

PROCESSOS TERMOQUÍMICOS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA

Vera Fonseca da Silva

Dissertação apresentada à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança** para obtenção do grau de Mestre em **Energias Renováveis e Eficiência Energética**

Orientadores:

Professora Doutora Ana Maria Alves Queiroz da Silva

Professor Doutor António Manuel Esteves Ribeiro

Professor Doutor Paulo Miguel Pereira de Brito

Bragança, outubro de 2021

Agradecimentos

A concretização de um projeto não se deve apenas aos seus autores, mas antes, a todos aqueles que de forma direta ou indireta se envolveram. Foi enorme e constante a partilha, partilharam-se dúvidas, incertezas, conquistas e muitas, muitas aprendizagens.

Agradeço, em primeiro lugar, aos orientadores Prof. Dr.^a Ana Queiroz, Prof. Dr. António Ribeiro, Prof. Dr. Paulo Brito que com grande apoio, dedicação, orientação e confiança me ajudaram a construir o caminho que percorri desde a idealização até à concretização deste projeto.

Aos colegas do Curso de Mestrado em Energias renováveis e eficiência energética do Instituto Politécnico de Bragança, pela amizade e companheirismo. Aos meus amigos que nunca estiveram ausentes, agradeço a amizade e o carinho que sempre me disponibilizaram, em especial à Tamires Évora que sempre acreditou em mim e me motivou a continuar.

Por fim, agradeço à minha mãe pelos estímulos que sempre me transmitiu para estudar e gostar de aprender, sem ela nada seria possível.

A todos obrigada por permitirem que esta tese seja uma realidade.

Resumo

Atualmente, devido à crescente preocupação com o aquecimento global e procura por fontes de energia mais limpas, os governos são pressionados, cada vez mais, para restringir as emissões poluentes.

Para que o mercado de combustíveis deixe de ser predominantemente dominado pelos combustíveis fósseis é preciso continuar a desenvolver outras alternativas tecnológicas que vão além das fontes energéticas atuais, que além do fator económico também sofrem pressões ambientais, que exigem formas mais limpas de energia, na tentativa de evitar a mesma emissão de gases para a atmosfera que os atuais combustíveis fósseis. A biomassa é uma das alternativas para diminuir a dependência de combustíveis fósseis da matriz energética mundial.

Este trabalho fornece uma revisão detalhada sobre novos conceitos da conversão termoquímica da biomassa baseados em processos de gaseificação e pirólise, tecnologias consideradas essenciais para o aproveitamento e valorização das mais variadas fontes de biomassa, incluindo fontes residuais. Para promover estas tecnologias no futuro são necessários processos e sistemas de conversão avançados, económicos e altamente eficientes.

A pirólise rápida tem vindo a despertar grande interesse, uma vez que é até à data a única tecnologia disponível industrialmente para a produção de bio óleos. Embora o mecanismo da pirólise da biomassa tenha sido pesquisado intensivamente, existem ainda muitos desafios. Para obter avanços e desvendar a complexidade própria da rede de pirólise da biomassa, sugere-se a continuação dos esforços para se concentrarem nas questões como entender a correlação entre a estrutura da biomassa e a relação da pirólise, melhorar o desempenho catalítico para que haja menor produção de carvão, entre outras questões.

A gaseificação em água supercrítica é uma abordagem promissora para a produção de hidrogénio a partir de matérias-primas de biomassa, especialmente aquelas com elevado teor de humidade. No entanto, as grandes instalações de gaseificação acarretam ainda riscos (por exemplo, disponibilidade de biomassa) que fazem com que os projetos diminuam a atratividade económica. Sob o ponto de vista prático, e na melhoria do processo de gaseificação, há ainda muito trabalho a ser exaustivamente investigado, designadamente: tipo de matéria-prima versus tipo de gaseificador, o dimensionamento do gaseificador, e a influência das diferentes zonas (ou seja, secagem, combustão e redução) na produção de gás de síntese.

Palavras-chave: Biomassa, Conversão Termoquímica, Pirólise, Gaseificação.

Abstract

Currently, due to the growing concern with global warming and the search for cleaner energy sources, governments are increasingly pressured to restrict pollutant emissions.

For the fuel market to stop being predominantly dominated by fossil fuels, it is necessary to continue developing other technological alternatives that go beyond the current energy sources, which besides the economic factor also suffer environmental pressures, which demand cleaner forms of energy, in an attempt to avoid the same emission of gases into the atmosphere as the current fossil fuels. Biomass is one of the alternatives to reduce the dependence on fossil fuels in the world's energy matrix.

This work provides a detailed review on new concepts of thermochemical conversion of biomass based on gasification and pyrolysis processes, technologies that are considered essential for the utilization and valorization of a wide variety of biomass sources, including waste sources. To promote these technologies in the future, advanced, economical and highly efficient conversion processes and systems are required.

Fast pyrolysis has been arousing great interest, since it is to date the only industrially available technology for the production of bio-oils. Although the mechanism of biomass pyrolysis has been intensively researched, there are still many challenges. To achieve breakthroughs and unravel the very complexity of the biomass pyrolysis network, further efforts are suggested to focus on the issues such as understanding the correlation between biomass structure and pyrolysis relationship, improving the catalytic performance so that there is less char production, among other issues.

Supercritical water gasification is a promising approach for hydrogen production from biomass feedstocks, especially those with high moisture content. However, large gasification plants still carry risks (e.g., biomass availability) that cause projects to decrease in economic attractiveness. From a practical point of view, and in the improvement of the gasification process, there is still much work to be thoroughly investigated, namely: feedstock type versus gasifier type, the sizing of the gasifier, and the influence of the different zones (i.e. drying, combustion and reduction) on the production of syngas.

Keywords: Biomass, Thermo-chemical Conversion, Pyrolysis, Gasification.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Estrutura do relatório.....	6
2. BIOMASSA	7
2.1. Biomassa como bioenergia.....	7
2.2. Tipos de biomassa	8
2.2.1. Biomassa florestal	8
2.2.2. Briquetes e Pellets	9
2.2.3. Resíduos sólidos	11
2.3. Propriedades da biomassa como combustível	11
3. POTENCIAL DA BIOMASSA	14
3.1. Global.....	14
3.2. Europa	16
3.3. Portugal	17
3.4. Cabo Verde.....	23
4. CONVERSÃO DA BIOMASSA	27
4.1. Processos termoquímicos de conversão	28
4.1.1. Liquefação	30
4.1.2. Combustão.....	30
4.1.3. Gaseificação	30
4.1.4. Pirólise da biomassa	41
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA PIRÓLISE E DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA	47
6. CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS	83

