 3,76 \quad (2.12)$$

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

$$m_{ar} = w(M_{O_2} + 3,76M_{N_2}) \quad (2.13)$$

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

$$AFR = \left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}} \right)_{est} \quad (2.14)$$

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

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

$$\phi = \frac{\frac{m_{comb}}{m_{ar}}}{\left(\frac{m_{comb}}{m_{ar}}\right)_{est}} \quad (2.15)$$

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

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

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{est}} \quad (2.16)$$

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

$$\lambda = \frac{(m_{ar})_{real}}{(m_{ar})_{est}} \quad (2.17)$$

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

$$e[\%] = (\lambda - 1) * 100 \quad (2.18)$$

2.4.5.2.4 Entalpia de formação

Em qualquer reação química ocorre a absorção ou libertação de energia. Esta variação de energia pode ser expressa em termos de variações de entalpia. Sendo a combustão uma reação química exotérmica, é possível quantificar a energia libertada no processo através destas variações de entalpia.

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

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

2.4.5.2.5 Entalpia de reação, entalpia de combustão e entalpia absoluta

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

No caso das reações de combustão, aplica-se à variação de entalpia a designação de entalpia de combustão. Dado que estas reações são exotérmicas, a entalpia de combustão toma sempre um valor negativo. Pretendendo-se exprimir a entalpia de combustão específica da mistura ou entalpia específica, Δh_R , esta é dada por:

$$\Delta h_R(T) = h_{prod}(T) - h_{reag}(T) \quad (2.19)$$

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

$$h(T) = h_f^0(T_{ref}) + \Delta h_s(T) \quad (2.20)$$

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

$$\Delta h_s(T) = \int_{T_{ref}}^T C_p * (T^*) dT^* \quad (2.21)$$

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

2.4.5.2.6 Poder calorífico

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

Ao calor recuperado na queima de um combustível por unidade de massa, com a água resultante da combustão em estado de vapor, dá-se o nome de Poder Calorífico Inferior (PCI). Como referido anteriormente, pode ser a pressão constante que é igual ao simétrico da entalpia de combustão padrão por unidade de massa de combustível quando se tem vapor de água nos produtos de combustão ou um (PCI) a volume constante que é igual ao simétrico da energia interna de combustão padrão por unidade de massa de combustível quando se tem vapor de água nos produtos da combustão.

Se os produtos da combustão encontrarem condições que promovam a condensação do vapor de água, então é recuperado o calor latente de vaporização, h_{fg} . Neste caso, ao total do calor aproveitado dá-se o nome de Poder Calorífico Superior (PCS), o qual, varia entre pressão e volume constante. O PCS à pressão constante é simétrico da entalpia de combustão padrão por unidade de massa de combustível quando se tem água no estado líquido nos produtos de combustão ou um PCI a volume constante que é igual ao simétrico da energia interna de combustão padrão por unidade de massa de combustível quando se tem água no estado líquido nos produtos da combustão.

2.4.5.3 Estágios de combustão

Uma vez abordados os conceitos chave da combustão, ainda que de forma sucinta, é agora possível analisar o processo de combustão da biomassa. A Figura 10 representa a evolução da massa de uma partícula de biomassa durante o processo de combustão, estando identificados os diversos estágios presentes neste processo. A combustão da biomassa inicia-se quando ocorre a ignição do combustível. A fase seguinte designa-se secagem, processo que envolve a evaporação da água contida na biomassa, dependendo, deste modo, do teor de humidade inicial. À medida que a biomassa perde humidade, a sua temperatura aumenta, seguindo-se a fase da pirólise (volatilização),

onde são libertadas as espécies voláteis do combustível. Assim sendo, a secagem e a pirólise provocam uma drástica perda de massa do material, como é possível verificar na Figura 10. Seguidamente, inicia-se a combustão do resíduo sólido carbonoso, restando no final do processo a parte inorgânica da biomassa, as cinzas (Khan et al., 2009; Loo & Koppejan, 2008; Quaak et al., 1999).

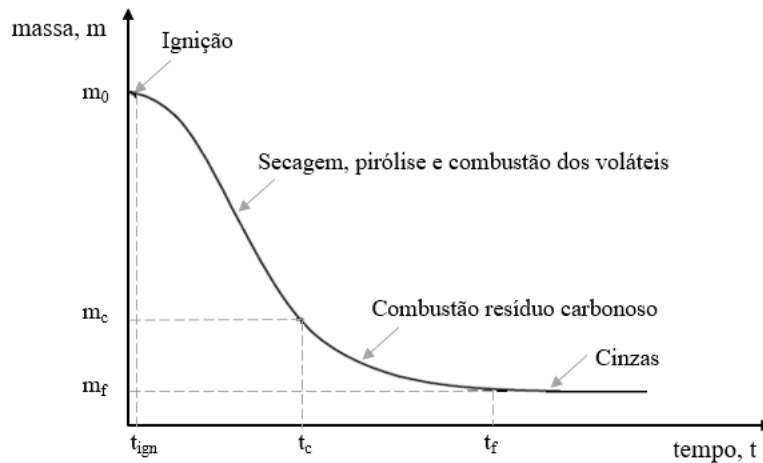


Figura 10 - Representação gráfica da massa do material em função do tempo. Adaptado de: Ferreira (2013).

De seguida, são caracterizados os vários estágios do processo da combustão.

2.4.5.3.1 Ignição

A ignição de uma mistura combustível/comburente pode ocorrer de duas formas distintas: espontânea ou forçada. A primeira é um fenómeno pouco habitual, ocorrendo quando se observam certas condições de pressão, temperatura e composição, levando ao arranque da velocidade da reação de oxidação, iniciando-se a combustão viva. À temperatura mínima a partir da qual se inicia a combustão viva chama-se temperatura de auto-inflamação.

A ignição forçada, mais usual, ocorre por meio da aplicação de uma fonte de calor exterior. Neste caso, ocorre a inflamação numa pequena parte da mistura, podendo, sob certas condições, as reações de combustão propagarem-se a todo o volume da mistura. Saliente-se que a ignição de uma mistura exige uma quantidade mínima de energia designada energia mínima de ignição, a qual depende essencialmente da composição da mistura combustível/comburente.

2.4.5.3.2 Secagem

Depois da ignição da mistura combustível/comburente, é iniciada a fase de aquecimento, provocando um aumento da temperatura da biomassa e a consequente evaporação da água contida no material. Uma vez que a secagem é um processo endotérmico, utiliza a energia proveniente da combustão, tendo como consequência a redução da temperatura da câmara de combustão, aumentando o tempo de residência necessário e, conseqüentemente, atrasando o processo (Quaak et al., 1999). Tal como foi referido, a biomassa não deve ter um teor de humidade superior a 60%, para ser possível a ignição do combustível.

2.4.5.3.3 Combustão do resíduo sólido carbonoso

O resíduo sólido carbonoso, produto final depois da libertação dos voláteis da biomassa, é essencialmente constituído por carbono e cinzas, com pequenas quantidades de hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre. A combustão deste resíduo carbonoso é caracterizada pelas chamas maioritariamente azuis, sendo as cinzas o produto restante do processo de combustão da biomassa (Quaak et al., 1999).

2.4.5.4 Poluentes resultantes da combustão

Os poluentes mais comuns resultantes do processo de combustão são: os óxidos de azoto (NO_x), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SO_x), os hidrocarbonetos não queimados (HC), o dióxido de carbono (CO_2) e as partículas sólidas (na maioria menores do que 10 μm , e designadas na linguagem técnica e científica por PM10) (Nussbaumer, 2003). Geralmente estes poluentes estão integrados em dois grupos, os poluentes não queimados (resultantes da combustão incompleta) e os poluentes relativos a cada tipo de combustível.

A emissão dos poluentes não queimados é fortemente dependente do sistema de queima, tanto do equipamento como das condições do processo; neste grupo, inclui-se o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos não queimados (HC), os voláteis condensados, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e as partículas de carvão. As formações destes poluentes resultam da baixa temperatura de combustão, da mistura deficiente entre o combustível e o ar e do período insuficiente de residência do combustível na câmara de combustão (Khan et al., 2009; Verma et al., 2012; Werther et al., 2000). Relativamente ao segundo grupo, a formação e emissão destes poluentes depende da composição da biomassa, onde se destacam os compostos de azoto (NO_x), os óxidos de enxofre (sobretudo SO_2), os gases ácidos (como HCl), os metais pesados (como Pb, Zn e Cd) e as cinzas. No caso do enxofre e dos metais pesados, face ao baixo

teor na biomassa florestal, geralmente as emissões são insignificantes (Khan et al., 2009; Werther et al., 2000). Dos poluentes mencionados, o monóxido de carbono e os óxidos de azoto são os que terão maior destaque na presente secção. O monóxido de carbono, quando inalado, combina-se com a hemoglobina, reduzindo a capacidade do sangue em transportar oxigénio dos pulmões aos tecidos, podendo conduzir à morte. Tal como referido, as emissões de CO relacionam-se com a combustão incompleta, pertencendo ao grupo dos não queimados. Elevados diâmetros de partículas e elevado teor de cinzas contribuem para maiores emissões deste gás (Khan et al., 2009).

A formação de CO ocorre em duas situações distintas, nas regiões de mistura rica e nas regiões de mistura pobre. No primeiro caso, quando existe deficiência de ar, a mistura ar/combustível é dificultada, não existindo oxigénio suficiente para a oxidação completa e, conseqüentemente existe libertação de CO. Em contrapartida, nas situações com elevado excesso de ar, ocorre a diminuição da temperatura de combustão, permitindo a formação de CO (Johansson et al., 2004; Loo & Koppejan, 2008; Roy, Dutta, & Corscadden, 2013).

Por outro lado, os óxidos de azoto (NO_x) constituem, de uma maneira geral, o conjunto formado pelo óxido nítrico (NO) e pelo dióxido de azoto (NO_2), sendo o primeiro o principal óxido de azoto emitido durante a combustão. Estes poluentes participam em reações atmosféricas, produzindo partículas prejudiciais, nomeadamente ozono troposférico (*smog*) e chuvas ácidas (Khan et al., 2009; Werther et al., 2000).

O óxido nítrico é formado a partir da oxidação do azoto molecular existente no ar de combustão ou existente no combustível. Existem três mecanismos para a formação deste composto, resultando no NO-térmico, no NO-combustível e no NO- imediato. Para temperaturas elevadas, superiores a 1000 °C, o óxido de azoto é maioritariamente originado pelo mecanismo térmico e imediato (Nussbaumer, 2003; Werther et al., 2000).

O NO térmico resulta da reação de oxidação do azoto molecular presente no ar de combustão a temperaturas elevadas na ordem dos 1300 °C, sendo este processo designado mecanismo de Zeldovich (Roy et al., 2013). Por outro lado, o NO combustível é consequência do conteúdo de azoto presente no combustível, sendo libertado a temperaturas relativamente baixas (Liu, Chaney, Li, & Sun, 2013; Werther et al., 2000). O último, conhecido por NO imediato, súbito ou instantâneo, é formado devido às rápidas reações na frente de chama, envolvendo reações de radicais livres de hidrocarbonetos com o azoto molecular, frequentemente em chamas com defeito de ar (Verma, Bram, Gauthier, & De Ruyck, 2011).

2.4.5.5 Análise do processo de combustão

Para analisar o processo de combustão, optou-se por dividi-lo, conceitualmente, em dois momentos (espaços): a fornalha (local onde o combustível é queimado e de onde saem os produtos de combustão) e o permutador de calor (local onde o calor da corrente dos gases de combustão é utilizado para aquecer um fluido, como água, vapor ou ar) (Quaak et al., 1999).

Na Figura 11, apresenta-se um esquema do balanço de massa no processo de combustão, estando representados os dois espaços mencionados anteriormente.

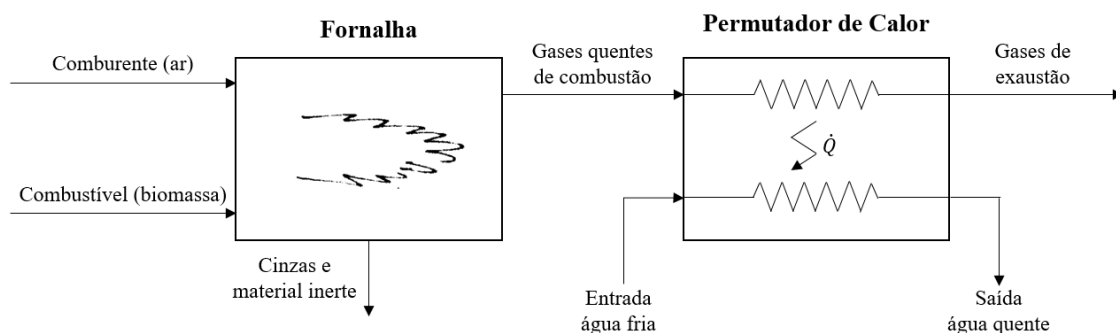


Figura 11 - Representação esquemática do processo de combustão nos dois momentos: fornalha e permutador de calor. Adaptado de: Quaak et al. (1999).

De seguida, analisar-se-á a fornalha e o permutador de calor, separadamente, tendo como objetivo calcular o rendimento associado a cada espaço.

2.4.5.5.1 Fornalha

De uma forma geral, a fornalha deve permitir evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar a temperatura do combustível até à combustão, proporcionar a condição ideal para uma combustão completa, criando turbulência para misturar o ar e o combustível, e impedir a troca de calor entre os gases quentes de combustão e o ambiente. Deste modo, as paredes interiores da fornalha têm de suportar altas temperaturas, apresentar elevada resistência ao choque térmico, reduzida dilatação térmica e devem ser revestidas com uma camada de tijolos refratários, responsáveis por reter o calor no interior da fornalha.

A alimentação da fornalha consiste no combustível (neste caso os briquetes de biomassa) e no comburente (ar atmosférico), como é possível visualizar na Figura 11. Durante a combustão, as ligações químicas do combustível são quebradas e, conseqüentemente, liberta-se energia térmica, ficando esta disponível na corrente dos gases quentes de combustão (output da fornalha apresentado também na Figura 11). A

energia contida no combustível que não foi transferida para a corrente de gases de combustão, na forma de energia térmica, é, deste modo, perdida. Estas perdas englobam:

- as cinzas volantes, partículas de pequenas dimensões que são arrastadas pela corrente de gases de combustão, passando através do permutador de calor, sem que a sua energia térmica seja utilizada;
- as partículas não queimadas nas cinzas, partículas de maiores dimensões que ficam no fundo da fornalha, cuja energia química armazenada não é libertada;
- os compostos não queimados na corrente de gases, como o monóxido de carbono, cuja energia química armazenada não é libertada durante a combustão;
- as perdas para o ambiente, nomeadamente as perdas por radiação e convecção (Quaak et al., 1999).

2.4.5.5.2 Permutador de calor

A alimentação do permutador de calor, como é possível verificar na Figura 11, é a corrente de gases quentes de combustão, sendo que a energia térmica disponível para a transferência de calor com o outro fluido (água) é tanto maior quanto maior for a sua temperatura. No permutador de calor, a energia térmica disponível nos gases quentes de combustão é então transferida para a água, aquecendo-a. Deste modo, a saída do permutador corresponde à corrente dos gases de combustão à temperatura de exaustão na chaminé, sendo que a diferença entre as temperaturas é diretamente proporcional à quantidade de calor que foi transferida para a água (Quaak et al., 1999). No entanto, é possível calcular um valor aproximado da temperatura dos gases de combustão, imediatamente antes da transferência de calor para a água, desprezando todas as perdas de calor para o exterior, tornando a fornalha num sistema adiabático. Deste modo, a temperatura dos produtos da combustão a calcular designa-se temperatura adiabática de chama e é definida como a temperatura máxima que os produtos podem atingir nesta reação.

CARATERIZAÇÃO DA BIOMASSA E PRODUÇÃO DE BRIQUETES

- 3.1 Caracterização da biomassa
- 3.2 Produção e caracterização de briquetes

3 CARATERIZAÇÃO DA BIOMASSA E PRODUÇÃO DE BRIQUETES

3.1 Caracterização da biomassa

Como referido anteriormente, o conhecimento da composição da biomassa é importante para o projeto térmico de um sistema de queima, e permite prever as emissões gasosas provenientes da combustão. A composição imediata (humidade, cinzas matéria volátil e carbono fixo) permite conhecer os teores de humidade, cinzas, voláteis e carbono fixo da biomassa.

As culturas anuais de rápido crescimento (pequenos ramos e folhagens de árvores, madeiras, palhas, gramíneas e frutos) têm maiores teores de humidade e cinzas em comparação com caules, troncos, cascas e ramos de árvores grandes (Vassilev et al., 2010).

3.1.1 Teor de humidade

O teor de humidade é a razão entre a quantidade de água existente na biomassa e a sua massa total, podendo ser expressa em base húmida, em base seca e em base seca livre de cinzas. Sendo esta propriedade relevante para o comportamento da biomassa nos processos termoquímicos, em particular na combustão, é extremamente importante mencionar a base utilizada na sua medição (McKendry, 2002a; Quaak, Knoef, & Stassen, 1999).

A biomassa apresenta uma vasta gama de teores de humidade, dependendo do tipo de biomassa e das condições do seu armazenamento, variando, na base húmida, entre 10% (para os cereais) e 50 – 70% (no caso de resíduos florestais e madeiras de poda de culturas agrícolas). Quanto maior for o teor de humidade, maior é a quantidade de água existente na biomassa, mais energia é utilizada na sua evaporação e, conseqüentemente, menor é a temperatura máxima possível de se obter no processo de combustão e maior é o tempo de residência necessário na câmara de combustão (Khan et al., 2009; Loo & Koppejan, 2008; Quaak et al., 1999).

Naturalmente, quanto maior o teor de humidade, menor será o poder calorífico inferior do combustível (menor a energia que se iria aproveitar), atingindo o valor nulo para um teor de humidade aproximadamente 87% (na base húmida). Na prática, o teor de humidade não deve superar os 55 – 60%, na base húmida (Loo & Koppejan, 2008;

Quaak et al., 1999). Do mesmo modo, a biomassa com elevado teor de humidade provoca uma diminuição da temperatura na câmara de combustão, podendo impedir a ignição do combustível e a consequente extração de energia. Por esta razão, antes da aplicação dos processos termoquímicos é frequente proceder-se à secagem da biomassa para a transformar num produto apropriado para a queima. É de notar que, quanto maior for o teor de humidade inicial da biomassa, maior quantidade de energia será necessária na etapa da secagem (Loo & Koppejan, 2008).

Como referido, a quantidade de humidade presente na biomassa tem influência sobre o processo de conversão energética, o volume de gases combustíveis produzidos por unidade de energia e também sobre o seu poder calorífico, uma vez que este diminui com o aumento da humidade no combustível (Loo & Koppejan, 2008; Quaak et al., 1999).

