

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Gasificação em Leito Fluidizado de Resíduos de Biomassa da Eurorregião Galiza e Norte de Portugal.

Francisco Lopes Alexandre

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Coorientador INEGI: Victor Daniel Camilo Ferreira
Porto, Portugal
2021

Resumo

A presente dissertação foi realizada no âmbito da Unidade Curricular Dissertação, que se enquadra no 5º ano do plano de estudos da opção Energia Térmica do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, lecionado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Este trabalho integra-se no projeto “Biomassa-AP” desenvolvido pela unidade de Energia do INEGI em parceria com outros centros de investigação, com o objetivo de promover a valorização energética de novos biocombustíveis.

O objetivo deste trabalho recai numa primeira avaliação da gasificação em leito fluidizado de pequenas cargas de quatro espécies de biomassa: videira (*Vitis vinifera*), kiwi (*Actinidia deliciosa*), tojo (*Ulex spp*) e giesta amarela (*Cytisus scoparius*) - provenientes de resíduos de limpeza florestal ou agrícola.

Os ensaios foram realizados num reator de leito fluidizado, com o ar como agente oxidante e foi avaliada a influência da temperatura do leito, na qualidade do gás produzido. Os testes de gasificação foram realizados às temperaturas de 750, 800, 850 e 900 °C, com uma razão $3 < u/U_{mf} < 4$ e uma carga, constante, de 1 g. Através da análise dos compostos do gás de produção (CO, CO₂, CH₄, O₂ e H₂) foi possível determinar os parâmetros de gasificação e comparar entre as diferentes biomassas qual a que obteve os melhores e piores resultados. Observou-se um comportamento mais constante e com valores médios superiores para a eficiência de conversão de carbono e o *PCI* na giesta e valores médios mais baixos que os demais, no kiwi.

Tratou-se de uma primeira abordagem à gasificação à escala laboratorial destas espécies, e não foi possível garantir-se uma homogeneidade na escolha das cargas das biomassas testadas biomassa, o que levou a uma aleatoriedade de valores obtidos. Sentiu-se ao tato que havia cargas partículas mais resistentes e outras mais frágeis, contudo neste primeiro estudo, experimentou-se todo o tipo de formas e consistências da biomassa para, de uma forma exploratória, se entender os comportamentos das espécies.

Abstract

This dissertation was carried out within the scope of the Dissertation Curricular Unit, which is part of the 5th year of the study plan for the Thermal Energy option of the Integrated Master in Mechanical Engineering, taught at the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP). This work is part of the “Biomass-AP” project developed by the Energy unit of INEGI in partnership with other research centers, aiming to promote the energy recovery of new biofuels.

The objective of this work is a first assessment of gasification in fluidized bed of small loads of four species of biomass: grapevine (*Vitis vinifera*), kiwi (*Actinidia deliciosa*), gorse (*Ulex spp*) and broom (*Cytisus scoparius*) - from waste forestry or agricultural cleaning.

The tests were carried out in a fluidized bed reactor, with air as the oxidizing agent and the bed temperature was evaluated, in terms of the quality of the gas produced. The gasification tests were carried out at temperatures of 750, 800, 850 and 900 ° C, with a ratio of $3 < u/U_{mf} < 4$ and a constant load of 1 g. Through the analysis of the production gas compounds (CO, CO₂, CH₄, O₂ e H₂) it was possible to determine the gasification parameters and compare among the different biomasses which one obtained the best and worst results. It was observed a more constant behavior and with higher average values for the efficiency of carbon conversion and the *PCI* in the broom and lower average values than the others, in the kiwi.

This was a first approach to gasification at the laboratory scale of these species, and it was not possible to guarantee homogeneity in the choice of the loads of the biomass tested, which led to a randomness of values obtained. It was felt that there were loads that were more resistant and others that were more fragile. However, in this first study, all types of forms and consistencies of biomass were experimented with, in an exploratory way, to understand the behaviors of species.

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação é sinónimo da concretização de um percurso permeado por inúmeros desafios, incertezas, alegrias e muitos percalços pelo caminho. A concretização de um marco na minha vida e um olhar para o futuro, que não seria concretizável se não fosse o contributo de várias pessoas.

Antes de mais, gostaria de agradecer ao meu orientador e Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho, todos os conhecimentos transmitidos e histórias partilhadas. Desde do início dispôs-se prontamente a ajudar, orientar, e sobretudo inspirar. Qualquer problema encontrado ao longo deste trabalho laboratorial tornou-se trivial com o todo o seu conhecimento, competência e paciência.

Ao meu co-orientador Victor Daniel Camilo Ferreira agradeço a disponibilidade e conselhos prestados, sempre com um sorriso na cara e uma simpatia desmedida.

Antes de agradecer às pessoas que me são próximas, queria deixar o meu agradecimento à instituição Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que acolheu tão bem, e ao INEGI por me providenciar as instalações necessárias para a realização desta dissertação.

Todo o meu percurso percorrido até agora foi acompanhado por pessoas incríveis, que me apoiaram desde o início. Dentro delas, destaco os meus pais Maria de Fátima Gonçalves Lopes e José Luís Coelho Alexandre, que com nada me faltaram. Sempre tive tudo de vós e sem vocês nada disto seria possível. São um dos meus pilares, e umas simples frases não retratam o amor e gratidão que sinto por vocês.

À minha irmã, Bárbara, a minha confidente durante anos, guerreira, e amiga, quero agradecer-te de uma forma imensa tudo que foste e és para mim. És a verdadeira irmã, e queria, de certa forma, homenagear a pessoa que é uma das minhas inspirações.

Não podia falar de amor, amizade e cumplicidade, sem falar da minha cara metade. A ti, Inês Félix, rapariga dos meus olhos, minha melhor amiga, minha companheira dos bons e maus momentos, também tenho de agradecer. A rapariga que me roubou o coração, pela forma única de ser que o é, o meu obrigado. A tua bondade ainda me impressiona e só te posso dizer ainda hoje não acredito na sorte que tenho de ser teu namorado.

A toda a minha família de sangue, desde aos meus avós que me sempre me apoiaram e sempre quiseram o melhor para mim, aos meus primos e tios, que são como uns segundos pais e irmãos. E não menos importante, aos meus avós, não de sangue, mas de coração: Sr. Barros, por voltar a trazer à minha avó uma alegria há muito perdida e à Dona Alzira, que infelizmente e com muita tristeza minha não possa fisicamente estar presente, mas que sempre me tratou como um neto, e para sempre a irei recordar.

Por fim, aos meus amigos também queria deixar uma palavra de apreço por toda força e incentivo dados para concluir esta dissertação.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Objetivo da dissertação.....	2
1.2 - Características da biomassa	2
1.2.1 – Biomassa em estudo	5
1.3 - Estrutura da dissertação	8
1.4 - INEGI.....	8
Capítulo 2	11
A gasificação como método de conversão da biomassa	11
2.1 - Desenvolvimento da gasificação	13
2.2 - Enquadramento.....	14
2.3 - Tecnologias de gasificação.....	17
2.3.1 – Tipos de reatores.....	19
2.3.2 – Eficiência de um processo de gasificação.....	26
2.4 - Opiniões.....	26
Capítulo 3	29
Instalação e métodos experimentais	29
3.1 - Instalação experimental	29
3.1.1 – Reator de gasificação.....	30
3.1.2 – Leito.....	32
3.1.3 – Medidor de caudal.....	33

3.1.4 – Alimentação da biomassa.....	33
3.1.5 – Controlador de Temperatura.....	34
3.1.6 – Sistema de análise de dados.....	34
3.1.7 – Caracterização do equipamento de medida	35
3.2 - Procedimento experimental.....	36
3.2.1 – Preparação da instalação	36
3.2.2 – Ensaio experimental.....	37
3.3 - Caracterização das biomassas.....	37
Capítulo 4.....	41
Resultados e discussão.....	41
4.1 - Velocidade mínima de fluidização.....	41
4.1.1 –Procedimento de cálculo	41
4.2 - Parâmetros de gasificação	44
4.2.1 – Cálculo do número total de moles do gás.....	44
4.2.2 – Cálculo do número de moles, volume de cada composto, num ensaio	44
4.2.3 – Cálculo da eficiência de conversão de carbono (%)	45
4.2.4 – Cálculo do rendimento do gás seco (m ³ /kg).....	46
4.2.5 – Cálculo da energia do gás (kJ).....	46
4.2.6 – Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior do gás de produção (MJ/m ³) (em condições PTN).....	46
4.2.7 – Eficiência do gás frio (%).....	47
4.3 - Ensaio de gasificação.....	47
4.3.1 – Parâmetros de ensaio.....	47
4.3.2 – Análise da composição do gás produzido.....	48
4.4 - Influência da temperatura na composição do gás de produção	51
4.4.1 – Estudos dos parâmetros de gasificação.....	58
4.5 - Influência da biomassa na composição do gás de produção – Comparação e avaliação dos resultados	62
Capítulo 5.....	67
Conclusão e trabalhos futuros	67
Capítulo 6.....	71
Bibliografia.....	71
Anexo A – Calibrações.....	77
A.1 - Calibração de analisadores	77
A.2 - Calibração do rotâmetro	78
Anexo B – Interface dos <i>softwares</i>.....	79
Anexo C – Sistema de filtragem.....	80

Lista de figuras

Figura 1.1 – Árvore de videira (em cima) e kiwi (em baixo).....	6
Figura 1.2 – Arbusto de giesta	7
Figura 1.3 – Arbusto de tojo.....	8
Figura 2.1 – Capacidade de gasificação por região geográfica em 2015 gasificação (Global Syngas Technologies Council, 2016).	15
Figura 2.2 - Número de gasificadores por matéria-prima (Global Syngas Technologies Council, 2016).	16
Figura 2.3 – Taxa de crescimento Anual de matéria-prima para gasificação	16
Figura 2.4 – Mapa de instalações de gasificação de biomassa.....	17
Figura 2.5 – Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento ascendente (Almeida, 2020).....	20
Figura 2.6 - Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento descendente (Almeida, 2020).....	21
Figura 2.7 - Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento cruzado (Almeida, 2020)	22
Figura 2.8 – Representação de um reator borbulhante (à esq.) e de leito fluidizado circulante (à dir). (Almeida, 2020).....	23
Figura 2.9 – Representação de reator de escoamento arrastado de alimentação superior (à esq.) e alimentação lateral (à dir.) (Almeida, 2020).....	24
Figura 3.1 - Representação esquemática da instalação experimental (Almeida, 2020).....	29
Figura 3.2 - Instalação experimental e analisadores.....	30
Figura 3.3 - Reator de gaseificação (esq.) e distribuidor (dir.).	31
Figura 3.4 – Tijolo refratário (a), manta de fibra cerâmica (b), resistência elétrica (c).....	31

Figura 3.5 – Reator de gasificação sem manta térmica.....	32
Figura 3.6 - Peneiro de resolução de 200 μm	32
Figura 3.7 - Rotâmetro utilizado nas experiências laboratoriais.....	33
Figura 3.8 - Controlador de Temperatura.	34
Figura 3.9 – Analisador de gás de produção (a) e sistema de tratamento dos gases (b).	35
Figura 3.10 – 1,0 g de amostra de poda de videira	38
Figura 3.11 - 1,0 g de amostra de poda de kiwi.....	38
Figura 3.12 - 1,0 g de amostra de poda de tojo	39
Figura 3.13 - 1,0 g de amostra de poda de giesta.....	40
Figura 4.1 – Composição dos gases presentes no gás de produção, derivado da videira, a 850 °C.	49
Figura 4.2 – Composição dos gases do gás produzido (Morgado, 2020)	50
Figura 4.3 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de videira.....	52
Figura 4.4 – Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de videira	52
Figura 4.5 – Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de tojo	54
Figura 4.6 - Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de tojo.....	54
Figura 4.7 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de kiwi	55
Figura 4.8 – Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de kiwi	56
Figura 4.9 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de giesta	57
Figura 4.10 - Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de giesta.....	57
Figura 4.11 – Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de videira	59
Figura 4.12 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de tojo	59
Figura 4.13 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de kiwi.....	60
Figura 4.14 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de giesta	61

Figura 4.15 - Influência do tipo de biomassa na composição dos diferentes gases.....	63
Figura 4.16 – Influência do tipo de biomassa na composição volumétrica média do gás de produção.....	64
Figura 4.17 – Efeito da biomassa nos parâmetros de gasificação.....	65
Figura A.1 – Reta de calibração do analisador de metano.....	77
Figura A.2 – Reta de calibração do rotâmetro do agente oxidante - Ar.....	78
Figura B.1 – Interface do programa de análise de temperaturas - <i>Advantech</i>	79
Figura B.2 – Interface do programa analisador de compostos gasosos – <i>madur</i>	79
Figura C.1 – Esquema do sistema de filtragem. Adaptado (madur Eletronics, 2017a)	80

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre reatores de leito fixo, leito fluidizado e de escoamento arrastado ((Basu, 2010; Castanheira, 2017; Almeida, 2020)	25
Tabela 2.2 – Comparação de parâmetros dos diferentes reatores de leito fixo e leito fluidizado (Basu 2006; Knoef 2009; Basu 2010)	25
Tabela 3.1 - Propriedades do leito.....	32
Tabela 3.2 - Caracterização do equipamento de medida.	36
Tabela 3.3 – Resultados da análise da poda de videira.....	37
Tabela 3.4 – Resultados da análise da poda de kiwi.....	38
Tabela 3.5 - Resultados da análise da poda de tojo.....	39
Tabela 3.6 - Resultados da análise da poda de giesta.....	39
Tabela 4.1 – Valores das constantes em condições PTN.....	42
Tabela 4.2 – Valores de viscosidade do ar de fluidização, velocidade mínima de fluidização, velocidade terminal a diferentes temperaturas e velocidade real	43
Tabela 4.3 - Valores de poder calorífico superior e inferior dos gases constituintes do gás de produção ((Francis e Peters, 1980)	46
Tabela 4.4 – Parâmetros de ensaio	48
Tabela 4.5 – Exemplo das condições operacionais de um ensaio.....	48

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

BFB	Bubbling Fluidized Bed
CFB	Circulating Fluidized Bed
CHP	Combined Heat and Power
CVR	Centro para a Valorização de Resíduos
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
<i>PCI</i>	Poder Calorífico Inferior
<i>PCS</i>	Poder Calorífico Superior
PTN	Condições normais de temperatura e pressão

Símbolos latinos

d_p^*	Diâmetro adimensionalizado da partícula de areia
d_p	Diâmetro médio das partículas [m; mm]
$Energia_{gás}(PCI)$	Energia do gás, através do <i>PCI</i> do gás de produção [kJ]
$Energia_{gás}(PCS)$	Energia do gás, através do <i>PCS</i> do gás de produção [kJ]
$Energia_{biomassa}$	Energia da biomassa [kJ]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
M	Massa molar
$m_{amostra,seca}$	Massa seca da amostra [kg; g]
m_{ar}	Massa de ar inserida no leito [kg; g]
$m_C(t)$	Quantidade de carbono nas moléculas de CO ₂ do gás de produção [kg; g]

$m_P(C)$	Massa de carbono nos produtos [kg; g]
$m_R(C)$	Massa de carbono nos reagentes [kg; g]
$N_{2[\%]}$	Azoto lido pelo analisador, no instante t=0 [%]
$n_{N_2,in}$	Número de moles de N ₂ presentes no ar injetado [mol]
$N_{2,lido[\%]}(t)$	Concentrações de azoto lidas pelo analisador ao longo do tempo [%]
$n_{CO_2}(t)$	Número de moles de CO ₂ , ao longo do tempo [mol]
$n_{gas}(t)$	Número de moles total do gás, ao longo do tempo [mol]
p	Pressão [N/m ²]
PCI_{gas}	Poder Calorífico Inferior do gás de produção [MJ/m ³]
PCS_{gas}	Poder Calorífico Inferior do gás de produção [MJ/m ³]
$PCI_{biomassa}$	Poder Calorífico Inferior da amostra, em base seca [MJ/kg]
R	Constante particular do ar [J/(kg K)]
S	Constante de Sutherland
T	Temperatura do leito [K; °C]
T_0	Temperatura de referência [K; °C]
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização [m/s]
U^*	Velocidade do gás de fluidização adimensionalizada
U_t^*	Velocidade terminal adimensionalizada
U_t	Velocidade terminal das partículas da areia [m/s]
$V_{CO_2}(t)$	Volume de CO ₂ , ao longo do tempo [m ³ ; dm ³]
$V_{gás}$	Volume total do gás [m ³ ; dm ³]
Y	Rendimento do gás seco [m ³ /kg]
$\%C(B.S)$	Quantidade de carbono presente na amostra da biomassa, na base seca [%]
$\%conv(C)$	Eficiência de conversão de carbono [%]

(Nota: Os m³ dos poderes caloríficos e do rendimento de gás seco são referidos a 1 atm e 0 °C)

Símbolos gregos

ϵ_{mf}	Porosidade do leito nas condições mínimas de fluidização
$\eta_{gás}$	Eficiência do gás frio [%]
μ	Viscosidade do ar [kg/(m s)]
μ_0	Constante de viscosidade [kg/(m s)]
ρ_p	Massa volúmica das partículas de inertes [kg/m ³]

ϕ	Esfericidade
ΔH^0	Variação de entalpia na base molar [kJ/mol]

Capítulo 1

Introdução

A produção de combustíveis gasosos, provenientes de combustíveis sólidos, é uma arte antiga, mas de forma alguma, é uma arte esquecida. - (Higman e Burgt, 2008)

Pode-se definir gasificação como um processo químico que converte materiais carbonosos – como a biomassa – em combustíveis gasosos ou matéria-prima química. Contudo, esta definição não inclui combustão, visto que, enquanto a combustão precisa de mais oxigénio para converter em energia térmica toda a energia disponível nas ligações químicas existentes num dado material ou combustível, a gasificação ocorre com uma relação ar/combustível com defeito de ar, resultando numa menor libertação de calor, calor esse que irá seguidamente impor um processo de conversão química à restante parte da massa inicialmente presente e que não foi consumida nessa combustão parcial. A gasificação converte a maior parte da energia existente em ligações químicas com alto valor energético, em novas ligações químicas também de potencial energético elevado. A combustão converte ligações químicas de alto teor energético em ligações químicas com baixo potencial energético, libertando o diferencial energético existente entre as ligações originais e as finais, em energia térmica (Higman e Burgt, 2008). O processo de gaseificação consiste em quatro estágios principais: secagem, oxidação parcial, pirólise e por fim, redução (Akhtar et al., 2018). Sintetizando, a pirólise é a designação geral dada à decomposição térmica de um composto carbonoso ou orgânico em atmosfera redutora, isto é, com defeito de ar. Se o objetivo for a produção de um sólido, carvão, o processo chama-se carbonização. Se o objetivo for a produção de produtos gasosos o processo chama-se gasificação

O propósito da pirólise, não é simplesmente a conversão de energia, produção de matéria-prima química, também é uma importante aplicação. Na verdade, as primeiras aplicações da pirólise remontam aos primórdios da história da humanidade, mais especificamente à transformação de madeira em carvão, não para fins de aquecimento, mas para melhorar os processos de cozedura dos alimentos evoluindo posteriormente para aplicações mais elaboradas como a redução de minério de ferro (Higman e Burgt, 2008).

Na verdade, a biomassa, teve de uma forma recorrente um papel importante no desenvolvimento da humanidade ao longo dos séculos. Na verdade, trata-se de um material

versátil e suscetível a transformações podendo originar diferentes tipos de biocombustíveis, não só sólidos (briquetes e péletes de madeira) mas também líquidos (etanol e metanol) ou gasosos. A nível mundial, a biomassa ocupa o quarto lugar na hierarquia das fontes de energia primária, fornecendo cerca de 14 % das necessidades energéticas mundiais. De facto, a biomassa é a fonte de energia mais importante em países em desenvolvimento, fornecendo cerca de 35 % das suas energias (Demirbas, 2004).

Seguidamente, na secção 1.1, será abordado o objetivo e enquadramento da presente dissertação. Na secção 1.2 retrata-se a pertinência do uso da biomassa - como recurso para gasificação - e as características da mesma. Na secção 1.3, justifica-se a seleção das espécies vegetais que foram usadas. Por fim, a última secção, 1.4, descreve, a estrutura desta dissertação.

1.1 - Objetivo da dissertação

A presente dissertação tem por objetivo uma primeira avaliação da gasificação em leito fluidizado de pequenas cargas de quatro espécies de biomassa, de origem agrícola e florestal. Este trabalho foi desenvolvido na Unidade de Energia do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI – e financiado pelo projeto Interreg Europe, BIOMASA-AP. As espécies vegetais estudadas foram o kiwi, a videira, o tojo e a giesta. Mais concretamente, resíduos de poda de kiwi e de videira, ou seja, resíduos agrícolas, enquanto a giesta e tojo são resíduos florestais ou silvícolas. O que se pretende é ter uma ideia da composição da mistura gasosa, o gás de produção, que se obtém da sua gasificação em leito fluidizado borbulhante à escala laboratorial.

1.2 - Características da biomassa

Nesta secção realça-se a importância no conhecimento da composição da biomassa como combustível, assim como a razão pela qual foram escolhidas as espécies em estudo.

Apesar de, dentro das fontes de energia renováveis, a biomassa ser aquela que conduz à emissão de gases de efeito estufa – a queima de resíduos orgânicos liberta dióxido de carbono e óxidos de azoto – tal não a impede de ser considerada como ambientalmente sustentável no âmbito de produção de energia, já que as emissões de dióxido de carbono são compensadas pela absorção do mesmo gás durante o crescimento da biomassa. Na verdade, não sendo, hoje em dia, a biomassa um combustível muito utilizado a nível industrial (fornece cerca de 15 %-20 % do combustível consumido no mundo), é muito utilizada em processos não industriais como no aquecimento doméstico (Higman e Burgt, 2008).

A biomassa inclui apenas espécies vivas ou mortas recentemente, que possam ser usadas como combustível ou em processos químicos, ou seja, não se consideram como tal, matérias orgânicas que ao longo de muitos milhares de anos foram transformados por processos geológicos em substâncias como o carvão, o petróleo, ou o gás natural (Basu, 2010).

Todos os anos, uma vasta quantidade de biomassa cresce através de processos naturais, como a fotossíntese que absorve CO_2 da atmosfera. Quando arde, a biomassa liberta o dióxido de carbono que previamente absorveu, fazendo com que a queima da biomassa não acrescente ao banco de dióxido de carbono total da Terra. Por esta razão, a biomassa é considerada um combustível “neutro em carbono” (Basu, 2010). De facto, a biomassa dita botânica é formada através da conversão do CO_2 da atmosfera e da água que absorve do solo em carboidratos, pela energia do sol na presença de clorofila, a qual consegue converter a energia da luz solar em energia química através do processo de fotossíntese (Silva, 2018).

Esta forma de combustível pode ser constituída por celulose, hemicelulose, lípidos, proteínas, açúcares simples, lenhina, amido, água, hidrocarbonetos, cinzas, entre outros compostos. Dentro destes constituintes, a biomassa pode apresentar uma concentração diferente, que depende do tipo de espécie vegetal, tipo de tecido, estado e condições de crescimento (Mateus, 2019).

Pelo simples motivo de a biomassa ser constituída por hidratos de carbono, apresenta concentrações de oxigénio mais elevadas que os combustíveis fósseis convencionais. Este fator indica que, teoricamente, a combustão da biomassa requer uma menor quantidade de oxigénio atmosférico, ou seja, de ar, para a sua combustão. Na verdade, o carbono empenha o papel de principal constituinte – representa cerca de 30 a 60 % (v/v) da matéria seca – seguido do oxigénio e o hidrogénio – cerca de 5 a 6% (v/v) da matéria seca. O azoto, enxofre e cloro encontram-se em quantidades geralmente, inferiores a 1 % (v/v) da matéria seca, contudo estes são os elementos responsáveis pela emissão de gases poluentes. A exemplo disso, o azoto, constituinte da fração proteica, é indispensável para o crescimento das plantas, porém, também é responsável pelas emissões de NO_x (Jenkins, 1998).

Dentro da categoria de biomassa há propriedades específicas inerentes aos tipos de biomassa existentes que determinam o seu desempenho como combustível, tanto na combustão, como na gasificação, ou em ambos. Na literatura encontrada, diferentes indicadores são normalmente usados para qualificar a biomassa em estudo, contudo os que mais se destacam e requerem uma atenção mais detalhada, na caracterização energética e eficiência do processo em estudo, compreendem os seguintes pontos:

- Cinzas;
- Produtos voláteis;
- Teor de humidade;
- Morfologia e densidade;
- Poder calorífico.

Relativamente às propriedades da cinza, o grande fator que diferencia a biomassa dos combustíveis fósseis é que na maioria das biomassas a cinza é maioritariamente composta por sais alcalinos ou alcalinoterrosos. Os componentes mais importantes nas cinzas são o potássio, cálcio e fósforo. Devido a isto, as cinzas da biomassa têm um baixo ponto de fusão e provaram ser

extremamente agressivas em relação aos materiais refratários que revestem as paredes das fornalhas, assim como em relação aos materiais ferrosos dos feixes de transferência de calor (Higman e Burgt, 2008).

Os produtos voláteis referem-se à parte da biomassa que é libertada quando esta é aquecida (até 400 a 500 °C). Durante este processo de aquecimento, a biomassa decompõe-se em gases voláteis – a biomassa apresenta, normalmente, altos valores de gases voláteis que vão até 80 % do seu conteúdo. O queimar destes gases é, geralmente, um processo rápido e ocorre tão logo estes são libertados. O teor de matéria volátil afeta diretamente o processo de combustão e geralmente, é o responsável pela formação de alcatrão na fornalha ou reator (Jenkins, 1998).

Por outro lado, o teor de humidade da biomassa, resume-se à quantidade de água no material, expresso como uma percentagem em massa da amostra. Esta massa pode ser referida segundo uma base húmida, numa base seca, ou numa base seca e sem cinza. Porque o teor de humidade afeta bastante o valor da biomassa como combustível, a base em que o conteúdo é calculado deve ser sempre indicada. Um elevado teor de humidade pode dificultar a ignição e reduzir a temperatura. Pode-se considerar que entre 40 a 60 % (m/m) de humidade, um teor médio. Por fim, reporta-se que os valores de humidade apresentam uma vasta gama, como por exemplo, no caso do grão dos cereais com menos de 10 % até os 50 a 70 % de humidade, no caso dos resíduos florestais (Quaak et al., 1999).