Lista de Figuras

Figura 1 - Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental (APREN, 2021).....	3
Figura 2 - Evolução da Produção de Eletricidade por Fonte em Portugal Continental (APREN, 2021).	3
Figura 3 - Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental (APREN, 2021).	4
Figura 4 - Esquema com a classificação dos resíduos sólidos (Graça, 2015).	11
Figura 5 - Percentagem da procura total de energia primária por combustível, entre 2010-2019 (IEA, 2019).	15
Figura 6 - Metas globais para o uso das energias renováveis (2020 e 2030) (Eurostat, 2021). ..	16
Figura 7 - Uso da biomassa em várias regiões do globo (PORDATA, 2020).....	17
Figura 8 - Distribuição por uso/espécie florestal dos pontos de amostragem no terreno (IFN6,2015).....	19
Figura 9 - Ocupação da floresta portuguesa em 2018 (Infografia, 2020).	20
Figura 10 - Uso e ocupação do solo (Portugal continental) (Infografia, 2020).....	20
Figura 11 - Evolução histórica da área florestal, 1860 – 2020 (Agroportal, 2020).....	21
Figura 12 - Evolução da matriz elétrica portuguesa ao longo dos anos (1970-2018) (APREN, 2019).	22
Figura 13 - Consumo de Energia Final 2019 (DGEG, 2020).....	22
Figura 14 - O Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Final 2019 (DGEG, 2020).	23
Figura 15 - Taxa de produção de energia em Cabo Verde (ER, 2020).	24
Figura 16 - Cenário atual em Cabo Verde (ER, 2020).....	24
Figura 17 - Repartição do Consumo Interno Bruto de Energia em 2003 (SED, 2005).....	25
Figura 18 - Evolução da Procura Total de Lenha pelas Famílias em Cabo Verde (SE4ALL, 2015).	25
Figura 19 - Fontes de biomassa e seus processos de conversão (Marafon, 2016).	27
Figura 20 - Esquema do processo termoquímico e das suas classificações (Pritam et al., 2021).	29
Figura 21 - Processos termoquímicos da conversão da biomassa (Moura, 2016).....	29
Figura 22 - Processo da gaseificação da biomassa (Ardila, 2015).	31
Figura 23 - Ilustração da sequência das etapas de gaseificação (Janajreh et al., 2021).	33
Figura 24 - Uma representação esquemática do processo da gaseificação (Das <i>et al.</i> , 2021). ...	34
Figura 25– Esquema de diferentes tipos de gaseificadores existentes (Castanheira, 2017).....	38
Figura 26 - Uma representação esquemática do processo de pirólise (Das et al., 2021).	42
Figura 27 - Número de publicações da pirólise da biomassa nos bancos de dados Scopus e ScienceDirect.	47

Figura 28 - Número de publicações da gaseificação da biomassa nos bancos de dados Scopus e ScienceDirect.	48
Figura 29 - Número de publicações da pirólise da biomassa por área nos bancos de dados Scopus e ScienceDirect.....	48
Figura 30 - Número de publicações da gaseificação da biomassa por área nos bancos de dados Scopus e Science Direct.	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores médios da composição química da madeira (Marques, 2016).....	9
Tabela 2 - Características dos pellets versus briquetes (Smartfire, 2020).....	10
Tabela 3 - Comparação entre as fontes de biomassa sólida (Barbosa, 2008).....	10
Tabela 4 - Análise imediata e poder calorífico para diversas fontes de biomassa (Junior, 2015).	13
Tabela 5 - Produção primária por tipo de energia renovável (PORDATA, 2020).....	17
Tabela 6 - Estequiometria das reações (Ardila, 2015).	37
Tabela 7 - Funcionamento, vantagens e desvantagens de diferentes tipos de gaseificadores de leito fixo (Castanheira, 2017).....	39
Tabela 8 - Composição dos gases para diferentes gaseificadores a ar (Castanheira, 2017).....	39
Tabela 9 - Características da pirólise de diferentes biomassas (Jesus, 2017).....	50
Tabela 10 - Estudos recentes sobre a pirólise.....	51
Tabela 11 - Estudos recentes sobre a gaseificação.....	62
Tabela 12 - Produtos obtidos da gaseificação da biomassa com e sem catalisador (Hamad et al., 2016).	75

Lista de Abreviaturas e Siglas

SI – Sistema Internacional de Unidades

Ø – Diâmetro

Mb/d – Milhões de barris por dia

Kb/d – Milhares de barris por dia

Mtoe – Megatoneladas equivalentes de petróleo

MV – Matéria volátil (%)

CF – Carbono fixo (%)

CZ – Cinzas (%)

U – Humidade (%)

PCS – poder calorífico superior (MJ.kg^{-1})

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O desenvolvimento da civilização está ligado ao consumo de energia pelo homem. A descoberta do fogo e a utilização da sua energia para cozinhar alimentos e outros fins tornou-se um enorme marco na evolução da Humanidade. O Homem tem obtido a energia através de atividades extrativas, aproveitando os recursos da natureza. Este aproveitamento dos recursos tem sido realizado sem qualquer preocupação com os impactos que poderiam resultar da sua execução, visto que se acreditava que os recursos naturais e os combustíveis fósseis eram fontes de energia abundantes, sem previsão de esgotamento (Cardoso, 2012).

A poluição e o aquecimento global são dois dos principais desafios ambientais enfrentados pela humanidade atualmente. Ambos estão diretamente relacionados com a atual dependência excessiva dos combustíveis fósseis (Singh *et al.*, 2015). Os combustíveis fósseis são um bem escasso (uma fonte de energia finita a curto prazo), na posse de apenas alguns países, o que conseqüentemente provoca o aumento mundial do seu preço. Estes combustíveis, para além dos seus preços elevados, produzem elevados níveis de poluição derivados da sua utilização, como seja a libertação do dióxido de carbono, que é um gás com efeito de estufa (Marques, 2016).

A procura por alternativas de produção e distribuição de energia mais eficientes é um aspeto crucial para os seres humanos, especialmente na sociedade atual, na qual as formas de consumo se têm vindo a intensificar dia após dia. Face a esta dependência dos recursos energéticos, surge a necessidade de diversificar as fontes de energia, como no caso do petróleo tem surgido muitas pressões para a sua substituição de um lado temos a preocupação com a escassez, a instabilização dos preços e a sua distribuição desigual, que provocou mesmo guerras; por outro lado, a necessidade de travar o atual processo de alterações climáticas causadas pela atividade antrópica, especialmente pelas emissões de carbono, metano e óxidos de azoto. Por outro lado, o contexto corrente de desenvolvimento científico e tecnológico apresenta alguns elementos de grande importância: a emergência de novas tecnologias e o objetivo global de transição rumo a uma economia sustentável baseada em recursos renováveis (Galembeck *et al.*, 2009; Castro, 2016).