O teor de humidade da biomassa foi determinado em triplicado, para cada tipo de combustível, através da perda de massa da mesma, segundo a norma “BS EN ISO 18134-3:2015”. As amostras (5 g), previamente pesadas, foram colocadas numa estufa laboratorial (VENTICELL 111, MMM Medcenter™, apresentada na Figura 12), e secas à temperatura de 105 °C, durante um período de 24 horas. Posteriormente, foram colocadas num exsiccador durante um período de 30 minutos para garantir que a amostra permanecia à temperatura ambiente para serem pesadas novamente. No final foi calculada a média dos valores obtidos para cada uma das três amostras de forma a obter apenas um teor de humidade médio para cada tipo de biomassa.



Figura 12 - Estufa laboratorial VENTICELL 111

A percentagem de humidade das amostras, foi calculada através da equação 3.1:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (3.1)$$

onde, M_{ad} (teor de humidade), m_1 (massa do cadinho), m_2 (massa do cadinho com a amostra antes da secagem) e m_3 (massa do cadinho com a amostra ao fim do tempo total de secagem).

3.1.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas (base seca) determinado a 550-600 °C na biomassa varia normalmente entre 0,1-46 %, dependendo da espécie de biomassa. Este teor e a sua composição química, afetam o comportamento dos processos de conversão energética (a elevadas temperaturas), nomeadamente no que diz respeito à formação de escórias (cinzas de elevada granulometria) e aglomerações, o que faz com que aumentem os custos de manutenção, e, portanto, os custos globais do processo. Os principais elementos que se encontram nas cinzas de biomassa são Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, S e P (Jenkins, Baxter, Miles, & Miles, 1998; McKendry, 2002a; Quaak et al., 1999; Vassilev et al., 2010). Os elevados teores de cinzas de alguns combustíveis de madeira, tais como madeira tratada quimicamente e resíduos de madeira, indicam uma maior quantidade de impurezas minerais, metálicas e outras contaminantes resultantes do processo de fabrico. Em contrapartida, a temperatura de combustão afeta significativamente o rendimento total em cinzas de biomassa; por exemplo, os teores de cinzas determinados a 1000-1300 °C são 20-70 % mais baixos do que os determinados a 500-550 °C (Vassilev et al., 2010).

O teor de cinzas (em base seca) para madeira é, em geral, inferior a 1%. Em contraste, a biomassa apresenta um teor de cinzas que variam de 2% até 8-10%, embora, alguns tipos de biomassa possam atingir até 25% de cinzas (por exemplo, em alguns tipos de arroz). A natureza recupera os constituintes inorgânicos valiosos; em alguns casos, as impurezas do solo podem contribuir consideravelmente para o conteúdo de cinzas.

O teor de cinzas foi determinado segundo a norma “BS EN ISO 18122:2015”. Prepararam-se três amostras de diferentes tipos de biomassa com cerca de 1 g para cada amostra, pesadas numa balança de precisão 0,1 mg, modelo PLJ 6100 da KERN (apresentada na Figura 13). Estas amostras foram colocadas num forno (MLM, TERMOLAB, apresentado na Figura 14), inicialmente à temperatura ambiente, sendo esta, aquecida até 250 °C num período de 30 a 50 minutos, permanecendo por 60 minutos a 250 °C, originando, a eliminação dos voláteis das amostras antes de iniciar-se a ignição, após este período, continuamos a aumentar a temperatura do forno para 550 °C por um tempo de 30 minutos; por fim, mantemos este nível de temperatura pelo menos, durante 120 minutos. Após o processo, as amostras são colocadas numa base de resistência térmica durante 5 a 10 minutos para arrefecer, posteriormente, as amostras são colocadas num exsicador durante um período de 30 minutos para garantir que permanecem à temperatura ambiente. No final foi calculada a média dos resultados obtidos para as três amostras, de forma a obter apenas um teor de cinzas médio para cada tipo de biomassa.



Figura 13 - Balança KERN PLJ 6100



Figura 14 - Forno MLM



A percentagem de cinzas das amostras, foi calculada através da equação 3.2:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3.2)$$

onde, A_d (teor de cinzas), m_1 (massa do cadinho), m_2 (massa do cadinho com a amostra antes da secagem), m_3 (massa do cadinho com as cinzas) e M_{ad} (% de humidade na amostra).

3.1.3 Teor de matéria volátil

O teor de matéria volátil é a fração orgânica da biomassa que é libertada como gás compreendendo o vapor de água, quando a biomassa é aquecida a uma temperatura de 900 °C (Abbasi & Abbasi, 2010; McKendry, 2002a). A biomassa apresenta um teor de matéria volátil (base seca) que varia e geralmente é elevado, podendo ter valores entre 48-86 %, o que dá a indicação que este tipo de combustível é de fácil ignição e oxidação (Loo & Koppejan, 2008; McKendry, 2002a; Quaak et al., 1999; Vassilev, Baxter, Andersen, & Vassileva, 2010). Contudo, é expectável que o processo termoquímico seja mais rápido e de difícil controlo, pois o processo passa a ser dominado pela oxidação dos voláteis na fase gasosa e não pela oxidação do carbono na fase sólida (Werther et al., 2000).

O teor de matéria volátil (V_d) na biomassa pode variar num intervalo de 48 a 86%, em contraste, ao valor da matéria volátil no carvão que é geralmente de 12 a 68%. As produções de material volátil em produtos provenientes de biomassa podem incluir hidrocarbonetos leves, CO, CO_2 , H_2 e humidade.

O teor de matéria volátil foi determinado segundo a norma "BS EN ISO 18123:2015". Foram preparadas três réplicas com cerca de 1 g para cada amostra, pesadas numa balança de precisão 0,1 mg e colocadas em cadinhos de cerâmica (Figura 15) com as respetivas tampas também de cerâmica, que são adequados às elevadas temperaturas do forno. Os cadinhos são introduzidos na mufla durante 7 minutos a 900 °C. No final deste período são retirados e arrefecidos à temperatura ambiente, em superfícies resistentes à temperatura. Depois do arrefecimento de cerca de 7/10 minutos, pesam-

se os cadinhos com a amostra já volatilizada, e as respectivas tampas. No final foi calculada a média das três réplicas de modo a obter um teor de matéria volátil médio para cada tipo de biomassa.



Figura 15 - Cadinho com tampa

A percentagem de matéria volátil das amostras, foi calculada através da equação 3.3:

$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] * \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (3.3)$$

onde, V_d (teor de matéria volátil), m_1 (massa do cadinho com a tampa), m_2 (massa do cadinho com a tampa mais a amostra antes da secagem), m_3 (massa do cadinho com a tampa mais a amostra no final da queima) e M_{ad} (% de humidade na amostra).

3.1.4 Carbono fixo

O teor de carbono fixo é a fração mássica que se mantém após a libertação dos voláteis, excluindo a cinza e o teor de humidade (McKendry, 2002a). O conteúdo de carbono fixo (base seca) da biomassa varia entre 1-38 %. Teores elevados de carbono fixo são característicos de algumas cascas de madeira, de resíduos herbáceos e de biomassa agrícola. A biomassa apresenta geralmente um rácio de matéria volátil/carbono fixo superior a 3,50 (Vassilev et al., 2010).

O teor de carbono fixo [C_f , %] na biomassa varia no intervalo de 1 a 38%. Em contraste, o valor de carbono fixo no carvão está compreendido entre 20 e 72%. A biomassa apresenta uma razão de matéria volátil / carbono fixo $> 3,5$, enquanto essa razão para o carvão está normalmente no intervalo de 0,6 a 2,4.

O carbono fixo foi determinado por diferença, tendo em consideração os correspondentes teores de matéria volátil e cinzas, através da equação 3.4:

$$C_f = 100 - A_d - V_d \quad (3.4)$$

onde, C_f (teor de carbono fixo), A_d (teor de cinzas) e V_d (teor de matéria volátil).

3.1.5 Análise elementar

Em termos de composição elementar, e do mesmo modo que nos combustíveis fósseis, o principal constituinte da madeira é o carbono, seguido do oxigénio e em terceiro lugar o hidrogénio (aproximadamente 5-6 % da matéria seca). No entanto, a biomassa tem muito mais oxigénio que os combustíveis fósseis convencionais (incluindo o carvão), uma vez que é constituída essencialmente por hidratos de carbono, representando estes cerca de 45 % da matéria seca. O elevado teor de oxigénio da biomassa permite que a sua combustão necessite do fornecimento de uma menor quantidade de ar e uma menor quantidade de energia. Outros elementos presentes na biomassa em pequenas quantidades (inferiores a 1 % de matéria seca), são o azoto (constituente da fração proteica das plantas), o enxofre e o cloro. Estes elementos são responsáveis pela formação de emissões poluentes (ex: NO e NO₂, resultantes do azoto), contrariando assim a teoria de neutralidade da biomassa em emissões de GEE (EUBIA, 2019).

A composição elementar permite então estimar o poder calorífico e as necessidades de comburente (ingrediente necessário à combustão), durante os processos termoquímicos. Devido à forte influência da humidade e do teor de cinzas no conteúdo das outras características químicas da biomassa, são feitas caracterizações comparativas dos diversos tipos deste recurso através da análise elementar (cinco elementos, C, H, O, N, S) e dos dados adicionais para o conteúdo de cloro. Contudo, alguns tipos de biomassa contêm outras espécies, consideradas impurezas e que possuem grande relevância no que diz respeito à emissão de poluentes, dependendo da fonte de combustível (Khan et al., 2009; Vassilev et al., 2010).

O conhecimento da composição das matérias-primas provenientes da biomassa é essencial para projetar o equipamento de queima ideal para a combustão, especialmente o sistema de depuração dos gases. A biomassa, e em particular a celulose, têm quantidades elevadas de oxigénio e hidrogénio, originando elevados poderes caloríficos inferiores, isso pressupõe antever um elevado poder calorífico da biomassa sempre que o teor de carbono seja o mais elevado. Relativamente ao enxofre, permite prever, ao ser queimado, emissões de óxidos de enxofre que potenciam a acidificação e a eutrofização. A realização da análise elementar foi efetuada através do equipamento LECO TruSpec CHN apresentado na Figura 16.



Figura 16 - Analisador LECO TruSpec CHN

3.1.5.1 Teor de Carbono (C)

O teor de carbono total da biomassa varia entre 42 e 71 %. Este elemento é característico de algumas cascas de madeira, resíduos de cinzas, resíduos de frango (dejetos/estrupe) e farinha de carne e ossos. É de referir também que o teor de carbono na biomassa lenhosa é superior ao da biomassa herbácea (Vassilev et al., 2010).

3.1.5.2 Teor de Oxigénio (O)

O teor de oxigénio na biomassa varia entre 16 e 49 %. Este constituinte é particularmente característico dos resíduos de pimenta, café e cascas de soja (Vassilev et al., 2010).

3.1.5.3 Teor de Hidrogénio (H)

O teor de hidrogénio na biomassa varia entre 3 e 11 %. A semelhança entre as ordens de ocorrência do H e C indica a sua associação, em termos de ocorrência e comportamento na biomassa, provavelmente como hidratos de carbono. O elevado teor de hidrogénio é característico de casca de larícínios (espécie de pinheiro), cascas de mostarda, algodão, farinha de carne e ossos, combustível derivado de resíduos e cascas de amendoim (Vassilev et al., 2010).

3.1.5.4 Teor de Azoto (N)

O azoto é um macronutriente essencial para as plantas, cujo excesso é prejudicial ao seu crescimento, contudo ele existe nos diferentes tipos de biomassa, variando a sua concentração de espécie para espécie. O conteúdo de azoto na biomassa varia entre 0,10 e 12,0 %; este elemento é característico da farinha de carne e ossos, lamas de ETAR,

resíduos de pimenta, alfafa, palha de hortelã, sementes de palmeiras (Khan et al., 2009; Vassilev et al., 2010).

3.1.5.5 Teor de Enxofre (S)

O teor de enxofre na biomassa varia entre 0,01 e 2,30 %, este elemento é característico da lama de ETAR, farinha de carne e ossos, misturas de biomassa, resíduos de pimenta, combustível derivado de resíduos, e pinheiros (do género das árvores de Natal). Estudos realizados permitem afirmar também, que a casca e a palha têm um teor de enxofre mais elevado do que a madeira, mas alguns produtos de madeira (*pellets* e *briquetes*) podem também conter aditivos com enxofre (Vassilev et al., 2010).

3.1.5.6 Teor de Cloro (Cl)

O teor de cloro na biomassa varia entre 0,01 e 0,90 %. Este elemento está presente em teores particularmente elevados no combustível derivado de resíduos, alfafa, milho, cevada, hortelã, arroz e trigo. Por outro lado, a maior parte das amostras de madeira, biomassa lenhosa, herbáceas e biomassa agrícola apresenta um conteúdo mais baixo de cloro, sendo que a madeira contém, geralmente, teores de cloro muito baixos. No entanto, alguns produtos de madeira podem conter aditivos de cloro, o que faz com que este teor aumente (Vassilev et al., 2010).

3.1.6 Poder calorífico

O poder calorífico inferior de um combustível é o valor da quantidade de energia libertada, por unidade de massa, durante a combustão. Denomina-se por poder calorífico superior (PCS) o valor máximo de energia que pode ser aproveitado da combustão, sob a condição de que a água formada durante a combustão se encontra no estado líquido. Por sua vez, o poder calorífico inferior (PCI) corresponde ao valor de energia caso tenha ocorrido a evaporação da água, sendo, portanto, a diferença entre o poder calorífico superior e o calor latente de vaporização da água (McKendry, 2002a).

Uma das desvantagens do uso da biomassa é o valor reduzido do seu poder calorífico quando comparado com o dos combustíveis fósseis. Enquanto o carvão apresenta um PCI entre 25 e 30 MJ/kg, a maioria da biomassa apresenta um PCI entre 15 e 19 MJ/kg.

O poder calorífico foi determinado segundo a norma “BS EN ISO 14918:2009” utilizando o calorímetro da LECO AC500, representado na Figura 17.



Figura 17 - Calorímetro LECO AC500

3.1.7 Massa volúmica aparente (ou a granel)

A massa volúmica é uma propriedade física que apresenta uma relação entre a massa e o volume. Neste contexto, divide-se a massa volúmica em dois grupos: massa volúmica aparente (ou a granel) e a massa volúmica das partículas (Shastri, Hansen, Rodríguez, & Ting, 2014). Usualmente, o valor da massa volúmica aparente das espécies de biomassa é mais reduzido quando comparado com a massa volúmica do carvão betuminoso (fóssil). Quanto menor for o valor desta propriedade, para uma dada massa, maior é o volume ocupado, originando um aumento do espaço necessário para transportar e armazenar a biomassa e, conseqüentemente, maiores serão os custos de transporte e de armazenamento. Adicionalmente, um reduzido valor desta propriedade leva a um reduzido valor do poder calorífico por unidade de volume, influenciando, o comportamento durante os processos de conversão energéticos da biomassa (McKendry, 2002a; Shastri et al., 2014). Portanto, é vantajoso proceder-se à densificação da biomassa, através de processos como a peletização e a briquetagem, com o intuito de aumentar a massa volúmica aparente. Esta propriedade apresenta um valor de 50 – 125 kg/m³ (biomassa não processada) para 450 – 650 kg/m³ (péletes ou briquetes de madeira) (Khan et al., 2009; Loo & Koppejan, 2008; Werther, Saenger, Hartge, Ogada, & Siagi, 2000).

3.1.8 Teor de metais alcalinos

O teor de metais alcalinos como Na, K, Mg, P e Ca é um fator importante nos processos termoquímicos, visto que, esses elementos reagem com a sílica presente na cinza formando escórias, capazes de obstruir as superfícies de transferência de calor e as entradas de ar na fornalha/caldeira podendo causar sérios problemas operacionais na combustão (McKendry, 2002a).

3.1.9 Razão celulose/lenhina

Esta propriedade é importante nos processos de conversão bioquímicos. A celulose apresenta uma biodegradabilidade superior à lenhina, as plantas com maior quantidade de celulose apresentam uma maior conversão de carbono, sendo este um fator determinante na seleção do tipo de biomassa para utilizar nestes processos de conversão (McKendry, 2002a). A lenhina, por sua vez, é um componente essencial para o uso nas operações de peletização e briquetagem, visto que, funciona como aglomerante natural capaz de facilitar as operações de densificação.

3.2 Produção e caracterização de briquetes

A biomassa requer processos de combustão complexos, pela constituição físico-química diversificada do combustível, na combustão em ambiente não controlado e o seu teor de humidade e densidade da matéria-prima tem um efeito negativo no que diz respeito a eficácia da combustão. Os comportamentos das matérias-primas provenientes da biomassa tendem a ser melhorados, recorrendo-se a uma densificação da matéria, proporcionando uma homogeneidade da biomassa e originando que uma maior variedade de materiais lenho-celulósicos possa ser utilizada como combustível.

3.2.1 Preparação das misturas

A matéria-prima antes de ser utilizada foi triturada num moínho de corte (SM 200, “Retsch”, apresentado na Figura 18), responsável pela trituração da biomassa em pequenas partículas. Dependendo do tamanho pretendido, neste caso, utilizou-se uma peneira de malha de “4 mm”, visto que, o tamanho ideal para a elaboração dos briquetes compreende tamanhos entre 4 a 6 mm.



Figura 18 - Moinho de lâminas Retsch SM 200

Como referido anteriormente, procede-se à densificação da matéria-prima para atingir uma homogeneidade da biomassa. Esta, ao entrar no moinho de lâminas no seu estado normal, passa por um processo de redução de tamanho através das forças de corte e cisalhamento. A amostra entra em contato com o rotor e é fragmentada entre as lâminas e as barras de corte estacionárias de dupla ação. A biomassa no estado normal, bem como após a trituração efetuada no moinho de lâminas, apresenta-se na Figura 19.

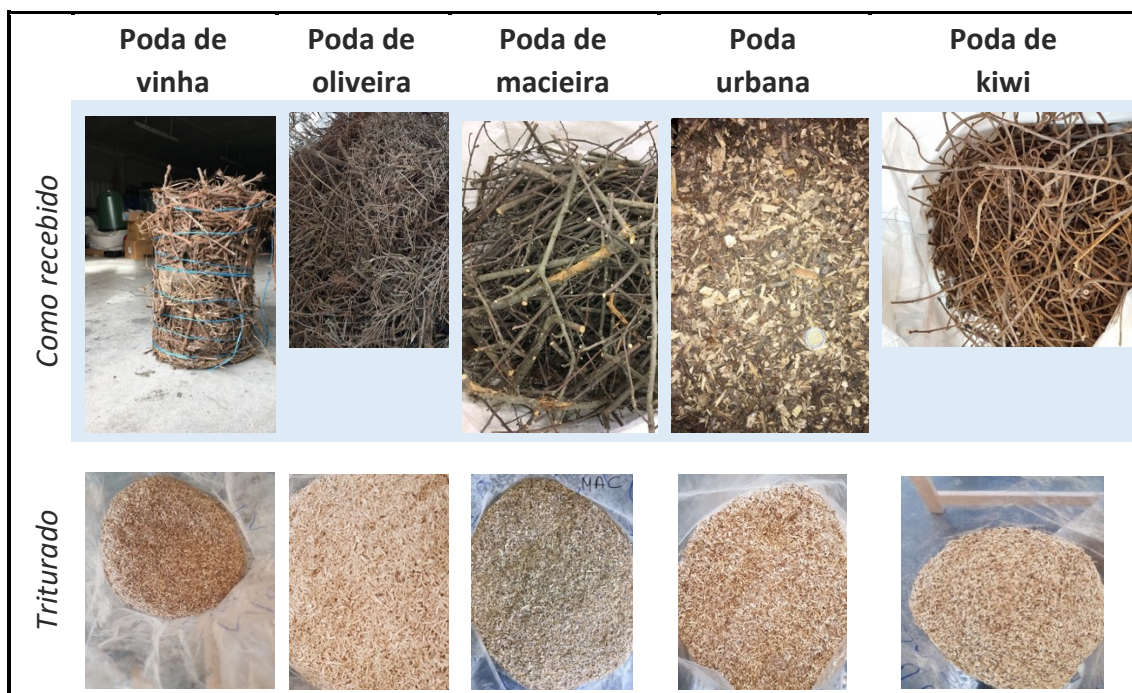


Figura 19 - Tipos de biomassa utilizados, antes e após a trituração

3.2.2 Briquetadora

O processo de briquetagem depende do tipo de biomassa utilizada, da pressão de compactação aplicada, da temperatura, da velocidade, do teor de humidade do material e da dimensão do tamanho das partículas (Granada, López González, Míguez, & Moran, 2002). O processo de produção de briquetes é dividido em três estágios: o pré-tratamento, a briquetagem e o pós-tratamento.