Um bom sistema de alimentação do combustível, assim como, um bom tipo de tecnologia de combustão é determinado pela densidade e pela granulometria das partículas que consegue processar. A densidade da biomassa depende da natureza do material e é importante na consideração do seu conteúdo energético, transporte, manuseamento e armazenamento (Solar Energy Research, 1986). Contudo, as variações de densidade e morfologia da corrente de alimentação não são fatores com elevada importância, quando se trabalha em gasificadores de leito fluidizado, ao contrário de reatores de leito fixo, em que uma carga elevada leva a que a matéria se estabeleça acumulada numa determinada zona, levando a diminuição da eficiência do equipamento, podendo mesmo danificar a instalação (Basu, 2006).

O valor do poder calorífico pode ser avaliado a partir da composição elementar, assim como do teor de cinzas e humidade presente na amostra de biomassa. Na verdade, o poder calorífico de um combustível é um indicador de energia quimicamente ligada nesse combustível com referência a um ambiente normalizado. Os parâmetros mais conhecidos são Poder Calorífico Inferior (*PCI*) – que representa a energia real que se obtém da combustão da unidade de massa matéria húmida considerando-se que a água é libertada no estado gasoso – e o Poder Calorífico Superior (*PCS*) – cujo estado de referência considera que água é libertada no estado líquido.

Na combustão da biomassa seca forma-se sempre alguma água, que é libertada como vapor, quando aquecida. Por outro lado, se os gases da combustão são arrefecidos a temperaturas suficientemente baixas, abaixo do respetivo ponto de orvalho, isto implica que além do calor libertado durante as reações químicas pode-se adicionar a este o calor libertado na condensação do

vapor de água. Se a biomassa tiver alguma humidade o seu *PCI* real, isto é da biomassa tal e qual é queimada numa situação real, decresce com o aumento do teor de humidade na biomassa, pois a parte de energia térmica que é absorvida pela vaporização da água aumenta significativamente (Quaak, et al., 1999).

As características que afetam a eficiência (o rendimento, a qualidade) da combustão da biomassa, inerentes a esta, podem distribuir-se em propriedades termoquímicas e termofísicas (Kanuary, 1994):

- Termoquímicas: destaca-se a entalpia da reação de combustão, a temperatura de combustão, a energia de ativação e o teor em cinzas. Estas características são influenciadas pelas propriedades da biomassa (descritas anteriormente) e da instalação de queima;
- Taxa de combustão/termofísicas: este fator afeta o processo de combustão no interior da partícula assim como na superfície. Certas propriedades, como o tamanho da partícula, condutividade térmica, densidade, calor específico e porosidade são propriedades físicas que afetam os processos internos. Por outro lado, as propriedades que afetam os processos à superfície estão essencialmente relacionadas com a transferência de calor desde o ambiente envolvente da partícula, com a circulação do ar e com a transferência de massa entre os voláteis e o ar.

Em jeito de conclusão, salienta-se uma série de características que tornam a biomassa um bom combustível, dos quais se destacam o elevado poder calorífico, a baixa temperatura de ignição, a facilidade de secagem, o elevado teor de matérias voláteis, entre outras. Tais propriedades tornam-se influenciáveis pelas características do combustível, como também pelas características da fornalha. Na verdade, a eficiência da combustão da biomassa será fortemente afetada por outras características como a humidade, a granulometria, a densidade e a heterogeneidade dos materiais lenhosos. (Kanuary, 1994). De salientar também que, como a biomassa apresenta uma composição química complexa, com forte dependência da espécie em estudo, torna esta um caso mais complexo relativo aos outros tipos de combustíveis.

1.2.1 – Biomassa em estudo

Em países industrializados, o uso da biomassa como combustível é altamente restrito ao uso de produtos provenientes da silvicultura, assim como, das indústrias do papel e açúcar. Contudo, o uso desta é altamente encorajado como parte de uma estratégia para redução das emissões de CO₂ (Higman e Burgt, 2008).

A utilização dos resíduos florestais tem uma enorme virtude, transforma um desperdício, numa mais valia para as populações rurais em particular, mas também para toda a sociedade. Na presente dissertação, serão estudadas várias espécies de biomassa lenhinoceulósica – cujos

constituintes, como indica o nome, são a celulose e a lenhina - mais especificamente a giesta e o tojo (biomassa florestal), assim como, o kiwi e a videira (resíduos de biomassa agrícola). Estas espécies foram selecionadas no abrigo do Projeto “Biomassa-AP”, projeto este que pretende estudar o aproveitamento de resíduos vegetais e agrícolas da Euroregião Norte de Portugal e Galiza.

Localizada na Península Ibérica, a Euroregião Norte de Portugal e Galiza é palco de oportunidades e de grande potencial para desenvolvimentos futuros com um território de 51.000 km² (29.575 da Galiza e 21.278 do norte de Portugal) com uma população de cerca de 6,4 milhões (2.760.179 na Galiza e 3.727.313 no Norte de Portugal). De facto, esta área é local de vastas viniculturas – produto principal de agricultura no norte da Península Ibérica e, no caso de Portugal ocupa 180.000 ha para produção de vinho - e plantações de kiwi (*Actinidia deliciosa*) – Portugal encontra-se em 4º lugar na Europa atrás de Itália, França e Grécia, com uma produção anual de 35.000 t. Na verdade, toda esta produção leva a uma elevada quantidade de lixo e desperdício anualmente (cerca de 2.850 t, no caso de Portugal). Na figura 1.1 encontram-se representadas as duas espécies.

Os resíduos orgânicos das espécies agrícolas obtiveram-se essencialmente nas podas de Inverno e Verão, verificando-se o mesmo destino para ambas: próprio campo de cultivo para posterior destruição, para uso de fonte de matéria orgânica. Estima-se que sejam produzidas mais de 2,85 mil toneladas de resíduos por ano (Freitas, 2014; Ferreira e Sanches, 2019)



Figura 1.1 – Árvore de videira (em cima) e kiwi (em baixo)

Por fim, as espécies de giesta (*Cytisus scoparius*) e tojo (*Ulex spp*) fazem parte dos típicos arbustos de floresta e de outras áreas não cultivadas (mato), que são de crescimento espontâneo, nas zonas litoral centro e norte de Portugal. A recolha destas espécies ajuda de duas maneiras na preservação do meio ambiente: i) há uma redução do risco de incêndio florestal; ii) há valorização do material colhido ou da energia obtida na combustão da mesma.

No caso da giesta (representada na figura 1.2), tratam-se de arbustos de 0,5 a 3,0 m de altura, com caules fotossintéticos longos e flexíveis, que mantêm folha durante poucos meses do ano. Esta espécie tem sido considerada espontânea em Portugal em quase todas as “Floras”, localizada em matos, bosques e margens dos rios, em várias localidades: Buçaco, Póvoa, Meadas e Serra de Ossa (ESTABROOK, 2006). Na verdade, este género engloba cerca de 60 espécies, das quais se destacam o *Cytisus multiflorus*, vulgarmente conhecida como giesta branca - conhecida pelas suas alegadas propriedades medicinais; tem sido utilizada devido às suas propriedades diuréticas, anti-inflamatórias, anti-hipertensivas e antidiabéticas – e o *Cytisus scoparius* - usado na medicina tradicional pelas suas propriedades diuréticas, antidiabéticas, hipnóticas e sedativas (Gião *et al.*, 2007). Tal como o *Cytisus multiflorus*, o *Cytisus scoparius* também detém a capacidade de fixar azoto nos seus ramos e galhos, pelo que é, muitas vezes, utilizado como fertilizante dos solos (Estabrook, 2006).



Figura 1.2 – Arbusto de giesta

O tojo (representado na figura 1.3), apresenta-se como um arbusto com 60-150 m de altura, ramos principais ascendentes ou eretos, todo recoberto de espinhos. Encontram-se em charnecas, orlas de bosques e pinhais, mas preferencialmente em substratos ácidos, em zonas perto do litoral. Tratam-se de plantas leguminosas e, como tal, capazes de subsistir em ambientes com falta de azoto mineral nos solos, estabelecendo-se como um género bastante tolerante. De facto, são extremamente resistentes, capazes de dominarem ambientes degradados com bastante rapidez. Com uma particular resistência aos incêndios, as raízes destas, também resistem as altas temperaturas, sendo muito dificilmente destruídas pelas adversões climáticas. As sementes têm viabilidade nos solos por mais de 30 anos (Oliveira e Marques, 2007)



Figura 1.3 – Arbusto de tojo

1.3 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação consta de 6 capítulos. O primeiro consiste numa simples definição da gasificação e características da biomassa em estudo.

No segundo capítulo expõe-se uma visão mais alargada do conceito de gasificação, como método de conversão de biomassa. Este capítulo também serve de contextualização da situação do uso de gasificação no mundo, assim como as opiniões relativas a este processo.

No terceiro capítulo caracteriza-se primeiramente a instalação, assim como todos os componentes que a constituem, seguido do procedimento experimental.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos experimentalmente.

Por fim, no quinto capítulo tecem-se sumariamente as conclusões e propõem-se trabalhos futuros.

1.4 - INEGI

O laboratório de combustão, local onde os ensaios foram realizados, encontra-se no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). Trata-se de um

instituto vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica, servindo também como uma ponte entre a Universidade e a Indústria. Na verdade, o laboratório de combustão, aqui situado, tem como principal objetivo desenvolver tecnologias na área da Termodinâmica e Combustão.

Capítulo 2

A gasificação como método de conversão da biomassa

A biomassa consegue ser convertida em calor, eletricidade ou combustível, contudo, torna-se importante ter em conta a eficiência energética dos processos de conversão, pois estes traduzem-se numa diminuição dos custos energéticos e eliminação de resíduos sem perda da qualidade de produtos (Rodrigues, 2016).

Atualmente, a conversão da biomassa em energia útil ocorre através de processos físicos – apesar de não ser exatamente um processo de conversão energético da biomassa, uma vez que há uma mudança física e não química do material – processos bioquímicos, físico-químicos e termoquímicos.

Os **processos físicos** definem-se como processos que alteram a condição física do material e, antecedem, normalmente, os restantes processos de conversão da biomassa. Estes processos físicos incluem corte, secagem, moagem, densificação de material (entre outros), e são utilizados em grande parte das vezes em material como serrim, resíduos florestais ou partículas de carvão vegetal (Silva, 2018).

Relativamente aos **processos bioquímicos**, tratam-se de métodos que convertem os compostos polissacarídeos da biomassa. Através de processos de hidrólise, fermentação e digestão anaeróbia, os componentes polissacarídeos são decompostos, de forma a obter combustíveis ricos em metano e outros hidrocarbonetos leves (Zhang, et al., 2010; Silva, 2018; Mateus, 2019).

Por outro lado, os **processos físico-químicos** consistem em técnicas de destrocamento e compressão de matérias vegetais diversas, seguidas de extração de óleos vegetais, para posteriormente os transformar em biodiesel. Este processo consiste numa reação química onde os óleos vegetais reagem com o álcool – metanol ou etanol – na presença de um catalisador, sendo este ou alcalino ou ácido (Silva, 2018; Mateus, 2019; Morgado, 2019).

Por fim os **processos termoquímicos** ocorrem quando a energia quimicamente armazenada num material, é convertido por processos térmicos e químicos, noutra tipo de energia. Na verdade, vários tipos de tecnologias são capazes desta conversão de matéria orgânica em energia, através da via termoquímica, dos quais se destacam: liquefação, pirólise, gasificação e combustão (Van Loo e Koppejan, 2008).

A tecnologia de gasificação será abordada, novamente, nas próximas secções com mais detalhe, sendo este processo usado ao longo desta dissertação. Este e os restantes métodos termoquímicos são seguidamente caracterizados de forma sucinta:

- **Liquefação (hidrotérmica):** também designada liquefação direta, trata-se de um processo de conversão de materiais sólidos, utilizando baixas temperaturas – entre 250 e 350 °C – e pressões elevadas – 100 a 200 bar - normalmente com elevada pressão parcial de hidrogénio e um catalisador. Deste processo resulta, maioritariamente, um alto rendimento de produção de fase líquida e um gás rico em CO₂ (Basu, 2010);
- **Pirólise:** processo termoquímico, que ocorre na ausência de oxigénio, em temperaturas compreendidas entre 400 e 700 °C, e à pressão atmosférica. Deste processo, resultam três produtos distintos: carvão vegetal carbonizado, bio-óleo e gás de produção (Basu, 2010). A fração de cada produto é função do tempo de permanência, da taxa de aquecimento e da temperatura de operação (Silva, 2018);
- **Gasificação:** caracteriza-se como um processo que envolve um agente oxidante em quantidade inferior à estequiometricamente necessária à combustão. Trata-se de uma tecnologia de decomposição térmica de um produto sólido – geralmente, rico em carbono – num combustível gasoso. Este processo ocorre em temperaturas entre 800 e 1100 °C, num ambiente com pouca concentração de oxigénio - superior à pirólise, mas inferior à combustão. Na secção 2.3 consta uma descrição mais detalhada dos processos de gasificação (Basu, 2010).
- **Combustão:** constitui um processo de oxidação completa do combustível através de um agente oxidante (Van Loo e Koppejan, 2008). Trata-se da tecnologia termoquímica de conversão da biomassa mais utilizada a nível mundial e ocorre de forma geral, a temperaturas superiores a 800 °C e em excesso de oxidante. Na verdade, consiste num processo químico nos quais um conjunto de reações exotérmicas rápidas de oxidação, no qual há uma libertação da energia térmica armazenada ((Almeida *et al.*, 2019).

2.1 - Desenvolvimento da gasificação

A história da gasificação remonta ao século XVII. Desde a concepção da ideia, a gasificação passou por várias fases de desenvolvimento.

Os dos primeiros objetivos da gasificação foi a produção de gás de cidade, também conhecido como gás de carvão. Trata-se de um gás proveniente da gasificação do carvão mineral. Este gás continha cerca de 50 % de hidrogénio e 3 a 6 % (v/v) de monóxido de carbono e foi utilizado outrora para iluminação e aquecimento. Foi exatamente este marco de desenvolvimento, que ditou o início da revolução industrial e, conseqüentemente, um grande marco na história da gasificação. Em 1609, Jan Batista Van Helmont descobriu a produção do gás através do aquecimento da madeira ou carvão. Após esta descoberta, outros começaram a investigar e a desenvolver o processo. Os primeiros trabalhos com gasificação surgem em 1669, realizados por Thomas Shirley, e com o aperfeiçoamento do processo, surgem os primeiros resultados publicados por Robert Gardner em 1788, John Barber em 1791 e Philippe Lebon em 1798. Um grande inconveniente do gás de cidade era que o poder calorífico era relativamente baixo e, desta forma, não era economicamente viável ser transportado através de longas distâncias. Em relação a este problema, observa-se que o desenvolvimento de motores a vapor, assim como, vários processos de gaseificação, não seriam possíveis sem o desenvolvimento paralelo de tubos metálicos e ebulidores, enfatizando assim, a importância de equipamentos apropriados para o desenvolvimento processos, quer físicos, como químicos (Estabrook, 2006; Higman e Burgt, 2008; Rodrigues, 2016)

Na verdade, o recurso à gasificação tornou-se algo tão comum que entre 1901 e 1920, muitos sistemas de gaseificação eram vendidos e usados para gerar eletricidade. Contudo, os únicos gases que poderiam ser produzidos num processo contínuo eram o gás de produção que após tratamento passava a ser designado por gás de síntese – obtido através de oxidação parcial de coque com ar humidificado – e o gás de alto forno produzido neste tipo de equipamentos (*blast furnace*). Um alto-forno é um tipo de forno metalúrgico tradicionalmente usado para extrair metais, geralmente ferro, do minério. Os altos-fornos existem há séculos, com os primeiros modelos desenvolvidos no século 1 a.C. na China. O funcionamento deste explica-se da seguinte forma: Uma correia transportadora conduz a carga contendo as matérias primas ferrosas, fundentes e coque para a parte superior do forno, onde são distribuídas alternadamente no seu interior. Numa região chamada zona de combustão, ventiladores sopram gases a elevadas temperaturas, contendo oxigénio e outros combustíveis auxiliares (óleo mineral, carvão pulverizado, gás natural, etc.), que sobem e reagem com a carga metálica contida no interior do forno, causando a sua redução e fusão (Breault, 2010)

Foi só depois de Carl von Linde comercializar a separação criogénica do ar, durante a década de 1920, que processos de gasificação totalmente contínuos usando uma injeção de oxigénio, passaram a ser usados na produção de gás. Esta foi a época do desenvolvimento de alguns dos processos importantes que foram os precursores de muitas das unidades de hoje: o processo de leito fluidizado de Winkler [1926], o processo de gasificação pressurizada em leito móvel de Lurgi [1931] e o processo de fluxo arrastado de Koppers-Totzek [1940] (Breault, 2010; Cardoso, 2013; Rodrigues, 2016).

Cerca de 1930, a Alemanha começou a utilizar a gasificação do carvão para a produção de combustível sintético. Os governos britânicos e franceses seguem o exemplo e optam pela produção de automóveis movidos a gás pois torna-se mais adequado o uso destes nas respetivas colónias onde a gasolina é mais escassa. 10 anos depois grande parte da Europa toma medidas semelhantes. Contudo, com o fim da II Guerra Mundial, a gasificação torna-se uma tecnologia esquecida com a acessibilidade de gasolina e gasóleo a preços muito reduzidos. Mais tarde, em 1950, dá-se um novo desenvolvimento desta tecnologia com a necessidade de combustíveis e problemas de isolamento, por parte de África do Sul durante o período do apartheid. Atualmente os combustíveis fósseis apresentam problemas com a diminuição das suas fontes, além do aumento acelerado dos seus custos e da preocupação mundial com a emissão de gases poluentes, levando a que o interesse pela gasificação, neste caso da biomassa, um combustível de origem renovável, fosse reavivado (Cardoso, 2013).

2.2 - Enquadramento

A gasificação, ou gaseificação - conforme foi introduzido nesta dissertação - trata-se de um processo termoquímico, que remonta há mais de cem anos, que constantemente continua a ser aprimorado, de tal forma que, atualmente constitui uma alternativa aos processos tradicionais de conversão energética.

O ano de 2015 foi marcado pelo facto de ser um ano onde se bateram recordes a nível de investimentos mundial em energia limpa, com fontes de energia renováveis a aumentar cerca do dobro dos combustíveis fósseis. Estes investimentos chegaram mesmo a passar os 350 mil milhões de euros (Indrawan *et al.*, 2020). Na verdade, a UE pretende atingir uma quota de 32 % de fontes de energia renováveis (FER) até 2030 e neutralidade de carbono até 2050, favorecendo a implementação massiva de fontes de energias renováveis. No entanto, a intermitente natureza das FER, como a energia fotovoltaica e energia eólica, faz com que seja expetável apresentarem problemas para a estabilidade de redes elétricas (Jegoux *et al.*, 1992). De facto, com o estilo de vida atual e com o desenvolvimento da economia, torna-se cada vez mais difícil responder à demanda energética. Por esta razão (e não só) o mundo virou-se para a gasificação, como tecnologia de conversão de resíduos, como um meio de melhorar algumas formas de energia

primárias, ou como mais uma resposta a problemas como, falta de acesso e procura de eletricidade, principalmente a nível rural – em países em desenvolvimento (Indrawan *et al.*, 2020).

Atualmente, existem mais de 272 unidades de gasificação operacionais a nível mundial com 686 gasificadores. E em 2015 estavam previstas mais 74 de unidades em construção, também a nível mundial, resultando em mais 238 gasificadores com uma produção de 83 MWth. Até então, a China era o país com o maior número de instalações de gasificação (Global Syngas Technologies Council, 2016) A figura 2.1, apresenta um gráfico, de 2015, onde já se ilustrava o avanço da Ásia, relativamente aos restantes continentes no mundo.

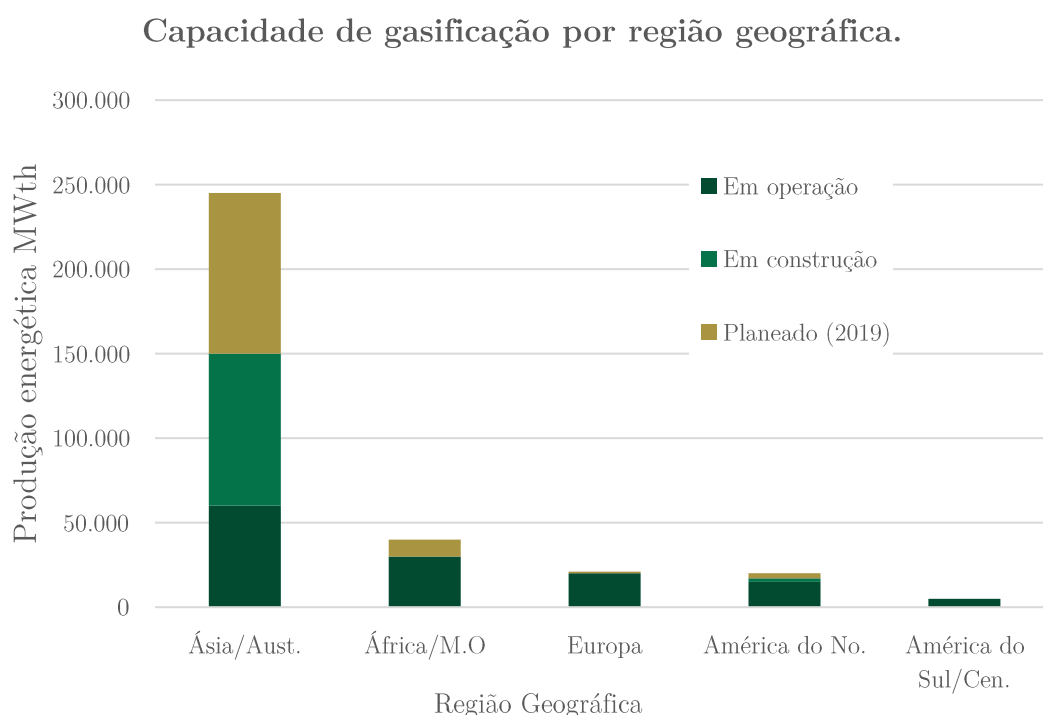


Figura 2.1 – Capacidade de gasificação por região geográfica em 2015 gasificação (Global Syngas Technologies Council, 2016).

Com o passar do tempo as distribuições regionais de gasificação alteraram-se de forma acentuada, sendo que as unidades de gasificação se encontram igualmente distribuídas entre Europa, África/Médio Oriente, e América do Norte. Contudo, a região de Ásia/Austrália apresenta valores de capacidade de gasificação (tanto a nível operacional como em construção) tão elevados que ultrapassa o resto do mundo somado (Global Syngas Technologies Council, 2016).

Estes valores representam a gasificação com diferentes tipos de matéria-prima, contudo o elemento mais relevante para esta dissertação é a biomassa. Na verdade, sabe-se que o carvão é a matéria-prima dominante para a gasificação e vai continuar a ser no futuro próximo. A figura 2.2 representa o número de gasificadores por matéria-prima, que corrobora esta mesma informação. É de notar, também, que, até 2015 – data ao qual este estudo foi levado a cabo – havia ainda instalações de gasificação a usar petróleo como matéria-prima, contudo este número caiu devido ao facto de o preço deste aumentar.

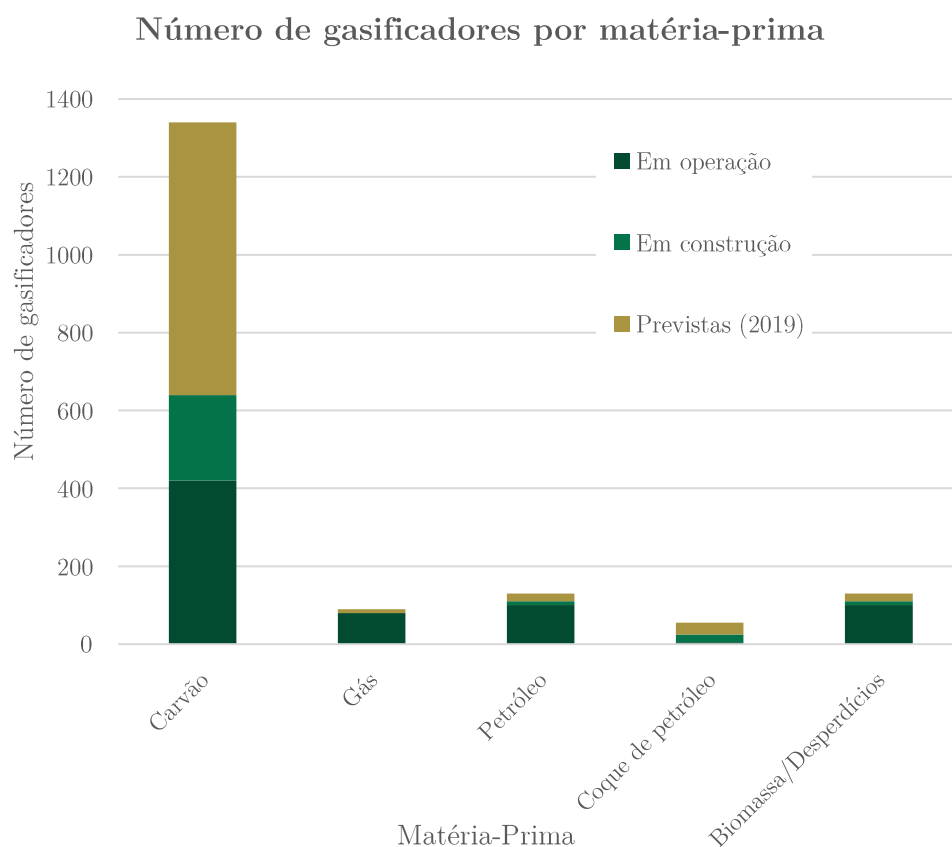


Figura 2.2 - Número de gasificadores no mundo, por matéria-prima (Global Syngas Technologies Council, 2016).

Sabe-se também que, o uso da biomassa e dos desperdícios como matéria-prima está previsto aumentar significativamente, conforme é possível observar na figura 2.3 et al., (2020).