As energias renováveis desempenham um papel fundamental para abordar todas essas questões. Por esse motivo, as políticas dos principais países industrializados estão sendo orientadas para o aumento da parcela de energia produzida a partir de fontes renováveis. Isso tem como consequência a transformação da cadeia de suprimento de energia (Maggio *et al.*, 2019).

Várias alternativas foram surgindo para solucionar este problema, destacando-se a energia solar, a eólica, a atômica e a energia da biomassa. Contudo, todas as alternativas mencionadas têm impactos positivos e negativos que devem ser levados em consideração. Assim sendo, até agora nenhuma das opções se revelou como a mais adequada, pelo que cada uma deve ser analisada, verificando a melhor relação custo-benefício para cada aplicação (Cardoso, 2012).

Entre as várias soluções que estão a ser avaliadas, a biomassa aparenta ser bastante promissora devido ao seu baixo custo de aquisição, as emissões de carbono não contribuem para o efeito estufa, é menos agressiva ao meio ambiente, diminuindo assim o risco ambiental (Freitas, 2016). O uso da biomassa como fonte de energia vai igualmente produzir CO₂ como as demais fontes. No entanto, esta biomassa é proveniente das plantas que durante o seu crescimento consumiram precisamente a mesma quantidade deste gás que será devolvida à atmosfera após a sua utilização final. Considerando que esta opção só faz sentido se se considerar uma área cultivada onde as plantas estão continuamente a crescer a fim de produzir a energia que a sociedade necessita, o balanço de CO₂ é automaticamente nulo, não afetando assim o efeito de estufa.

Assim como a maioria dos países do sul da Europa, Portugal possui uma área florestal bastante significativa e, se for devidamente explorada, pode ser utilizada como uma fonte de energia renovável e sustentável (Nunes *et al.*, 2015).

Segundo os dados da Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) relativos à produção de eletricidade em Portugal Continental, entre janeiro e outubro de 2020, Portugal Continental apresentava uma produção bastante positiva no que respeita a energias renováveis. Em setembro de 2020, as fontes de energia renovável contribuíram com 61% do total da geração de eletricidade o correspondente a 21510 GWh, por sua vez, os centros electroprodutores térmicos fósseis representaram 39% (13747 GWh). Enquanto de janeiro a abril de 2021 foram gerados 17942 GWh de eletricidade em Portugal Continental, dos quais 75,1% foram de origem renovável. Na Figura 1 pode ser observado que a percentagem das energias renováveis na matriz energética portuguesa tem vindo a aumentar.

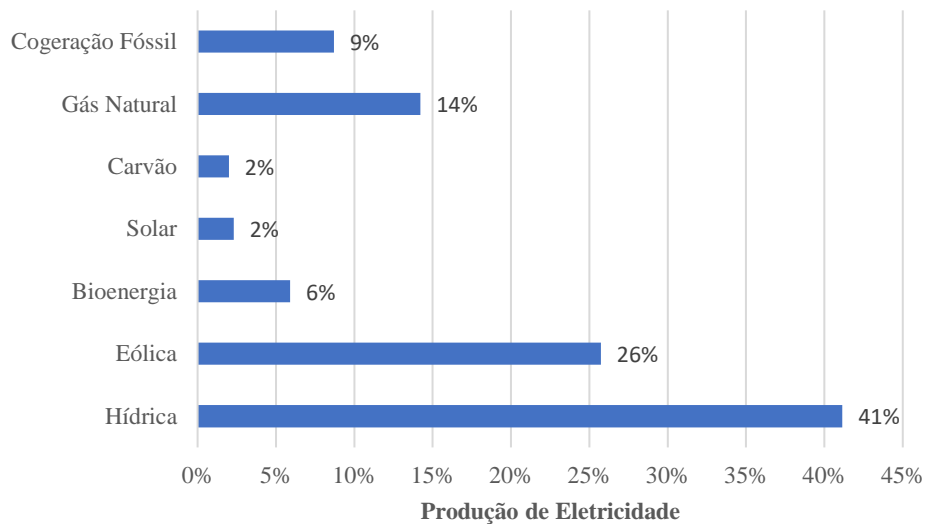


Figura 1 - Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental (APREN, 2021).

Desde novembro de 2019 a novembro de 2021 a utilização das fontes de energias renováveis tem vindo a aumentar (Figura 2). No quinto mês de 2021 por ser um ano atípico devido à influência do Covid19, a incorporação renovável na produção de eletricidade sofreu uma diminuição ligeira; já em novembro de 2021 a contribuição renovável na geração de eletricidade foi de 58,0 % (2310 GWh). Por sua vez, os centros electroprodutores térmicos fósseis representaram 38,3 % (1526 GWh) da produção de energia.

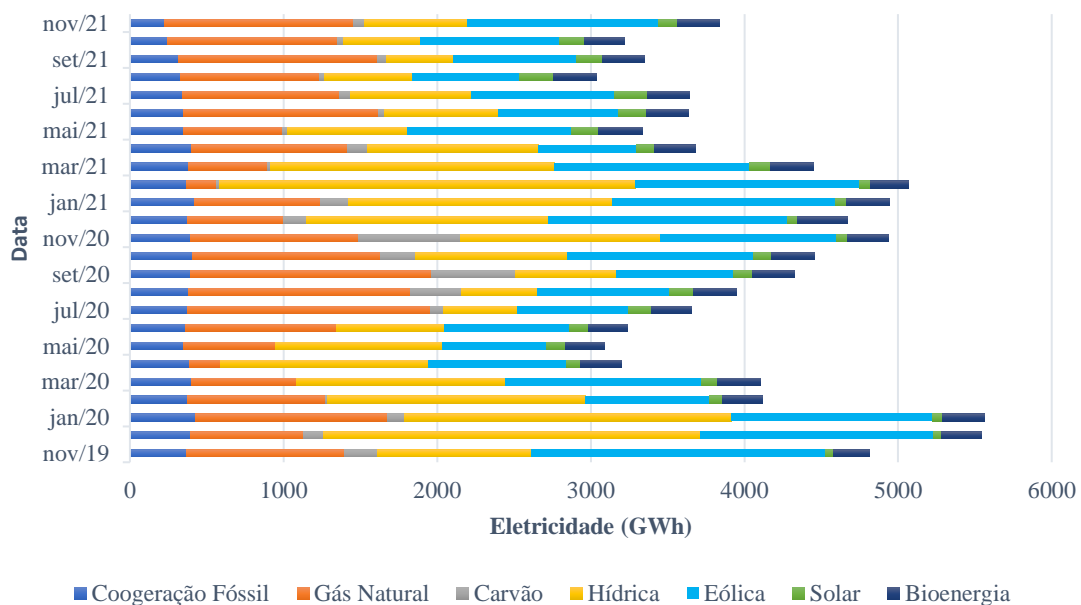


Figura 2 - Evolução da Produção de Eletricidade por Fonte em Portugal Continental (APREN, 2021).