3.2.2.1 Pré-tratamento

O pré-tratamento do material depende das condições em que ele se encontra inicialmente e inclui todas as etapas, desde a colheita até ao processo de densificação. Após a recolha da biomassa pode ser necessário efetuar a limpeza do material, reduzindo as impurezas contidas na matéria-prima (tais como terra, areias, partes de metais, vidros e plásticos). Deste modo, garante-se uma melhoria da qualidade do material, permitindo um melhor controlo do processo de densificação e um melhor comportamento dos briquetes durante a combustão (Loo & Koppejan, 2008).

Ainda no pré-tratamento da matéria-prima, ocorre a secagem do material, seguida do seu destroçamento e acondicionamento. Como referido anteriormente, a biomassa no seu estado natural apresenta um teor de humidade bastante variável, podendo atingir um valor da ordem dos 70%, na base húmida (Muazu, Borrion, & Stegemann, 2017). O processo de briquetagem é influenciado, entre outros fatores, pelo teor de humidade do material, devendo-se encontrar na gama entre 10 a 15%, na base húmida (Werther et al., 2000).

Por um lado, é necessária uma certa quantidade de humidade no material, não devendo a matéria-prima ser demasiado seca, uma vez que, a superfície das partículas poderá carbonizar e os ligantes acabam por se queimar antes do processo de densificação finalizar. Por outro lado, se a matéria-prima for demasiado húmida, nem toda a humidade evapora durante o processo de briquetagem, aumentando o volume dos briquetes, levando a uma redução das suas propriedades mecânicas e comprometendo a sua eficiência durante o processo de conversão energético (Loo & Koppejan, 2008). A secagem permite, assim, uma melhoria no controlo do processo de briquetagem, uma otimização do processo de combustão, aumentando o seu rendimento e diminuindo as emissões associadas, e uma melhoria na qualidade dos briquetes, reduzindo o risco de degradação biológica pelo aparecimento de fungos. O processo de secagem consome bastante energia, podendo ser uma contribuição significativa para o total de energia consumida durante todo o processo da briquetagem, dependendo, logicamente, da

quantidade de humidade a ser removida. A secagem também pode estar inerente a uma maior ou menor emissão dos GEE, dependendo do tipo de estufa, capacidade, temperatura e duração desta etapa (Loo & Koppejan, 2008; Muazu et al., 2017).

A etapa de destroçamento tem como objetivo a redução e homogeneização das partículas constituintes da biomassa. Neste processo, o material é cortado, triturado e moído, sendo na maioria das vezes utilizado um moinho de martelos. A energia consumida neste processo depende essencialmente da redução de tamanho exigida e do tipo e da morfologia da biomassa (Loo & Koppejan, 2008; Muazu et al., 2017).

Por sua vez, o processo de acondicionamento consiste na adição de vapor de água ou outros aditivos à matéria-prima, tendo como objetivo a formação de um filme de água superficial, melhorando os mecanismos de adesão e ligação das partículas durante o processo. Geralmente, não é necessária a adição de ligantes, pois devido à alta temperatura atingida durante o processo de briquetagem, a lenhina, polímero termoplástico, sofre um processo designado transição vítrea, atuando ela própria como um agente de ligação natural entre partículas (Furtado, Valin, Brand, & Bellote, 2010; Muazu et al., 2017).

3.2.2.2 Briquetagem

O processo de briquetagem depende do tipo de biomassa utilizada, da pressão de compactação aplicada, da temperatura, da velocidade de alimentação, do teor de humidade do material e da dimensão do tamanho das partículas (Granada et al., 2002). As tecnologias utilizadas no processo incluem prensas do tipo parafuso e prensas do tipo pistão. Nas primeiras, a biomassa é extrudida continuamente através de um molde (fieira), recorrendo a um parafuso cónico pré-aquecido de forma a reduzir o atrito. Nas prensas de pistão, a biomassa é pressionada para o interior de um molde, através de um pistão a alta pressão, num movimento descontínuo. Em ambos os casos, a aplicação da elevada pressão provoca um aumento da temperatura da biomassa e a lenhina existente é fundida agindo como um aglutinante natural, como referido anteriormente (Granada et al., 2002; Loo & Koppejan, 2008).

3.2.2.3 Pós-tratamento

Durante o processo de densificação, ocorre um aumento de temperatura dos briquetes, sendo, geralmente, necessário proceder-se a um arrefecimento cuidadoso do material, antes do seu empacotamento e armazenamento. Seguidamente, ocorre a triagem do material, onde pode ser necessário a remoção de finos dos briquetes produzidos, levando a uma homogeneização do material final. Para facilitar o transporte, a

distribuição e, também, para proteger a biomassa do meio envolvente, os briquetes são normalmente embalados (Loo & Koppejan, 2008; Muazu et al., 2017).

Na produção de briquetes para posterior análise do seu comportamento durante a queima, foi utilizada uma briquetadora RUF Briquetting Systems, representada na Figura 20.



Figura 20 - Briquetadora RUF

Como podemos observar na Figura 21, a briquetadora RUF é constituída por:

- Agitador;
- Funil;
- Parafuso de carregamento;
- Repositório para matéria prima prensada;
- Bomba de repositório;
- Rampa de descarga;
- Prensa pistão;
- Tanque de óleo hidráulico;
- Painel de controlo elétrico;
- Motor principal equipado com bomba hidráulica;
- Sistema de arrefecimento.

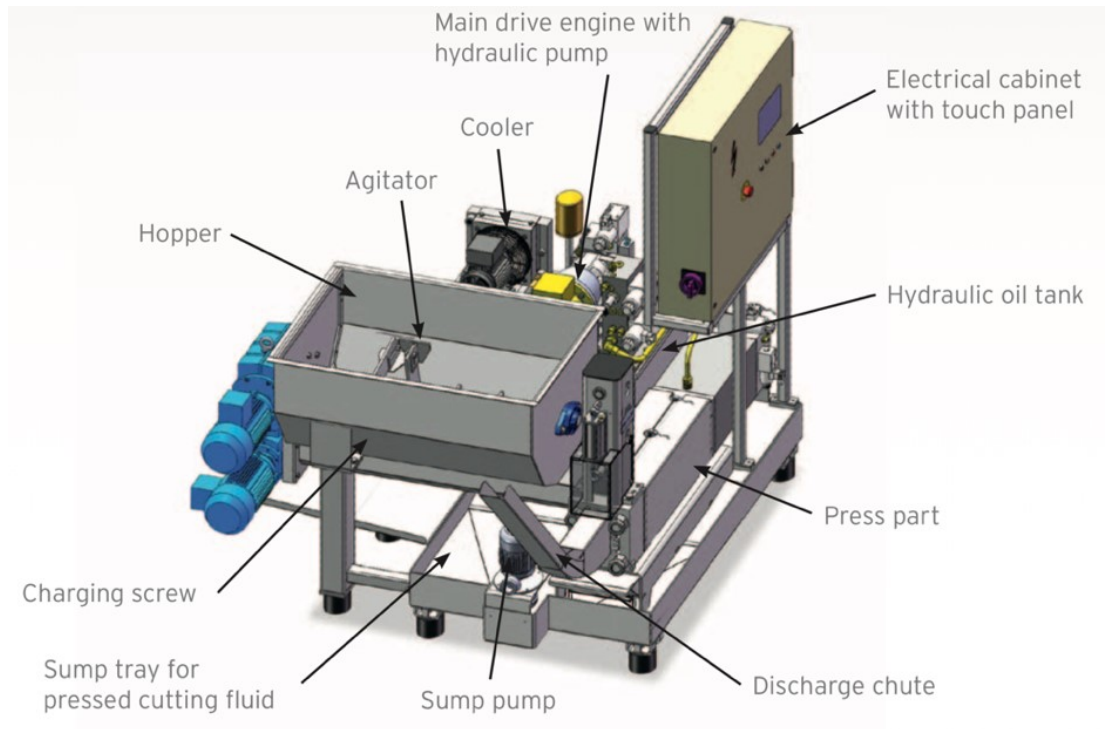


Figura 21 - Esquema da briquetadora RUF

ENSAIOS DE COMBUSTÃO

- 4.1 Procedimento experimental
- 4.2 Instalação experimental
- 4.3 Metodologia dos ensaios
- 4.4 Avaliação da eficiência da caldeira

4 ENSAIOS DE COMBUSTÃO

Como referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é o de realizar um estudo sobre a taxa de queima de partículas de matérias provenientes da biomassa em condições aproximadas de regime permanente, ou seja, acompanhando-se o mais possível as condições normais de operação da referida caldeira.

4.1 Procedimento experimental

Para a realização dos ensaios de combustão previstos, e para quantificar os parâmetros desejados começou-se por limpar a caldeira que podia conter resíduos de outros ensaios já decorridos. Após a limpeza, começou-se o procedimento de ensaio de combustão, que se inicia pela fase de arranque, responsável pela ignição do combustível. Quando a ignição do material está garantida, fecha-se a entrada de ar pelo canal inferior. Essa fase termina quando se atingem as condições próximas de regime permanente.

Para ser possível a ignição do combustível, foi necessário utilizar acendalhas e uma fonte externa de calor – gás butano. As condições de queima variaram de ensaio para ensaio, tendo apresentado maiores dificuldades operacionais. É de referir que os briquetes utilizados na caldeira nos diversos ensaios foram previamente pesados, permitindo obter a massa total de combustível utilizado, durante todos os ensaios.

Uma vez atingidas as condições próximas de regime permanente, e já com todo o sistema de aquisição operacional e devidamente calibrado deu-se início aos ensaios de combustão. A alimentação de combustível na caldeira foi realizada com intervalos de tempo (de 5 em 5 minutos), com o intuito de que a combustão fosse o mais uniforme possível ao longo do ensaio, afetando os resultados da composição dos gases. Os ensaios foram realizados sendo possível avaliar as emissões resultantes da sua combustão e a concentração de poluentes nas emissões resultantes dos diferentes tipos de combustível. Uma vez que a alimentação da caldeira era manual, o regime permanente foi afetado sempre que se abria a porta superior, verificando-se oscilações nos parâmetros medidos, nomeadamente em termos de valores de temperaturas e de composição dos gases de combustão. Durante o ensaio monitorizaram-se e registaram-se, automaticamente as temperaturas e a composição dos gases de combustão. Os ensaios de combustão tiveram um período de duração aproximada de 1 hora.

4.2 Instalação experimental

A experiência de combustão foi realizada em uma saída nominal de fluxo descendente. Um tubo *Pitot* com uma sonda é introduzido na pilha para análise de gases de exaustão. Foi medida a humidade através de um analisador Dadolab ST5, que também registou a temperatura dos gases de escape. A velocidade do gás de combustão foi calculada a partir da pressão diferencial no tubo *Pitot* e a concentração de CO_2 , O_2 , NO_x e CO em volume foi determinada usando um analisador de gases múltiplos (Horiba PG 350E, SRM). O carbono orgânico total (TOC) foi determinado por meio de um cromatógrafo (Signal 3010) e o material particulado (PM) foi quantificado usando um amostrador isocinético Dadolab ST5 e uma balança analítica Adam PW254. Na Figura 22 encontram-se os equipamentos utilizados na monitorização da combustão.

A caldeira foi operada na saída nominal durante todas as experiências. Para cada ensaio realizado, foi carregada com combustível e pré-aquecida até a temperatura de exaustão atingir cerca de 230 °C e a temperatura da água estar acima de 70 °C. Após este ponto, a caldeira foi carregada novamente com combustível novo e os testes de combustão foram iniciados. Em alguns casos, quando foi observado um nível de oxigênio acima do esperado nos gases de combustão (monitorizados em tempo real), a caldeira foi aberta e rapidamente recarregada com mais combustível.

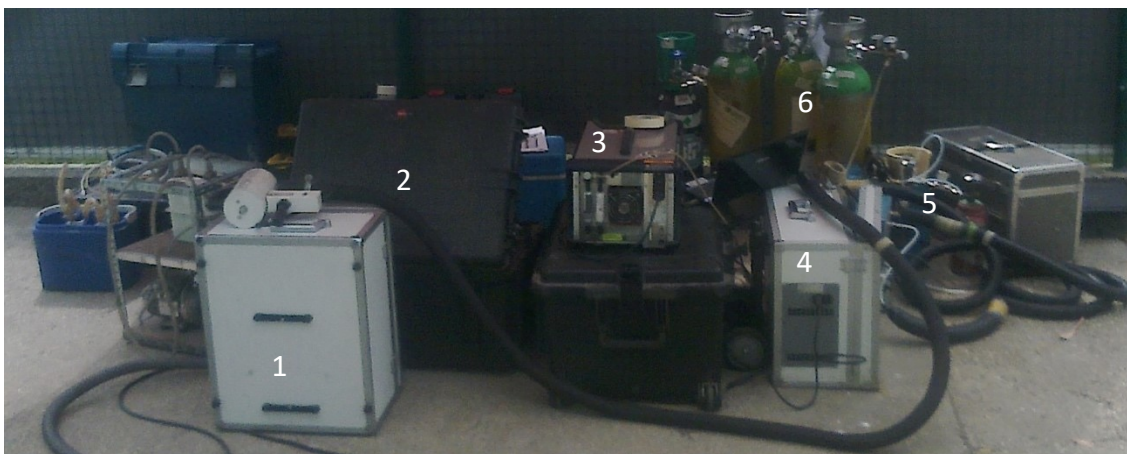


Figura 22 - Equipamentos utilizados na monitorização da combustão

Como podemos ver na Figura 22, os equipamentos e materiais utilizados na monitorização da combustão são:

1. Oriba PG 350E SRM
2. Dadolab ST5
3. Oriba PG 350E SRM
4. Oriba PG 350E SRM
5. Signal 3010
6. Gás padrão

4.2.1 Caldeira

A caldeira utilizada para os ensaios de combustão dos briquetes, como referido anteriormente, é da marca “ATMOS”, modelo DC 25 SP, com uma potência térmica nominal de 25 kW, destinada ao aquecimento de edifícios e para uso doméstico. Na Figura 23, apresenta-se a caldeira utilizada nos ensaios.



Figura 23 - Caldeira ATMOS DC 25 SP

Na Figura 24 apresenta-se um esquema da caldeira vista lateralmente e pela parte de trás, sendo possível observar todos os componentes integrantes da caldeira. A alimentação da caldeira não é automática, sendo que os briquetes são colocados, manualmente, na câmara superior, sendo para tal necessário abrir a porta superior durante o decorrer do ensaio.

Para ser possível entender o normal funcionamento da caldeira, é necessário ter conhecimento dos locais de entrada do comburente na caldeira e da respetiva circulação dos gases de combustão. A caldeira tem dois canais por onde o ar pode entrar para a câmara de combustão: canal superior, por onde entra o ar primário, e canal inferior, por onde entra o ar secundário. O canal inferior tem a possibilidade de estar aberto ou fechado, alterando a circulação do comburente na caldeira. Na Figura 25, apresenta-se em pormenor a caldeira com as respetivas entradas de ar.

Uma vez explicada a forma como se procede à alimentação de ar na caldeira, falta referir o modo como os gases de combustão são extraídos. A caldeira tem um extrator de gases de combustão responsável pela sucção dos mesmos através das tubagens de circulação dos gases. Estas tubagens têm início na câmara de combustão inferior, pelo que a depressão causada pelo extrator faz com que os gases de combustão desçam da zona de combustão para a câmara inferior e entrem nas tubagens, como se ilustra na Figura

25. As caldeiras com este tipo de funcionamento designam-se caldeiras de chama invertida, fazendo com que a combustão ocorra em leito fixo com o comburente a circular em sentido descendente.