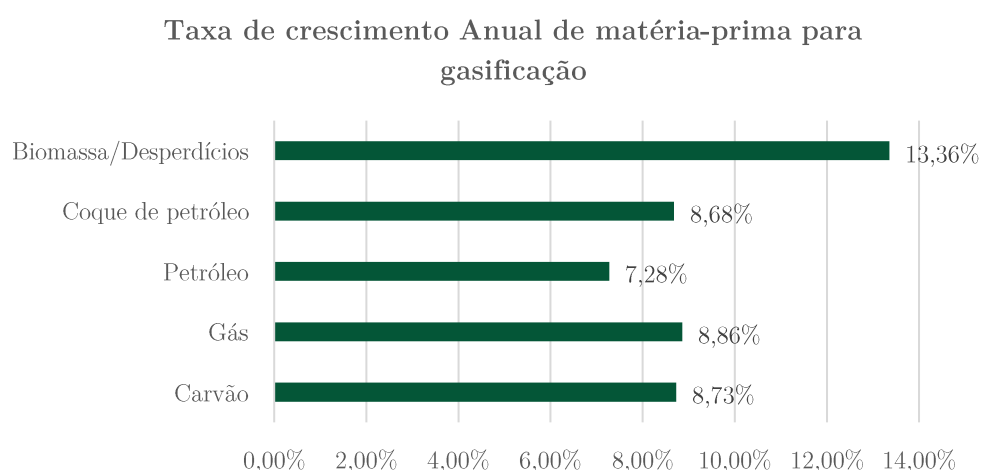


Figura 2.3 – Taxa de crescimento Anual de matéria-prima para gasificação

Atualmente, na Europa, a Alemanha e a Itália lideram em quantidade de unidades de gasificação de biomassa, no entanto, a Suécia e Finlândia apresentam as unidades com maior volume, com mais de 20 MW. A figura 2.4 apresenta o mapa de instalações de gasificação atual (Indrawan et al., 2020).



Figura 2.4 – Mapa de instalações de gasificação de biomassa.

Após uma pesquisa relativa à situação atual da gasificação, evidenciou-se um forte aumento ao recurso de gasificação de biomassa de pequena escala para potência e calor (*combined heat and power* - CHP) nos últimos anos, em toda a Europa. Por outro lado, também se observou um afastamento da biomassa, para o recurso a desperdícios e outros materiais mais difíceis de processar (excrementos de galinhas, lodo de esgoto, desperdício médico, entre outros). Também de salientar que, uma combinação entre gasificação e outras energias renováveis (como por exemplo a energia eólica) oferecem novas possibilidades para balancear a rede elétrica ou armazenamento de energia (Hrbek, 2020). As várias tecnologias de gasificação utilizados nestes países serão descritas na secção 2.4.

2.3 - Tecnologias de gasificação

Conforme já foi referido nesta dissertação, a gasificação consiste na conversão de matérias-primas, normalmente com elevado teor de carbono, num combustível gasoso com um elevado potencial energético. Conforme já se referiu na introdução desta secção, ocorre normalmente entre as temperaturas de 800 e 1000 °C e envolve sempre um meio oxidante em quantidade inferior à estequiometricamente requerida para a combustão.

Na gasificação, o principal objetivo é a produção de um gás com potencial energético de interesse e, como tal, o caráter parcial da oxidação da matéria-prima resulta na produção de um gás diferente do gás de combustão (Basu, 2006; Almeida *et al.*, 2019). Durante o processo de

gasificação, a biomassa sofre uma série de etapas – primeiro a secagem, de seguida a desvolatilização/pirólise, e, por fim, combustão e gasificação/redução – que podem ser sequenciais (no caso de gasificação em leito fixo) ou simultâneas (gasificação em leito fluidizado, que ocorre simultaneamente em todo o volume de leito) (Farzad, et al., 2016).

Relativamente à **secagem**, é aconselhada a sua utilização, para garantir a produção de um combustível gasoso com um poder calorífico mais elevado. Este processo é necessário para eliminar a humidade que os combustíveis apresentam. Esta humidade pode estar compreendida entre valores de 10 a 20 % e até, no caso da madeira fresca, entre valores de 30 a 60 %. Durante a fase de secagem, há uma evaporação da água existente no seio da biomassa, quer intrínseca quer extrínseca, assim como, a volatilização de moléculas leves e ocorre entre os 100 e os 200 °C (Basu, 2006).

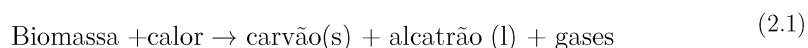
Na fase de **pirólise**, nenhum agente externo é adicionado. Pode-se dividir esta etapa em três pequenas fases. Na primeira fase, compreendida entre as temperaturas de 200 e 280 °C, há uma nova etapa de evaporação da água presente na matéria-prima assim como, a libertação de alguns compostos voláteis como o CO₂, CO e ácido acético (CH₃COOH). Na segunda fase, que ocorre entre os 280 ° e os 500 °C, há uma degradação molecular que origina hidrocarbonetos pesados, designados por alcatrões primários e carbonizado (carvão). Na terceira fase, os alcatrões primários degradam-se em alcatrões secundários e terciários. Há também a libertação moléculas com menor grau de complexidade que irão participar nas reações da gasificação. Esta etapa ocorre nas temperaturas entre os 500 ° e os 800 °C (Almeida *et al.*, 2019).

Apesar de se tratar de um gasificador, há sempre uma etapa de combustão presente nos reatores autotérmicos (que se suportam termicamente). Esta zona normalmente situa-se na zona na qual o agente de oxidação é introduzido. Devido às reações com o oxigénio (reações exotérmicas), há uma elevada quantidade de energia libertada levando a temperaturas superiores a 1000 °C. Trata-se de uma zona crítica, pois o calor gerado nesta secção é utilizado nas restantes zonas para ajudar na secagem, pirólise, gasificação.

A fase da **gasificação** ocorre nas temperaturas de 800 aos 1000 °C, na qual há uma decomposição da matéria-prima residual remanescente e dos compostos formados na pirólise, assim como a formação de gás de produção. Na verdade, há três tipos de derivações da matéria-prima: compostos gasosos (H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, C_aH_bO_c) e dentro dos compostos sólidos há alcatrões e carbonizado (carvão). Estes três componentes, através de várias reações, resultam no pretendido gás de produção (Basu, 2006, 2010; Almeida, 2020).

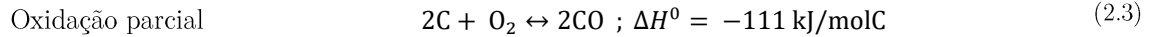
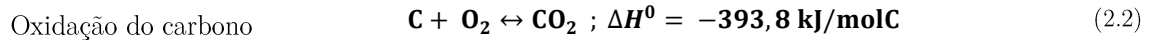
Devido ao elevado grau de complexidade das reações químicas, homogéneas e heterogéneas envolvidas no processo de gasificação, não é possível demonstrá-las aqui, contudo as seguintes aproximações resumem as principais reações para melhor compreensão.

- **Pirólise:**



- **Combustão:**

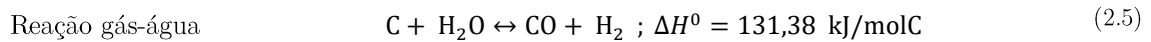
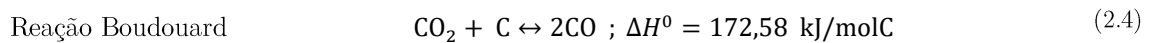
Reações heterogêneas



Tomou-se em consideração as reações endotérmicas com valores positivos de entalpia e as reações exotérmicas com valores negativos.

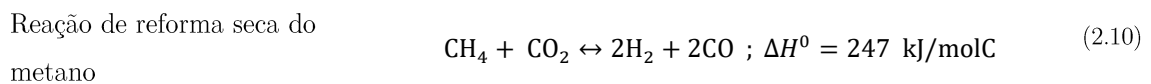
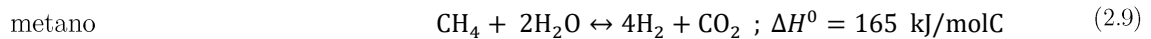
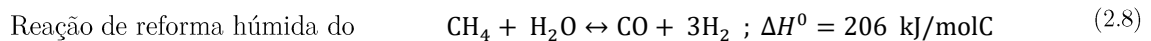
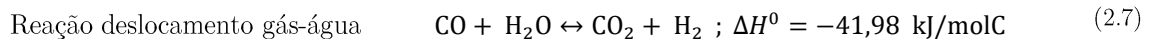
- **Gasificação:**

Reações heterogêneas



As equações podem ser transformadas nas seguintes equações homogêneas, visto que o objetivo é compreender em que situações a conversão do carbono no estado sólido é completa.

Reações homogêneas



2.3.1 – Tipos de reatores

Diversos tipos de reatores são usados na indústria e outros tantos são referenciados como em desenvolvimento. Esta elevada diversidade, deve-se ao facto de diferentes tipos de biomassa podem ser empregados como matéria-prima, assim como o desejo da qualidade do produto no final da gasificação. De forma sucinta e mais abrangente, serão descritos os três tipos de gasificadores mais comuns nesta secção: **reatores de leito fixo** (escoamento ascendente/*updraft*, escoamento descendente/*downdraft* e escoamento cruzado/*crossdraft*), **reatores de leito fluidizado** e, por fim, **reatores de escoamento arrastado**. Esta classificação de gasificadores deve-se a uma categorização segundo a pressão (atmosféricos ou pressurizados) e segundo o tipo de leito (fixo ou fluidizado) (Basu, 2006; Almeida, 2020).

Os **reatores de leito fixo**, típicos para pequena e média escala, com potências térmicas inferiores a 10 MW, são de construção simples e económicos quando comparados com os outros tipos de reatores. Contudo, apresentam elevadas dificuldades na estratificação térmica ao longo do leito reacional e apresentam uma certa probabilidade de formação de aglomerados, pelo que são adequados para a conversão de quantidades relativamente pequenas de biomassa.

- **Gasificadores de leito fixo com escoamento ascendente (*updraft*):** a biomassa é introduzida pelo topo do reator enquanto o agente oxidante é alimentado na parte inferior. A matéria-prima move-se no sentido descendente, à medida que o ar se move de forma ascendente. Devida a esta variação de correntes, também se pode denominar estes gasificadores como gasificadores contracorrente. Neste sistema existem principalmente duas zonas: uma em que a temperatura está compreendida entre os 200 e os 300 °C - local na qual são introduzidas a biomassa e o agente oxidante – e outra zona, no qual se extrai o gás gerado, cujas temperaturas rondam valores entre 200 e os 400 °C. Esta tecnologia tem como principal desvantagem a produção elevada de alcatrão, o que requer um sistema de limpeza eficiente (Basu, 2006; Almeida, 2020). Na figura 2.5 encontra-se representado um gasificador de leito fixo com escoamento ascendente.

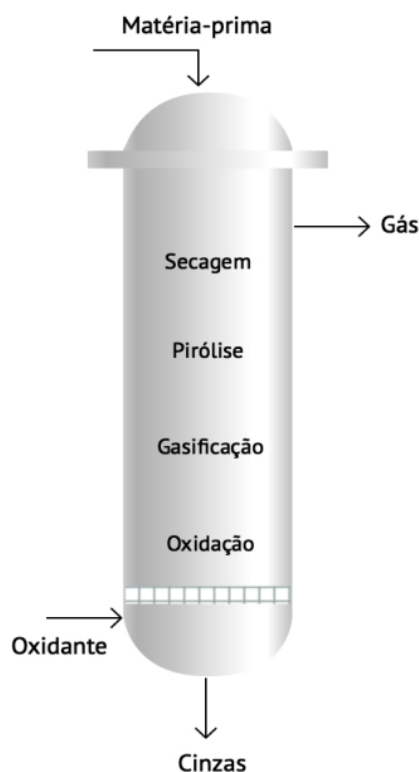


Figura 2.5 – Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento ascendente (Almeida, 2020)

- **Gasificadores de leito fixo com escoamento descendente (*downdraft*):** conforme representado na figura 2.6, tanto os fluxos de ar como os de biomassa

ocorrem em no mesmo sentido. A matéria-prima é admitida na parte superior, enquanto na zona de combustão é introduzido o agente gasificante. Esta configuração leva a que a extração do gás produzido seja feita pela parte superior. Na verdade, com esta caracterização há uma inversão da zona de oxidação com a zona de redução, em relação ao reator *updraft*. Também se verifica uma menor produção de alcatrões, quando comparado ao mesmo reator (Basu, 2006; Rodrigues, 2016; Almeida, 2020).



Figura 2.6 - Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento descendente (Almeida, 2020)

- **Gasificadores de leito fixo com escoamento cruzado (*crossdraft*):** tratam-se dos reatores de leito fixo mais complexos. A alimentação é efetuada na parte superior, como os restantes, e o agente oxidante é admitido, no lado oposto ao da saída dos produtos, na parte lateral. Esta configuração é destinada a gasificações de carvão de pequena escala (Basu, 2006; Rodrigues, 2016; Almeida, 2020). Na figura 2.5 encontra-se representado um gasificador de leito fixo com escoamento cruzado.

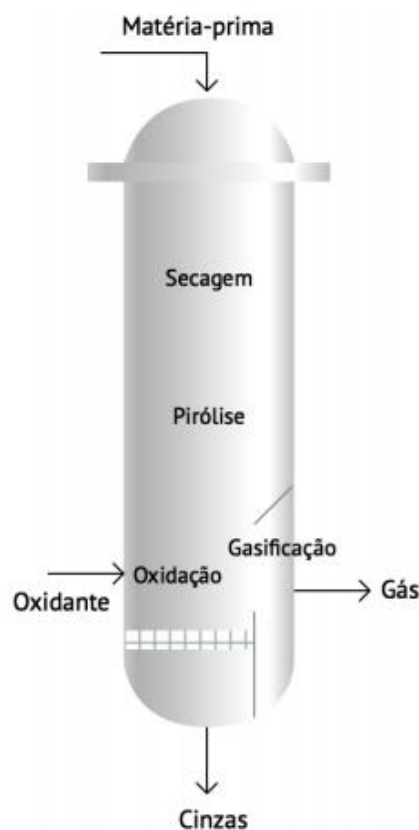


Figura 2.7 - Representação de um gasificador de leito fixo com escoamento cruzado (Almeida, 2020)

Os reatores de leito fixo, neste momento, e na generalidade são os mais fáceis de projetar e de operar. Também são os mais adequados para pequenas ou médias instalações, como já se referiu.

Os **reatores de leito fluidizado**, cuja tecnologia será base dos ensaios laboratoriais desta dissertação, não apresentam certos problemas operacionais que os reatores de leito fixo apresentam, nomeadamente limitações quanto à alimentação de biomassa com alto teor de cinzas, perdas de pressão e problemas de escoamento. Este tipo de gasificadores surge para aumentar, também, a eficiência do processo (Rodrigues, 2016). Tratam-se dos reatores mais estudados em termos da sua aplicação à escala comercial e apresentam potências térmicas inferiores aos 100 MW. A eficiência deste tipo de reatores pode ser, aproximadamente, cinco vezes superior à de um reator de leito fixo.

Contudo, os custos deste tipo de instalações são superiores aos de leito fixo, é promovida uma circulação vigorosa das partículas que favorece as reações envolvidas no processo. Com a fluidização do leito há uma uniformidade da temperatura do leito, o que leva a uma inexistência de gradientes de temperatura, de pontos mais ativos ou de regiões estagnadas no leito. Na verdade, contribui para uma maior área de contacto superficial entre sólidos e fluido, o que favorece a transferência de massa e calor (Basu, 2006; Rodrigues, 2016).

Apesar desta uniformização, a temperatura de operação do leito está limitada pela temperatura em que ocorre a sinterização das cinzas, sendo esta, a principal limitação dos reatores com leito fluidizado. Este leito é constituído por sólidos mantidos em suspensão, através da passagem de um escoamento de fluido, com uma velocidade suficiente para manter a fluidização, no leito de partículas (areia, geralmente) (Miranda, 2014).

Segundo Basu (2006), os gasificadores de leito fluidizado são divididos nos seguintes dois grandes tipos: leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante. Na figura 2.8 encontram-se representados, esquematicamente, estes dois tipos de gasificadores de leito fluidizado.

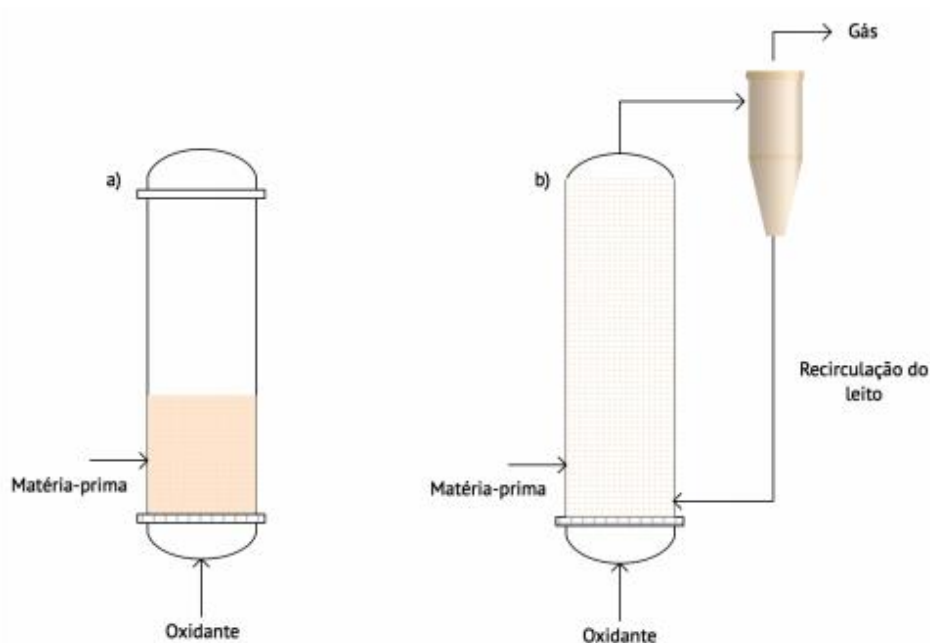


Figura 2.8 – Representação de um reator borbulhante (à esq.) e de leito fluidizado circulante (à dir).
(Almeida, 2020)

Os reatores de leito fluidizado, ou fluidificado (conforme foi referenciado na literatura), do tipo **borbulhante** (*Bubbling fluidized bed* – BFB) operam em gamas de temperatura compreendidas nos valores de 700 e 900 °C e, devido à sua simplicidade de construção (quando comparado com os de tipo circulante), apresentam uma elevada facilidade de se projetar um aumento de escala (Almeida *et al.*, 2020). Neste tipo de reatores a temperatura é uniforme no leito e a alimentação da biomassa é feita sobre este. Para diminuições dos teores de hidrocarbonetos, alcatrões e H₂S, é possível adicionar um catalisador que também promove a libertação de H₂ e um aumento do caudal de gás produzido (Basu, 2006; Almeida, 2020). Este é o tipo de reator utilizado para desenvolvimento da presente dissertação.

No caso dos reatores de leito fluidizado **circulantes** (*Circulating fluidized bed* -CFB), as partículas arrastadas pelos gases são enviados de volta para o leito, por ação de um ciclone. Relativamente ao leito, contrariamente aos BFB (onde o leito fluidizado preenche apenas cerca de metade da altura do equipamento), nos CFB, este encontra-se totalmente preenchido pela matéria

sólida, pelo que há uma maior necessidade de um maior escoamento de fluido para manter a fluidização do leito o que leva a um aumento da transferência de calor e maior taxa de conversão da biomassa. Este tipo de reatores utiliza um sistema de transporte pneumático para uma recirculação das partículas, com velocidades típicas do gás desde 3 até 10 m/s. As temperaturas de funcionamento são mais altas, quando comparadas com BFB, e estão compreendidas entre 800 e 1000 °C (Basu, 2006; Rodrigues, 2016; Almeida, 2020).

Por fim, os **reatores de escoamento arrastado** são os mais utilizados em grande escala, com potências térmicas superiores as 100 MW. Distinguem-se dos outros reatores descritos até agora, na medida que, trabalha em regimes de temperaturas superiores aos 1000 °C. Neste tipo de reatores, é comum misturar água com a matéria-prima, transformando-a numa espécie de lama, com o intuito de facilitar a alimentação no reator. A velocidade do gás no reator é suficientemente alta para arrastar as partículas do combustível. Nos gasificadores alimentados na forma de lama, é necessário um maior volume do reator para evaporar a água adicionada anteriormente. Na verdade, este tipo de reatores, quando comparados com os alimentados a seco, apresentam valores de consumo de oxigénio superiores. Os reatores de escoamento arrastado podem apresentar duas configurações distintas: alimentação superior e alimentação lateral (Almeida, 2020). Estes dois reatores estão representados na figura 2.9.

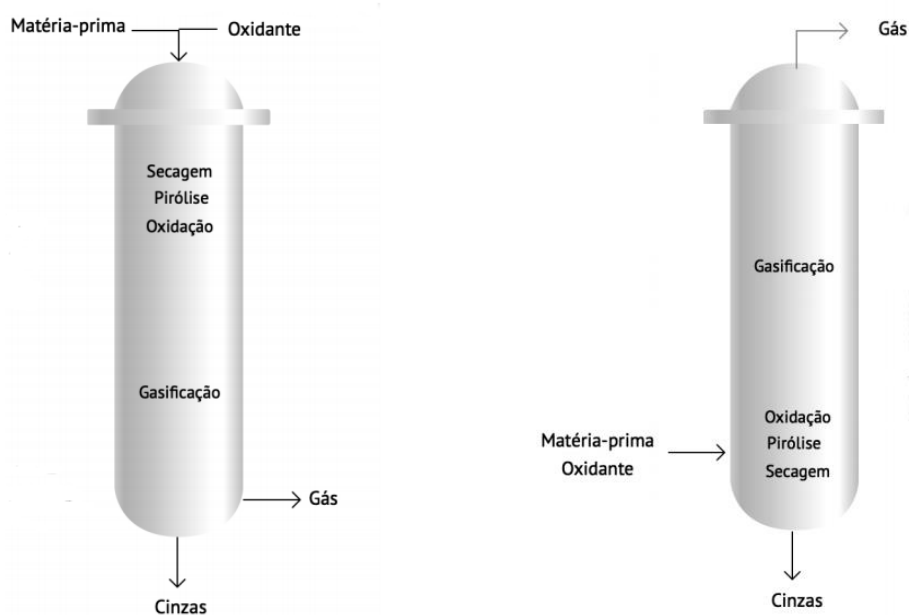


Figura 2.9 – Representação de reator de escoamento arrastado de alimentação superior (à esq.) e alimentação lateral (à dir.) (Almeida, 2020)

Abaixo agrupou-se de forma sucinta as comparações entre os diferentes reatores. Na primeira tabela (tabela 2.1), expõem-se as vantagens e desvantagens do uso destas três tecnologias, assim como indicações da escala de produção. Na tabela 2.2, fez-se uma comparação de vários parâmetros relativamente aos três tipos de reatores de leito fixo e os dois tipos de reatores de leito fluidizado.

Tabela 2.1 – Comparação entre reatores de leito fixo, leito fluidizado e de escoamento arrastado ((Basu, 2010; Castanheira, 2017; Almeida, 2020)

Classe	Tipo	Vantagens/Desvantagens	Produção
Leito fixo	Ascendente	Alto poder calorífico, alta produção de alcatrão, limitação do tamanho do combustível.	Baixa a média escala
	Descendente	Baixo poder calorífico, baixa produção de alcatrão e partículas, sensível à humidade do combustível.	
	Cruzado	Baixo poder calorífico, alta produção de alcatrão, construção simples, difícil de operar, mais baixa temperatura permitindo o uso de componentes mais baratos.	
Leito Fluidizado	Borbulhante ou Circulante	Maior eficiência, alto poder calorífico, melhor transferência de calor pelo combustível.	Média escala
Escoamento Arrastado		Grande variedade de matéria-prima, temperatura uniforme em todo o reator.	Alta escala

Tabela 2.2 – Comparação de parâmetros dos diferentes reatores de leito fixo e leito fluidizado (Basu 2006; Knoef 2009; Basu 2010)

Parâmetro	Leito fixo			Leito fluidizado	
	Descendente	Ascendente	Cruzado	Borbulhante	Circulante
Humidade Biomassa (%)	<25	<60	15	<40	<50
Cinzas (%)	<5	<15	1.0	<20	<20
Partículas biomassa (mm)	20-100	5-100	1-5	10-100	10-100
Morfologia	Uniforme	Praticamente uniforme	Uniforme	Uniforme	Uniforme
Massa volúmica (kg/m ³)	>500	>400	200	>100	>100
Eficiência do gás (%)	85-90	90-95	90	85-90	90-95

2.3.2 – Eficiência de um processo de gasificação

A qualidade do produto final – gás de produção – depende de uma série de variáveis que afetam o desempenho do processo de gasificação. As características da tecnologia adotada para o processo (descritas na secção anterior) fazem parte deste conjunto de fatores, assim como as variáveis relativas às características físico-químicas da matéria-prima, o tipo de agente oxidante utilizado, a razão oxidante/matéria-prima e as condições operativas do processo (temperatura, pressão, caudais de alimentação, tempo de residência, composição do leito, características do catalisador, se utilizado).