De acordo com a REN (Redes Energéticas Nacionais) “A maior utilização dos recursos endógenos e renováveis portugueses para a produção de eletricidade tem alterado a composição da produção de eletricidade em Portugal e tem, consecutivamente, desempenhado um papel cada vez mais determinante na satisfação do consumo.” Na Figura 3 apresenta-se a evolução da produção elétrica em Portugal Continental, entre 2000 e 2020.

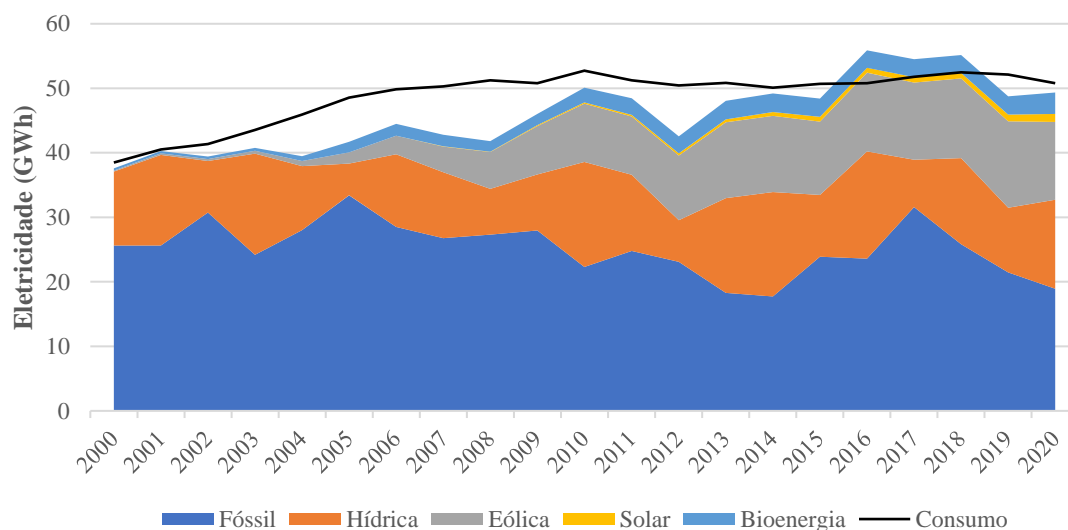


Figura 3 - Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental (APREN, 2021).

Com o cenário atual da matriz energética portuguesa é possível acreditar num futuro promissor para as fontes de energias renováveis, as quais têm vindo a desempenhar um papel importante na redução da dependência em relação aos combustíveis fósseis.

Aumentar a utilização de fontes de energia renováveis é uma prioridade na agenda política da maioria dos estados-membros da União Europeia. Utiliza-se a biomassa para satisfazer uma variedade de necessidades energéticas, entre elas a produção de eletricidade, aquecimento doméstico, abastecimento de veículos e fornecimento de calor em processos industriais (Faria, 2016).

1.1. Objetivos

O desenvolvimento mundial ocorrido nas últimas décadas desencadeou um crescente interesse em tecnologias alternativas à economia do petróleo, devido ao aumento do preço e escassez de recursos petrolíferos. Neste contexto, a biomassa aparece como uma alternativa promissora face aos combustíveis fósseis para a produção de energia considerada mais limpa, evitando alguns constrangimentos a nível ambiental, pois é renovável, neutra em CO₂ e tem potencial para participar do fornecimento seguro de energia.

Assim, o principal objetivo da presente dissertação é a elaboração de uma revisão bibliográfica aprofundada sobre as tecnologias de conversão termoquímica da biomassa, maioritariamente baseadas em processos de pirólise e gaseificação.

1.2. Estrutura do relatório

A presente dissertação inicia-se com um enquadramento sobre a biomassa e as suas diferentes fontes. No segundo capítulo apresenta-se um breve resumo das propriedades da biomassa como combustível e, seguidamente, no terceiro capítulo aborda-se o potencial da biomassa globalmente na Europa, em Portugal e em Cabo Verde. No quarto capítulo referem-se os principais processos termoquímicos de conversão da biomassa (Liquefação, Combustão, Pirólise e Gaseificação). Por fim no quinto capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os processos de pirólise e gaseificação da biomassa, onde se apresentam alguns dos estudos mais recentes relacionados com esta área.

2. Biomassa

A biomassa é considerada por muitos uma alternativa para o futuro, um futuro em que a Humanidade não dependerá dos combustíveis fósseis. A biomassa é garantia de futuro sem apagão.

2.1. Biomassa como bioenergia

A biomassa, em particular a madeira, é a forma de energia mais antiga utilizada pelos seres humanos. Tradicionalmente, é utilizada através da combustão direta, processo que é amplamente utilizado em muitas partes do mundo (Demirbas, 2009).

Na União Europeia (UE) a biomassa por ser definida como “a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos” (Diretiva 2009/28/CE).

A biomassa é utilizada como matéria-prima para a produção de biocombustíveis e inclui uma vasta gama de materiais colhidos da natureza ou porção biológica de resíduos. O exemplo mais típico é a madeira (lenha, resíduos de madeira, ramos de árvores, tocos, pellets de madeira, etc...), que constitui a maior fonte de biomassa. Outros exemplos de biomassa são a erva, bambu, milho, cana-de-açúcar, resíduos animais, lodo de esgoto e algas. A utilização da biomassa como combustível é considerada neutra em carbono, uma vez que o carbono foi aprisionado da atmosfera durante o ciclo de vida da biomassa (Eurostat, 2019). As plantas e árvores fazem com que o dióxido de carbono (CO₂) seja removido da atmosfera e armazenado à medida que crescem. A queima de biomassa nas habitações, em processos industriais, na produção de eletricidade ou para o transporte, devolve o CO₂ retido à atmosfera. Com o crescimento de novas plantas e árvores o ciclo do carbono atmosférico é mantido em equilíbrio, através da reabsorção deste CO₂. É de extrema importância a gestão sustentável das fontes de biomassa para assegurar que o ciclo do carbono não seja rompido (BCDS, 2007).

A biomassa pode ser classificada segundo a sua origem, dividindo-se em três categorias distintas (Singh *et al.*, 2014; Marques, 2015):

- Biomassa primária: recursos provenientes diretamente da natureza, tais como resíduos florestais ou agrícolas;
- Biomassa secundária: resíduos resultantes do processamento físico, químico ou biológico de recursos primários;
- Biomassa terciária: resíduos biodegradáveis produzidos pelo homem e pelos animais.

Segundo a UE existe um amplo leque de biomassa que pode ser utilizada para a produção de biocombustíveis derivados de produtos agrícolas e florestais bem como de resíduos e detritos da silvicultura e das indústrias silvícola e agroalimentar (Diretiva 2003/30/CE).