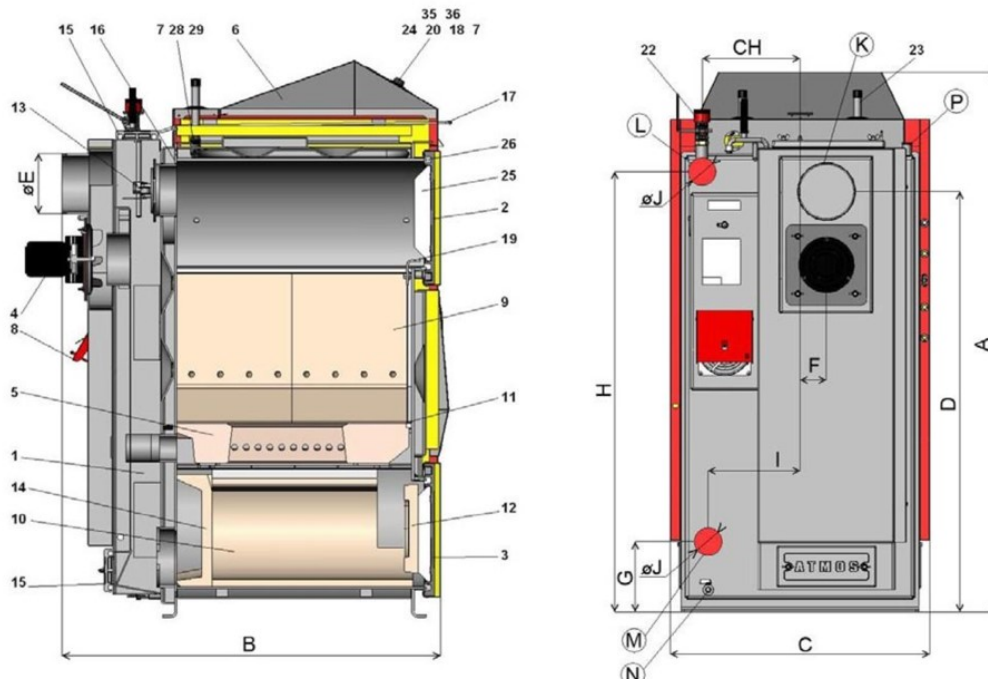


Figura 24 - Esquema da caldeira com a vista lateral e traseira

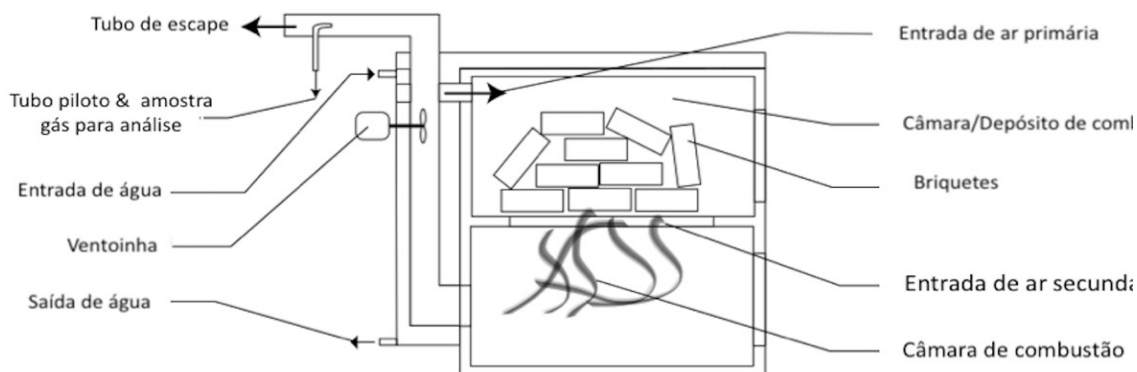


Figura 25 - Esquema simplificado do funcionamento da caldeira

Como referido anteriormente, os briquetes são colocados na câmara de combustão superior. No início da fase de arranque, o canal inferior deve-se encontrar aberto para permitir a entrada de ar na zona intermédia da câmara de combustão, o que funciona como uma “barreira” ao escoamento de ar descendente, facilitando a ignição do combustível. Quando a ignição tiver sido assegurada, o canal inferior deve ser fechado, ocorrendo a combustão nas duas câmaras da caldeira. Na câmara superior ocorre a secagem do material e a posterior libertação dos voláteis contidos no combustível. Os

voláteis gerados passam para a câmara de combustão inferior, onde entram em combustão.

4.2.2 Balança

A balança analítica (PW254, Adam) (Figura 26), foi utilizada para pesar as amostras colocadas na estufa laboratorial para se determinar o respetivo teor de humidade, bem como, para se determinar, através de uma análise simples e utilizando um amostrador isocinético (Dadolab ST5), a quantidade de partículas nas emissões resultantes dos combustíveis sólidos utilizados.



Figura 26 - Balança Adam PW254

4.2.3 Cromatógrafo

O cromatógrafo, Signal 3010 (Figura 27), foi utilizado para determinar os compostos orgânicos voláteis totais das emissões dos combustíveis utilizados na combustão.



Figura 27 - Cromatógrafo Signal 3010

4.2.4 Analisador dos gases de combustão

A concentração dos gases de exaustão foi determinada pelo equipamento Horiba (PG 350e (SRM)), o qual foi responsável pela medição da concentração em volume de dióxido de carbono (CO_2), oxigénio (O_2), óxidos de azoto (NO_x) e monóxido de carbono (CO), a velocidade do gás de combustão foi calculada a partir da pressão diferencial no tubo Pitot. Os sinais analógicos provenientes do analisador foram transmitidos para o equipamento Dadolab ST5, registando-se a fração molar dos gases mencionados (Figura 28).



Figura 28 - Analisador Horiba PG 350E (esquerda) e equipamento Dadolab ST5 (direita)

4.3 Metodologia dos ensaios

Na realização dos ensaios de combustão, foram seguidas certas metodologias consoante o tipo de ensaio que era pretendido, bem como, o método utilizado para obter os resultados pretendidos.

Na Tabela 5, apresenta-se um conjunto de operações que foram realizadas e os correspondentes métodos e equipamentos utilizados.

Tabela 5 - Metodologia nos ensaios de combustão

Ensaio	Método de Deteção	Método de Ensaio	Tempo de amostragem	Equipamento
Determinação de Humidade (H ₂ O)	Gravimetria	EN 14790:2017	30 min	Amostrador isocinético Dadolab ST5 V4.5 Balança AE PW 254
Determinação da Velocidade e do caudal	Método de referência manual	EN ISO 16911:2013		Tubo de Pitot tipo S
Determinação de Dióxido de Carbono (CO ₂)	Absorção de infravermelhos	Método interno	30 min	Horiba PG 350E (SRM) Analisador modular de gases de combustão de acordo com requisitos normas CEN
Determinação de Oxigénio (O ₂)	Paramagnetismo	EN 14789:2017		
Determinação de óxidos de azoto (NO _x)	Quimiluminescência	EN 14792:2017		
Determinação de monóxido de carbono (CO)	Absorção de infravermelhos	EN 15058:2017		
Determinação de compostos orgânicos totais (COT's)	Ionização de chama	EN 12619-1:2013	30 min	Cromatógrafo Signal 3010
Determinação de partículas (Pts)	Gravimetria	EN 13284-1:2009	30 min	Amostrador isocinético Dadolab ST5 V4.5 Balança AE PW 254

4.4 Avaliação da eficiência da caldeira

A avaliação do rendimento de uma caldeira pode ser obtida genericamente através de dois métodos de avaliação: o método das perdas e o método das entradas e saídas. A maioria dos procedimentos normalizados para avaliação do rendimento destes equipamentos, como é o caso da norma EN 12809, baseia-se no primeiro método, que consiste em subtrair à energia contida no combustível as perdas decorrentes do funcionamento, como sendo, as perdas pelos gases de exaustão, as perdas associadas a

evaporação de água presente no combustível e no ar de combustão, as perdas por combustível não queimado e também as perdas por troca de calor não útil com o espaço por radiação, condução e convecção. O segundo método é bastante mais expedito e relaciona apenas a energia útil que se recupera em forma de água quente com a energia contida no combustível.

Para efeitos deste trabalho não foi avaliada a eficiência da caldeira, visto que, o foco principal era obter resultados das concentrações de poluentes e respetivos caudais mássicos das biomassas utilizadas. No entanto, para proceder a uma avaliação do rendimento da caldeira dever-se-ia usar o método das entradas e saídas, por ser mais expedito, porque o método das perdas implica o conhecimento de dados de difícil obtenção como, por exemplo, a quantidade de carbono perdido nas cinzas. O método das entradas e saídas está traduzido na equação (4.1).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{comb}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{água}}}{\dot{Q}_{\text{comb}}} = \frac{(\dot{m} * C_p * \Delta T)_{\text{água}}}{(\dot{m} * PCI)_{\text{comb}}} \quad (4.1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 5.1 Propriedades da biomassa residual
- 5.2 Propriedades dos briquetes produzidos
- 5.3 Caracterização dos efluentes gerados na combustão
- 5.4 Composição do gás de combustão
- 5.5 Emissões de poluentes no gás de combustão
- 5.6 Comparação entre dois estudos

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos, quer para a caracterização da biomassa residual, quer para os briquetes produzidos, quer ainda nos ensaios de queimas destes briquetes em caldeira. São ainda analisados estes resultados e comparados com os obtidos por outros autores.

5.1 Propriedades da biomassa residual

As características da biomassa residual dependem de vários fatores, incluindo as condições de colheita e armazenamento temporário e, particularmente da natureza da biomassa original. A caracterização foi efetuada conforme descrito no capítulo 3, e os resultados apresentam-se de seguida.

5.1.1 Teor de humidade da biomassa residual

O teor de humidade, de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Teores de humidades utilizados nos ensaios

<i>Combustível</i>	Teor de humidade [%]	Desvio padrão [%]
<i>Poda de vinha</i>	12,2	0,26
<i>Poda de oliveira</i>	10,6	0,69
<i>Poda de macieira</i>	12,7	0,31
<i>Poda urbana</i>	9,5	0,18
<i>Poda de kiwi</i>	19,5	0,45
<i>Serrim</i>	9,7	-

Pela análise dos valores do teor de humidade obtidos, as fontes de biomassa apresentam um teor de humidade equivalente ao da madeira natural, variando de 9,5 a 12,7%. É de salientar o valor apresentado pelas podas de kiwi que registou um valor mais alto (19,5%), e que pode ser explicado pelo modo e tempo passado desde a recolha da matéria-prima em questão, a qual foi recolhida no mês de fevereiro deste mesmo ano, face às restantes podas obtidas entre os meses de fevereiro e abril no ano de 2018, e o curto espaço de tempo de acondicionamento nas instalações em comparação com

os outros resíduos de biomassa disponíveis. Assim, o processo natural de secagem desta biomassa não foi devidamente realizado face aos outros tipos de combustível em estudo.

5.1.2 Teor de cinzas da biomassa residual

O teor de cinzas, de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Teores de cinzas nos ensaios

Combustível	Teor de cinzas [A_d, %]	Desvio padrão [%]
<i>Podas de vinha</i>	3,3	0,22
<i>Podas de oliveira</i>	3,7	0,61
<i>Podas de macieira</i>	5,1	0,43
<i>Podas urbanas</i>	4,8	0,16
<i>Podas de kiwi</i>	3,2	0,33
<i>Serrim</i>	0,8	-

Pela análise do teor de cinzas obtido, todas as podas de biomassa apresentam um teor de cinzas superior quando comparados com o serrim. Isso é atribuído à maior proporção da casca/tronco que é natural nas podas. É de salientar o valor apresentado pelas podas de macieira e urbanas, que registaram um valor mais alto e que pode ser explicado, como referido anteriormente, com o tronco e referente resina que o mesmo possa apresentar. No caso das podas urbanas, o solo de onde foi feita a recolha pode conter mais ou menos poluição proveniente do fumo dos veículos ou mesmo outro tipo de poluição de resíduos que entram em contactos com o solo. Relativamente ao serrim apresenta potencial pelo baixo teor de cinzas, apesar do exame ter sido realizado noutras condições.

5.1.3 Teor de matéria volátil da biomassa residual

O teor de matéria volátil, de cada tipo de combustível encontra-se na Tabela 8Tabela 8.

Tabela 8 - Teores de matéria volátil

Combustível	Teor de matéria volátil [V_d, %]	Desvio padrão [%]
<i>Podas de vinha</i>	80,1	0,28
<i>Podas de oliveira</i>	78,7	0,59
<i>Podas de macieira</i>	78,7	0,31
<i>Podas urbanas</i>	79,1	0,11
<i>Podas de kiwi</i>	79,7	0,55
<i>Serrim</i>	83,7	-

Pela análise do teor de matéria volátil, todas as podas de biomassa apresentam um valor muito semelhantes neste estudo, as quais são inferiores ao teor de matéria volátil do serrim.

5.1.4 Teor de carbono fixo da biomassa residual

O teor de carbono fixo, de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Teores de carbono fixo da biomassa residual

Combustível	Teor de carbono fixo [C_f, %]	Desvio padrão [%]
<i>Podas de vinha</i>	16,6	0,22
<i>Podas de oliveira</i>	17,6	0,54
<i>Podas de macieira</i>	16,2	0,37
<i>Podas urbanas</i>	16,1	0,16
<i>Podas de kiwi</i>	17,1	0,39
<i>Serrim</i>	15,5	-

Pela análise do teor de carbono fixo, conclui-se que todas as podas de biomassa apresentam um valor muito semelhante neste estudo, as quais são superiores ao teor de carbono fixo do serrim.

5.1.5 Análise elementar da biomassa residual

A análise elementar de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise elementar da biomassa residual

Parâmetro	Unidade	Podas de vinha	Podas de oliveira	Podas de macieira	Podas urbanas	Podas de kiwi	Serrim
<i>C</i>		50,5	48,8	46,5	47,7	48,2	47,3
<i>O*</i>		39,4	38,5	40,9	39,8	41,4	45,2
<i>H</i>	(%)	5,84	7,14	6,20	6,13	6,40	6,40
<i>N</i>		0,95	1,80	1,20	1,45	0,70	0,13
<i>S</i>		0,04	0,08	0,08	0,07	0,15	0,99

*Estimado pela diferença do total: $100\% - ((C\% + H\% + N\% + S\%) + cinzas)$

O teor de azoto ou nitrogênio (N) nas podas de biomassa é um elemento chave no que diz respeito à formação de NO_x na combustão de combustíveis sólidos. Pelos resultados da análise elementar, este revelou-se significativamente superior ao valor encontrado

no serrim, o que pode ser atribuído ao tipo inerente de biomassa em estudo. Folhas de plantas são naturalmente ricas em azoto, devido a questões relacionadas com a capacidade de fotossíntese e também a constituição da casca e pequenos ramos, especialmente em árvores que são fertilizadas com nitrogênio para melhorar a sua taxa de crescimento, justificando assim os resultados.

5.1.6 Poder calorífico da biomassa residual

O poder calorífico, de cada tipo de combustível apresenta-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Poder calorífico da biomassa residual

	Podas de vinha	Podas de oliveira	Podas de macieira	Podas urbanas	Podas de kiwi	Serrim
PCI [MJ/kg]	15,77	17,03	14,65	15,56	16,90	18,60
PCS [MJ/kg]	17,03	18,57	15,80	16,89	18,63	-






Pela análise do poder calorífico, as podas de biomassa apresentam um PCI inferior comparado com o serrim. Esse comportamento pode estar associado com um maior teor de cinzas e humidade apresentados nas podas em estudo.

5.2 Propriedades dos briquetes produzidos

A caracterização permite obter uma compreensão mais aprofundada sobre os briquetes produzidos, com vista a uma melhor conversão energética na combustão.

Na Tabela 12, apresentam-se os briquetes produzidos, bem como as suas propriedades. Pela análise da Tabela 12, o briquete de kiwi apresenta um teor de humidade elevado, levando a uma maior dificuldade quando for sujeito à combustão. Este briquete distingue-se pelo comprimento. Como referido anteriormente, pelos valores apresentados na tabela, podemos deduzir pela análise do teor de humidade que os briquetes de kiwi deverão apresentar o pior desempenho perante o processo de combustão, face ao briquetes urbanos que deverão apresentar uma melhor combustão. Isto não significa que os briquetes urbanos são melhores que os briquetes de kiwi, apenas no processo de combustão os briquetes que apresentem menor humidade queimam melhor que os restantes. É de salientar que a composição elementar e o PCI dos briquetes é igual a das podas, visto que é uma característica própria da matéria-prima e não sofre alterações na compactação.

Tabela 12 - Características dos briquetes produzidos com a biomassa residual

<i>Designação</i>	<i>Briquetes</i>	<i>Humidade [%]</i>	<i>Comprimento [mm]</i>	<i>Massa [g]</i>	<i>Massa volúmica [kg/m³]</i>	<i>Área de secção [mm²]</i>
<i>Briquete de vinha</i>		11,1	84,9	218,25	1133	2269
<i>Briquete de oliveira</i>		10,2	86,7	226,79	1175	2226
<i>Briquete de macieira</i>		11,9	85,6	212,15	1092	2269
<i>Briquete urbano</i>		9,1	81,85	183,44	951	2357
<i>Briquete de kiwi</i>		12,3	106,1	227,91	844	2544

Os ensaios realizados permitem quantificar as emissões poluentes resultantes da combustão dos briquetes no meio ambiente. Desta forma, procura-se validar a possibilidade da utilização de briquetes provenientes de biomassa no processo de

combustão, em comparação com os briquetes comerciais (serrim), do modo a avaliar as emissões gasosas, e assim compreender os benefícios da combustão de briquetes.

5.3 Caraterização dos efluentes gerados na combustão

Nesta secção apresentam-se os resultados referentes à caracterização dos efluentes gerados na combustão dos briquetes produzidos com a biomassa residual, analisando-se o comportamento que os variados tipos de combustível e o caudal mássico de combustível têm na emissão de poluentes, como representa a Tabela 13.

Tabela 13 - Caraterização dos efluentes resultantes da combustão de cada um dos combustíveis

Parâmetro	Fonte Fixa					Serrim
	Podas urbanas	Podas de vinha	Podas de oliveira	Podas de macieira	Podas de kiwi	
Pressão atmosférica (Pa)	99620	99700	99900	99520	98630	99800
Temperatura ambiente (K)	294,0	294,2	292,3	294,9	291,9	297,0
Temperatura exaustão (K)	547,2	546,6	553,1	534,4	503,4	439,8
Pressão absoluta exaustão (Pa)	99560	99650	99870	99510	98640	99910
Massa molecular do gás seco (g/mol)	30,73	30,71	30,72	29,55	30,55	29,52
Densidade do gás seco ($\text{kg/m}^3\text{N}$)	1,371	1,370	1,371	1,318	1,363	1,317
Velocidade do escoamento (m/s)	3,23	2,08	2,25	2,33	2,85	1,3
Caudal efetivo (m^3/h)	205	133	143	148	181	117
Caudal volúmico seco (Nm^3/h)	92	58	65	69	74	62
Isocinetismo (95-115%)	99	99	97	95	95	111

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 13, todos os combustíveis utilizados originam valores muito semelhantes nos parâmetros em análise neste estudo, embora sejam de salientar os valores do caudal volúmico seco e efetivo das emissões das podas urbanas, que se destacam dos outros tipos de combustíveis. Estes valores mais elevados ($92 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e $205 \text{ m}^3/\text{h}$, respetivamente) podem ser explicados pelo facto de as podas urbanas terem sido o primeiro combustível testado na combustão, portanto, a caldeira e o tubo Pitot estavam completamente limpos, o que pode ter influência nesses valores.

5.4 Composição do gás de combustão

Nesta secção apresentam-se os resultados referentes à composição dos gases libertados na combustão, como representado na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição do gás na combustão

Parâmetro	Fonte Fixa					Serrim
	Podas urbanas	Podas de vinha	Podas de oliveira	Podas de macieira	Podas de kiwi	
O_2 (% vol)	6,9	7,1	6,8	8,3	8	13,4
CO_2 (% vol)	15,35	15,16	15,29	7,62	13,97	6,17
N_2 *(% vol)	77,75	77,74	77,91	84,08	78,03	80,43
H_2O (% vol)	8,3	10,2	7	7,7	13,7	12,9
Temperatura (K)	547,2	546,6	553,1	534,4	503,4	439,8
Velocidade no escoamento (m/s)	3,23	2,08	2,25	2,33	2,85	1,3

*Valor calculado: $N_2 = 100\% - (CO_2 + O_2)$

Na análise dos resultados da Tabela 14, a combustão das podas de vinha, oliveira e urbanas originou uma composição de oxigênio nas emissões na casa de 7%, denotando o menor excesso de ar em todos os ensaios de combustão e, portanto, as temperaturas mais elevadas dos gases de escape (cerca de 550 K). No que diz respeito ao ensaio de combustão de briquetes de resíduos de poda de macieira, esta apresentou alguns problemas para se estabilizar, levando muito tempo e combustível. Devido a isso, a massa utilizada de briquetes foi insuficiente e, no final do teste, o nível de excesso de ar aumentou, resultando em um maior teor de oxigênio (8,3%) e uma temperatura de gás de combustão de cerca de 20 K mais baixa. Em relação às emissões da queima dos briquetes provenientes das podas de kiwi apresentaram um teor de oxigênio (8%) e a temperatura mais baixa em comparação com as emissões resultantes das restantes podas oriundas de fontes de biomassa. O teste de referência, feito com briquetes de madeira de pinho (serrim), registou o maior nível de excesso de ar e a menor temperatura dos gases de combustão de todos os testes. Como a caldeira é um sistema de gaseificação de madeira descendente, essa diferença pode ser atribuída a uma carga de combustível inicial muito diferente no teste.