2.4 - Opiniões

Apesar do aumento acentuado na utilização de tecnologias - como a gasificação - para conversão de biomassa em energia útil, este tema continua a ser matéria de algum ceticismo por outros. Pimentel (2008), defende que a energia proveniente da biomassa não é viável. Segundo este, em condições ditas ideais, é possível colher cerca de 3 t/ha por ano, o que resulta em cerca de 565 milhões kJ/ha, quando transformado em energia. Contudo a energia despendida, no processo de conversão da biomassa, ronda, aproximadamente, 33 l de diesel por ha, sem contabilizar com a energia gasta no processo de poda e colheita da mesma. Assim, o rácio de energia inserida comparativa à retornada, num sistema de biomassa é calculado em 1:22. Mas o mesmo autor ainda vai mais longe, afirmando que, uma cidade de 100.000 pessoas a usar a biomassa de uma floresta dita sustentável (3 t/ha por ano) para eletricidade exigiria, aproximadamente, cerca de 200.000 ha de área florestal, com base na demanda elétrica média de pouco mais de 1 bilhão de kWh (860 kcal= 1 kWh)

Na verdade, em linha com o que Pimentel (2008) defende, Patzek (2008) questiona a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, afirmando que é completamente impossível tal troca, devido à forma como o planeta Terra opera e mantém a vida. Segundo este, as refinarias de etanol celulósico – uma das várias maneiras de conversão da biomassa em combustível, e na qual, há uma elevada esperança e dinheiro investido – são consideradas ineficientes (cerca de 20 % de eficiência) quando comparadas com as existentes refinarias de petróleo (cerca de 90% de eficiência). Conforme referido na introdução da presente dissertação, um dos compostos da biomassa é a celulose, que é o principal componente estrutural das paredes celulares em plantas, e é a forma mais abundante de biomassa terrestre viva (Pimentel, 2008). O fabrico de etanol proveniente celulose (etanol celulósico) é exemplo de conversão de biomassa e segundo este autor a conversão de 5 t de madeira recolhida em 1.000 litros, requer uma absorção de 385 milhões kJ.

Patzek (2008) argumenta ainda que, mesmo que as refinarias de biomassas apresentassem uma eficiência impossivelmente alta, estas não conseguiriam manter o estilo de vida corrente na sociedade, a longo prazo. Tal impossibilidade deve-se ao facto de, segundo ele, a Terra não conseguirá fornecer a biomassa necessária para continuarmos a viver da forma que estamos a fazer.

Os autores (Pimentel e Patzek, 2007) acrescentam ainda que, apenas uma fração extremamente baixa de luz solar incidente num hectare de cultivo biomassa é que é realmente captada pela plantação (cerca de 0,1%). Este valor está em forte contraste com o apresentado por um painel fotovoltaico, de qualidade mediana, que apresenta um valor superior a 10% de captura, ou seja, 100 vezes superior ao da biomassa. Outro fator a ter em consideração, é o facto de os impactos ambientais da produção de combustíveis provenientes da biomassa serem extremamente elevados. Estes incluem desde a erosão do solo ao alto uso de fertilizantes à base de azoto. Há, também, uma significativa contribuição deste processo no aquecimento global, na medida em que, são utilizados 1.000 a 2.000 litros de água para produção de cada litro de etanol ou outro biocombustível líquido como por exemplo o biodiesel. Esta contribuição é derivada pelo tratamento e transporte da água (bombas, por exemplo).

Contudo, os mesmos autores (Pimentel e Patzek, 2007) defendem que, de facto, há uma forma viável para a utilização de tecnologias – como a gasificação – em sistemas de conversão da biomassa. Estes defendem, por exemplo, sistemas de síntese de metanol baseados em energia solar. Uma outra sugestão para utilização de sistemas de conversão de biomassa, fonte de carbono, em que de facto, há um retorno energético e financeiro viável, é o caso em instalações com eletricidade proveniente da energia solar, conjugadas com uma injeção de hidrogénio – este proveniente da eletrólise da água - num sistema de conversão de biomassa como a gasificação, incorporado com um sistema de síntese Fischer-Tropsch. (Pinho 2021) A síntese Fischer-Tropsch é definida como um processo que produz hidrocarbonetos de diferentes comprimentos, a partir de uma mistura de gás de H_2 e CO. Os hidrocarbonetos maiores podem ser transformados para formar combustível de excelente qualidade, que pode ser injetado num motor de combustão interna. Por outro lado, os hidrocarbonetos mais pequenos são usados num ciclo combinado com o resto do gás de síntese. Este sistema proposto, tratar-se-ia de, hipoteticamente, uma refinaria com dimensões semelhantes às refinarias solares

Existem, na verdade, estudos feitos em gasificação combinada com síntese Fischer Tropsch, que revelam que, a longo prazo, a produção de líquidos FT (Fischer-Tropsch) pode ser reduzida em cerca de, 9 US \$/L. O custo da obtenção e produção da biomassa é reduzido devido ao facto de eficiência energética global do sistema ser superior (Tijmensen *et al.*, 2002).

Capítulo 3

Instalação e métodos experimentais

Neste capítulo apresenta-se, a descrição da instalação, assim como o procedimento experimental para obtenção dos resultados para análise.

3.1 - Instalação experimental

A instalação experimental, localizada no INEGI, é constituída por uma série de componentes esquematizados na Figura 3.1 e mostrado na Figura 3.2.

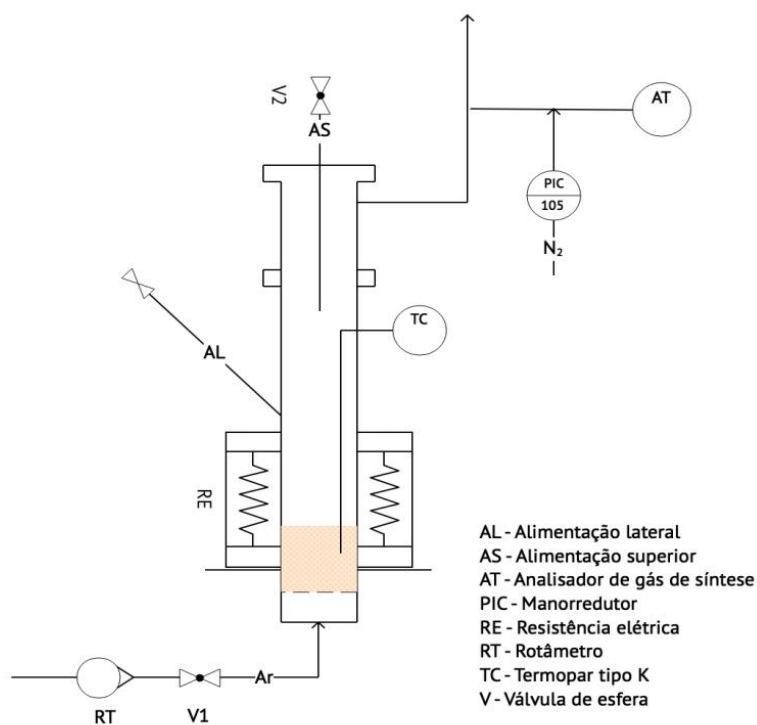


Figura 3.1 - Representação esquemática da instalação experimental (Almeida, 2020)



Figura 3.2 - Instalação experimental e analisadores.

O reator apresentado é um gasificador de leito fluidizado borbulhante. Está ligado a um computador por meio um sistema de análise de dados e ainda a um controlador de temperatura. O leito é constituído por de areia sílica. Esta configuração de leito borbulhante permite uniformizar a temperatura da zona de reação, garantindo, assim, uma melhor troca de calor entre as partículas de biomassa e as partículas inertes que constituem o leito.

3.1.1 – Reator de gasificação

O reator foi construído em aço inoxidável AISI 316 L, tem 52 mm de diâmetro interno e 420 mm de comprimento, e cerca de 300 mm de zona aquecida. O aquecimento do reator é realizado por uma resistência elétrica de 2 kW, isolada termicamente por uma manta de fibra cerâmica da marca Kaowool. A resistência térmica está montada num conjunto de tijolos refratários, devidamente customizados para segurar e distribuir o calor uniformemente pelo reator. No interior do deste, encontra-se um distribuidor entre duas flanges, que consiste numa placa de aço inoxidável (AISI 304) de 3 mm de espessura perfurada com uma matriz de 10×10 furos com 0,3 mm de diâmetro de orifício, Figura 3.3. A arquitetura deste tipo de gasificadores simples, torna possível o estudo de vários tipos de combustíveis sólidos com diferentes granulometrias e diferentes condições de funcionamento.

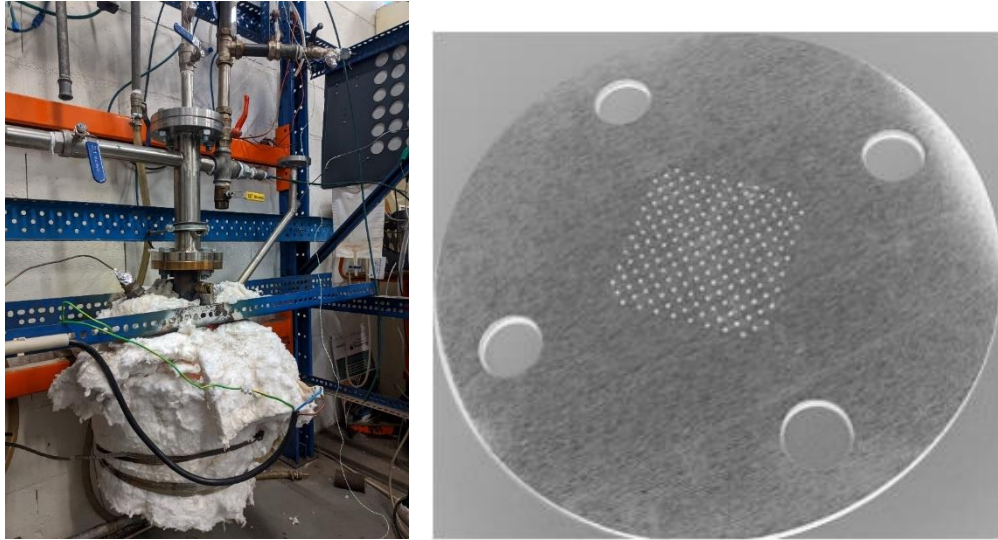


Figura 3.3 - Reator de gaseificação (esq.) e distribuidor (dir.).



Figura 3.4 – Tijolo refratário (a), manta de fibra cerâmica (b), resistência elétrica (c).

Na parte inicial do procedimento de testes, foi possível verificar a estrutura deste reator, assim como os elementos que o complementam, nomeadamente os tijolos refratários que suportam a resistência elétrica de aquecimento, representados na figura 3.4.

Na figura 3.5 encontra-se representado o reator de gasificação sem a manta térmica. Esta figura tem como objetivo demonstrar a disposição dos tijolos e da resistência elétrica, em torno do reator.



Figura 3.5 – Reator de gasificação sem manta térmica.

3.1.2 – Leito

A areia de sílica foi o material utilizado para o leito. Esta apresentava um diâmetro médio de partícula de 225 μm . Esta medição foi realizada com base nas dimensões de peneiros normalizados (DIN), como a apresentada na Figura 3.6. Os restantes valores apresentados na tabela (esfericidade ϕ , porosidade do leito nas condições mínimas de fluidização ϵ_{mf} , massa específica ρ_p) foram retirados de Moreira (2007), que os determinou experimentalmente.

Tabela 3.1 - Propriedades do leito

d_p (μm)	ϕ	ϵ_{mf}	ρ_p (kg/m^3)
225	0,77	0,53	3000



Figura 3.6 - Peneiro de resolução de 200 μm

3.1.3 – Medidor de caudal

O caudal mássico de ar, constante durante os ensaios, foi medido por um rotâmetro, ligado à rede de ar comprimido. Foi garantida também, uma pressão na linha de ar de 1 bar (relativo), pela válvula V1 indicada na Figura 3.7. O flutuador rotâmetro foi colocado na posição 6, correspondente a um caudal de ar de 0,126 kg/h, conforme se mostra na Figura 3.7. A curva de calibração deste rotâmetro encontra-se no Anexo A.



Figura 3.7 - Rotâmetro utilizado nas experiências laboratoriais.

O ar comprimido foi introduzido pela parte inferior do reator, com o intuito de fluidizar o leito de areia conforme o ponto de funcionamento escolhido.

3.1.4 – Alimentação da biomassa

Na parte superior do reator existe um tubo de aço inoxidável destinado à alimentação da biomassa que está ligado ao reator, e ainda duas válvulas, com o objetivo de prevenir entradas extras de ar, após a alimentação da biomassa. Quando a biomassa é colocada no tubo, uma das válvulas é aberta, enquanto a outra está fechada. Após a inserção do combustível, abre-se a segunda válvula, com a força da gravidade, e com a ajuda de uma vareta (para evitar entupimentos), a carga é enviada para o leito. Certificando-se que não sobraram restos de biomassa no tubo, volta-se a encerrar a segunda válvula.

3.1.5 – Controlador de Temperatura

A resistência do reator foi acionada por um controlador de temperatura proporcional integral e derivativo (PID), Figura 3.8, através de um relé do estado sólido. O controlo de temperatura foi efetuado através de um termopar do tipo K com bainha em aço inoxidável de diâmetro 1,5 mm e comprimento 0,5 m, colocado na proximidade da resistência elétrica no interior do leito, que fornecia a informação necessária ao controlador



Figura 3.8 - Controlador de Temperatura.

3.1.6 – Sistema de análise de dados

Por fim, para se recolher os valores recorreu-se a um analisador de gás síntese (AT) - calibrado de fábrica para gamas de concentração volumétrica dos compostos presentes no gás síntese tipicamente encontradas na biomassa, Figura 3.9. Apesar do fabricante denominar o aparelho como um analisador de gás de síntese, este analisa o gás produzido. A designação formal de gás de síntese só deve ser aplicada após o gás de produção sofrer um tratamento próprio, passando então a ser designado por gás de síntese. Por isso doravante, no presente texto, esta analisador será referenciado como analisador de gás de produção. Os produtos da gasificação saíam pela parte superior do reator, local onde era aspirada uma amostra de gás, para ser analisada pelo analisador. Este analisador utiliza uma bomba com um caudal de aspiração de 1,5 l/min, um condensador e, a montante, um sistema de tratamento tipicamente utilizado para aplicações com uma quantidade excessiva de poluentes no processo (madur Electronics, 2017b). Este analisador é constituído por quatro células de tratamento, duas com borbulhadores cheios de água, uma contém um filtro coalescente – tipicamente usado para remover aerossóis de água e óleo que contaminam o ar comprimido – e noutro aloca-se um filtro de carvão ativado – com a

função de remover compostos interferentes. As células com água têm a função de lavagem da corrente gasosa amostrada. Após o gás aspirado ser submetido a este sistema de filtragem, era analisado pelo analisador. Este sistema de filtragem encontra-se em detalhe no Anexo C.



Figura 3.9 – Analisador de gás de produção (a) e sistema de tratamento dos gases (b).

O analisador e o sensor de temperatura usado no controlo da temperatura do leito encontravam-se ligados ao sistema de análise de dados.

3.1.7 – Caracterização do equipamento de medida

Na Tabela 3.1 encontram-se agrupadas as características dos equipamentos de medida utilizados nos ensaios experimentais. Na coluna da esquerda, descreve-se o tipo de equipamento, e na coluna da direita, as propriedades do mesmo.

Tabela 3.2 - Caracterização do equipamento de medida.

Tipo/Grandeza	Descrição
Caudal de ar de fluidização	Rotâmetro da marca KDG modelo 1100
Controlo de Temperatura	Controlador PID da marca Eurotherm, Relé do Estado Sólido (30 A) e dissipador da marca Omron, termopar tipo K com bainha inox Ø1,5 mm × 500 mm.
Temperaturas	Leito: termopar tipo K com bainha inox Ø1,5 mm × 500 mm. Coluna: termopar tipo K com bainha inox Ø1 mm × 200 mm.
Sistema de Análise de dados	Analizador de gás de produção (AT) da marca <i>Madur</i> , modelo <i>Mamos MD3</i>
Sistema de Filtragem	Módulo <i>GF4 Scrubber</i> da marca <i>Madur</i>
Massa das cargas	Balança marca Sartorius, modelo MA30, resolução de 1mg.

3.2 - Procedimento experimental

Para se iniciar os ensaios de gasificação, foi necessário preparar a instalação, de maneira a garantir que as condições exigidas eram cumpridas e inalteradas. Nesta secção será descrito o processo de realização dos ensaios laboratoriais.

3.2.1 – Preparação da instalação

Começava-se por ligar a resistência elétrica do reator, seguido do controlador de temperatura, ajustando-se este para a temperatura pretendida (*setpoint*), para a realização do trabalho (levando a um tempo de espera médio de 2 horas para poder realizar qualquer teste). De seguida, verificava-se a pressão lida no manómetro instalado na linha de ar comprimido, de maneira a corresponder à pressão usada para calibração do rotâmetro (1 bar relativos). Ajustava-se o rotâmetro, o caudal de ar desejado e, quando a temperatura atingia o valor pretendido, ligava-se o analisador de composição da corrente gasosa, de acordo com o procedimento experimental definido pelo manual do mesmo.

Os programas informáticos utilizados para estudo das componentes gasosas e temperaturas do gasificador, foram, respetivamente, o *Madur – MoSys* e o *Advantech – AdamApax*. A interface destes softwares encontra-se no Anexo B.

Por fim, pesava-se, numa balança de precisão, 1 kg de massa da matéria em estudo, concluindo assim o preparo do ensaio. Quando a temperatura do leito atingia a temperatura pré-estabelecida, dava-se início ao ensaio experimental.

3.2.2 – Ensaio experimental

O ensaio experimental, começava com a inserção da massa na parte superior do tubo, conforme descrito em 3.1.4, levando à gasificação da mesma. A reação levava à libertação de gases, cuja amostra foi aspirada e diluída numa corrente de azoto (gás de arrasto), e enviada para o analisador de gases. Toda a informação recolhida pelos softwares foi posteriormente analisada e descrita no capítulo seguinte.

3.3 - Caracterização das biomassas

Foram realizadas análises de composição química das quatro espécies de biomassa, através do envio das mesmas para o Centro para a Valorização de Resíduos – CVR. É possível observar, nas seguintes tabelas, as frações mássicas dos componentes, assim como os valores de poder calorífico inferior (*PCI*) e poder calorífico superior (*PCS*), todos apresentados em base seca. Todos os valores apresentados doravante de *PCI* e *PCS*, são determinados em condições PTN. As figuras 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, representam respetivamente 1,0 g de amostra de poda de videira, kiwi, tojo e giesta.

Tabela 3.3 – Resultados da análise da poda de videira.

Parâmetros	Métodos Analíticos	Resultados
Teor de humidade °C (%)	CEN – 14774-1	10,3
Matéria volátil a 900 °C B.S.	CEN - 15148	69,5
Cinzas a 550 °C (%) B.S.	CEN - 14775	3,2
Carbono Fixo (%) B.S.	Cálculo	17,0
Hidrogénio (%) B.S.	Absorção infravermelha	6,2
Azoto (%) B.S.	Condutividade térmica	0,6
Oxigénio (%) B.S.	Cálculo	46,1
Carbono total (%) B.S..	Absorção infravermelha	47,0
<i>PCS</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	19,03
<i>PCI</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	17,03

B.S. – Base seca



Figura 3.10 – 1,0 g de amostra de poda de videira

Tabela 3.4 -- Resultados da análise da poda de kiwi.

Parâmetros	Métodos Analíticos	Resultados
Teor de humidade °C (%)	CEN - 14774-1	9,9
Matéria volátil a 900 °C B.S.	CEN - 15148	66,7
Cinzas a 550 °C (%) B.S.	CEN - 14775	3,5
Carbono Fixo (%) B.S.	Cálculo	19,9
Hidrogénio (%) B.S.	Absorção infravermelha	6,6
Azoto (%) B.S.	Condutividade térmica	1,2
Oxigénio (%) B.S.	Cálculo	45,8
Carbono total (%) B.S..	Absorção infravermelha	46,1
<i>PCS</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	19,07
<i>PCI</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	17,75

B.S. – Base seca



Figura 3.11 - 1,0 g de amostra de poda de kiwi

Tabela 3.5 - Resultados da análise da poda de tojo.

Parâmetros	Métodos Analíticos	Resultados
Teor de humidade °C (%)	CEN – 14774-1	12,3
Matéria volátil a 900 °C B.S.	CEN - 15148	78,9
Cinzas a 550 °C (%) B.S.	CEN - 14775	2,6
Carbono Fixo (%) B.S.	Cálculo	18,5
Hidrogénio (%) B.S.	Absorção infravermelha	6,3
Azoto (%) B.S.	Condutividade térmica	1,2
Oxigénio (%) B.S.	Cálculo	40,4
Carbono total (%) B.S..	Absorção infravermelha	52,0
<i>PCS</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	19,18
<i>PCI</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	17,81

B.S. – Base seca



Figura 3.12 - 1,0 g de amostra de poda de tojo

Tabela 3.6 - Resultados da análise da poda de giesta.

Parâmetros	Métodos Analíticos	Resultados
Teor de humidade °C (%)	CEN – 14774-1	10,4
Matéria volátil a 900 °C B.S.	CEN - 15148	79,3
Cinzas a 550 °C (%) B.S.	CEN - 14775	2,4
Carbono Fixo (%) B.S.	Cálculo	18,3
Hidrogénio (%) B.S.	Absorção infravermelha	7,36
Azoto (%) B.S.	Condutividade térmica	1,25
Oxigénio (%) B.S.	Cálculo	44,22
Carbono total (%) B.S..	Absorção infravermelha	47,0
<i>PCS</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	17,66
<i>PCI</i> (MJ/kg) B.S.	Cálculo	16,07

B.S. – Base seca



Figura 3.13 - 1,0 g de amostra de poda de giesta

Capítulo 4

Resultados e discussão

Este capítulo incide sobre os resultados experimentais dos ensaios realizados. Na verdade, conforme referido anteriormente, serão discutidas as características das diferentes espécies de biomassa quando sujeitas a diferentes temperaturas do leito.

O tratamento de dados, obtidos experimentalmente, tiveram como base um ficheiro *Excel* criado e otimizado para o projeto “Biomassa-AP” (Morgado e Silva, 2020). Neste programa foram considerados diversos fatores, contudo o foco deste capítulo prender-se-á na análise da eficiência na conversão de carbono durante a gasificação, assim como, o rendimento de gás seco e a energia do gás produzido.

Contudo antes de se analisarem os resultados da gasificação apresentam-se os procedimentos de cálculo da velocidade mínima de fluidização por forma a seguidamente se escolher a velocidade de fluidização à qual foram realizados os testes laboratoriais.

4.1 - Velocidade mínima de fluidização

Nesta secção é analisada a determinação da velocidade mínima de fluidização para a gama das temperaturas utilizada. Expõe-se, o método de cálculo analítico para obtenção dos valores e depois comparam-se os valores obtidos por cálculo com valores determinados por experimentação no mesmo laboratório.

4.1.1 –Procedimento de cálculo

Para as diferentes temperaturas utilizadas nos ensaios, foi efetuado o cálculo da velocidade mínima de fluidização. Para tal foi necessário calcular o valor da viscosidade dinâmica do ar de

fluidização. Usou-se a expressão de Sutherland com três coeficientes (expressão 4.1) para casos de modelação de problemas que envolvem fenómenos de transferência (Munson, 2012).

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (4.1)$$

μ corresponde ao valor de viscosidade dinâmica [kg/(m.s)], T é a temperatura do leito [K], μ_0 representa a constante de viscosidade [kg/(m s)], T_0 corresponde à temperatura de referência [K], e S é a constante de Sutherland [K]. Em condições PTN, os valores das constantes são os seguintes:

Tabela 4.1 – Valores das constantes em condições PTN

μ_0 (kg/m-s)	T_0 (K)	S (K)
$1,716 \cdot 10^{-5}$	273,11	110,56

A velocidade mínima de fluidização U_{mf} para as diferentes temperaturas foi obtida através da expressão de Kunii e Levenspiel (1991),

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g \varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (4.2)$$

Esta expressão tem como condição, o número de Reynolds da partícula nas condições mínimas de fluidização ser inferior a 20. Para determinar o valor de ρ - massa específica do ar - recorreu-se à equação dos gases perfeitos,

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4.3)$$

Nesta equação tomou-se $P=101325$ Pa (pressão atmosférica), $R = 287,11$ J/(kg K) (constante particular do ar) e T é a temperatura absoluta do leito.

Por fim, calculou-se também a velocidade terminal das partículas constituintes do leito para as diferentes temperaturas dos ensaios. Os valores obtidos são resultado da aproximação para o cálculo direto da velocidade terminal, também apresentada por Kunii e Levenspiel (1991), baseada no diâmetro da partícula adimensionalizado d_p^* , equação (4.4) e na velocidade do gás de fluidização adimensionalizada U^* , equação (4.5):

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho(\rho_p - \rho)g}{\mu^2} \right] = Ar^{1/3} \quad (4.4)$$

$$U^* = U \left[\frac{\rho^2}{\mu(\rho_p - \rho)g} \right]^{1/3} = \frac{Re_p}{Ar^{1/3}} \quad (4.5)$$

Resultando na velocidade terminal adimensionalizada,

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2,335 - 1,744\phi}{(d_p^*)^{\frac{1}{2}}} \right]^{-1}, 0,5 < \phi < 1. \quad (4.6)$$

A velocidade terminal U_t obtém-se através da equação 4.7,

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\rho^2}{\mu(\rho_p - \rho)g} \right]^{1/3}. \quad (4.7)$$

Segundo os autores acima referidos, para partículas pequenas, o leito borbulhante inicia-se para valores de U^* acima de U_{mf} , ultrapassando os valores U_p .

Na tabela 4.2 são apresentados os valores de velocidade mínima de fluidização, para as condições de operação utilizadas nos ensaios laboratoriais, uma atmosfera e as temperaturas de 750, 800, 850 e 900 °C. Nesta tabela, também se encontram os valores calculados das velocidades terminais das partículas da areia, assim como a viscosidade do ar de fluidização. Indica-se também a velocidade real e a razão desta com a velocidade mínima de fluidização. Conclui-se assim que, durante toda a experiência laboratorial, trabalhou-se sempre em regime borbulhante.

Estes resultados analíticos foram ainda comparados com os resultados do trabalho laboratorial levado a cabo em 2019 (Mateus, 2019), no qual foram realizados testes laboratoriais para se obter a velocidade de fluidização, com as mesmas condições de operação e areia. Observa-se que o desvio máximo é de ordem dos 10 %, pelo que se consideraram aceitáveis os cálculos demonstrados nesta secção. Há, contudo, uma certa subjetividade na escolha da esfericidade, razão pela qual em Mateus (2019) foram utilizados valores da esfericidade da areia iguais, mas diâmetros um pouco maiores (283 μm), mas os resultados obtidos diferem minimamente.