2.2. Tipos de biomassa

Em relação à sua utilização energética, pode ser dividida em duas partes: a primeira, chamada biomassa tradicional, refere-se à biomassa sólida queimada de forma ineficiente, por norma poluente, utilizada para fornecer energia térmica para cozinhar, conforto e processamento agrícola e industrial em pequena escala, geralmente utilizada nas zonas rurais dos países em desenvolvimento; a segunda, chamada biomassa moderna, é aproveitada através da combustão eficiente da biomassa no estado sólido, líquido ou gasoso para aplicações modernas, abrangendo desde pequenos eletrodomésticos residenciais de alto rendimento até instalações industriais de conversão de energia - geração de eletricidade, sistemas que combinam produção de calor e energia, e combustível para automóveis (REN21, 2014).

As fontes de biomassa diferenciam-se de acordo com as suas características ou origens. Deve-se considerar estas diferenças sempre que se pretenda utilizá-las enquanto fonte eficiente para a produção de energia.

2.2.1. Biomassa florestal

De acordo com Netto (2008) a biomassa florestal refere-se a toda a matéria florestal que possa ser utilizada para fins energéticos. Cabem nesta definição a rolaria, os cepos, os ramos e as folhas, embora nem todas estas frações sejam ou devam ser utilizadas. A biomassa florestal residual (BFR) consiste na fração da biomassa florestal que é produzida como um resíduo das operações de exploração florestal (podas, desbastes, cortes, etc.) e refere-se aos topos, ramos, incluindo folhas ou agulhas, e cepos.

Esta classe de biomassa tem um teor energético associado à celulose e à lenhina contidas no material e ao baixo teor de humidade. É utilizada no aproveitamento energético final sobretudo através das vias tecnológicas mais simples de transformação termoquímica, como a combustão direta e a carbonização, mas também se utilizam vias mais complexas para a geração de combustíveis líquidos e gasosos, tais como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro (um subproduto da indústria da celulose), entre outros (Cardoso, 2012).

Essencialmente, a biomassa florestal consiste em hidratos de carbono (celulose e hemicelulose) e lenhina, o qual lhe confere propriedades que a tornam num excelente combustível para processos de conversão de biomassa em bioenergia. Dado o grande número de espécies florestais existentes, tanto a composição química como as propriedades básicas da biomassa florestal são bastante

variáveis. A tabela seguinte apresenta as composições médias das madeiras macias e duras, no entanto é importante ter em atenção que estes valores variam entre espécies e até mesmo entre partes da árvore (Marques, 2016; Fonte *et al.*, 2017).

Tabela 1 - Valores médios da composição química da madeira (Marques, 2016).

Tipo de madeira	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lenhina (%)
Macia (gimnospermas)	45	25	30
Dura (angiospermas)	42	38	20

Tradicionalmente, considera-se que a lenha é a forma pura mais utilizada para produzir energia térmica em residências, porém com o avanço da tecnologia desenvolveram-se equipamentos industriais e domésticos os quais utilizam como matéria-prima a biomassa florestal em forma processada, tais como caldeiras e fogões. Para estes novos equipamentos, as matérias-primas mais utilizadas são aparas de madeira, pellets e briquetes, sendo as duas últimas formas processadas de biomassa florestal (Marques, 2016).

2.2.2. Briquetes e Pellets

As tecnologias de briquetagem e pelletização permitem transformar a biomassa na sua forma triturada em blocos compactos de várias dimensões e prontos para serem queimados em fornos, caldeiras, lareiras e fogões (Embrapara, 2012).

Ambos os processos são de densificação da energia da biomassa, e também são processos de conversão de resíduos em combustível sólido. Empregam-se na geração de energia sob a forma de calor ou eletricidade. As dimensões dos pellets podem variar entre 4 mm e 10 mm, enquanto o briquete tem um diâmetro a partir de 50 mm. A pelletização é considerada um processo de extrusão com maior exigência do que o processo de briquetagem, já que as prensas são mais exigentes e o processo mais seletivo com os resíduos (APREN, 2018). Na Tabela 2 está apresentada uma comparação das características dos pellets e dos briquetes e na Tabela 3 uma comparação entre as fontes de biomassa sólida.

Tabela 2 - Características dos pellets versus briquetes (Smartfire, 2020).

Características	Pellets	Briquetes
Matéria-prima	Madeira triturada e seca ou resíduos agrícolas triturados e secos	
Forma	Cilíndrica – Ø 6 a Ø 12 mm e comprimento 4 a 5 vezes o Ø	Cilíndrica – Ø entre 80 e 90 mm ou paralelepípedica – 150x70x60 mm
Estrutura	Firme, robusta	Relativamente quebradiça, frágil
Densidade	650 – 700 kg/m ³	650 e 1200 kg/m ³
Aspetto	Macio	Áspero
Transporte	Sacas	Unidades, paletes
Manuseamento	Uso manual ou automático	Utilização manual
Poder calorífico	16 – 17 MJ/Kg	16 – 17 MJ/Kg
Humidade	7 – 12%	7 – 12%
Cinzas	Máximo de 0,5%	0,2%

Tabela 3 - Comparação entre as fontes de biomassa sólida (Barbosa, 2008).

	Pellets	Briquetes	Carvão vegetal	Estilha	Lenha
Comprimento (mm)	< 50	< 500	< 120	< 70	--
Diâmetro/ Largura (mm)	4–10	80–90	< 40	< 50	--
Densidade (kg/m³)	1–1,4	1–1,4	0,34	0,25–0,35	0,3–4
PCI (MJ/kg)	17,5–19,5	17,5–19,5	33	10	10,3
Teor de humidade (%)	< 12	< 12	5	40%	40%
Cinzas (%)	< 1,5	< 1,5	4	5	5
Custo (€/kWh)	0,036	0,036	0,070	0,023	0,023

Os combustíveis densificados têm como principal vantagem a sua conveniência, visto que ao terem dimensões uniformes podem ser facilmente empilhados, facilitando o seu correto armazenamento e manuseamento. Além disso, existem outras vantagens, como o facto de serem o combustível sólido mais limpo, uma vez que têm emissões muito baixas durante a sua conversão

energética. A sua combustão é muito mais eficiente e liberta muito menos fumo do que a lenha normal, devido à redução das humidades. Cada tonelada de pellets para aquecimento produz aproximadamente a mesma energia que uma tonelada e meia de lenha (Embrapara, 2012).

2.2.3. Resíduos sólidos

Entende-se por resíduos sólidos qualquer material que tenha sido descartado. Inclui resíduos resultantes das atividades humanas e animais, em geral sólidos, não utilizados ou indesejáveis pelo seu detentor, mas com capacidades de recuperação.