5.5 Emissões de poluentes no gás de combustão

Nesta secção apresentam-se os resultados referentes às emissões de poluentes que ocorrem na combustão como representa a Tabela 15.

A concentração de poluentes no gás de combustão seco, nomeadamente CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de azoto), COT (compostos orgânicos totais) e Partículas, foi convertida de ppm para mg / m^3 e corrigida para uma referência de teor de oxigênio de 6%, usando a equação 5.1.

$$\text{Concentração @ } 6\% O_2 = \text{Concentração @ medida } \%O_2 \times \frac{20,9-6,0}{20,9-O_2 \text{ medido}} \quad (5.1)$$

onde:

A concentração @ 6% O_2 é a concentração do poluente no teor de 6% de oxigênio;

A concentração @ medida % O_2 é a concentração de poluente medida no teste;

O_2 medido é a concentração média de oxigênio medida no teste.

Tabela 15 - Emissões na combustão

Parâmetros	Fonte Fixa					Serrim
	Podas urbanas	Podas de vinha	Podas de oliveira	Podas de macieira	Podas de kiwi	
CO (mg/m^3 @ 6% O_2)	96	275	285	508	265	989
NO_x (mg/m^3 @ 6% O_2)	613	615	433	918	1140	169
COT (mg/m^3 @ 6% O_2)	182	126	301	160	112	217
<i>Partículas</i> (mg/m^3 @ 6% O_2)	69	137	133	83	189	72

Na análise da Tabela 15, obteve-se um nível muito baixo de emissões de monóxido de carbono nos resíduos urbanos de poda (96 mg / m^3 @ 6% O_2), em contraste com os briquetes de madeira de pinho (serrim), que registaram um nível de emissão 10 vezes superior (quase 1000 mg / m^3 @ 6% O_2). Os resíduos de poda de kiwi, vinha e oliveira apresentaram níveis semelhantes de emissão de CO (abaixo de 300 mg / m^3 @ 6% O_2) e resíduos de poda de macieira um pouco acima dos dois últimos.

As emissões de CO estão ligadas à combustão incompleta, que pode ser causada por vários fatores na combustão de combustível sólido, ou seja, nível inadequado de ar em excesso, temperatura da câmara de combustão, mistura de reagentes, etc. A alta taxa de emissão de CO resultante da combustão de briquetes de madeira de pinho (serrim) pode estar ligada ao alto nível de excesso de ar em teste, que causa uma baixa temperatura na câmara de combustão, comprovada pela temperatura mais baixa registada dos gases de exaustão. A mesma conclusão pode ser tirada para os resíduos de poda de macieira, que registaram o maior excesso de nível de ar e emissão de CO de todos os resíduos de poda. Os demais tipos de biomassa apresentaram emissão de CO no gás de combustão de acordo com o nível de sofisticação do equipamento de combustão utilizado no ensaio. Estes factos provam que os briquetes feitos a partir de resíduos típicos de poda lenhosa podem ser queimados sem grandes preocupações, em relação ao comportamento na combustão, quando comparadas com briquetes feitos de madeira de pinho, estando dentro dos valores limites da legislação em vigor.

A emissão de óxido de azoto na combustão das biomassas de poda residual variou de 433 a 1140 mg / m^3 @ 6% O_2 , valores que contrastam com 169 mg / m^3 @ 6% O_2 dos briquetes de serrim de referência. O NO_x pode ser formado na combustão da biomassa por dois mecanismos principais, que estão diretamente relacionados com o teor de N do combustível e à temperatura de combustão (Perez-Jimenez, 2015). Portanto, essa diferença significativa na emissão de NO_x entre a biomassa de poda e a madeira de

pinho pode ser explicada pelo conteúdo de N superior no combustível, variando de 5 a 14 vezes mais nos resíduos de poda quando comparado à de madeira de pinho. Apesar disso, comparando a emissão de NO_x com resíduos de poda, parece que o nível de emissão não depende do teor de N do combustível, mas sim da temperatura de combustão, que é inversamente proporcional ao excesso de ar (teor de oxigênio no gás de combustão). Esta conclusão indica que as biomassas dos resíduos de poda tendem a originar maiores níveis de emissão de NO_x do que a madeira, mas essas emissões podem ser minimizadas com técnicas corretas de controle de emissão de NO_x , como, por exemplo, *air staging* ou combustão em dois estágios (a introdução de ar excessivo na caldeira).

O nível de emissão dos compostos orgânicos é inferior em todas as fontes residuais de biomassa, quando comparado aos briquetes de referência de madeira de pinho, exceto para resíduos de poda de oliveira. Durante a produção do combustível observou-se que a matéria-prima era composta por uma quantidade significativa de folhas e os briquetes produzidos apresentavam uma superfície aderente ao toque. Dada a fonte de biomassa, isso pode significar a presença de óleos residuais que podem resultar na emissão de compostos orgânicos na combustão, explicando os resultados.

No que diz respeito às partículas provenientes da combustão, os briquetes provenientes da poda de macieira e resíduos de poda urbana registaram um nível de emissão semelhante ao observado na combustão de briquetes de madeira de pinho. Briquetes de resíduos de vinha, kiwi e oliveira apresentaram um nível de emissão de material particulado superior aos demais, dado que, a emissão de material particulado na combustão de madeira é significativamente afetada pela cinza volante (M. Obaidullah*, 2018), e os resíduos de poda kiwi, vinha e oliveira apresentam menor teor de cinzas que podas de macieira e urbana (ao contrário dos níveis de emissão de partículas). Esta diferença pode ser atribuída a cinzas em repouso, acumuladas nas câmaras da caldeira. Isso levou à conclusão de que a limpeza do equipamento de combustão é um elemento-chave no controle da emissão de partículas, e não o teor de cinzas, na medida dos níveis registrados neste estudo.

Segundo o Diário da República 1ª série nº 110 de 23 Junho 2009 na Portaria nº 677/2009 os valores limites de emissões para caldeiras que utilizem biomassa como combustíveis com um teor de O_2 de 11% são:

- NO_x – 650 mg/ Nm^3
- CO – 500 mg/ Nm^3
- Partículas – 150 mg/ Nm^3

5.6 Comparação entre dois estudos

Nesta secção apresentam-se uma pequena comparação entre dois estudos utilizando três tipos de biomassa iguais, mas em formatos diferentes de combustível (pellets e briquetes), analisando os resultados referentes às emissões de poluentes que ocorrem na combustão, como representa a Tabela 16.

Tabela 16 - Emissões na combustão dos diferentes tipos de combustível

Parâmetros	Pellets	Pellets	Pellets	Briquetes	Briquetes	Briquetes
	Vinha	Oliveira	Kiwi	Vinha	Oliveira	Kiwi
CO ($mg/m^3 @ 6\% O_2$)	11086	10422	11442	275	285	265
NO_x ($mg/m^3 @ 6\% O_2$)	617	530	919	615	433	1140
Partículas ($mg/m^3 @ 6\% O_2$)	673	643	208	137	133	189
O_2 (%vol)	18,3	18,8	18,1	7,1	6,8	8

A Tabela 16, compara os resultados da emissão de poluentes na combustão dos briquetes, produzidos neste trabalho, com pellets de matéria-prima com a mesma origem. A sua análise permite perceber uma grande diferença nos valores em todos os parâmetros analisados. No que diz respeito ao CO, a concentração do poluente na combustão de pellets é duas ordens de grandeza mais elevada, quando comparada com a dos briquetes. Esses valores podem ser explicados pelo nível de excesso de ar utilizado na combustão dos pellets, patente no elevado teor de O_2 nos gases de escape, o que demonstra que o coeficiente de excesso de ar é um parâmetro importante para alcançar a combustão ideal da biomassa. Em relação aos valores de NO_x , os pellets de vinha apresentam valor semelhante aos briquetes da mesma matéria-prima. Já os pellets de oliveira apresentam cerca de ($97 mg/m^3 @ 6\% O_2$) a mais do que os briquetes, enquanto que os pellets de kiwi revelam emissão 24,05 % menor ($221 mg/m^3 @ 6\% O_2$) que os briquetes.

Como já referido anteriormente, na combustão de biomassa o NO_x formado tem, essencialmente, origem no N presente no combustível. Apesar de não ser conhecido o teor de N que os pellets continham, este pode ou não estar diretamente ligado a diferença entres os valores dos pellets e dos briquetes, em ambos os casos podemos constatar que os teores de N devem ser semelhantes já que a matéria-prima é a mesma, contudo este teor de N pode ser diferente; basta que tenham sido, por exemplo, utilizados mais ou menos fertilizantes no cultivo da matéria-prima, na comparação dos dois tipos diferentes de combustível apenas difere o modo de compactação a que foi sujeita. A compactação não provoca alterações nas propriedades químicas da biomassa, logo, outro dos fatores que pode afetar os valores de NO_x é a temperatura de combustão, esta, pode estar ligada à diferença apresentada entre os dois estudos.

A emissão de partículas nos pellets de vinha e oliveira é bastante superior aos valores registados na combustão dos briquetes, enquanto que os pellets de kiwi, apresentam ($19 \text{ mg/m}^3 @ 6\% \text{ O}_2$) superior aos briquetes. A emissão de partículas na combustão é afetada por vários fatores, tais como o teor de cinzas da matéria-prima, a velocidade do ar na grelha de combustão (ar primário) e a presença de partículas finas no combustível. Como a origem da biomassa é semelhante, o teor de cinzas supõe-se da mesma ordem de grandeza. A velocidade do ar na grelha em excesso pode fazer com que cinzas sejam pneumáticamente transportadas para a chaminé e a presença de partículas muito finas pode fazer com que sejam imediatamente transportadas pelos fluxos de ar, sem tempo de residência na câmara de combustão suficiente para que sejam queimadas. Por isso, é possível inferir que a diferença na emissão de partículas está relacionada com os parâmetros de combustão e/ou qualidade da densificação do combustível. Em suma, as diferenças registadas parecem ter origem em parâmetros de combustão de pellets desajustados, uma vez que o controlo do excesso de ar introduzido na caldeira é um ponto crítico na realização de ensaios de combustão de biomassas.

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

- 6.1 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)
- 6.2 Modelação
- 6.3 Resultados

6 AVAlIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que permite medir o impacto ambiental de um produto, processo ou sistema, ao longo do seu ciclo de vida. A aplicação desta metodologia engloba a identificação e avaliação de entradas e saídas do sistema de e para o meio ambiente, por forma a determinar os seus impactos ambientais, permitindo assim instituir estratégias para os reduzir/eliminar.

Numa ACV consideram-se como entradas todos os recursos, matérias-primas, consumos de energia, entre outros, que intervêm em processos do sistema. Já as saídas definem-se como todas as emissões para o meio ambiente (ar, água e solo), os resíduos e os subprodutos que se obtêm em cada processo do sistema.

A metodologia de ACV segue um tratamento holístico, ou seja, avalia o sistema como um todo, daí incluir todas as entradas/saídas que intervêm ao longo do ciclo de vida. Contudo, devido à quantidade de informação necessária, esta metodologia nem sempre pode ser aplicada na sua plenitude, pelo que existem diferentes abordagens, de acordo com as etapas do ciclo de vida de um produto consideradas. Na Figura 29 é representada uma análise mais detalhada das etapas da ACV.

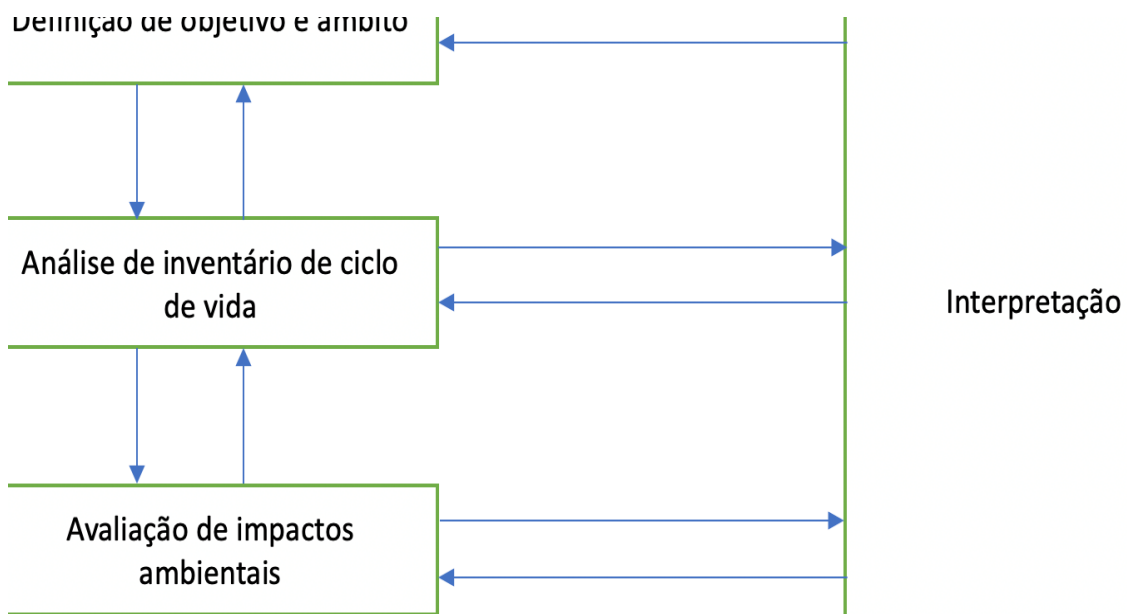


Figura 29 - Etapas de uma ACV

Relativamente às fronteiras um estudo de ACV, as mais comuns são:

- **Do berço ao túmulo**, em que a ACV inclui a obtenção das matérias-primas até ao fim de vida do produto, incluindo: extração, transporte, armazenamento, produção e embalagem, distribuição, uso e fim de vida;
- **Do berço à porta**, em que neste caso a ACV se limita às etapas compreendidas entre a obtenção das matérias-primas e a colocação do produto no mercado ou seja: extração, transporte, armazenamento, produção e embalagem, distribuição;
- **Da porta à porta** em que a ACV considera apenas as entradas/saídas do sistema produtivo (produção), excluindo distribuição, uso e fim-de-vida;

O objetivo deste estudo foi examinar sustentabilidade ambiental do sistema de combustão de biomassa através da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida, para isso foi definido uma fronteira do berço ao túmulo para o estudo em questão. Os sistemas envolvidos na ACV da combustão de biomassa foram: atividade poda, recolha, secagem, trituração, transporte, compactação, combustão de biomassa e fim de vida, como representado na Figura 30.

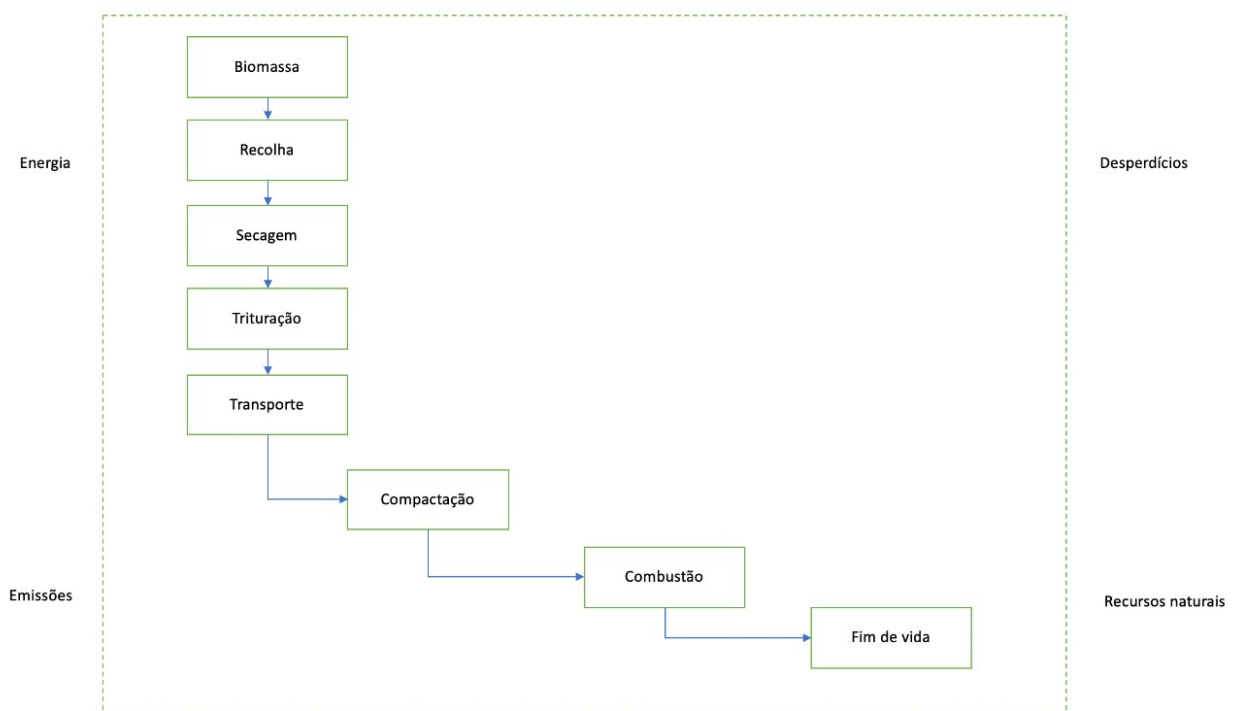


Figura 30 - Sistemas envolvidos na ACV

Com base neste sistema podemos obter dois cenários possíveis para este tudo, como apresenta a Figura 31.

Como referido anteriormente, foram estudados dois cenários, num deles opta-se após a recolha da biomassa por efetuar a queima ao ar livre da biomassa (foi optado por este cenário, visto que, para pequenos hectares é o método mais utilizado pelos agricultores) (Cenário 1) e no outro caso a biomassa é recolhida para ser utilizada numa caldeira, na forma de briquetes (Cenário 2) , envolvendo todo um processo como se pode ver na Figura 31.