Tabela 4.2 – Valores de viscosidade do ar de fluidização, velocidade mínima de fluidização, velocidade terminal a diferentes temperaturas e velocidade real

Temperatura (°C)	μ [kg/(m.s)]	U_{mf} [m/s]	U_t [m/s]	u [m/s]	u/U_{mf}
750	$4,22 \cdot 10^{-5}$	0,0151	0,56	0,044	2,90
800	$4,38 \cdot 10^{-5}$	0,0145	0,54	0,046	3,19
850	$4,53 \cdot 10^{-5}$	0,0140	0,53	0,049	3,50
900	$4,65 \cdot 10^{-5}$	0,0137	0,52	0,051	3,75

4.2 - Parâmetros de gasificação

4.2.1 – Cálculo do número total de moles do gás

Iniciou-se o processo de cálculo dos parâmetros com o cálculo do número de total de moles de gás, através do balanço ao N₂.

De salientar que se considerou o ar atmosférico apenas constituído por azoto e oxigénio, sendo que os restantes gases presentes (cerca de 1 %) são ignorados. A seguinte equação permite determinar o número de moles de N₂, presentes no ar injetado:

$$\begin{aligned}
 n_{N_2,in} &= \frac{m_{ar} \cdot \left(1 - \frac{\left(1 - \frac{N_{2[\%]}}{100} \right) \cdot M_{O_2}}{M_{ar}} \right)}{M_{N_2}} \\
 &= \frac{(0,126 \cdot 1000/3600) \cdot \left(1 - \frac{\left(1 - \frac{79}{100} \right) \cdot 2 \cdot 15,999}{28,958} \right)}{28,15} \\
 &= 9,57 \times 10^{-4} \text{ mol}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Onde M representa a massa molar, m_{ar} a massa de ar inserida no leito (g) e $N_{2[\%]}$ as concentrações de azoto (%) lidas pelo analisador, no instante $t = 0$. Com o valor do número de moles de N₂, torna-se trivial determinar o valor do número de moles total do gás (mol):

$$n_{gas}(t) = \frac{n_{N_2,in}}{(N_{2,lido[\%]}(t)/100)} \tag{4.9}$$

Também é de notar que todas as leituras do analisador de síntese foram feitas segundo a segundo, logo a equação (4.9) foi aplicada a todos os segundos analisados.

4.2.2 – Cálculo do número de moles, volume de cada composto, num ensaio

Os seguintes passos foram tomados de forma a calcular o número de moles, massa e volume do composto de CO₂. Todas estas etapas foram repetidas para os compostos CO, CH₄, H₂ e O₂.

Todos os parâmetros que se pretende calcular foram obtidos com base na integração dos valores lidos pelo analisador.

Doravante, os seguintes cálculos tiveram como base o cálculo da área pela integral. Para se obter o número de moles de CO₂ (mol):

$$n_{CO_2}(t) = \frac{n_{gas}(t) \cdot \int_{t-1}^t \%CO_2}{100} \quad (4.10)$$

No qual t é o tempo em segundos (s). Esta fórmula foi aplicada, tal como todas as seguintes, também segundo a segundo, ao longo de todo o ensaio de gasificação. O cálculo das moles totais do componente é a soma de todas as áreas.

Para se obter o volume do componente no gás produzido (dm^3), em condições PTN, seguiu-se a seguinte fórmula (Moreira, 2007):

$$V_{CO_2}(t) = n_{CO_2}(t) \cdot 22,4. \quad (4.11)$$

Para cálculo do volume total do componente soma-se todas as áreas. O volume total do gás (dm^3) é a soma dos volumes de todos os componentes que o constituem, conforme descreve a equação 4.12

$$V_{gas} = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{CH_4} + V_{H_2} + V_{O_2} + V_{N_2} \quad (4.12)$$

Também se fez uma análise da constituição molecular de cada elemento, calculando (no caso de CO_2) a quantidade de C, e O. Para os restantes componentes seguiu-se a mesma abordagem. A equação 4.13 demonstra a forma utilizada para obtenção da quantidade de carbono (em g) nas moléculas de CO_2 do gás de produção.

$$m_C(t) = n_{CO_2}(t) \cdot M_C \quad (4.13)$$

4.2.3 – Cálculo da eficiência de conversão de carbono (%)

O cálculo da eficiência de conversão de carbono (%), obteve-se através dos seguintes passos (Moreira, 2007; Timmer, 2008):

$$\%conv(C) = \frac{m_P(C)}{m_R(C)}, \quad (4.14)$$

Nesta equação $m_P(C)$ e $m_R(C)$ representam, respetivamente, a massa de carbono nos produtos e a massa de carbono nos reagentes (em g). A massa de carbono nos produtos é a soma das massas de carbono nos diferentes compostos do gás, obtido pela equação (4.13). A massa de carbono nos reagentes obtém-se através da expressão (Moreira, 2007):

$$m_R(C) = \frac{\%C(b.s)}{100} \cdot m_{amostra,seca} \quad (4.15)$$

A $m_{amostra,seca}$ (g) foi obtida retirando o teor de humidade da amostra inicial e representa a quantidade de massa seca da amostra.

4.2.4 – Cálculo do rendimento do gás seco (m^3/kg)

O cálculo do rendimento do gás seco (m^3/kg) foi obtido pela seguinte expressão (Moreira, 2007; Timmer, 2008):

$$Y = \frac{V_{gas}}{m_{amostra,seca}} \quad (4.16)$$

4.2.5 – Cálculo da energia do gás (kJ)

Este parâmetro designado de cálculo de energia do gás (kJ) foi obtido através do somatório das energias provenientes do *PCI* e *PCS* de todos componentes do gás de produção. Esta energia de *PCI* ou *PCS*, por sua vez, é calculada através da massa de cada componente(kg), multiplicado pelo *PCI/PCS* do mesmo (kJ/kg). A tabela 4.3 representa os valores de *PCI* e *PCS* dos componentes gasosos.

Tabela 4.3 - Valores de poder calorífico superior e inferior dos gases constituintes do gás de produção ((Francis e Peters, 1980)

Parâmetro	Valor
<i>PCS</i> CO [kJ/kg]	10082,16
<i>PCI</i> CO [kJ/kg]	10082,16
<i>PCS</i> CH ₄ [kJ/kg]	55380,82
<i>PCI</i> CH ₄ [kJ/kg]	49909,20
<i>PCS</i> H ₂ [kJ/kg]	141702,00
<i>PCI</i> H ₂ [kJ/kg]	119723,56

4.2.6 – Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior do gás de produção (MJ/m^3) (em condições PTN)

Para cálculo do *PCS* e *PCI* do gás de produção procedeu-se às seguintes equações:

$$PCI_{gas} = \frac{Energia_{gas} (PCI)}{V_{gas}}, \quad (4.17)$$

Por $Energia_{gás}(PCI)$ (kJ) entende-se como a energia do gás, calculada com o PCI dos componentes.

$$PCS_{gas} = \frac{Energia_{gas}(PCS)}{V_{gas}}, \quad (4.18)$$

De forma análoga, $Energia_{gás}(PCS)$ entende-se como a energia do gás calculada com o PCS dos componentes.

4.2.7 – Eficiência do gás frio (%)

Por fim, para cálculo da eficiência do gás frio ($\eta_{gás}$), utilizou-se a seguinte equação:

$$\eta_{gas} = \frac{Energia_{gas}}{Energia_{biomassa}} \cdot 100 = \frac{Energia_{gas}}{m_{amostra,seca} \cdot PCI_{biomassa}} \cdot 100, \quad (4.19)$$

Onde $Energia_{biomassa}$ (kJ), conforme se descreve, prende-se na multiplicação da massa da amostra seca (g) e o $PCI_{biomassa}$, em base seca (MJ/kg), determinado pelo laboratório CVR. Embora em muita literatura corrente a eficiência do gás frio é calculada com o PCS , neste caso corrente, e seguindo o trabalho de Almeida (2020), adotou-se o cálculo da mesma com o PCI .

4.3 - Ensaios de gasificação

O sistema de leitura e registo das medições de temperatura e da composição dos gases provenientes da gasificação, guarda a informação respeitante a cada ensaio, em função do tempo. Os resultados são posteriormente colocados num ficheiro *Excel* produzindo, de forma automática, e neste ficheiro criam-se vários gráficos de interesse para esta dissertação:

- Concentrações dos componentes no gás produzido ao longo do tempo;
- Evolução da temperatura no reator ao longo do tempo.

Neste ficheiro, também se calculam os seguintes valores para cada ensaio, definidos na secção anterior.

- Eficiência da conversão de carbono;
- Rendimento do gás seco;
- Energia do gás produzido.

4.3.1 – Parâmetros de ensaio

Na tabela 4.4, sintetizou-se toda a informação relativa aos ensaios realizados

Tabela 4.4 – Parâmetros de ensaio

Tipos de biomassa	Vide, Tojo, Kiwi, Giesta
Número de ensaios por biomassa, por temperatura	2
Massa das cargas (g)	1,0
Tamanho médio das partículas do leito (μm)	220
Temperatura do leito ($^{\circ}\text{C}$)	750, 800, 850, 900
Caudal de entrada de ar (kg/h)	0,126

4.3.2 – Análise da composição do gás produzido

É necessário um estudo prévio do comportamento dos compostos gasosos do gás de produção, ao longo do tempo. Esta análise ajuda à compreensão do desempenho do reator ao longo do processo de gasificação. Para tal, apresenta-se na figura 4.1 um exemplo do diagrama obtido, resultante de um ensaio de gasificação. Os detetores instalados no analisador de gás síntese captam os seguintes gases:

- O_2 ;
- CO_2 ;
- CO ;
- CH_4 ;
- H_2 ;
- N_2 .

As condições a que o teste foi realizado foram as seguintes:

Tabela 4.5 – Exemplo das condições operacionais de um ensaio

Parâmetro	Condição
Biomassa	Vide
Temperatura do leito ($^{\circ}\text{C}$)	850
Caudal de ar (kg/h)	0,126
Massa da amostra (g)	1,000

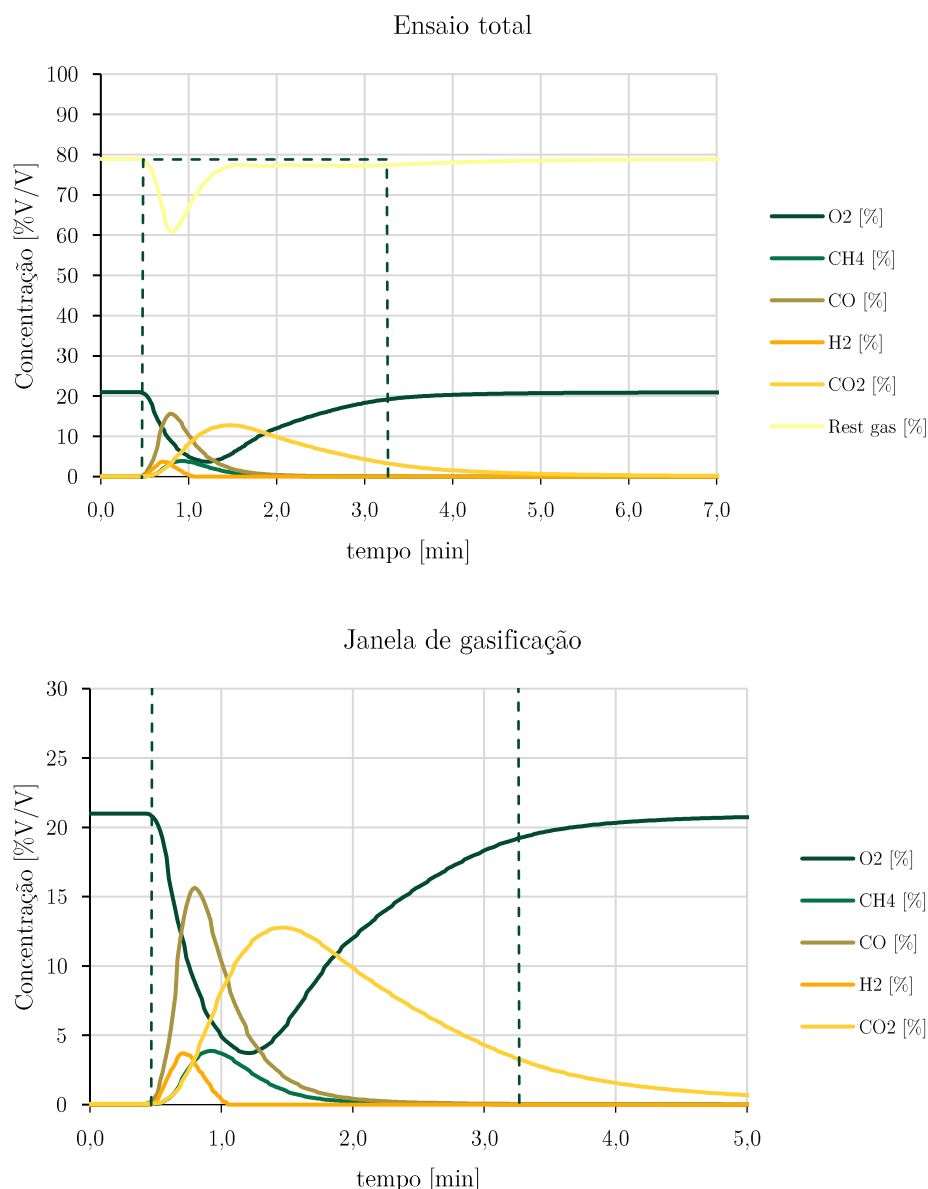


Figura 4.1 – Composição dos gases presentes no gás de produção, derivado da videira, a 850 °C.

Em todos os ensaios, definiu-se uma janela de gasificação, em função do andamento das curvas de composição dos gases produzidos no ensaio, no qual se considera que ocorre a gasificação. Esta janela de gasificação começa, mais precisamente, quando há um decréscimo na captação dos níveis ditos normais de azoto (79 % v/v), acabando no momento em atinge 98% do valor inicial. Com esta banda de evolução dos valores da concentração do azoto é possível definir, no universo dos ensaios efetuados, com alguma certeza uma janela de gasificação. Poderá haver, porventura, alguma subjetividade na escolha da gama de valores de azoto acima referida, mas o facto dos ensaios se realizarem num intervalo de tempo muito curto a tal obriga. De salientar que, retirou-se a curva do azoto (N₂) - também designada por *Rest gas*, pelo programa de análise – para melhor visualização dos restantes compostos, que são mais relevantes para a experiência.

Numa análise das figuras anteriores, é notável verificar que os picos de concentração dos compostos CH_4 , CO , H_2 e CO_2 ocorrem cerca 15 a 30 segundos após serem detetados pelo analisador. Com o decorrer do tempo as concentrações decrescem para os valores inicialmente detetados. Todos os ensaios laboratoriais apresentaram gráficos semelhantes, podendo alguns demorarem mais ou menos tempo que o retratado na Figura 4.1 acima, mas de maneira consistente.

Recorreu-se ainda a uma análise prévia de resultados de ensaios de gasificação realizados em 2019 para o projeto “biomassa-AP” (Morgado, 2020) cujo ensaio (para as mesmas condições operacionais) encontram-se representadas na figura 4.2.

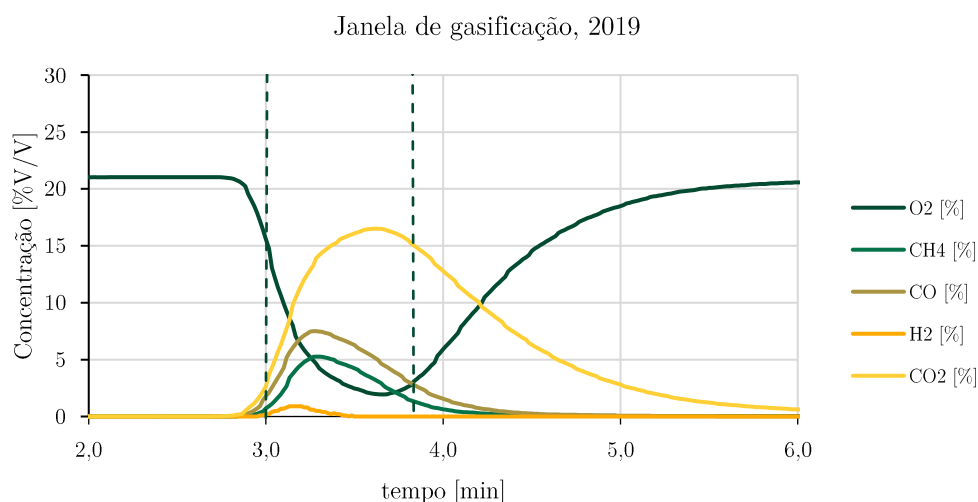


Figura 4.2 – Composição dos gases do gás produzido (Morgado, 2020)

Esta análise prévia foi fundamental para se compreender e justificar diferenças observadas nos dados obtidos, em comparação com estudos anteriores, no mesmo gasificador, quando submetido às mesmas condições de operação. Na figura 4.2 constam os dados de um ensaio realizado em 2019 nas mesmas condições do ensaio reportado na figura 4.1 e desde logo se notam várias diferenças. Destaca-se, primeiramente, um achatar da curva de metano (CH_4), justificado pelo facto de, após várias experimentações com o analisador, se ter verificado numa primeira fase que este aparelho vinha com uma calibração de fábrica indevida para aquele composto, visto que apresentava níveis de metano díspares, na análise do ar atmosférico. Para tal, recorreu-se a um ajuste da curva do metano, obtida através de um procedimento experimental no qual se injetou gás natural, com uma percentagem conhecida de metano, e comparou-se com o obtido pelo analisador. A curva de calibração apresenta-se no Anexo A. Também é notório um desfasamento das curvas, principalmente de CO_2 , relativamente às curvas obtidas em 2019. Após vários testes com os elementos que constituem o sistema de filtragem, descodificou-se o problema, concluindo-se que o tipo de carbono ativado utilizado influenciou estes valores. Na verdade, em 2019, foram utilizados carvões ativados fornecidos pelo fabricante do analisador, cuja granulometria difere daquela utilizada nos ensaios laboratoriais agora realizados. Por falta de material de fábrica, optou-se por recorrer a um carvão de menor granulometria o que levou a um atraso na leitura dos

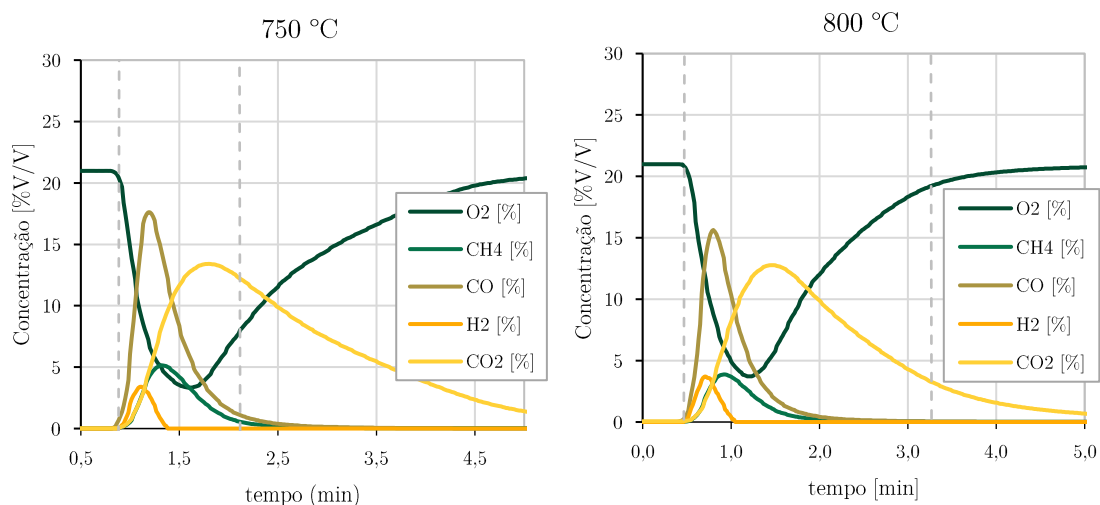
hidrocarbonetos do analisador de gás, justificando-se assim o atraso nas curvas apresentadas. Relativamente à curva de CO, diversas possibilidades podem justificar a diferença, contudo a que razão que pareceu mais conveniente para este caso é que, o ensaio demonstrado realizou-se numa altura em que se suspeitava que o carvão ativado se encontrava saturado, comprometendo, assim, as leituras dos componentes (Pinho, 2021).

4.4 - Influência da temperatura na composição do gás de produção

Nesta secção são analisados os resultados da gasificação das biomassas escolhidas, nomeadamente, a influência da temperatura na composição do gás de produção resultante da gasificação. Como foi descrito inicialmente quatro tipos de biomassa foram sujeitos a um processo de gasificação a quatro temperaturas diferentes, sendo constante em todos os ensaios os valores de massa inserida no gasificador (1 g) e o caudal de ar (0,126 kg/h).

Nas figuras que se seguem, constam a evolução da composição volumétrica do gás de produção, categorizando-se por biomassa, os resultados obtidos.

- Poda de videira



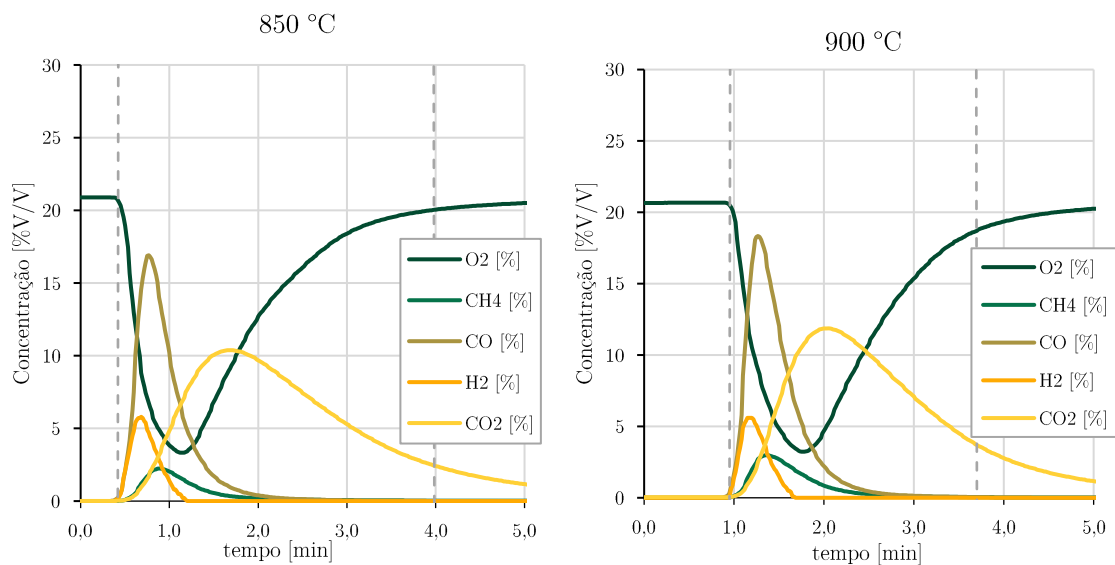


Figura 4.3 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de videira

Como se referiu anteriormente, foram realizados dois ensaios por biomassa, por temperatura, resultando num total de 38 ensaios. Para melhor compreensão e análise dos resultados procedeu-se a uma correção dos valores obtidos, no qual, designou-se os valores lidos, inicialmente, pelo analisador de gases – sem a reação de gasificação a decorrer – como offset, desta forma não serão contabilizados no cálculo das composições médias dos compostos gasosos. Para efetuar este cálculo recorreu-se ao cálculo da região abaixo da curva (integral da curva). O gráfico abaixo represento o resultado desta metodologia. Este processo foi repetido para os restantes ensaios das diferentes biomassas.

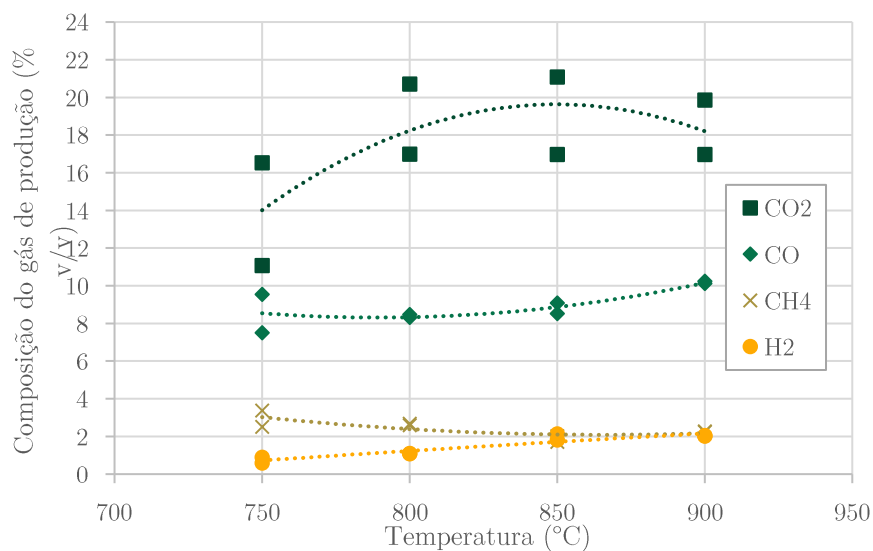


Figura 4.4 – Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de videira

Analisando a figura 4.4, é possível observar um valor quase constante, em termos médios da concentração de CH_4 e um ligeiro aumento nas concentrações de H_2 de 1%(v/v) para 2%(v/v). Contudo, dentro das gamas de temperatura testadas, verificou-se um aumento de CO – de 8 %(v/v) para 10 %(v/v) – e de um decréscimo nos valores médios de CO_2 – cerca de 2 % (v/v).

De reportar, contudo, que dos valores recolhidos – quando comparados com ensaios de gasificação de biomassa, em leito fluidizado, em instalações com características semelhantes (Rodrigues, 2016; Almeida, 2020) – apenas o valor de CO_2 apresenta valores díspares ao longo dos vários ensaios. Justifica-se tal discrepância pelo facto de, como constado anteriormente, ocorrer um atraso na leitura correta do dióxido de carbono pelo que, a curva derivada da leitura, sofre um atraso e um alargamento, o que resulta em valores de composição média do composto de CO_2 mais elevados que o expetável.