A fim de melhorar e otimizar as atividades de gestão de resíduos, é necessário implementar um sistema de classificação de resíduos que beneficie a saúde pública e o ambiente. Os diversos parâmetros relativos à classificação dos resíduos incluem o seu estado físico (sólido, líquido ou gasoso), sua natureza química (orgânica ou inorgânica), sua distribuição espacial (dispersa ou concentrada), pelo tipo de material constituinte (papel, vidro, metal, etc.), e suas propriedades em relação ao sistema (compostável, combustível, reciclável), entre outros (Russo, 2003).

Quanto aos resíduos sólidos (Figura 5), classificam-se geralmente quanto à natureza ou origem e aos potenciais riscos de contaminação do ambiente, dependendo do seu potencial de perigo (inertes, perigosos e não perigosos) (Graça, 2015).

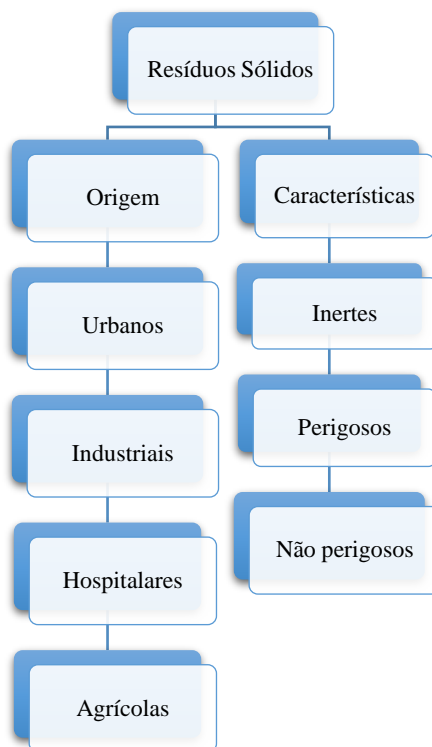


Figura 4 - Esquema com a classificação dos resíduos sólidos (Graça, 2015).

2.3. Propriedades da biomassa como combustível

É fundamental ter conhecimento sobre as propriedades de um material, uma vez que, a partir do seu conhecimento, podemos identificá-lo sob um determinado contexto, assim como saber como se comportam em determinados momentos.

As propriedades inerentes à fonte de biomassa determinam tanto a escolha do processo de conversão como quaisquer dificuldades de processamento posteriores que possam surgir. Do mesmo modo, a escolha da fonte de biomassa é influenciada pela forma em que a energia é necessária e é a interação destes dois aspetos que permite a introdução de flexibilidade na utilização da biomassa como fonte de energia (McKendry, 2002; Obernberger, 1998).

Na seleção de um processo de conversão, as propriedades da matéria-prima são um dos fatores mais importantes. Quando o objetivo é a conversão da biomassa em energia térmica, as principais propriedades a considerar são (Dermibas, 2009; McKendry, 2002; Castro, 2016):

Poder calorífico – É considerado como o calor libertado na combustão completa por unidade de massa, volume ou mole de combustível (normalmente kJ/kg, kJ/m³ ou kJ/mol). O Poder Calorífico Superior (PCS) consiste na quantidade de calor produzido por 1 kg de combustível, no momento da sua combustão, em excesso de ar, e os gases da descarga são arrefecidos de forma que o vapor de água nele contido seja condensado. Enquanto o Poder Calorífico Inferior se trata da quantidade de calor produzido por 1 kg de combustível, ao entrar em combustão com ar em excesso e os gases de descarga são arrefecidos até ao ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.

Na Tabela 4 apresenta-se o PCS de algumas fontes de biomassa. Em geral, encontram-se valores de PCS médios de 14 MJ/kg a 21 MJ/kg para diversas fontes de biomassa. O valor calorífico médio superior das madeiras é de 18,8 MJ/kg (Dermibas, 2009).

Tabela 4 - Análise imediata e poder calorífico para diversas fontes de biomassa (Junior, 2015).

Biomassas	MV (%)	CF (%)	CZ (%)	U (%)	PCS (MJ/ kg)
Eucalipto (Folhas)	67,75±5,01	20,19±2,77	5,55±2,24	6,5±1,2	19,33±1,6
Willow (árvore)	69,2±5,08	15,55±11,99	6,17±3,7	9,08±1,45	18,79±0,4
Poplar (árvore)	74,04±0,36	15,42±1,14	2,63±0,87	7,91±1,65	18,57±0,17
Pinus (árvore)	76,5±2,45	14,45±0,41	0,89±0,13	8,61±1,91	19,38±0,35
Palha de arroz	61,1±2,51	15,54±1,36	15,25±2,64	8,11±1,51	14,66±0,71
Palha de trigo	63,96±7,29	14,96±1,49	12,25±9,02	8,63±2,03	16,56±1,05
Palha de milho	62,74±6,15	14,83±2,13	13,12±8,79	9,21±2,05	16,64±0,38
Soja	68,95±1,74	15,62±0,17	6,08±1,1	9,34±1,88	16,96±0,62
Casca de amendoim	61,64±1,9	16,85±0,71	12,15±3,02	9,36±0,41	18,62±0,21

Densidade a granel: esta propriedade encontra-se diretamente relacionada com os custos de transporte e armazenamento. Quanto maior for a densidade a granel, maior será a possibilidade para usufruir de economias de escala no transporte e armazenamento, reduzindo assim os custos associados (McKendry, 2002; Junior, 2015).

Teor de humidade: é muito influente no comportamento dos processos de conversão (especificamente o processo de combustão e gaseificação), na temperatura adiabática do processo bem como no volume de gases produzidos. Seu valor varia em função do tipo de biocombustível e pode oscilar entre 10 e 70%. Há uma relação negativa entre o poder calorífico, humidade e as cinzas. Durante a combustão, a humidade tem uma forte influência no poder calorífico, podendo atingir o dobro para a biomassa no estado seco (Junior, 2015).

Teor de cinzas: São resíduos sólidos provenientes da combustão da biomassa. O teor de cinzas e contaminantes, cuja percentagem pode atingir até 20%, afeta na escolha do processo de conversão a adotar, visto que, particularmente no processo de combustão, pode conduzir a alguns problemas operacionais, como a formação de escória e escamas, reduzindo assim o rendimento do processo e aumentando os custos operacionais associados. Devido ao aumento do teor de cinzas, ocorre uma redução considerável do poder calorífico disponível (McKendry, 2002).

Teor em metais alcalinos: O facto de os metais alcalinos reagirem com as cinzas resultantes da combustão da biomassa originam um líquido de alta viscosidade, facto que pode ter algumas consequências negativas por exemplo, o entupimento dos tubos do equipamento utilizado (Junior, 2015).

3. Potencial da biomassa

O aumento da conscientização dos países na busca por combustíveis alternativos que minimizem a emissão de poluentes tem contribuído para que sejam desenvolvidos combustíveis a partir de biomassa renovável, fazendo com que a procura por tecnologia nessa área cresça rapidamente.