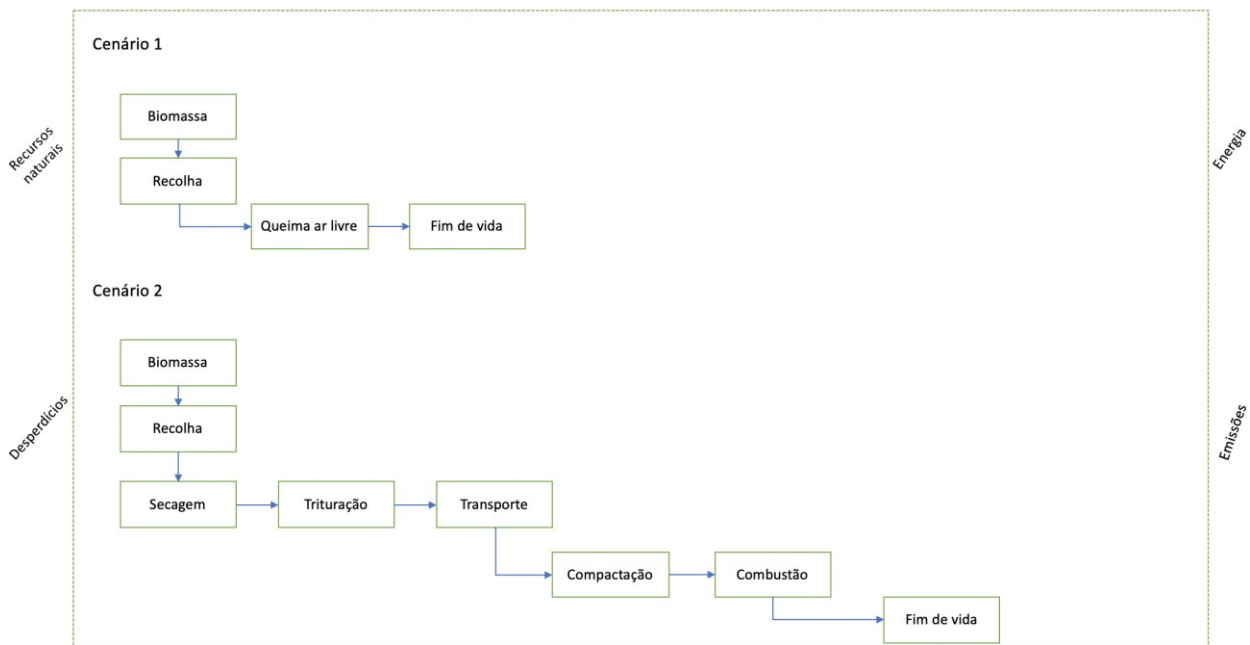


Figura 31 - Dois tipos de cenários diferentes na ACV

Nesta fase do ACV foram contabilizados os fluxos ambientais e energéticos das diferentes etapas e os processos envolvidos no ciclo de vida na combustão.

A primeira etapa da biomassa (poda agrícola) é um conjunto de operações efetuadas numa planta/árvore que permitem modificar de forma natural a vegetação restringindo o desenvolvimento dos ramos, de forma, a restaurar a árvore para obter uma produção constante e elevada, estas operações podem ser realizadas com uma tesoura de poda (manual, pneumática ou elétrica) e máquina de poda (poda integral e pré-poda). Na segunda etapa ocorre a recolha da biomassa, a maior parte dos tipos de biomassa (agrícola e florestal) são caracterizados pela sua disponibilidade sazonal. O período de tempo em que estes tipos de biomassa estão disponíveis é bastante limitado e é determinada pelo período de colheita das culturas, pelas condições meteorológicas e pela necessidade de replantação dos campos e florestas. O período de tempo limitado para a recolha de uma grande quantidade de biomassa leva também a uma necessidade

sazonal significativa de recursos, equipamentos e força de trabalho, nesta recolha podem ser utilizadas máquinas de enfardar e estilhar (florestas), máquina de ceifa (agrícola) e uma máquina que recolhe e tritura ao mesmo tempo facilitando o processo. No cenário 1 a terceira etapa é a queima ao ar livre de resíduos agrícolas e florestais, normalmente, quando recolhidos em pequena escala os produtores optam pela sua queima, esta mesma provoca emissões para o meio ambiente como CO_2 , CO, hidrocarbonetos, outros gases como SO_2 , NO_x , partículas com substâncias cancerígenas e compostos orgânicos voláteis (tolueno, isopreno e propeno). Relativamente ao cenário 2, a etapa que se segue é a secagem da biomassa, esta etapa é importante na preservação da biomassa, redução do teor de humidade e no aumento do poder calorífico. Este processo de secagem é mais utilizado quando a biomassa apresenta teor de humidade altos para a combustão, assim, uma das técnicas para reduzir esse mesmo teor é através da secagem natural ao ar, onde o teor de humidade alcançável da biomassa depende da temperatura e da humidade relativa do ar.

Após a secagem da biomassa estar concluída a etapa seguinte passa pela trituração da mesma. Este processo de trituração permite reduzir a biomassa em tamanhos mais pequenos que promovem o transporte da mesma, bem como a sua compactação quando for necessário produzir péletes ou briquetes, geralmente neste processo de trituração da biomassa são utilizadas trituradoras de martelo ou facas lâminas). O transporte da biomassa é considerado pela localização típica das fontes de biomassa. Normalmente os meios de transportes rodoviários são os mais utilizados, já que serão os únicos modos viáveis para a recolha e transporte da biomassa, porém, outros fatores que favorecem a utilização deste meio de transporte são a maior flexibilidade que o transporte em estrada pode oferecer e as pequenas distâncias, contudo os veículos de transporte rodoviário têm gerado várias opiniões na literatura acerca da viabilidade económica no uso destes veículos pesados ou equipamento agrícola/florestal para o transporte de biomassa. Relativamente a esta questão existem fatores como a distância média de transporte, densidade da biomassa, capacidade de carga e velocidade de condução dos veículos, tal como a sua disponibilidade, que fazem variar a escolha dos mesmos, todavia, os meios de transporte ferroviário e marítimo podem ser considerados uma solução quando a distância de transporte da biomassa é longa.

A compactação da biomassa é responsável pela conversão da biomassa em combustível sólido em forma de briquetes e péletes. A força da compactação é influenciada pela força mecânica, fatores físico-químicos, estas propriedades físicas e químicas da biomassa determinam a densidade, durabilidade e estabilidade dos briquetes/péletes, as propriedades físicas são afetadas pela humidade, tamanho de partículas e pela densidade aparente, habitualmente para a compactação dos briquetes são utilizadas briquetadora de parafuso ou com prensa hidráulica de pistão.

Na etapa da combustão, o combustível proveniente da biomassa (briquetes) é queimado com ar em excesso para produzir calor. Aqui a queima da biomassa é realizada a altas

temperaturas na presença abundante de oxigénio produzindo vapor a alta pressão, onde o primeiro estágio da combustão envolve a evolução do vapor combustível da biomassa, as principais emissões provenientes da combustão da biomassa são CO , CO_2 , NO , NO_x , SO , SO_x , partículas, cinzas, compostos orgânicos e hidrocarbonetos. Geralmente na combustão dos briquetes de biomassa são utilizadas caldeiras ou fornalhas. Na etapa final dos dois cenários, o fim de vida considerado foi a deposição em aterro.

6.1 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)

Como indicado, o ICV para o estudo baseou-se principalmente na etapa de combustão dos resíduos de biomassa provenientes da vinha. Sendo que nas outras etapas existentes foram utilizados processos agregados, ou seja, fruto de ICV e existentes nas bases de dados - processos de segundo plano.

De referir que os processos considerados de “segundo plano” e utilizados neste estudo foram: a produção de energia elétrica, o *mix* de diesel e os processos de fim-de-vida, tendo para tal utilizado os processos agregados (resultados de ICV) existentes na base de dados profissional do *software* de ACV (GaBi) com as seguintes características e nome:

- “PT: Electricity grid mix”: Os dados incluem a produção e distribuição de energia elétrica de acordo com a realidade Portuguesa. O *mix* elétrico considerado encontra-se em baixo. As perdas de distribuição/transmissão de eletricidade na rede estão também consideradas. Os dados são válidos de 2012 a 2019, estando dentro do período deste estudo;
- “EU-28: Diesel mix at filling station”: O conjunto de dados abrange toda a cadeia de abastecimento dos produtos da estação de serviço, incluindo perfuração de poços, produção e processamento de petróleo bruto, transporte de petróleo bruto para a refinaria e desta para a estação de enchimento. São consideradas as propriedades específicas da região (Europa 28, na falta de dados nacionais), da estação de enchimento, das matérias-primas e do produto (diesel).

Na Figura 32, está representado o diagrama de fluxo obtido no software de ACV utilizado para obter o cenário 1.

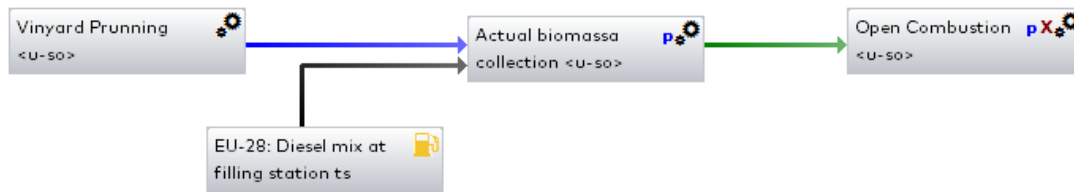


Figura 32 - Diagrama de fluxo correspondente a queima ao ar livre (cenário 1)

De forma a possibilitar uma melhor compreensão do ACV dos cenários, relativamente ao cenário 2 optou-se por agrupar em três grupos distintos, como demonstra a Figura 33:

- Biomassa residual (Poda, Recolha e Secagem);
- Briquetes (Trituração, Transporte e Compactação);
- Combustão.

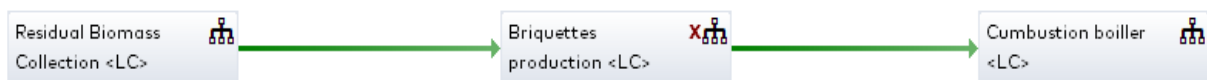


Figura 33 - Diagrama de fluxo da combustão numa caldeira (cenário 2)

6.2 Modelação

Tendo em conta os limites definidos, os dados recolhidos e os resultados obtidos nas tarefas anteriores, foram criados no *software* do ACV modelos que recriassem todo o processo da utilização dos resíduos de vinha na combustão ao ar livre e numa unidade de combustão utilizando esse mesmo resíduo, mas numa forma mais compacta (briquete). É possível observar a presença de diversos processos idênticos nas diferentes etapas nos cenários, tais como poda e fim-de-vida. Para o primeiro cenário, como demonstra a Figura 33, no processo de poda da biomassa foi assumido que se obtinham 3000 kg de resíduos, como demonstra a Figura 34.

Parâmetros						
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio p	Comentário
Parâmetro						

ACV	ACC: 0 EUR	ACTT	Documentação
-----	------------	------	--------------

Suficiência: Nenhum enunciado

Entradas						
Fluxo	Quantidade	Quantia	Unidade	Fluxo	Desvio p	Origem
Fluxo						

Saídas						
Fluxo	Quantidade	Quantia	Unidade	Fluxo	Desvio p	Origem
Biomass (solid) [Biomass fuels]	3E003	kg	X	0 %	(Nenhum enuncia	
Fluxo						

Figura 34 - Dados do processo de poda no cenário 1

Após estar definida a quantidade de biomassa a utilizar, foi inserido no seguinte processo, recolha (*actual biomass*), foram introduzidos todos os parâmetros, entradas e saídas que esse processo envolve como demonstra a Figura 35. É de realçar que neste processo de recolha foi utilizado um trator para efetuar essa mesma colheita, o qual, envolve utilização de diesel e conseqüentemente emissões.

Parâmetros						
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio %	Coment
biomass_a		3E003			0 %	kg
Biomass_burn	$biomass_a * 0,9$	2,7E003				
CH4_a	$0,0005 / 1000 * distance$	2E-006				
CO_a	$0,000667 / 1000 * distance$	2,67E-006				
CO2_a	$0,357 / 1000 * distance$	0,00143				
Diesel	$6,5 * 0,5$	3,25				
distance		4			0 %	km/ha
NOx_a	$0,00109 / 1000 * distance$	4,36E-006				
SOx_a	$0,000721 / 1000 * distance$	2,88E-006				
waste_a	$biomass_a * 0,1$	300				

Entradas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio %	Origem
biomass_z	⇒ Biomass (solid) [Biomass fuels]	Mass	3E003	1	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
Diesel	⇒ Diesel [Refinery products]	Mass	2,72	0,838	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia

Saídas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio %	Origem
Biomass_t	⇒ Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	2,7E003	1	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
waste_a	⇒ Biowaste [Waste for recovery]	Mass	300	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CO2_a	⇒ Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	Mass	0,00143	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CO_a	⇒ Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	Mass	2,67E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CH4_a	⇒ Methane [Organic emissions to air (gross)]	Mass	2E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
NOx_a	⇒ Nitrogen oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	4,36E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
SOx_a	⇒ Sulphur oxides [Inorganic emissions to air]	Mass	2,88E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia

Figura 35 - Dados da recolha da biomassa do cenário 1

Por fim, na queima ao ar livre, as emissões e cinzas foram devidamente contabilizadas. É de salientar que estes dados das emissões na queima ao ar livre foram obtidos através da literatura disponível, podendo estar afetados de erro, mas pela escassa disponibilidade de dados presentes na literatura, decidiu-se utilizar os dados que estavam à disposição. Na Figura 36, é possível ver os parâmetros e respetivas entradas e saídas que o processo da combustão ao ar livre envolve.

Parâmetros							
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio p	Coment	
Ash	0,033*Biomass	89,1					
Biomass		2,7E003			0 %		
CH4_a	0,0027*Biomass	7,29					
CO_a	0,092*Biomass	248					
CO2_a	5,57*Biomass	1,5E004					
COT_a	0,013*Biomass	35,1					
NOx_a	0,0025*Biomass	6,75					
PM_a	0,0039*Biomass	10,5					
SOx_a	0,00040*Biomass	1,08					
Parâmetro							

Entradas								
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fluxo	Desvio p	Origem
Biomass	⇒ Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	2,7E003	1	kg	X	0 %	(Nenhum enuncia
Fluxo								

Saídas								
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fluxo	Desvio p	Origem
Ash	⇒ Ash lumber [Materials from rene	Mass	89,1	1	kg	X	0 %	(Nenhum enuncia
CO2_a	⇒ Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emis	Mass	1,5E004	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
CO_a	⇒ Carbon monoxide [Inorganic emissions	Mass	248	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
PM_a	⇒ Dust (PM2.5 - PM10) [Particles to air]	Mass	10,5	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
CH4_a	⇒ Methane (biotic) [Organic emissions to	Mass	7,29	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
NOx_a	⇒ Nitrogen oxides [Inorganic emissions to	Mass	6,75	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
SOx_a	⇒ Sulphur oxides [Inorganic emissions to	Mass	1,08	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia
COT_a	⇒ Total organic carbon [Other emissions	Mass	35,1	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia

Figura 36 - Dados da combustão ao ar livre do cenário 1

Para o segundo cenário, como referido anteriormente, foi dividido em três grupos, no que diz respeito a biomassa residual é composta por três etapas, como podemos ver pelo diagrama de fluxo apresentado na Figura 37.

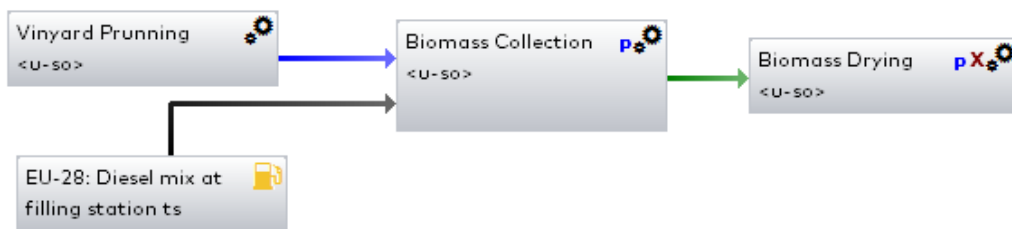


Figura 37 - Diagrama de fluxo do cenário 2 onde está presente poda, recolha e secagem da biomassa

Na primeira etapa (poda) é a mesma que se apresentou no primeiro cenário, originando a mesma de quantidade de resíduo (3000 kg de resíduo de vinha). De um cenário para o outro neste processo é quase semelhante, apenas difere nos hectares onde se procede a recolha, afetando os parâmetros do diesel, como demonstra a Figura 38.

Parâmetros							
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio	Coment.	
BioWaste	$ResBio * 0,1$	300					
CH4	$Dist_Collection * 0,0005 / 1000$	2E-006				kg	
CO	$Dist_Collection * 0,000667 / 1000$	2,67E-006				kg	
CO2	$Dist_Collection * 0,357 / 1000$	0,00143				kg	
Diesel	$6,5 * 1,5$	9,75				L/ha	
Dist_Collection		4			0 %	km/ha	
Fardos	$ResBio - BioWaste$	2,7E003					
NOx	$Dist_Collection * 0,00109 / 1000$	4,36E-006				kg	
ResBio		3E003			0 %		
SOx	$Dist_Collection * 0,000721 / 1000$	2,88E-006				kg	
Parâmetro							

ACV ACC: 0,00829 EUR ACTT Documentação							
Suficiência Nenhum enunciado							
Entradas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio	Origem
ResBio	Biomass (solid) [Biomass fuels]	Mass	9E006	3E003	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
Diesel	Diesel [Refinery products]	Mass	8,17	0,838	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
Fluxo							
Saídas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio	Origem
Fardos	Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	2,7E003	1	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
BioWaste	Biowaste [Waste for recovery]	Mass	300	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CO2	Carbon dioxide [Inorganic emissions to	Mass	0,00143	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CO	Carbon monoxide [Inorganic emissions to	Mass	2,67E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
CH4	Methane [Organic emissions to air (gr	Mass	2E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
NOx	Nitrogen oxides [Inorganic emissions to	Mass	4,36E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia
SOx	Sulphur oxides [Inorganic emissions to	Mass	2,88E-006	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia

Figura 38 - Dados referentes a recolha no cenário 2

Na etapa da secagem foi considerado que era realizada ao ar livre (natural), logo apenas se considerou o vapor de água libertado como demonstra a Figura 39.

Parâmetros							
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio	Coment.	
ResBio		2,7E003			0 %		
ResBio_Dry	$ResBio * (1 - 0,26)$	2E003					
Water	$ResBio * 0,26$	702					
Parâmetro							

ACV ACC: 0 EUR ACTT Documentação							
Suficiência Nenhum enunciado							
Entradas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio	Origem
ResBio	Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	2,7E003	1	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
Fluxo							
Saídas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Desvio	Origem
ResBio_Dr	Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	2E003	1	kg	X 0 %	(Nenhum enuncia
Water	Water vapour [Inorganic emissions to	Mass	702	1	kg	* 0 %	(Nenhum enuncia

Figura 39 - Dados da secagem da biomassa no cenário 2

Na Figura 40, pode-se observar, pelo diagrama de fluxo, as etapas constituintes do processo de briquetes.