- Poda de tojo

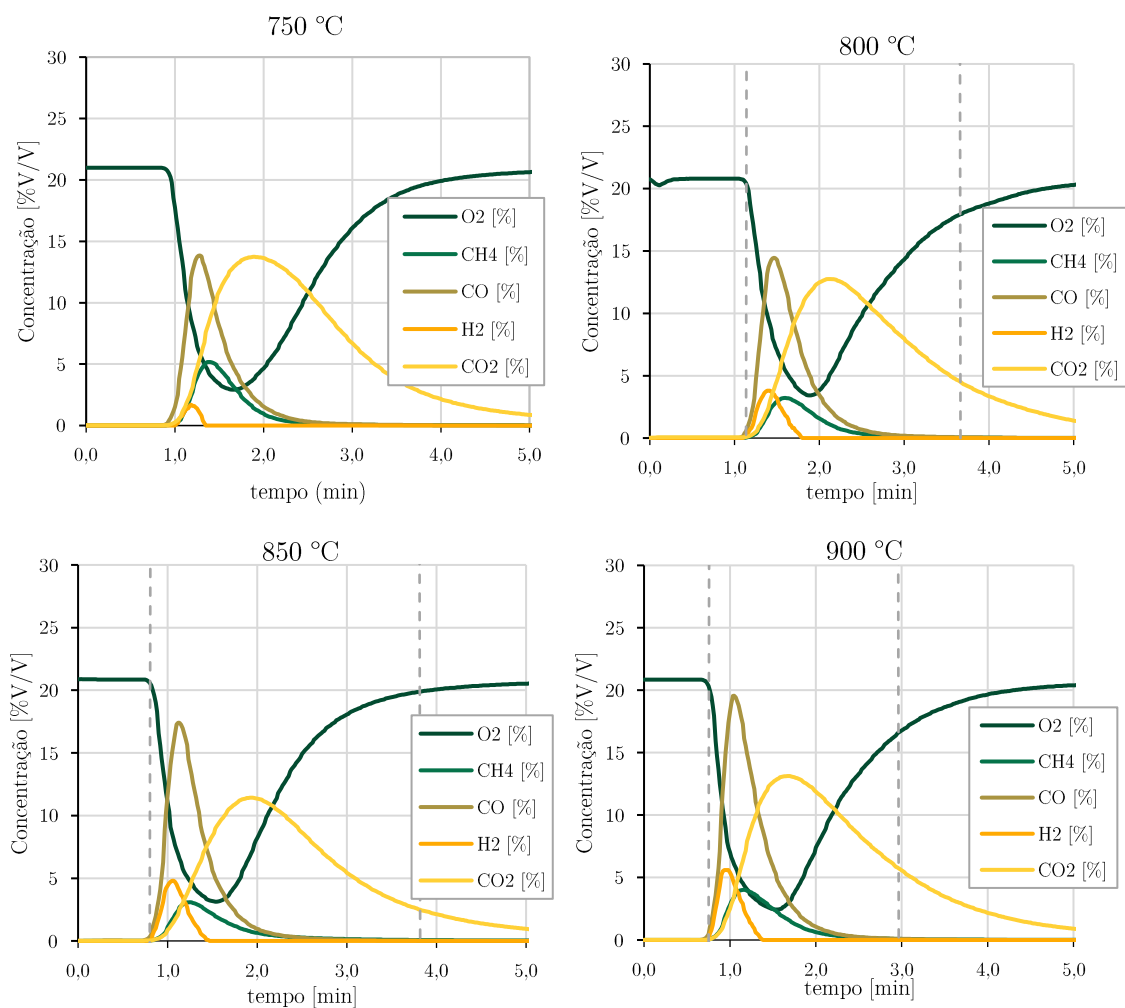


Figura 4.5 – Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de tojo

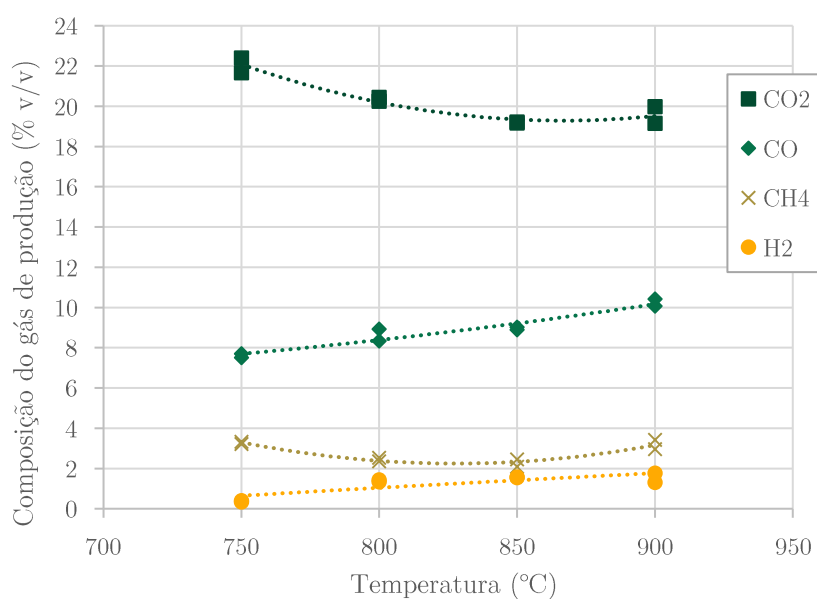


Figura 4.6 - Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de tojo

O comportamento da poda de tojo é diferente do observado no ensaio de gasificação da poda de videira, na medida em que, as concentrações médias dos componentes do gás de produção, de forma geral, apresentam um valor máximo ou mínimo das curvas à temperatura de 850 °C, exceto a curva de CO, a qual aumenta com o aumento da temperatura de forma quase proporcional.

- Poda de kiwi

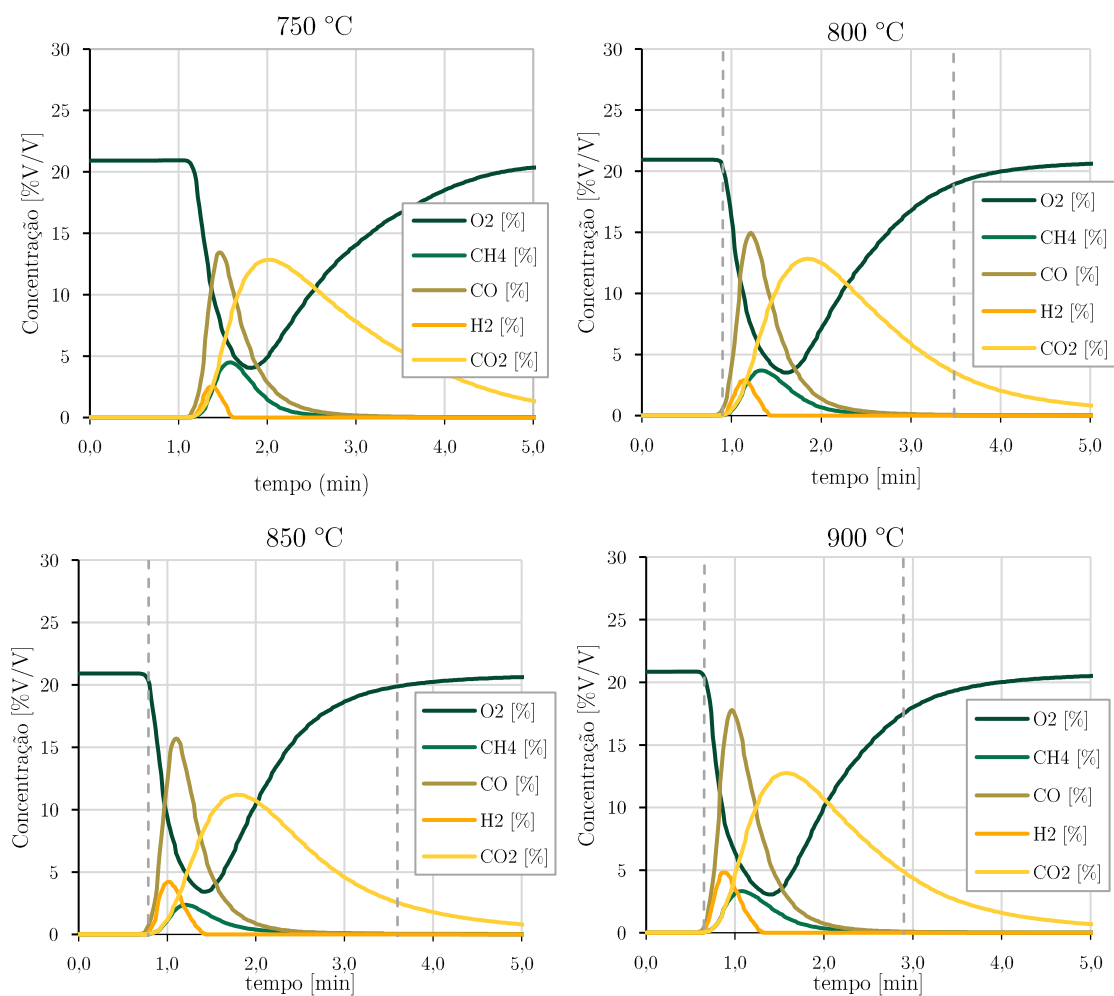


Figura 4.7 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de kiwi

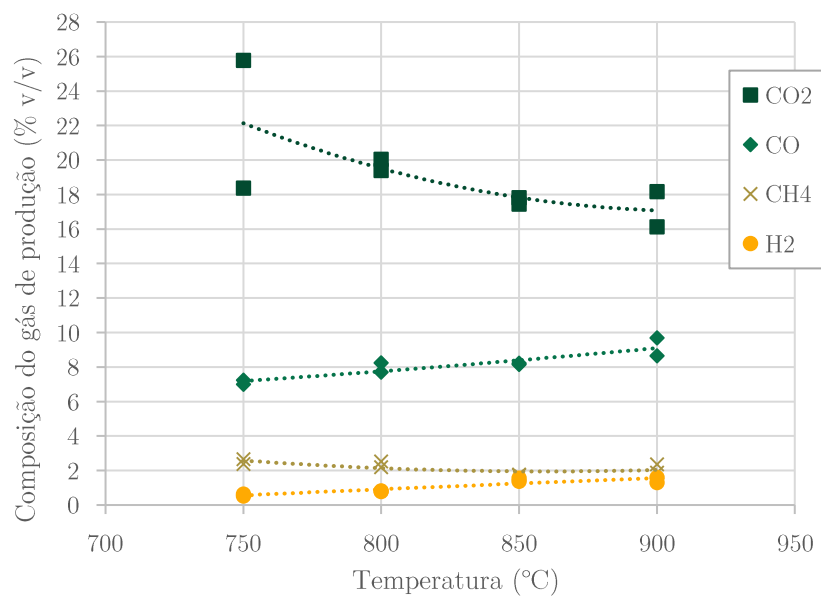
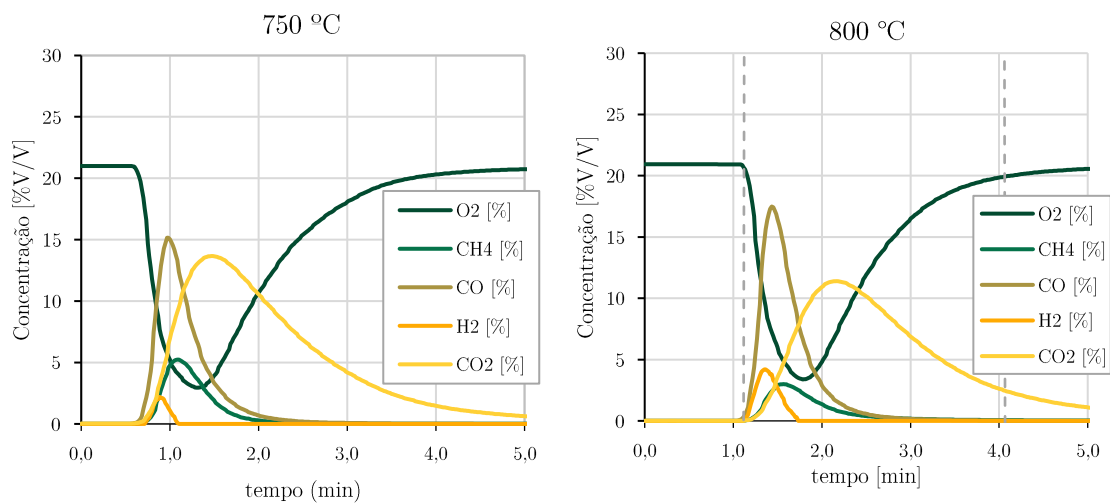


Figura 4.8 – Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de kiwi

Relativamente à poda de kiwi, o comportamento demonstrado no ensaio assemelha-se muito ao observado na poda de vide. Na figura 4.8, observa-se os mesmos picos nas curvas paramétricas, na formação do gás de produção.

- Poda de giesta



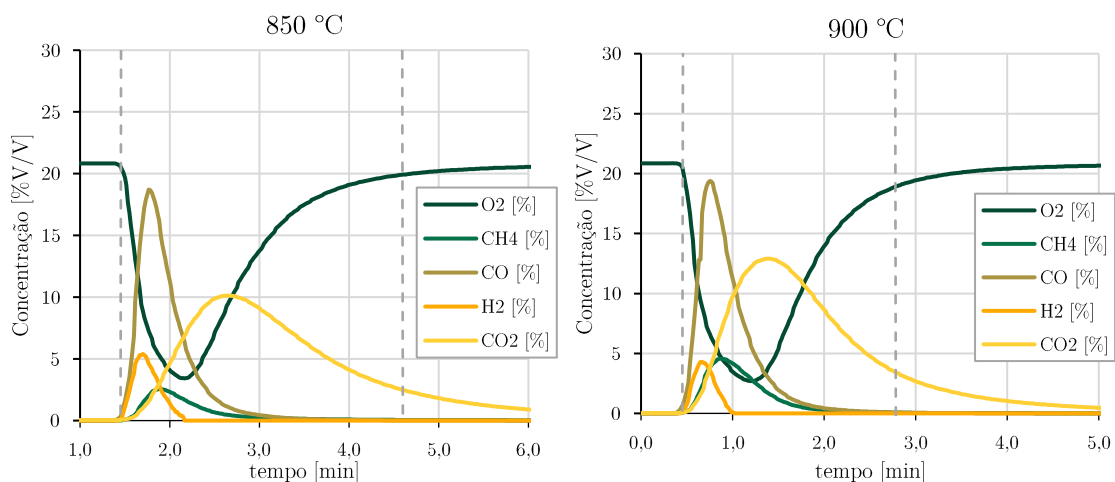


Figura 4.9 - Evolução das concentrações dos componentes gasosos obtidos nos ensaios de giesta

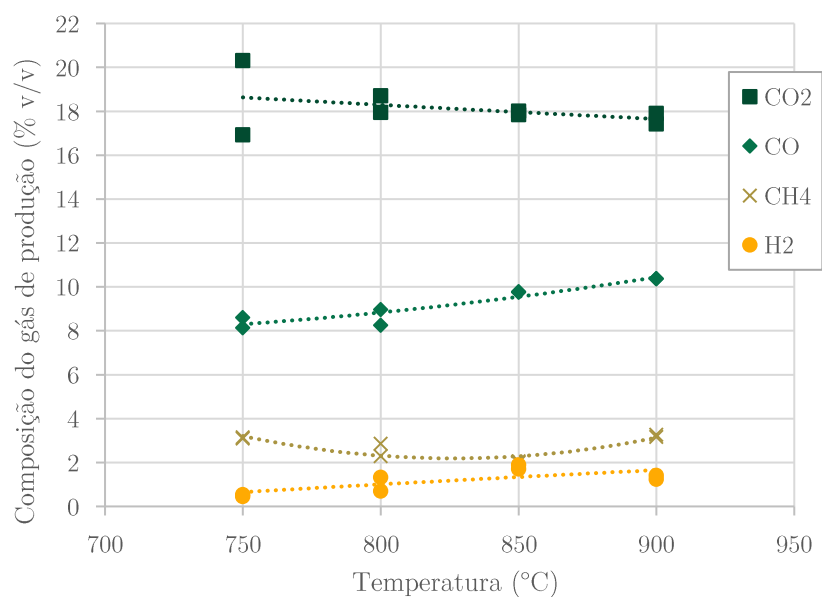


Figura 4.10 - Efeito da temperatura na composição volumétrica do gás de produção, derivado da poda de giesta

O comportamento da poda de giesta é diferente do observado pelas outras biomassas, na medida em que, os valores de CO₂ parecem manter-se constantes com as diferentes temperaturas, o CH₄ aumenta ligeiramente (cerca de 2% v/v) e o H₂ mantém-se constante até cerca dos 850 °C e decresce ligeiramente (1 % v/v) posteriormente.

Nos diferentes ensaios de gasificação, é possível justificar a evolução das curvas, em função da temperatura, baseando-se nas reações químicas anteriormente referidas. Destas reações - que

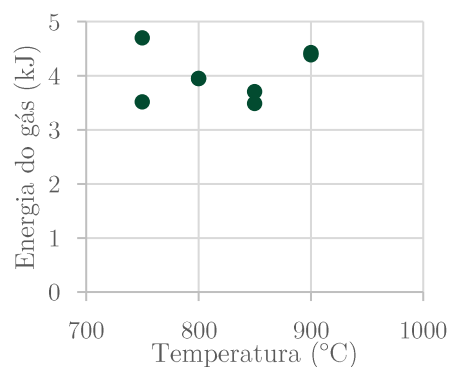
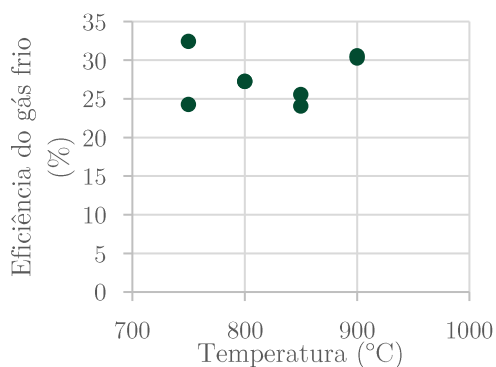
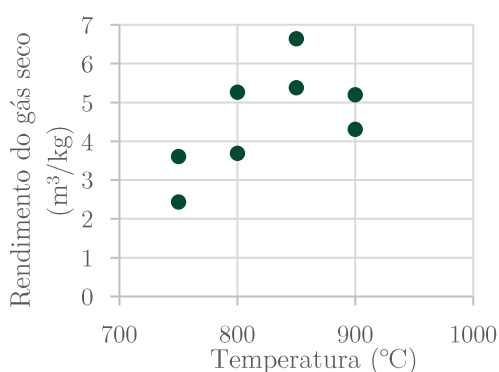
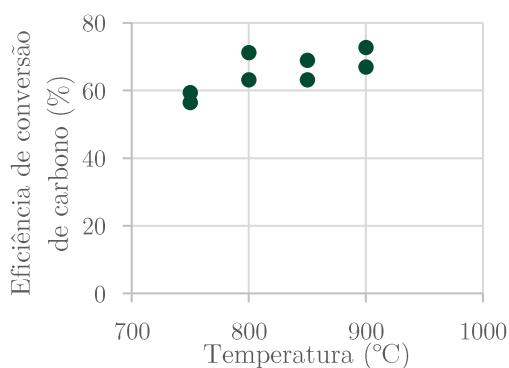
ocorrem, conforme referido, em simultâneo num processo de gasificação em leito fluidizado – são o exemplo, a produção de H_2 e CO , descritas como reações Boudouard (2.4) e gás-água (2.5), que, segundo Basu (2010), são influenciadas pelo aumento de temperatura, na produção destes gases, mas apenas até valores de temperatura de 850 °C.

Conforme observado na curva de hidrogénio do tojo, a humidade da biomassa pode ter influência na formação do hidrogénio., na medida em que um certo teor de humidade beneficia a reação gás-água (2.5). Analisando os valores de teor de humidade das biomassas em estudo, aquele que apresenta o valor mais elevado é a poda de tojo, e é onde, para temperaturas abaixo dos 850 °C, os valores de H_2 são ligeiramente mais elevados.

4.4.1 – Estudos dos parâmetros de gasificação

O estudo do efeito de temperatura na qualidade do gás de produção também foi avaliado através do cálculo dos parâmetros de gasificação, eficiência de conversão de carbono, rendimento do gás seco, energia do gás produzido e eficiência do gás frio. Tal como na análise anterior, esta avaliação será efetuada individualmente para cada tipo de biomassa. As formas de cálculo para obtenção dos parâmetros referidos foram apresentadas anteriormente.

- Poda de videira



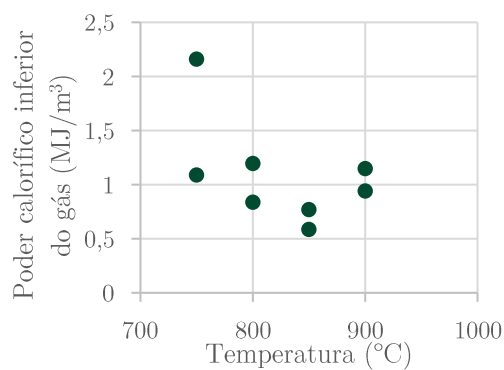


Figura 4.11 – Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de videira

- Poda de tojo

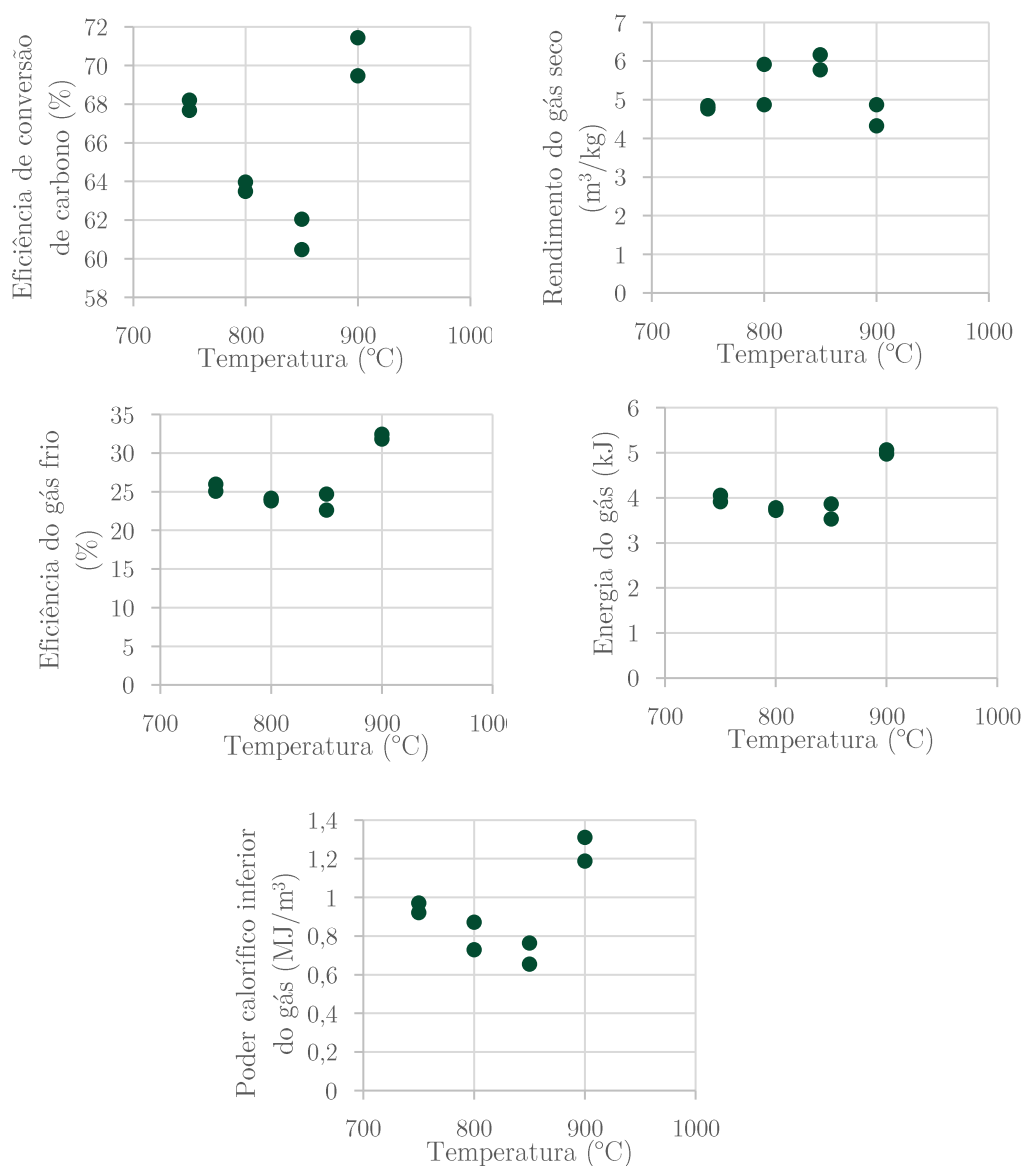


Figura 4.12 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de tojo

• Poda de kiwi

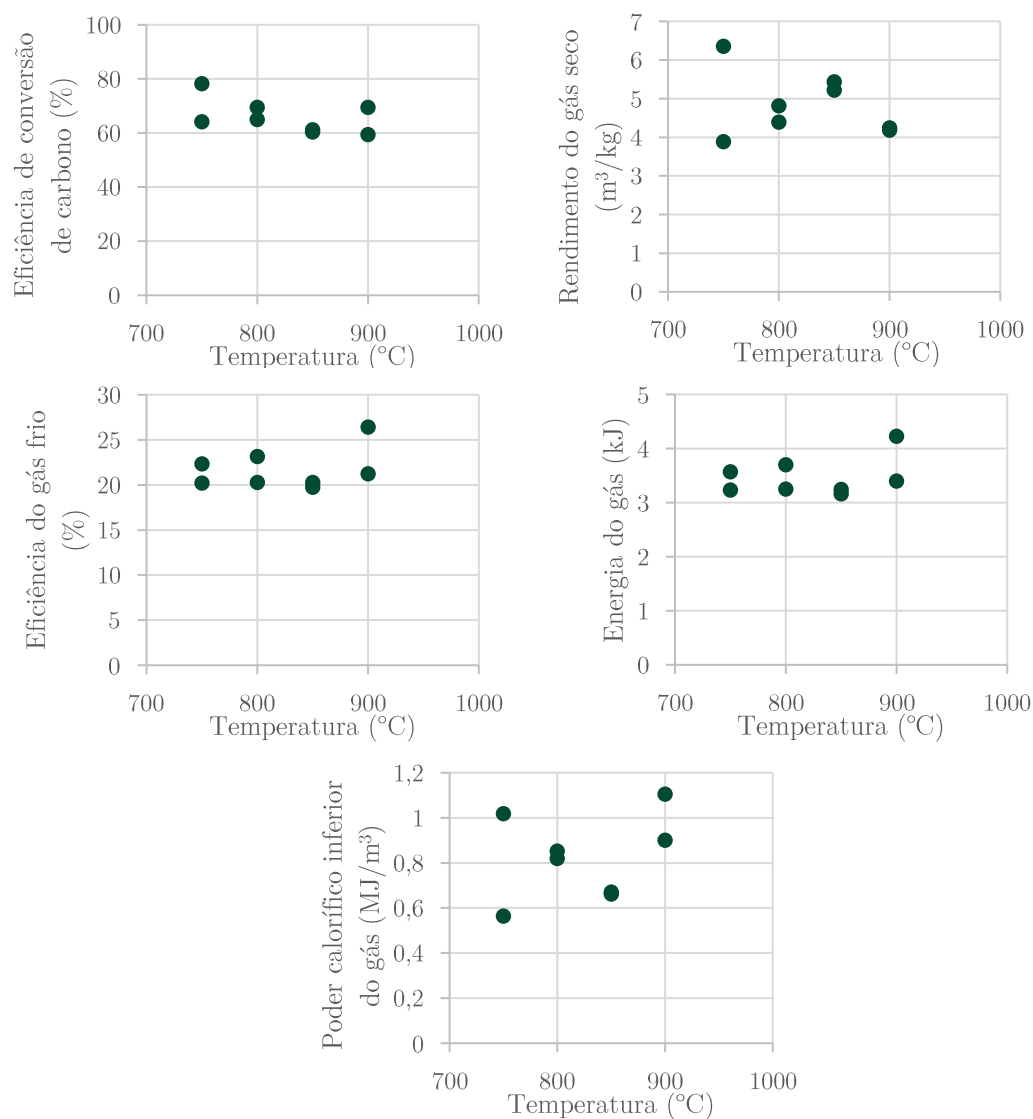
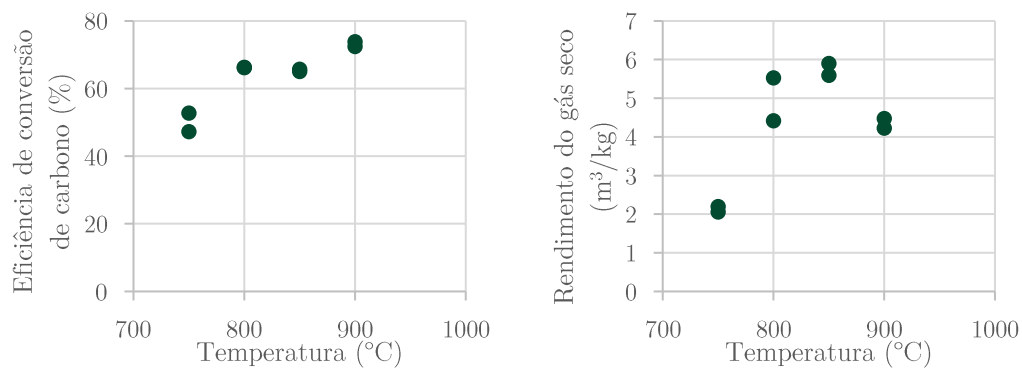