3.1. Global

No século XX, a produção energética dependia essencialmente dos combustíveis fósseis, representando ainda cerca de 80% de toda a energia produzida no mundo no início do século XXI: 24,59% para o carvão, 35,03% para o petróleo e 20,44% para o gás natural. As fontes de energia hidroelétrica, nuclear, solar, eólica, geotérmica e pequenas centrais hidroelétricas em conjunto representavam 10% da produção de energia. Os restantes 10% provinham da biomassa: 8,40% sob a forma de biomassa tradicional que era utilizada de forma primitiva e insustentável pelas populações pobres de África, Ásia e parte da América Latina, que cortavam árvores para aquecer ambientes e cozinhar, e os restantes 1,91% foram utilizados como formas modernas de energia, tais como o carvão vegetal e o etanol combustível (Goldemberg et al., 2008).

A procura pelo petróleo, incluindo biocombustíveis, teve um crescimento de 0,8% em 2019, ou 0,8 milhões de barris diários (mb/d), liderada pelo crescimento na China (Figura 6). A procura de carvão reduziu em 1,7%, uma vez que a produção de eletricidade a partir de centrais elétricas à base de carvão registou a maior queda de sempre, uma vez que o carvão tem sido desafiado pelos preços baratos do gás e pela crescente expansão das energias renováveis e da energia nuclear.

Segundo a International Energy Agency (2019) houve uma diminuição da procura de energia na União Europeia de 2% em 2019, uma vez que a utilização de carvão diminuiu 19%, impulsionada pelas tendências no setor da energia. Verificou-se também uma diminuição marginal da procura de petróleo, por três razões principais. Os níveis de produção industrial diminuíram desde 2018. A eficiência média dos automóveis da UE continuou a melhorar, embora a um ritmo mais lento, à medida que a quota dos utilitários esportivos nas vendas continuou a crescer. E a utilização de automóveis elétricos reduziu a procura de petróleo em 15.000 barris por dia (kb/d).

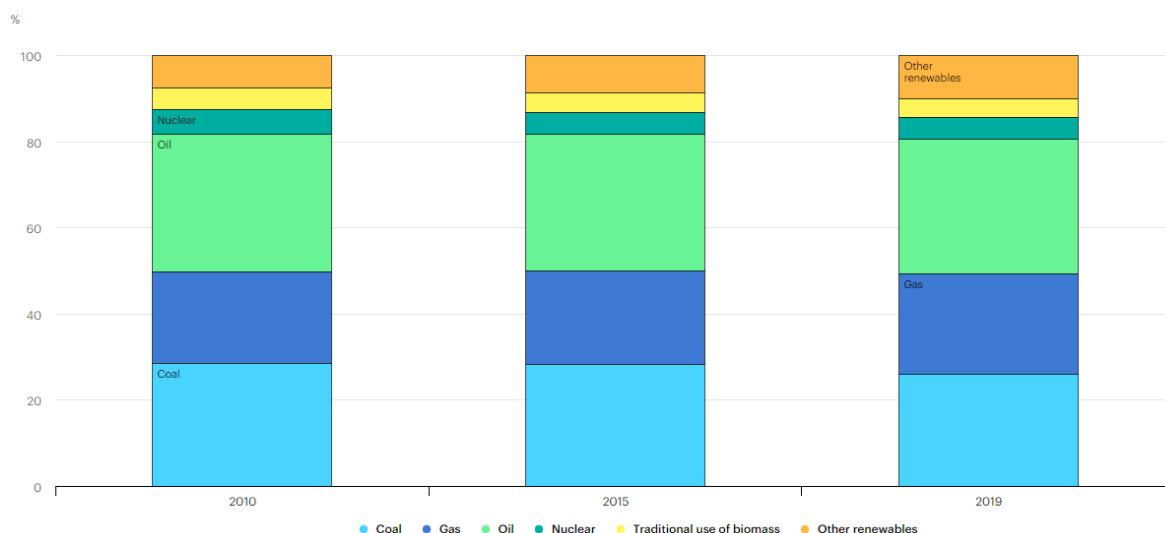


Figura 5 - Percentagem da procura total de energia primária por combustível, entre 2010-2019 (IEA, 2019).

O crescimento das energias renováveis registou o maior crescimento absoluto e a taxa de crescimento mais rápida em 2019, tendo aumentado a sua utilização global em 75 Mtoe ou 3,7%. Sendo que o uso da biomassa tradicional em 2019 foi de 4%, o que representou uma diminuição face ao ano de 2015 que teve um total de 5%. A energia eólica e solar fotovoltaica (PV) sofreram mais um ano de crescimento de dois dígitos, embora o crescimento solar PV tenha abrandado. Embora a utilização de energias renováveis se tenha expandido em quase todas as regiões, mais de 40% do crescimento global na produção de eletricidade a partir de energias renováveis concentrou-se na China (IEA, 2019).

As culturas energéticas florestais fazem parte do futuro da bioenergia. A bioenergia será cada vez mais desenvolvida através das culturas energéticas e a contribuição dos resíduos florestais diminuirá progressivamente. As culturas energéticas florestais, tais como salgueiro, choupo ou eucalipto, fazem parte de sistemas de produção intensiva de biomassa e caracterizam-se por ciclos de corte curtos, entre um e seis anos. Tais sistemas permitem, para além de uma maior mecanização das operações, gerir com maior facilidade a sustentabilidade e reduzir a pressão sobre a exploração da biomassa florestal residual (Netto, 2008).

Apesar do facto que a área florestal global tem vindo a diminuir nos últimos anos (tendo passado de 31,6% da superfície terrestre em 1990 para 30,6% em 2015), verifica-se que a taxa de perda tem sido menos significativa do que no passado. Em algumas regiões da Europa, Ásia e América do Norte, a área florestal tem aumentado, ajudando a compensar o declínio global. A taxa de perda permanece, no entanto mais significativa nos países em desenvolvimento (África Subsaariana, América Latina e Caraíbas), devido à conversão das áreas florestais em áreas agrícolas e urbanas (Agroportal, 2020).

3.2. Europa

Na medida em que a bioenergia permanece no topo da agenda política da União Europeia, e com a opinião geral a reconhecer o papel importante que esta forma de energia pode desempenhar na consecução das metas estabelecidas na estratégia 20-20-20 para 2020, aspetos como a disponibilidade e avaliação do recurso nos diferentes estados-membros têm suscitado um interesse crescente nos círculos científicos. Não surpreende, portanto, que nos últimos anos têm surgido vários estudos que procuram clarificar e consolidar posições sobre o assunto. Entre as questões ponderadas, encontram-se o potencial real da bioenergia na Europa e especificamente em cada um dos diferentes estados-membros, e os tipos de biomassa disponíveis atualmente.