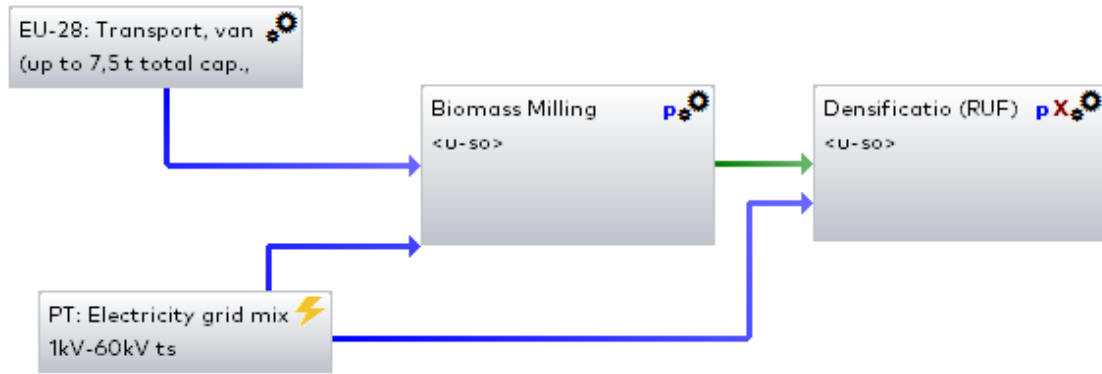


Figura 40 - Diagrama de fluxo correspondente ao processo de briquetes do cenário 2

Nas etapas de trituração e compactação da biomassa recolhida podemos observar pela Figura 41 e Figura 42, respetivamente, todos os parâmetros, entradas e saídas que esses processos envolvem, nomeadamente, energia gasta e desperdícios que envolvem ambos os processos.

Parâmetros		Valor	Mínimo	Máximo	Desvio	Coment
Briquette	$ResBio_dry * 0,9$	1,8E003				
Energ	$tempo * 37$	8,21E003				
ResBio_dry		2E003			0 %	
tempo	$ResBio_dry / 9$	222				
Transport	$100 * ResBio_dry$	2E005				
Waste	$ResBio_dry * 0,1$	200				
Parâmetro						

Entradas		Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fv	Desvio	Origem
ResBio_dr	Biomass (solid) for bioenergy [B	2E003	1	1	kg	X	0 %	(Nenhum enuncia
Energ	Electricity [Electric power]	2,96E004	3,6	1	MJ	X	0 %	(Nenhum enuncia
Transport	Transport [Others]	2E005	1	1	kgkm	X	0 %	(Nenhum enuncia
Fluxo								

Saídas		Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fv	Desvio	Origem
Briquette	Biomass (solid) for bioenergy [B	1,8E003	1	1	kg	X	0 %	(Nenhum enuncia
Waste	Biomaste [Waste for recovery]	200	1	1	kg	*	0 %	(Nenhum enuncia

Figura 41 - Dados referentes ao processo de trituração no cenário 2

Parâmetros						
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio %	Coment
Briquette_MP		1,8E003			0 %	kg
Electricity	$22 * \text{Briquette_MP} / \text{WorkLoad}$	110				kWh
WorkLoad		360			0 %	kg/h
<i>Parâmetro</i>						

Entradas						
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Flux Desvio % Origem
Briquette_	Biomass (solid) for bioenergy [B ...]	Mass	1,8E003	1	kg	X 0 % (Nenhum enuncia
Electricity	Electricity [Electric power]	Energy (net ca 396		3,6	MJ	X 0 % (Nenhum enuncia
<i>Fluxo</i>						

Saídas						
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Flux Desvio % Origem
Briquette_	Biomass (solid) for bioenergy [B ...]	Mass	1,8E003	1	kg	X 0 % (Nenhum enuncia

Figura 42 - Dados referentes ao processo de compactação no cenário 2

Por fim no segundo cenário, o último processo diz respeito a combustão dos briquetes na caldeira como demonstra o diagrama de fluxo da Figura 43.



Figura 43 - Diagrama de fluxo da combustão do cenário 2

Nesta etapa, como nas anteriores, foram inseridos todos os dados relativos a este processo. De realçar, que os valores das emissões são os resultados que se obtiveram na combustão dos briquetes desta mesma dissertação, os quais se encontram no capítulo das análises de resultados. Na Figura 44, como referido anteriormente, estão apresentados todos os inputs e outputs deste processo.

Parâmetros							
Parâmetro	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desvio p	Comentário	
Ash	Briquettes*0,033	59,3					kg
Briquettes		1,8E003			0 %		kg
CO	0,00212592*Briquettes	3,82					kg
CO2	1,8569*Briquettes	3,34E003					
COT	0,00124688*Briquettes	2,24					kg
Energy	120*84	1,01E004					kWh
NOx	0,00405234*Briquettes	7,29					kg
PM	0,00311719*Briquettes	5,61					kg
Parâmetro							

Entradas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fv	Desvio p Origem
Briquettes	Biomass (solid) for bioenergy [B	Mass	1,8E003	1	kg	X	0 % (Nenhum enuncia
Energy	Electricity [Electric power]	Energy (net ca	3,63E004	3,6	MJ	X	0 % (Nenhum enuncia
Fluxo							

Saídas							
Parâmetro	Fluxo	Quantidade	Quantia	Fator	Unidade	Fv	Desvio p Origem
Ash	Ash lumber [Materials from renewable	Mass	59,3	1	kg	*	0 % (Nenhum enunciado)
CO	Carbon monoxide [Inorganic emission:	Mass	3,82	1	kg	*	0 % (Nenhum enunciado)
PM	Dust (PM2.5 - PM10) [Partides to air]	Mass	5,61	1	kg	*	0 % (Nenhum enunciado)
NOx	Nitrogen oxides [Inorganic emissions t	Mass	7,29	1	kg	*	0 % (Nenhum enunciado)
COT	Total organic carbon [Other emissions	Mass	2,24	1	kg	*	0 % (Nenhum enunciado)
CO2	Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emis	Mass	3,34E003	1	kg		0 % (Nenhum enunciado)
Fluxo							

Figura 44 - Dados do processo de combustão da caldeira no cenário 2

6.3 Resultados

Após a introdução dos modelos e dados no *software* de ACV, e efetuar os respetivos balanços de massa e energia, foi possível determinar a pegada de carbono. A Pegada de Carbono, de acordo com o protocolo referido, é o modelo mais utilizado na categoria de impacto “Alterações Climáticas” dos processos em causa. Ainda podemos obter dados acerca do material particulado libertado, formação fotoquímica de ozono, acidificação e eutrofização. Os resultados da pegada de carbono em cada cenário encontram-se na Figura 45.

Segundo a Figura 45, o cenário de queima ao ar livre apresenta uma pegada de carbono maior (aproximadamente 15 kg_{CO2eq}) em comparação com a combustão na caldeira (aproximadamente 10 kg_{CO2eq}), e ambos representam 25 kg_{CO2eq} libertados para o meio ambiente. A diferença entre os dois cenários está ligada ao modo como a combustão é realizada, visto que a céu aberto essa mesma combustão não pode ser controlada em comparação com o outro caso, levando a diferença de valores entre os dois casos. Apesar de no caso da combustão na caldeira termos mais gastos de energia (eletricidade), este fator pode ser desvalorizado visto que, fomos capazes de reduzir cerca de 5 kg_{CO2eq} de emissões.

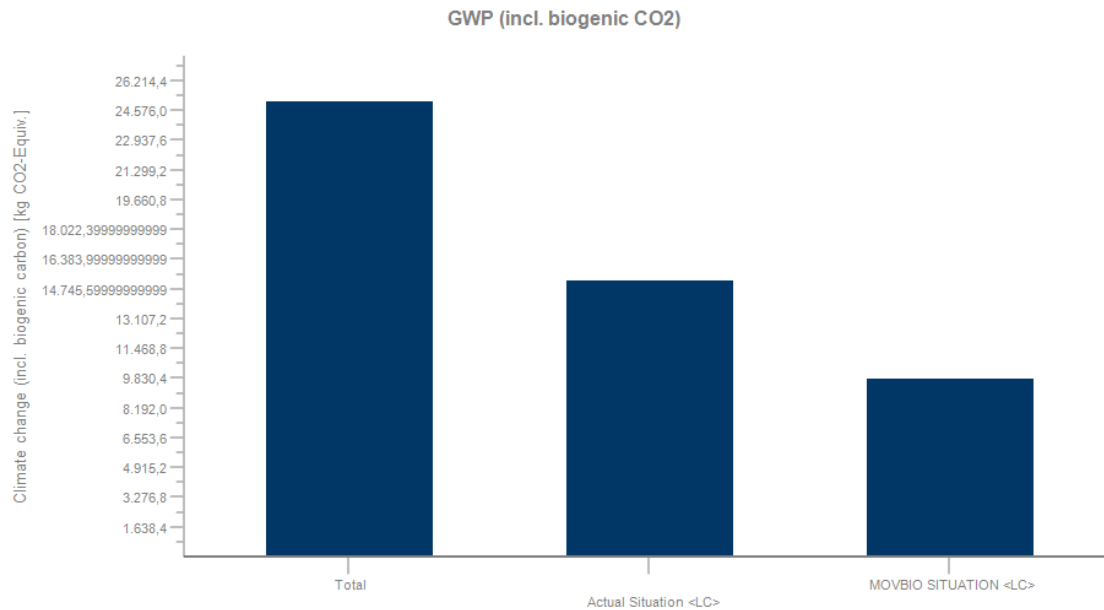


Figura 45 - Resultados das alterações climáticas em ambos os cenários

No que diz respeito ao material particulado podemos observar os resultados na Figura 46. Como demonstra a Figura 46, o cenário de queima ao ar livre volta a apresentar valores superiores à combustão na caldeira. Para o caso da queima ao ar livre obteve-se aproximadamente 6,5 PM_{2.5eq} em comparação com a combustão na caldeira (aproximadamente 4,5 PM_{2.5eq}), e ambos apresentam 11 PM_{2.5eq} de material particulado, com diâmetro de 2,5 ou inferior. Como referido anteriormente a combustão ao ar livre não é controlada, logo já era de esperar que este cenário obtivesse um maior número de partículas em comparação com o outro cenário. A diferença entre os dois cenários está ligada à quantidade e respetiva formação de cinzas; a céu aberto é impossível controlar as cinzas provenientes dessa mesma combustão.

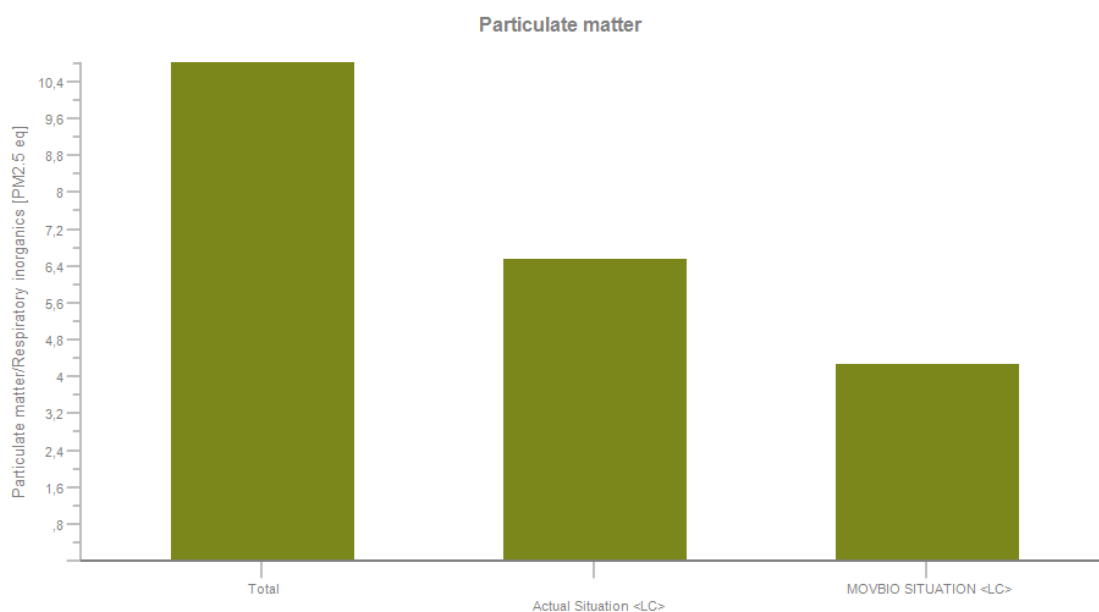


Figura 46 - Resultados do material particulado em ambos os cenários

A Figura 47 apresenta os resultados da formação fotoquímica de ozono. Assim, o cenário da queima ao ar livre revela valores um pouco acima comparado com a combustão na caldeira (aproximadamente 18 kg NMVOC_{eq} e acima de 16 kg NMVOC_{eq}, respetivamente), e ambos originando aproximadamente um total de 36 kg NMVOC_{eq}. A formação fotoquímica de ozono está relacionada com a formação de óxidos de azoto (NO_x) e de compostos orgânicos voláteis (COV) que ocorrem durante a combustão e nos veículos movidos por motores de combustão interna. A diferença entre os resultados dos dois cenários pode estar ligada com a radiação ultravioleta, visto que os óxidos de azoto podem reagir com o oxigénio sob a ação da luz solar provocando um agravamento na formação fotoquímica de ozono.

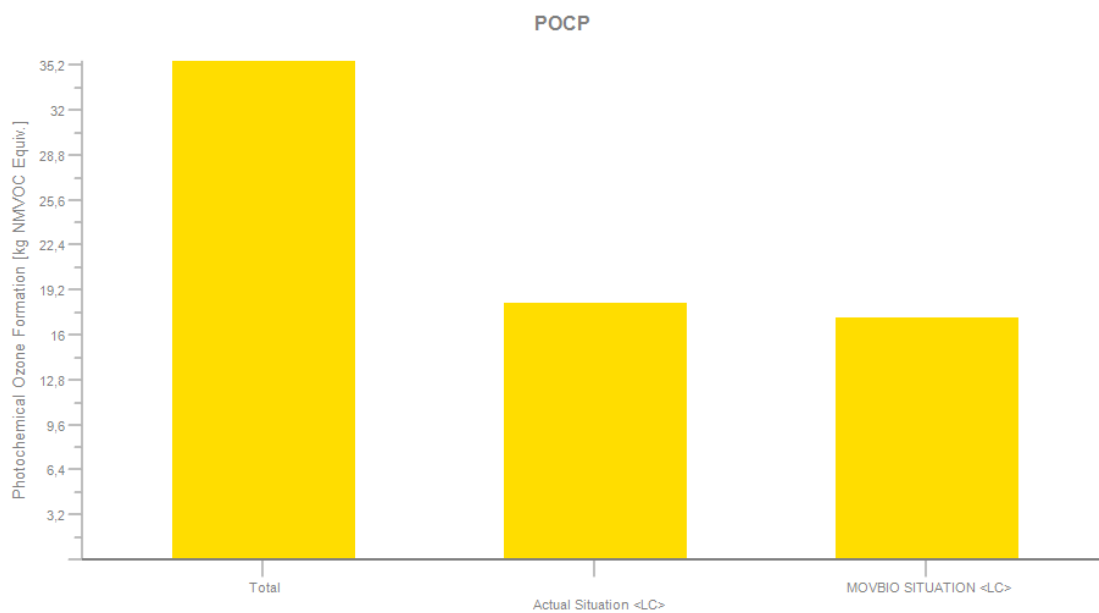


Figura 47 - Resultados da formação fotoquímica de ozono em ambos os cenários

Os resultados da acidificação em cada cenário encontram-se na Figura 48.

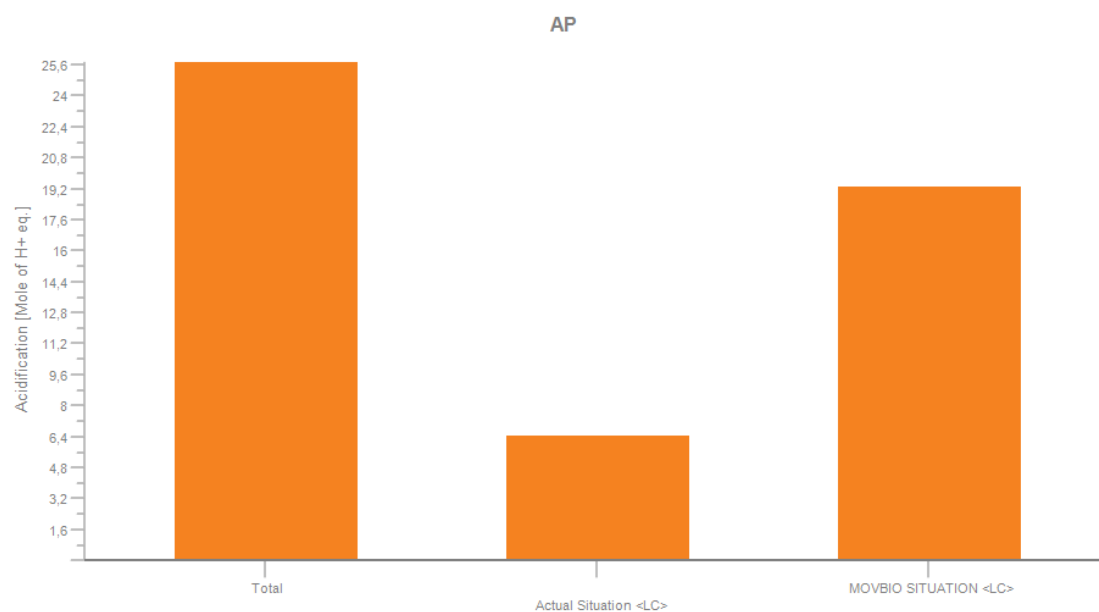


Figura 48 - Resultados da acidificação de ambos os cenários

Como apresenta a Figura 48, o cenário da queima ao ar livre revela valores bastante inferiores comparado com a combustão na caldeira (aproximadamente 6,4 moles de H_{eq} e 19,2 moles de H_{eq} , respetivamente), e ambos ostentam 25,6 moles de H_{eq} . A acidificação está relacionada com a libertação para a atmosfera de gases como o NO_x e o CO_2 que ocorrem durante a combustão e nos veículos que utilizem combustível fóssil. A diferença entre os resultados dos dois cenários pode estar ligada à concentração desses mesmos gases resultantes na combustão, uma vez que na combustão da caldeira apresenta valores superiores ao nível do NO_x e o CO_2 que podem ter causado a diferença entre os dois cenários.

Na Figura 49, apresenta-se os resultados da eutrofização em cada cenário. Como apresenta a Figura 49, o cenário da queima ao ar livre revela valores bastante inferiores, comparado com a combustão na caldeira (aproximadamente 30 moles de N_{eq} e 66 moles de N_{eq} , respetivamente), e ambos ostentam 96 moles de N_{eq} . A eutrofização está relacionada com a libertação do NO_x para a atmosfera, que ocorrem durante a combustão e nos veículos que utilizem combustível fóssil. A diferença entre os resultados dos dois cenários pode estar ligada à concentração deste mesmo gás resultante na combustão, uma vez que na combustão da caldeira apresenta valores superiores de NO_x que podem ter causado a diferença entre os dois cenários.