Figura 4.13 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de kiwi

• Poda de giesta



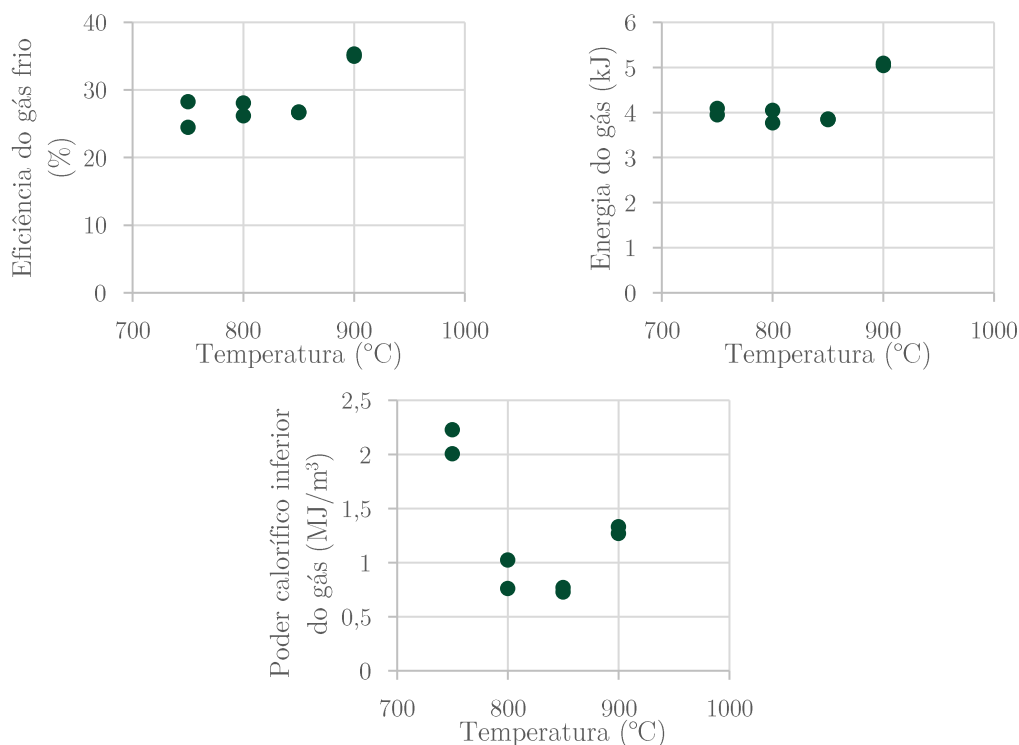


Figura 4.14 - Efeito da temperatura nos parâmetros de gasificação da poda de giesta

O desempenho das diferentes biomassas quando submetido ao processo de gasificação, levou a uma série de resultados, de certa forma, similares. A eficiência de conversão de carbono observada, apresenta resultados inconstantes com a temperatura, justificando-se com o método do teste, ou seja, não se garante que todos os ensaios tenham uma estabilidade de operação idêntica. São ensaios de pequenas cargas, por isso muito curtos, onde os fenómenos transitórios têm um grande peso. Isto poderá explicar muitas das variações encontradas. Não se conseguiu garantir uma reprodutibilidade para as todas as biomassas, para os diferentes ensaios, tal só seria possível através de ensaios em regime permanente. Também em regime permanente, mesmo que houvesse flutuações nas composições nas cargas, estas seriam homogeneizadas ao longo de um tempo que seria sempre bastante longo, ao contrário do esquema seguido, em que por um lado não se consegue garantir uma composição homogênea da carga da biomassa testada, como também o leito fluidizado pode conter cinzas dos ensaios laboratoriais anteriores. A granulometria também é fator importante a ter em conta, visto que, em especial em pequenas amostragens, a heterogeneidade da biomassa leva a que haja grandes flutuações dessas características dimensionais das cargas. E estas flutuações, em ensaios de curta duração, serão sempre relevantes.

Relativamente ao rendimento de gás seco, como este é calculado com base no volume do gás produzido, há um ligeiro crescimento inicial deste rendimento, seguido por um decréscimo acentuado. Pode-se justificar este aumentar de rendimento com a temperatura pelo facto, de a taxa inicial de pirólise aumentar com o aumento das temperaturas, assim como as reações endotérmicas (2.4) e (2.5).

Para se discutir os valores apresentados da eficiência do gás frio, é necessário referir antes o poder calorífico superior – o que equivale à soma da energia libertada sob a forma de calor (*PCI*) e a energia libertada na condensação da água que se forma na reação de oxidação. Relativamente ao *PCI*, considera-se que, provavelmente houve uma produção de alcatrões que foram libertados para o leito, o que poderá levar a valores inconclusivos para o *PCI* do gás formado na gasificação. Também se pondera que, um processo com esta dimensão, numa reação tão rápida, pode ter havido problemas na leitura correta dos valores experimentais. Trata-se de um fenómeno ainda por compreender totalmente, devido à curta extensão temporal do trabalho agora efetuado, o que obrigará à realização de testes futuros com cargas de maior capacidade.

Elevadas temperaturas contribuem para uma melhor evolução dos gases de produção – em especial H_2 e CO – conforme é evidente através das expressões (2.4), (2.5) e (2.7). Desta forma, a eficiência do gás frio conjuga os comportamentos demonstrado pelo *PCI* e pelo rendimento de gás seco, levando a um aumento do mesmo com o aumento das temperaturas.

Em suma, analisando os vários parâmetros apresentados, realça-se o facto de, em todos eles parece encontrar-se um ponto de viragem de funcionamento, que ronda os 850 °C. Também em trabalhos passados, consideraram este ponto pelo que, faria sentido analisá-lo, quando comparando as diferentes espécies. Nesta temperatura, é onde se parece conseguir obter os melhores resultados sem deterioramento da composição do gás.

4.5 - Influência da biomassa na composição do gás de produção – Comparação e avaliação dos resultados

Conforme se referiu anteriormente, considera-se como um bom ponto de estudo, a temperatura de 850 °C, pelo que as comparações e avaliações que se seguem, tiveram como base esta temperatura. O caudal e a massa das amostragens também são as mesmas descritas inicialmente.

Fez-se uma comparação, em primeiro lugar, relativamente à influência do tipo de biomassa na evolução da concentração dos gases, H_2 , CO e CH_4 , ao longo do tempo.

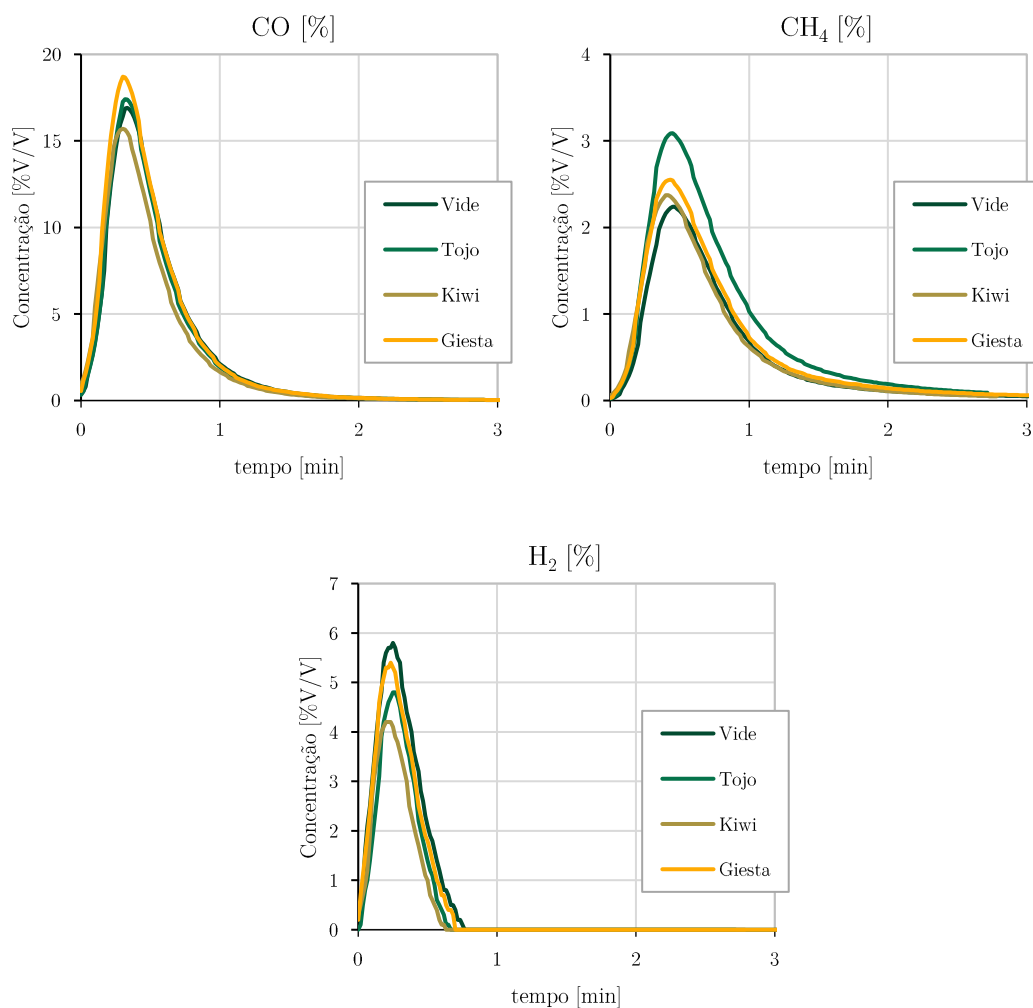


Figura 4.15 - Influência do tipo de biomassa na composição dos diferentes gases

Demonstrou-se através da análise, que a espécie que apresenta um gás de produção com mais teor de CO, é a giesta, seguida pelo tojo e a vide – sendo que estas últimas duas, apresentam valores muito próximos. Relativamente aos teores de CH₄, o tojo é a espécie que apresenta concentrações mais elevadas, e que se destaca mais das restantes. Por fim, a vide e a giesta aparentam apresentar melhores resultados nas concentrações de H₂, nos gases de produção.

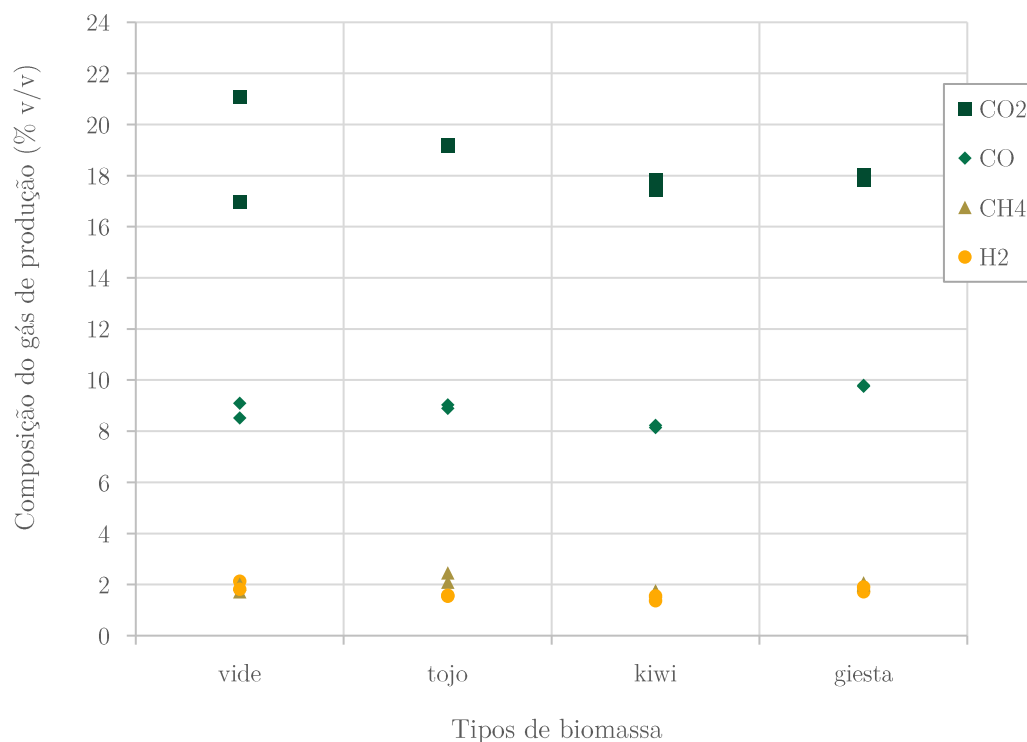
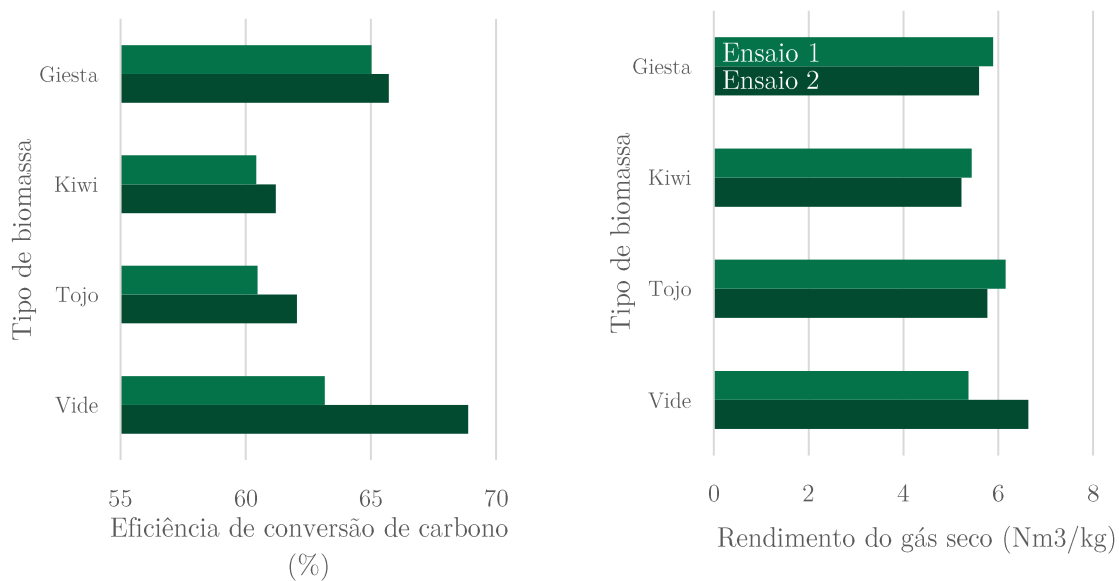


Figura 4.16 – Influência do tipo de biomassa na composição volumétrica média do gás de produção

Na figura 4.16 agruparam-se as composições médias das diferentes biomassas, que corroboram a análise anterior.

Por fim, fez-se uma análise das espécies de biomassa, a nível de parâmetros de gasificação, nomeadamente, eficiência de conversão de carbono, rendimento do gás seco, energia do gás produzido e eficiência do gás frio.



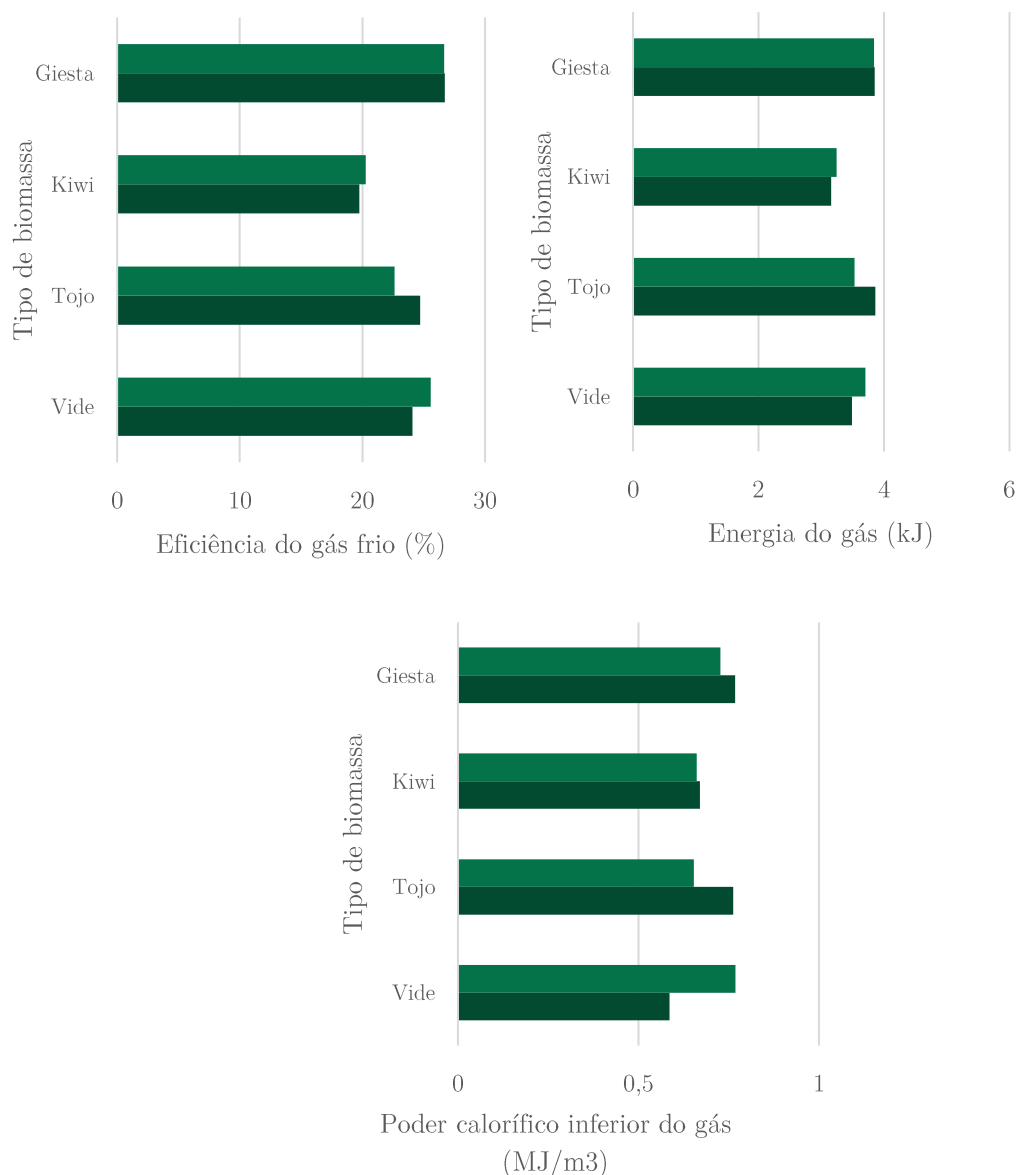


Figura 4.17 – Efeito da biomassa nos parâmetros de gasificação

Nos gráficos apresentados identificam-se dois valores, por biomassa, indicativos (conforme explícito anteriormente) de dois ensaios realizados para cada espécie. Todas estas substâncias têm, como átomos predominantes na sua estrutura molecular, carbono, hidrogénio e oxigénio. O facto de todos estes parâmetros apresentarem valores tão próximos, é justificado pelo facto da constituição molecular destas espécies ser muito semelhante. A humidade também é um fator a ter em conta, visto ter forte influência na composição do gás de produção. Quanto mais alto o valor do teor de humidade, mais calor será absorvido que deveria ser utilizado para aquecer a biomassa. Por outro lado, as concentrações de carbono e oxigénio, de forma geral, coincidem com a qualidade da produção do gás (e consequentemente, melhor conversão de carbono). Contudo não é possível generalizar estes fatores de influência pois, ao analisar as constituições das diferentes

biomassas, é possível verificar que o tojo apresenta as maiores concentrações de carbono e oxigénio, mas com elevado teor de humidade, o que resulta numa conversão de carbono inferior às demais.

Os resultados observados na eficiência de conversão de carbono, em média, apresentam valores mais elevados para a giesta. A poda de videira, também apresentou num dos ensaios um valor alto, mas devido à forte heterogeneidade da biomassa, não foi possível voltar a obter o mesmo valor.

Relativamente aos restantes parâmetros analisados, não parecem existir grandes diferenças nos valores registados, para as diferentes biomassas, contudo a espécie mais consistente, a nível de resultados obtidos, foi a giesta. Também esta foi a espécie de biomassa com melhor eficiência de gás frio. Conforme referido anteriormente, este fator conjuga o *PCI* do gás e o rendimento do gás seco.

Concluindo, dentro da proximidade dos resultados obtidos, a giesta aparenta manifestar resultados mais constantes e, de certa forma, com melhor desempenho, quando comparada com as restantes biomassas.

Um outro aspeto que se deve salientar é que nas cinzas destas biomassas existem alcalinos e alcalino-terrosos, sendo que alguns destes elementos poderão ter efeitos catalíticos nas reações químicas que se desenrolam durante a gasificação. Ora não se fizeram quaisquer análises às ditas cinzas e como tal ficam no ar dúvidas sobre esta questão. No entanto, no que diz respeito à combustão destas e de outras biomassas em leito fluidizado (Pereira e Pinho, 2015; Mateus et al., 2021), este aspeto já foi detetado como preponderante na afetação da cinética da reação e como tal no caso da gasificação, tal facto também terá de ser levado em conta em estudos mais aprofundados.

De qualquer modo estes foram ensaios exploratórios feitos com pequenas cargas levando a testes muito rápidos e curtos e como se explicou anteriormente variações pontuais na composição e granulometria das biomassas têm, nestas circunstâncias impactos nos resultados experimentais. Só com ensaios de maiores cargas, ou preferencialmente em regime permanente se conseguiria atenuar estas variações pontuais nas condições ou características das cargas entradas no reator, levando a resultados mais homogêneos e reproduzíveis no tempo. No entanto, o objetivo pretendido, que era ter-se uma pequena ideia do que se poderá obter, através de uma sequência relativamente curta de testes foi conseguido, pois os resultados alcançados dão uma ideia clara daquilo que poderá ser conseguido em estudos mais elaborados e temporalmente mais longos.

Capítulo 5

Conclusão e trabalhos futuros

O presente trabalho teve como objetivo principal uma primeira avaliação da gasificação em leito fluidizado de pequenas cargas de quatro espécies de biomassa, provenientes de resíduos de limpeza florestal ou agrícola. Com este trabalho visou-se valorizar as espécies num processo de gasificação e subsequente estudo do gás de produção. Tratou-se de um processo realizado num reator de leito fluidizado, com o ar como agente de oxidação, em que se estudou a influência da temperatura do leito no gás obtido, para cada biomassa.

As quatro espécies – videira, tojo, kiwi e giesta – foram previamente analisadas em laboratório, revelando que todas elas composições bastante próximas, nomeadamente quanto ao teor de humidade (%), concentrações de carbono e hidrogénio (%). Constatou-se, portanto, *a priori*, que os resultados deveriam ser muito semelhantes – o que se veio mais tarde a confirmar.