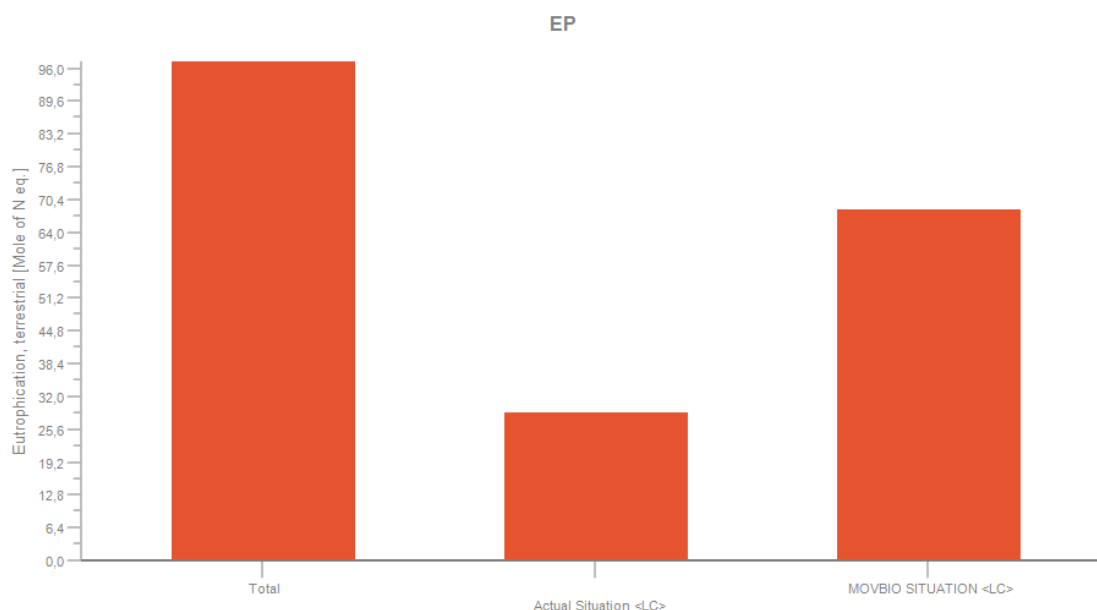


Figura 49 - Resultados da eutrofização em ambos os cenários

Em suma os dois cenários apresentam resultados diferentes consoante os problemas que temos pela frente. Apesar da combustão ao ar livre ser mais prejudicial para o meio ambiente, uma vez que neste processo a combustão vai ser efetuada de maneira não controlada que muitas das vezes pode causar problemas, como incêndios e é o cenário que contribui mais para as alterações climáticas como podemos ver pela Figura 45.

CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Dos ensaios efetuados, é importante salientar que a caldeira foi alimentada manualmente com briquetes de biomassa e serrim, sendo necessário abrir a porta superior da mesma, o que provocava instabilidade e, portanto, oscilações nos valores. Deste modo, ao longo dos ensaios foi impossível a manutenção de condições estritas de regime estacionário, empregando-se este conceito em termos globais e calculando-se os valores médios das grandezas medidas.

Da análise simplificada do teor de humidade, e de notar que os resíduos urbanos apresentam uma humidade baixa, cerca de 9,5% em comparação com os resíduos de kiwi, cerca de 19,5%, relativamente ao teor de cinzas, obteve-se maiores valores para os briquetes produzidos a partir das biomassas (entre 3,2 e 5,1%), em comparação com o serrim de pinho (0,8%), no que diz respeito ao teor de matéria volátil apresentam valores similares em todos os briquetes propostos ao ensaio (variam entre 78,7 e 80,1%), e um pouco superior no serrim (83,7%), já o teor de carbono de cada tipo de combustível é o parâmetro que apresenta mais semelhança entre os combustíveis (variam entre 15,5 e 17,6%). No que diz respeito ao poder calorífico inferior o serrim é o que apresenta o valor maior (18,6 MJ/kg) em comparação com os resíduos de macieira (14,65 MJ/kg), tendo os outros resíduos variado entre 15,56 e 17,03 MJ/kg. Na composição elementar dos combustíveis, a maior diferença entre as podas de biomassa e o serrim deve-se ao maior teor em N nas podas de biomassa (cerca de 0,13% para o serrim em comparação com os 0,70% dos resíduos de kiwi sendo este o valor mais baixo das podas de biomassa em estudo), o que pode causar níveis mais elevados nas emissões de NO_x , resultantes da sua queima.

No que diz respeito à caracterização dos efluentes produzidos nos ensaios com os vários briquetes, foram observados valores muito semelhantes nos parâmetros em estudo, embora, seja de salientar o valor do caudal volúmico seco e efetivo dos briquetes das podas urbanas, que se destacam dos outros tipos de combustíveis. Estes valores não apresentam grande impacto nos testes de combustão. Como os briquetes das podas urbanas foram o primeiro combustível testado, implicou que a caldeira e o tubo de Pitot estavam limpos, o que pode ter influência nesses resultados.

Em relação à análise da composição do gás de combustão, a combustão dos briquetes das podas de vinha, oliveira e urbanas originou um maior teor de oxigênio com o menor excesso de ar, em todos os ensaios de combustão, originando temperaturas mais elevadas dos gases de escape. No que diz respeito ao ensaio de combustão de briquetes de resíduos de poda de macieira, apresentou um maior teor de oxigênio e uma temperatura de gás de combustão mais baixa. Os briquetes provenientes das podas de kiwi apresentam um teor de oxigênio e a temperatura mais baixa em comparação com as restantes podas oriundas de fontes de biomassa. No ensaio de referência (serrim), registou-se o maior nível de excesso de ar e a menor temperatura dos gases de combustão de todos os testes.

No estudo referente às emissões poluentes resultantes da combustão, obteve-se um nível muito baixo de emissões de monóxido de carbono nas emissões resultantes da queima dos resíduos urbanos de poda, em contraste com os briquetes de madeira de pinho (serrim). Contudo, os resíduos de poda de kiwi, vinha e oliveira apresentaram níveis semelhantes de emissão de CO e os resíduos de poda de macieira um pouco acima dos dois últimos. Estes factos provam que os briquetes feitos a partir de resíduos típicos de poda podem ser queimados sem grandes preocupações, em relação ao comportamento na combustão, quando comparado com briquetes feitos de madeira.

No que toca ao NO_x as podas de biomassa registam valores superiores aos do serrim, o que seria de esperar, uma vez que os valores de NO_x dependem do teor de N do combustível e das temperaturas de combustão, as quais, atingindo valores elevados oxidam mais facilmente, e portanto, surgem mais emissões de NO_x .

O nível de emissão dos compostos orgânicos é inferior em todas as fontes residuais de biomassa, quando comparado aos briquetes de referência de madeira de pinho, exceto para resíduos de poda de oliveira. Relativamente ao material particulado proveniente da combustão, os briquetes provenientes da poda de macieira e resíduos de poda urbana originaram um nível de emissão semelhante aos briquetes de madeira de pinho, contudo os resíduos de vinha, kiwi e oliveira apresentaram um nível de emissão de material particulado superior aos demais, embora esta diferença possa também ser atribuída às cinzas em repouso, acumuladas nas câmaras da caldeira.

Em suma, o processo de briquetagem e conseqüente combustão pode ser feito para cada biomassa testada, mostrando resultados positivos quando comparado com os briquetes comerciais. Um dos fatores importantes na utilização de resíduos provenientes da biomassa, prende-se com a escolha do equipamento onde a combustão vai ser realizada. A escolha da caldeira deve ser parte importante no dimensionamento do sistema, bem como o controlo do excesso de ar, que tem grande influência nas emissões geradas. A valorização de resíduos de biomassa de poda biomassa mostraram-se viáveis para serem aproveitadas como combustível, utilizando o processo de briquetagem que demonstra facilidade na compactação destas podas (tendo um teor

de humidade aceitável, entre 10 e 12 %) e uns briquetes com propriedades aceitáveis. Os briquetes de podas revelaram ao ser submetidos ao processo de combustão uma queima pacífica (briquetes kiwi foram difíceis de queimar devido ao elevado teor de humidade), embora, todos eles mostram resultados positivos (emissões de poluentes) quando comparado com os briquetes comerciais. Contudo este tipo de biomassa pode ser utilizado em habitações domésticas caso o equipamento que possuem seja adequado para biomassa (caldeira de biomassa em vez das caldeiras normais).

No que toca à avaliação de ciclo de vida, ambos os cenários apresentam determinados prós e contras. A queima ao ar livre de resíduos de vinha é mais gravosa nas alterações climáticas, material particulado e na formação fotoquímica de ozono, enquanto, a combustão na caldeira do mesmo tipo de resíduo processado sob a forma de briquetes apresenta agravantes na acidificação e na eutrofização.

7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, e nas dificuldades encontradas durante o presente trabalho, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros, dando continuidade a esta linha de investigação.

O facto de a alimentação da caldeira ser realizada de forma intermitente e manual, causa instabilidade na combustão, impedindo a manutenção das condições de regime permanente. Assim, sugere-se a realização de estudos numa caldeira com alimentação automática.

Uma análise do rendimento térmico da caldeira seria uma mais valia. Propõe-se que seja feita nos ensaios de queima, para determinar a gama recomendada de caudal mássico de combustível. Tal possibilitava uma compreensão da influência da carga térmica no desempenho da caldeira. Por outro lado, sugere-se também a realização de mais ensaios usando os novos biocombustíveis, briquetes produzidos através das misturas das podas de biomassa com o serrim de pinho.

Seria ainda importante repetir os ensaios várias vezes para que as conclusões fossem mais fiáveis, não tendo sido possível no presente trabalho, por uma questão de escassez de tempo e de material disponível, bem como, uma limpeza ou remoção das partículas entre ensaios para evitar a contaminação dos ensaios seguintes e a alteração das condições de operação da caldeira. A torrefação é um método que poderia ser testado com estas biomassas de poda para ver o potencial desta mesma biomassa, contudo seria importante repetir o estudo do serrim nas mesmas condições que estas podas foram sujeitas.

É importante aprofundar o estudo da análise do ciclo de vida, visto que o estudo apresentado é demasiado simplista, para obtermos um conhecimento que permita avaliar melhor o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida da biomassa usada como combustível.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.006>
- Almeida, D., Ferreira, T., Marques, E., Paiva, J. M., & Pinho, C. (2013). Moisture influence on the quality of pellets made of *Cistus ladanifer* shrubs. In *8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems* (pp. 1–7).
- Cantrell, K. B., Ducey, T., Ro, K. S., & Hunt, P. G. (2008). Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresource Technology*, *99*(17), 7941-7953. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.061>
- Carneiro, P., & Ferreira, P. (2012). The economic, environmental and strategic value of biomass. *Renewable Energy*, *44*, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.020>
- Da Silva, D. A., Yamaji, F. M., De Barros, J. L., Da Róz, A. L., & Nakashima, G. T. (2015). Caracterização de biomassas para a briquetagem. *Floresta*, *45*(4), 713–722. <https://doi.org/10.5380/ufv.v45i4.39700>
- Demirbas, M. F., Balat, M., & Balat, H. (2009). Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, *50*(7), 1746–1760. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.013>
- Di Blasi, C. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, *34*(1), 47-90. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
- Diana Almeida, Edmundo Marques, & João Monney Paiva. (2016). *Cistus ladanifer* solar drying, milling and pelletizing - sawdust particle distribution and its influence on pellets quality. In *Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.20906/cps/cob-2015-1368>
- EUBIA. (2019). Biofertilizers – European Biomass Industry Association. Retrieved from <http://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biofertilizers/>
- Ferreira, T., Paiva, J. M., & Pinho, C. (2013). Performance assessment of a domestic boiler using pellets made from *Cytisus multiflorus* invasive shrubs compared with commercial pine. In *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)* (pp. 3598–3606).
- Furtado, T. S., Valin, M., Brand, M. A., & Bellote, A. F. J. (2010). Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *30*(62), 101–106. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.62.101>
- Granada, E., López González, L. M., Míguez, J. L., & Moran, J. (2002). Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy*, *27*(4), 561–573. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00005-8)

- Ho, W. W. S., Ng, H. K., & Gan, S. (2016). Advances in ultrasound-assisted transesterification for biodiesel production. *Applied Thermal Engineering*, 100(5), 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.058>
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1-3), 17-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3)
- Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., & Potter, A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*, 38(25), 4183-4195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>
- Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21-50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Liu, H., Chaney, J., Li, J., & Sun, C. (2013). Control of NOx emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, 103, 792-798. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.028>
- Loo, S. Van, & Koppejan, J. (2008). *Summary for Policymakers. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- LOVEJOY, D. (2009). *Renewable Energy Technologies: Their Applications in Developing Countries*. *Natural Resources Forum* (Vol. 11). Pergamon Press. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1987.tb00321.x>
- M. Obaidullah, S. B. and J. D. R. (2018). An Overview of PM Formation Mechanisms from Residential Biomass Combustion and Instruments Using in PM Measurements. *International Journal of Energy and Environment* 12, 41-50. <https://doi.org/ISSN: 2308-1007>
- McGowan, T. F., Brown, M. L., Bulpitt, W. S., & Walsh, J. L. (2010). *Biomass and Alternate Fuel Systems: An Engineering and Economic Guide*. <https://doi.org/10.1002/9780470925324>
- McKendry, P. (2002a). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00118-3)
- McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00119-5)
- Muazu, R. I., Borrion, A. L., & Stegemann, J. A. (2017). Life cycle assessment of biomass densification systems. *Biomass and Bioenergy*, pp. 384-397. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.026>
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy and Fuels*, 17(6), 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- Perez-Jimenez, J. A. (2015). Gaseous Emissions from the Combustion of Biomass Pellets. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 85, 85-99). <https://doi.org/10.2495/978-1-84566-062-8/006>
- Quaak, P., Knoef, H., & Stassen, H. (1999). *Energy from Biomass: A review of*

- combustion and gasification technologies. *World Bank Technical Paper*, (422), 1–78. <https://doi.org/ISBN0-8213-4335->
- Roy, M. M., Dutta, A., & Corscadden, K. (2013). An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, 108, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.044>
- Shastri, Y., Hansen, A., Rodríguez, L., & Ting, K. C. (2014). *Engineering and science of biomass feedstock production and provision. Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision* (Vol. 9781489980). <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-8014-4>
- Srivastava, A., & Prasad, R. (2000). Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 111–133. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00013-1)
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2017). Industrial Sector Energy Consumption. *Monthly Energy Review*, 37. <https://doi.org/10.1109/ICMeCG.2009.20>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Verma, V. K., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I., Hubin, A., & De Ruyck, J. (2012). Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90(1), 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.079>
- Verma, V. K., Bram, S., Gauthier, G., & De Ruyck, J. (2011). Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.043>
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2)
- Zhang, L., Xu, C. (Charles), & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969–982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>

ANEXOS

ANEXO A. FONTES, CARACTERISTICAS E EFEITOS NOCIVOS DOS POLUENTES ATMOSFERICOS
MAIS COMUNS

ANEXOS

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

Na Tabela 17, encontra-se uma descrição breve das características dos poluentes atmosféricos mais comuns, a sua origem como resultado da atividade antropogénicas bem como, os seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente.

Tabela 17 - Fontes, características e efeitos nocivos dos poluentes atmosféricos

Poluente	Características	Fontes antropogénicas	Efeitos
Monóxido de Carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> Poluente primário. Gás incolor, inodoro com forte afinidade com a hemoglobina sanguínea. 	<ul style="list-style-type: none"> Fogos florestais; queima incompleta de combustíveis e outro material contendo carbono e oxidação de poluentes orgânicos como o metano. 	<ul style="list-style-type: none"> Absorção pelos pulmões. Possui capacidade de ligação à hemoglobina sanguínea muito superior ao oxigénio causando dificuldades respiratórias, asfixia e morte. Diminui a perceção visual e capacidade mental e afeta o desenvolvimento fetal.
Dióxido de Enxofre (SO₂)	<ul style="list-style-type: none"> Poluente primário. Gás incolor, odor pungente. 	<ul style="list-style-type: none"> Queima de combustíveis fósseis contendo enxofre na sua composição. Processos industriais. Mineração de metais com enxofre. 	<ul style="list-style-type: none"> Irritante para as mucosas dos olhos e vias respiratórias. Agravante de problemas cardiovasculares. Causa acidificação das águas e solos pela provocação de chuvas ácidas. Provoca corrosão de edifícios e materiais de construção.

Poluente	Características	Fontes antropogénicas	Efeitos
Óxidos de Azoto (NO_x)	<ul style="list-style-type: none"> • Poluente primário (NO) e secundário (normalmente NO₂) • Consiste numa mistura de gases com cor a variar entre incolor e vermelho a castanhada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Queima de combustíveis a altas temperaturas tanto em instalações industriais como em veículos automóveis. • O NO emitido para a atmosfera é transformado posteriormente em NO₂ por oxidação fotoquímica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Provoca lesões nos brônquios e alvéolos pulmonares e levanta problemas de ordem cardiovascular. • Provoca efeitos negativos na vegetação e provoca danos em materiais como os polímeros. • É o principal responsável pela ocorrência de nevoeiro fotoquímico (smog).
Hidrocarbonetos (HC)	<ul style="list-style-type: none"> • Poluente primário. • Compostos orgânicos em forma gasosa ou partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Queima incompleta de combustíveis que contêm carbono na sua constituição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposição prolongada provoca irritação ocular, nasal e ao nível da garganta. • Exposição crónica suscita-se o aparecimento de cancro.
Partículas em suspensão	<ul style="list-style-type: none"> • Poluente primário ou secundário. • São partículas dispersas na atmosfera constituídas por poeiras, cinzas, fuligem, metais e outros químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Queima de combustíveis sólidos em centrais termoelétricas e outros equipamentos de combustão industriais e queima de combustíveis líquidos, especialmente em tráfego rodoviário. • Alguns processos industriais como, por exemplo, as indústrias cimenteira e metalúrgica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quanto menor o tamanho das partículas, maior o perigo para a saúde. • As partículas mais finas podem transportar substâncias tóxicas para as vias respiratórias inferiores acentuando os efeitos dos poluentes. • Estão associados os problemas de tosse, irritação nasal, bronquite e asma. • As partículas mais finas alojam-se profundamente nos alvéolos pulmonares causando graves problemas respiratórios e suscita-se que possam mesmo conduzir ao aparecimento de cancro.

ANEXO A.1. Parâmetros da briquetadora

Na Tabela 18, encontra-se os parâmetros utilizados na briquetadora para a elaboração dos briquetes.

Tabela 18 - Parâmetros da briquetadora

Parâmetro de Pressão

Pressão do pré-compactador:	200 Bar
Pressão do pistão:	220 Bar 2619 Kgf/cm ²
Pressão movimento rápido:	80 Bar

Parâmetro de alimentação

Tempo máximo de alimentação:	1,5 s
Tempo mínimo de carregamento:	1 s
Unidade de cálculo:	0,2 s
Tempo de inversão:	0 s

Parâmetro do Agitador

Ligar atraso:	0 s
Tempo min. de funcionamento do agitador:	5 s
Agitador apenas para a frente:	NÃO
Funcionamento intermitente do agitador:	NÃO
Tempo de impulso:	- s
Tempo de pausa:	- s

Parâmetro outros

Tempo de pistão à frente:	2 s
Modo da prensa:	A
Válvula de movimento rápido:	LIGADO

Parâmetro outros

Densificação satisfatória:	SIM	
Comprimento final:	- mm	
Peso (g) Densidade (g/cm ³):	-	-