Os ensaios de gasificação revelaram, quando comparando as diferentes espécies, uma proximidade dos valores nas concentrações dos componentes gasosos do gás de produção. Esta comparação baseia-se nos resultados obtidos com a gasificação à temperatura de 850 °C, que demonstrou ser, a temperatura mais adequada para a obtenção de valores de parâmetros de gasificação mais elevados. Contudo, houve uma biomassa que se pode dizer que destaca, na medida em que apresentou valores, de certa forma, mais elevados que os outros, mas sobretudo mais constantes, que foi a giesta. Esta espécie apresentou valores médios mais elevados tanto na eficiência da conversão de carbono (65,2 %), como no *PCI* (0,76 MJ/m³). O kiwi foi o biocombustível que apresentou piores valores, com uma eficiência média de conversão de carbono de 60,8% e um *PCI* de 0,66 MJ/m³, às condições de 1 atm e 0 °C

No procedimento experimental seguido aqueceu-se o reator através de uma resistência elétrica, o leva a que o facto das reações a terem lugar durante o processo de gasificação, fossem elas endotérmicas ou exotérmicas tivesse uma influência inferior do desenrolar desse processo, e consequentemente sobre os resultados.

Os ensaios levados a cabo, conforme mencionado previamente, não tiveram em atenção quaisquer critérios de homogeneidade na escolha da biomassa – o que levou a uma aleatoriedade de valores obtidos. Sentia-se ao tato cargas partículas mais resistentes e outras mais frágeis, contudo neste primeiro estudo, experimentou-se todo o tipo de formas e consistências da biomassa para, de uma forma exploratória, se entender o comportamento das espécies. Percebeu-se que futuramente, este tipo de ensaios, deve ser levado a cabo de uma forma sistemática - se possível em condições de regime permanente – com uma pré-seleção da consistência da biomassa. Um exemplo é o caso de ensaios de combustão de carvões vegetais em leito fluidizado, onde há uma carbonização prévia da matéria em estudo, o que resulta numa homogeneização da biomassa. Convém, também relembrar que, a granulometria do carvão ativado, influencia e muito, o tempo e a qualidade de resposta, quando na leitura das concentrações dos componentes do gás de produção.

Também para a presente dissertação, no cálculo dos parâmetros de gasificação contabilizaram-se todos os compostos do gás de produção, o que levou a valores mais baixos de *PCI* e *PCS* do que aqueles, que se obteriam sem a contabilização do volume ocupado pelo azoto e pelo oxigénio.

Relativamente às anomalias dos valores detetados no cálculo dos *PCI*, no tempo disponível para realizar e, pela aproximação simplista que foi feita - devido ao facto de tratar de um estudo prévio – não foi possível esmiuçar as causas destas. Há, na verdade, perguntas que ficaram sem resposta, no *PCI*, que as justificações ultrapassam o espaço temporal. Para trabalhos futuros, seria um ponto para trabalhar e encontrar a explicação deste problema.

Também se detetou - quando comparado com amostras retiradas em outras alturas do ano, onde as diferenças climáticas provocaram um aumento de teor de humidade nas biomassas - valores piores, nos parâmetros de gasificação, dos que observados no presente trabalho. Este fator, leva concluir que, para melhor aproveitamento energético destes sistemas, as espécies devem ser recolhidas após um período de baixa precipitação.

Finalmente será necessário em estudos futuros avaliar-se possíveis efeitos catalíticos ou inibidores devidos aos componentes menores das cinzas dessas biomassas, durante o processo de gasificação, à semelhança do que já se fez em estudos de combustão das mesmas.

Em suma, todos os biocombustíveis aqui estudados, possuem um elevado potencial de valorização energético, nomeadamente em sistemas de gasificação. Poderão futuramente tornar-se uma nova fonte de receita para os produtores rurais e acrescentar incentivos às indústrias devido aos créditos de carbono gerados. Um dos pontos que deverá ser tomado em consideração é a sazonalidade da produção de alguns destes biocombustíveis. Para transpor essa dificuldade será necessário a utilização de outros resíduos florestais/agrícolas com potencial energético, para realizar a co-gasificação desses outros materiais.

Para trabalhos futuros, também seria interessante analisar a influência da quantidade de biomassa estudada, assim como a influência do caudal injetado na instalação, assim como os

próprios agentes de oxidação, nomeadamente o oxigénio ou o vapor de água – agentes que, em teoria, levariam a melhores valores de *PCI*.

Bibliografia

Akhtar, A., Krepl, V., e Ivanova, T. (2018). A Combined Overview of Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Biomass

Almeida, A. (2020). Valorização energética de glicerol bruto e gordura animal por gasificação. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Almeida, A. *et al.* (2019) «Gasification of Crude Glycerol after Salt Removal», *Energy and Fuels*, 33(10), pp. 9942–9948. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02390.

Arfin, T., Mohammad, F., e Yusof, N. (2014). Biomass resources in environmental and socio-economic analysis of fuel-wood consumption. Biomass and Bioenergy: Processing and Properties (Vol. 9783319076).

Basu, P. 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. Journal of Chemical Information and Modeling. Vol. 53. Halifax, Canada: Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Basu, P., (2010), Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory. Academic Press, 2nd edition, 530pp.

Breault, R. W. (2010) «Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies», *Energies*, 3(2), pp. 216–240. doi: 10.3390/en3020216.

Calì, G. *et al.* (2020) «Syngas production, clean-up and wastewater management in a demo-scale fixed-bed updraft biomass gasification unit», *Energies*, 13(10). doi: 10.3390/en13102594.

Camia, A. *et al.* (2018) *Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment*, ISBN978-92-79-77237-5. <https://doi.org/10.2760/181536>.

Cardoso, Marcos Tsuyama. 2013. Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação. Programa de Pós-Graduação em Energia – PPGE EP - FEA - IEE – IF

Castanheira, D. F. D. (2017). Estudo de um sistema de gaseificação para cogeração – Estudo experimental e de aplicação. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

- Chowdhury, N. (2014) «Advances and Trends in Woody Biomass Gasification Acknowledgements», (November), pp. 1–12.
- Demirbas, A. (2004) «Combustion characteristics of different biomass fuels», *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), pp. 219–230. doi: 10.1016/j.pecs.2003.10.004.
- Dias, J. M. (IPBeja) (2002) «Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas», 1, p. 102.
- Estabrook, G. F. (2006) «Neither wild nor planted: essential role of giesta (cytisus, fabaceae) in traditional agriculture of Beira alta, Portugal», *Economic Botany*, 60(4), pp. 307–320.
- Farzad, S., Mandegari, M. A. e Görgens, J. F. (2016) «A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments», *Biofuel Research Journal*, 3(4), pp. 483–495. doi: 10.18331/BRJ2016.3.4.3.
- Ferreira, T. (2013). Estudo experimental sobre a influência de diferentes tipos de peletes de Acacia e Cytisus (spp.) na eficiência térmica de uma caldeira doméstica de 20 kW. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, Portugal
- Ferreira, V., e Sanches, A. (2019). Thermal performance of a domestic boiler burning briquettes made from pruning wastes. Relatório referente às atividades de gasificação realizadas pelo INEGI no “Projeto Biomassa-AP”
- Freitas, M. A. (2014). Gestão e Quantificação de Resíduos na Atividade Vitícola. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal
- Gião, M. S. *et al.* (2007) «Infusions of Portuguese medicinal plants: Dependence of final antioxidant capacity and phenol content on extraction features», *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(14), pp. 2638–2647. doi: 10.1002/jsfa.3023.
- Giuliano, A., Freda, C. e Catizzone, E. (2020) «Techno-economic assessment of bio-syngas production for methanol synthesis: A focus on the water–gas shift and carbon capture sections», *Bioengineering*, 7(3), pp. 1–18. doi: 10.3390/bioengineering7030070.
- Global Syngas Technologies Council (2016) *The Gasification Industry » GSTC*. Disponível em: <https://www.globalsyngas.org/resources/the-gasification-industry/> (Acedido: 3 de Janeiro de 2021).
- Guran, S. (2020) «Thermochemical conversion of biomass», *Green Energy and Technology*, pp. 159–194. doi: 10.1007/978-81-322-3965-9_8.
- Hall, C. A. S., Powers, R. e Schoenberg, W. (2008) «Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future», *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*, pp. 109–132. doi: 10.1007/978-1-4020-8654-0_5.
- Higman, C. (2016) «State of the gasification industry: Commercial applications & research and development», *ECUST OMB technology conference*, Nanjing(November).
- Higman, C., e M. van der Burgt. 2008. Gasification. 2a edição. Massachusetts, EUA: Elsevier.
- IEA. 2020. «Global Energy Review 2020». <https://www.iea.org/reports/global-energyreview-2020>
- Hrbek, J. (2015) *Status report on thermal gasification of biomass and waste 2019 IEA Bioenergy Task 33 special report Status report on thermal gasification of biomass and waste IEA Bioenergy Task 33 special report*. University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Austria. Disponível em: www.task33.ieabionenergy.com.

- Hrbek, J. (2020) *Webinar Task 33: The past, present and future of gasification*. University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Austria.
- Indrawan, N. *et al.* (2020) «Economics of distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste», *Energies*, 13(14), pp. 1–18. doi: 10.3390/en13143703.
- Jegoux, M. *et al.* (1992) *Efficient Co-Electrolyser for Efficient Renewable Energy Storage*.
- Jenkins M., B. *et al.* (1998) «Combustion Properties of Biomass Flash», *Fuel Processing Technology*, 54(1–3), pp. 17–46.
- Kanury, A., (1994), «Combustion characteristics of biomass fuels», *Combustion Science and Technology* (97), 469 – 491.
- Kunii, D., Levenspiel, O. (1991) ‘Fluidization Engineering’, 2^a. Edição, Butterworth Heinemann. Estados Unidos da América
- Lapuerta, M. *et al.* (2008) «Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions», *Fuel Processing Technology*, 89(9), pp. 828–837. doi: 10.1016/j.fuproc.2008.02.001.
- madur Eletronics. (2017). GF4 scrubber’s front view.
- madur Eletronics. 2017. «MAMOS – ONLINE MONITORING SYSTEM User guide»
- Martínez González, A., Lesme Jaén, R. e Silva Lora, E. E. (2020) «Thermodynamic assessment of the integrated gasification-power plant operating in the sawmill industry: An energy and exergy analysis», *Renewable Energy*, 147, pp. 1151–1163. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.045.
- Mateus, S. O. V. L. (2019). Combustão de Carvões de Alguns Resíduos Agrícolas em Leito Fluidizado. Obtenção de Dados Cinéticos.
- Mateus, S., Ferreira, V., Sanches, A., Resende, P. e Pinho, C. Determination of combustion kinetic data of some agricultural wastes from the Galicia-Northern Portugal Euroregion”. Aceite para publicação no Waste and Biomass Valorization. DOI: 10.1007/s12649-020-01227-7
- Moreira, N. A. R. (2007). Caracterização da combustão de carvões vegetais em leito fluidizado. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Morgado, G. (2019). Estudo da queima de briquetes de biomassa numa caldeira. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Química. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.
- Morgado, G e Silva, M.V., 2020. Comunicação pessoal. INEGI. Porto, Portugal.
- Munson, B.R., A.P. Rothmayer, e T.H. Okiishi. 2012. Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition: Wiley.
- Nogueira, Luiz & Lora, Electo. (2003). Dendroenergia: fundamentos e aplicações (2a. ed.).
- Oliveira, C. (2015). Características do gás durante a gasificação de biomassa em leito fluidizado. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal.
- Oliveira, S. R. de, e Marques, E. (2007). Efeito da lixiviação pela água da chuva sobre a composição da biomassa de arbustos recolhidos na floresta na região Litoral-Centro. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal.

- Pandey, A. (2009) *Handbook of Biofuels Plant-Based Biofuels*. New York, United States: Taylor & Francis Group.
- Patzek, T. W. (2008) «Can the earth deliver the biomass-for-fuel we demand?», *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*, pp. 19–55. doi: 10.1007/978-1-4020-8654-0_2.
- Pereira, C., Pinho, C. (2015). Analysis of the fluidized bed combustion behavior of *Quercus ilex* char. *Appl. Therm. Eng.* 81, 346–352.
- Pimentel, D. (2008) «Renewable and solar energy technologies: Energy and environmental issues», *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks*, pp. 1–17. doi: 10.1007/978-1-4020-8654-0_1.
- Pimentel, D. e Patzek, T. W. (2007) «Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower», *Food, Energy, and Society, Third Edition*, pp. 311–332. doi: 10.1201/9781420046687.
- Pinho, C (2021). Comunicação pessoal. FEUP, Porto, Portugal.
- Pindoria, R. V. *et al.* (1998) «Comparison of the pyrolysis and gasification of biomass: Effect of reacting gas atmosphere and pressure on Eucalyptus wood», *Fuel*, 77(11), pp. 1247–1251. doi: 10.1016/S0016-2361(98)00018-0.
- Quaak, P., Knoef, H. e Stassen, H. (1999) «World Bank Technical Paper No.422 - Energy from Biomass», p. 78.
- Rodrigues, S.(2016). Aproveitamento energético de biomassa num gasificador de leito fluidizado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal.
- Sataloff, R. T., Johns, M. M., e Kost, K. M. (2008). Biomass Combustion e Co-firing.
- Silva, M. V. (2018). Estudo da queima de briquetes de biomassa numa salamandra. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.
- Shaukat, S. S. (2012) *Progress in Biomass and Bioenergy Production, Progress in Biomass and Bioenergy Production*. doi: 10.5772/972.
- Solar Energy Research (1986) «A survey of biomass gasification», *Biologia Centrali-America*, 2, pp. v–413.
- Tabarés, J., Ortiz, L., Viar, F. (2000). Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes), *Fuel* 79: 1229 – 1237
- Tijmensen, M. J. A. *et al.* (2002) «Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification», *Biomass and Bioenergy*, 23(2), pp. 129–152. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00037-5.
- Timmer, Kevin Jay. 2008. «Carbon conversion during bubbling fluidized bed gasification of biomass». <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/15822>.
- Van Loo, S., e Koppejan, J. (2008). The Handbook Of Biomass Combustion And Co-Firing. Earthscan. London, UK.
- Viana, H. *et al.* (2012) «Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain», *Fuel*, 102, pp. 737–745. doi: 10.1016/j.fuel.2012.06.035.

- Waldheim, L., IEA BIOENERGY e WALDHEIM CONSULTING (2018) «Gasification of waste for energy carriers. A review», *IEA Bioenergy*, Task 33, p. 295.
- Wang, G. *et al.* (2014) «Evaluation of the combustion behaviour and ash characteristics of biomass waste derived fuels, pine and coal in a drop tube furnace», *Fuel*, 117(PART A), pp. 809–824. doi: 10.1016/j.fuel.2013.09.080.
- Wang, M. (2008) «Estimation of Energy Efficiencies of U.S. Petroleum Refineries», *Center for Transportation Research Argonne National Laboratory*, (March), pp. 1–10.
- Zhang, L., Xu, C. (Charles) e Champagne, P. (2010) «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass», *Energy Conversion and Management*, 51(5), pp. 969–982. doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.038.

Anexo A – Calibrações

A.1 - Calibração de analisadores

Como referido no Capítulo 4, houve uma confirmação da calibração, no qual se detetou uma anomalia no analisador de metano, devido à presença de hidrocarbonetos que resulta num incremento indevido. Para tal, registou-se os valores lidos pelo analisador várias situações com concentrações de metano conhecidas e traçou-se a respetiva curva de calibração. Com o conhecimento dos caudais das entradas e a constituição, fez-se um balanço mássico e, com estes valores, traçou-se a reta de calibração e a respetiva equação. A curva da figura A.1 representa a relação do valor lido pelo aparelho e valor correto que este deveria apresentar.

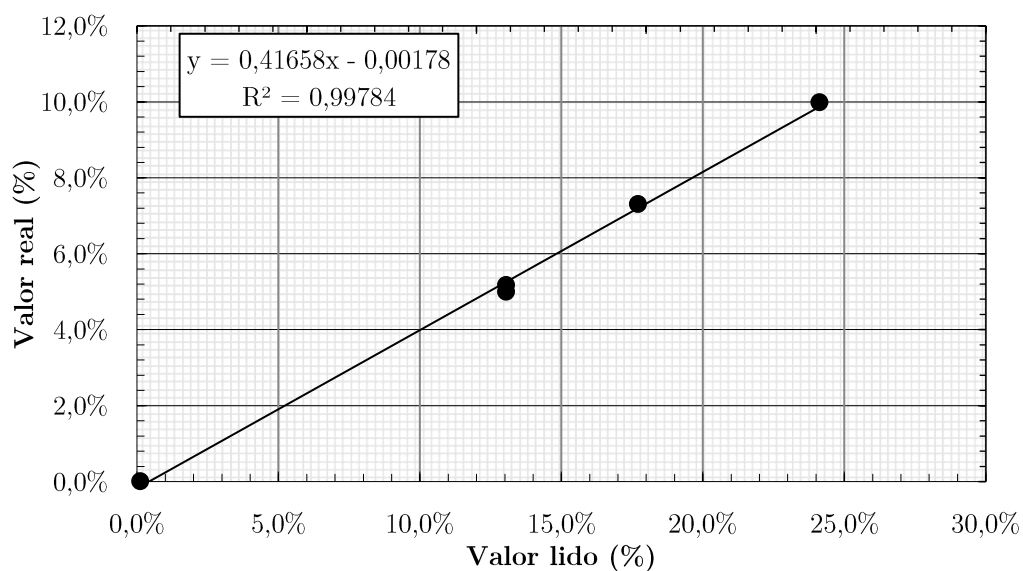


Figura A.1 – Reta de calibração do analisador de metano

A.2 - Calibração do rotâmetro

O rotâmetro utilizado foi calibrado para uma pressão relativa de 1 bar. Para se calibrar este aparelho, introduziu-se ar continuamente pela zona inferior do reator, que atravessou o distribuidor (descrito em 3.1.1) e acabava por escoar em sentido ascendente através do leito de partículas em suspensão na corrente gasosa. A figura A.2 representa a curva obtida para a calibração do rotâmetro.

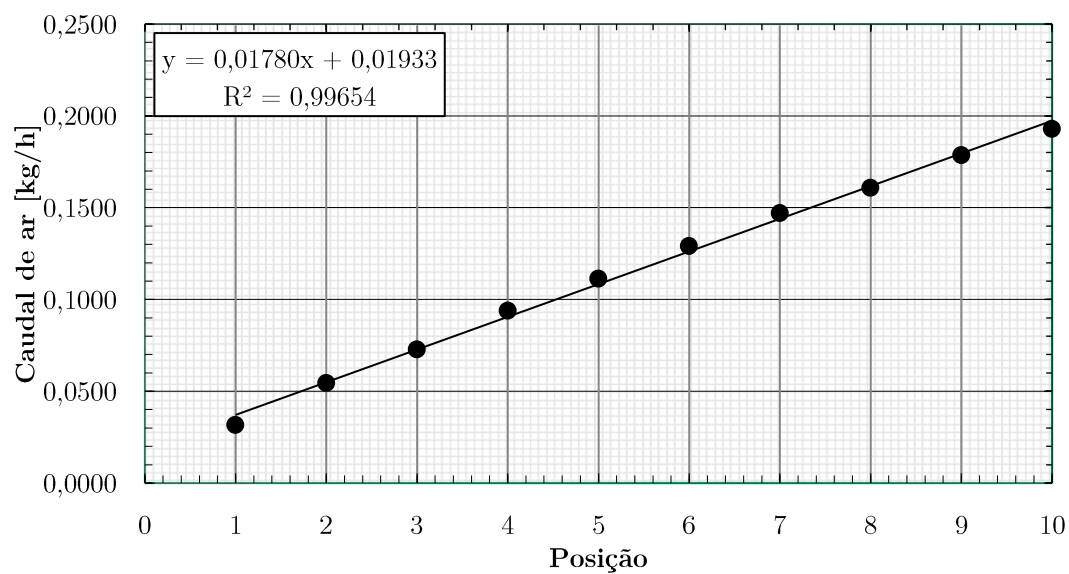


Figura A.2 – Reta de calibração do rotâmetro do agente oxidante - Ar

Anexo B – Interface dos softwares.

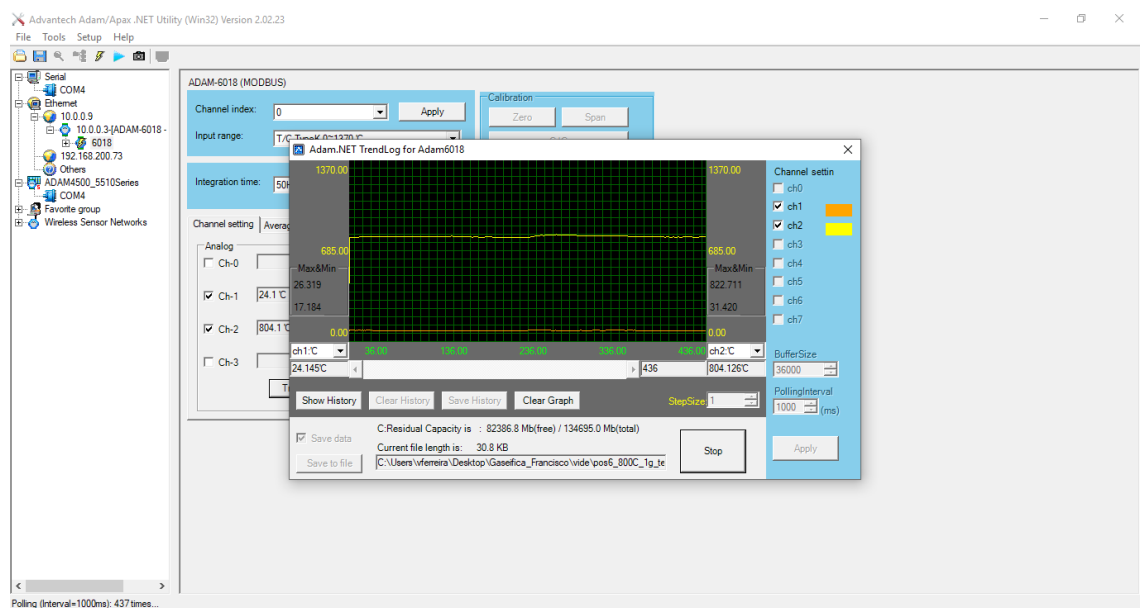


Figura B.1 – Interface do programa de análise de temperaturas - *Advantech*



Figura B.2 – Interface do programa analisador de compostos gasosos - *madur*

Anexo C – Sistema de filtragem

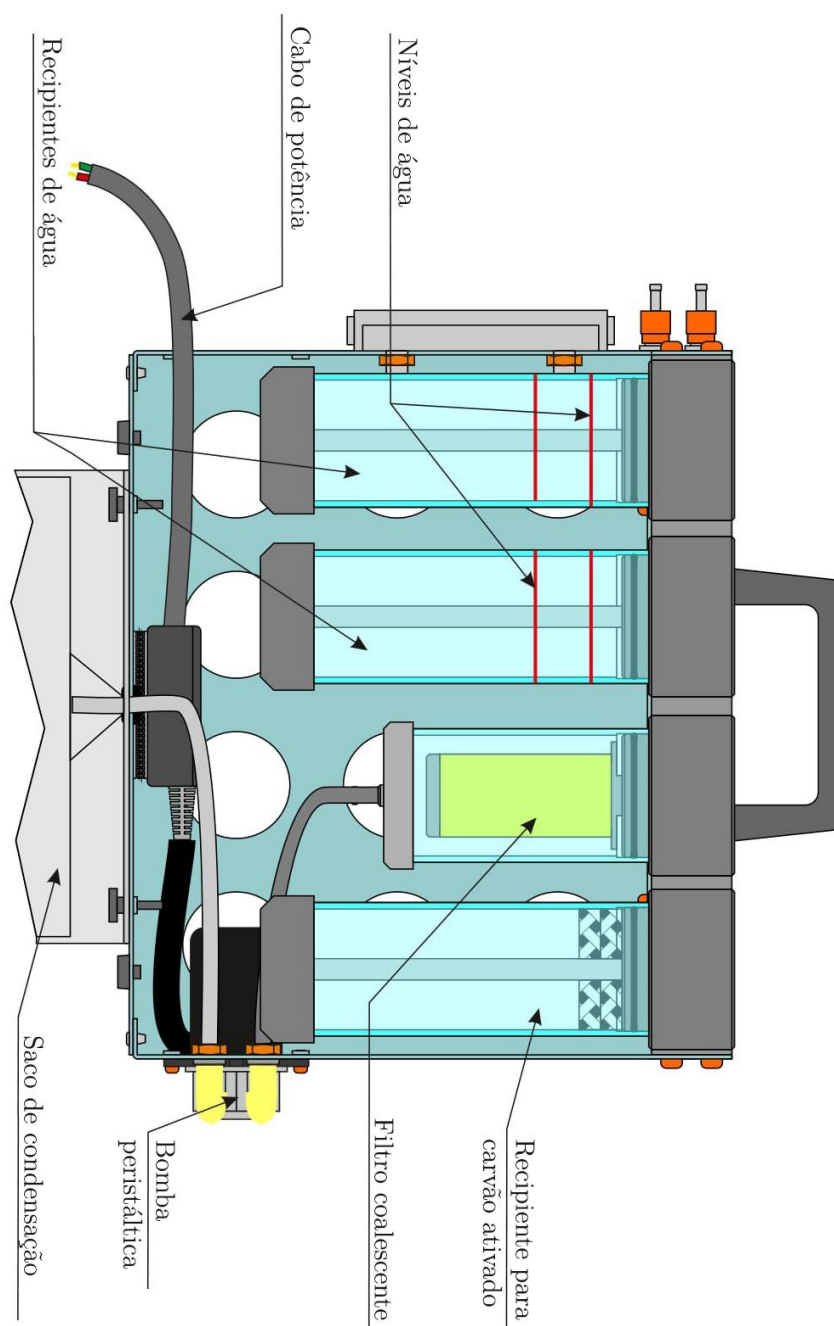


Figura C.1 – Esquema do sistema de filtragem. Adaptado (madur Eletronics, 2017a)