Na Figura 6 estão representadas as metas dos Estados-membros para a introdução de renováveis no consumo final de energia: valores atingidos em 2017 e metas para 2030, em %.

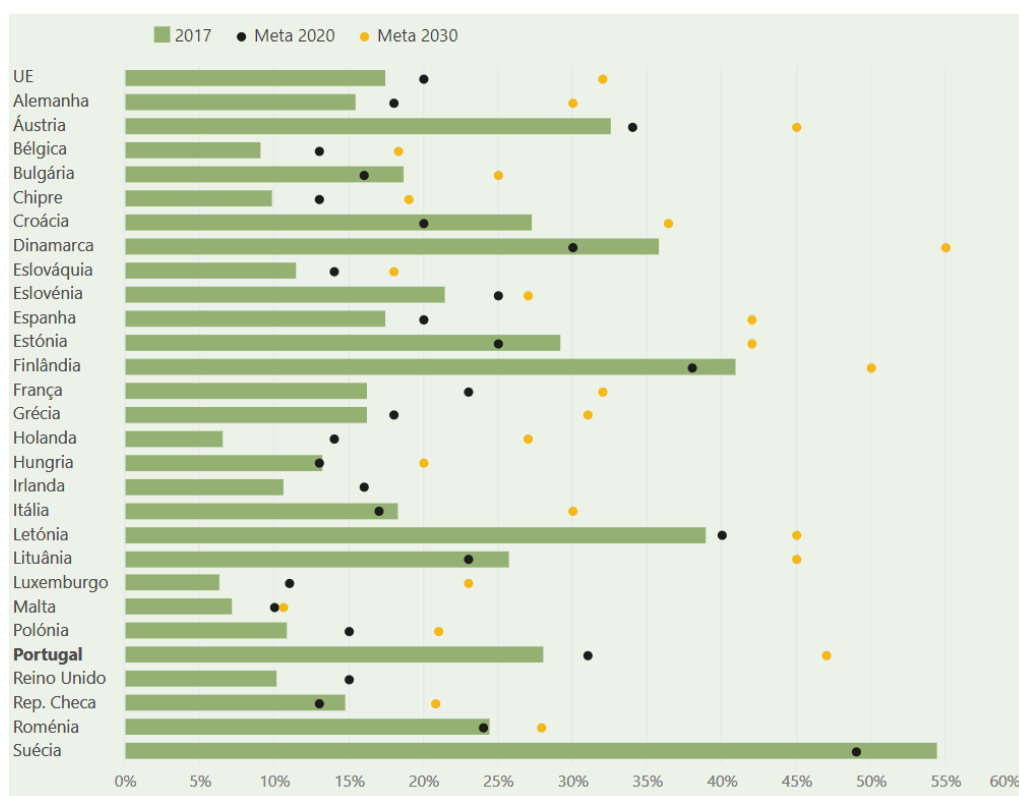


Figura 6 - Metas globais para o uso das energias renováveis (2020 e 2030) (Eurostat, 2021).

O uso da biomassa tem aumentado em várias regiões do globo (Figura 7), como no caso de alguns países da Europa que nos últimos anos tiveram um crescimento significativo no consumo.

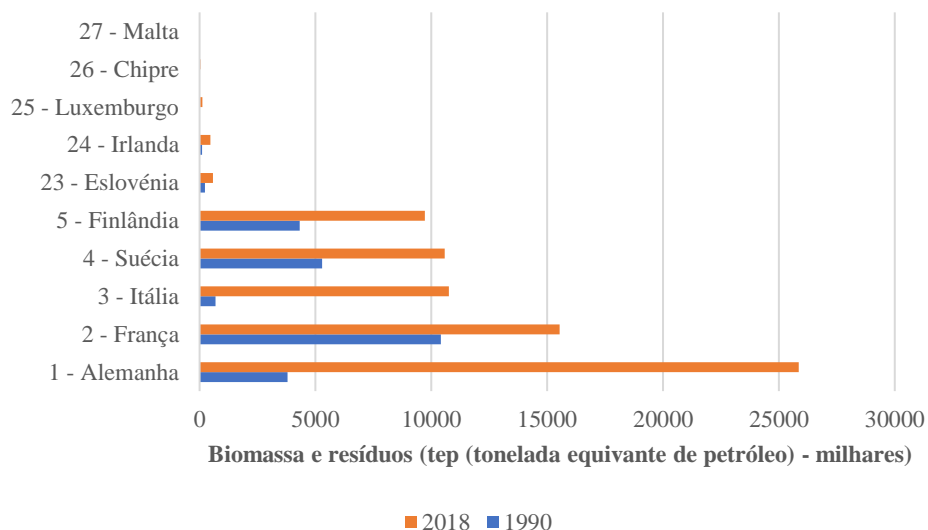


Figura 7 - Uso da biomassa em várias regiões do globo (PORDATA, 2020).

A Tabela 5 apresenta os valores da utilização da biomassa na união europeia e na zona Euro, conclui-se que desde 2010 a sua utilização aumentou aproximadamente 14% na UE27 (2020).

Tabela 5 - Produção primária por tipo de energia renovável (PORDATA, 2020).

Biomassa e resíduos			
Anos	UE27 (2020)	EU28	Zona Euro (19 Países)
2010	112626,2	117167,9	81321,2
2011	108693,3	113375,9	78013,1
2012	119098,5	124300,4	85803,8
2013	122794,9	128658,3	89480,9
2014	119978,8	126176,4	87809,4
2015	123981,7	130976,4	90175,3
2016	125234,4	132912,5	91056,9
2017	128253,6	136694,4	93963,3
2018	128189,5	137210,1	93808

3.3. Portugal

Em Portugal, as florestas produzem quantidades significativas de biomassa lenhosa para conversão energética. De acordo com os dados estatísticos as florestas portuguesas fornecem anualmente 9,3 milhões de toneladas de Biomassa Florestal Primária (produção florestal primária), sendo que apenas 763 mil toneladas, a biomassa relacionada com a lenha, podem ser utilizadas para a conversão energética, já que a biomassa primária se destina principalmente ao abastecimento da indústria nacional (serração, pasta de papel, outras) (Rego *et al.*, 2020). A

floresta portuguesa ocupa cerca de 38% do território. Esta percentagem evidencia perfeitamente o enorme potencial da biomassa florestal em Portugal.

Quanto aos resíduos agrícolas, sabe-se que a área agrícola representa cerca de 42% da área total de Portugal. Portanto, este é também um enorme recurso disponível para a obtenção de resíduos de biomassa. Tal como se pode ver, tanto em termos de recursos florestais como agrícolas, há uma vasta área no território português que poderia ser aproveitada (Nunes, 2012).

De acordo com o inventário florestal nacional (IFN6, 2015) verificou-se que as zonas florestais (floresta, matos e terras não produtivas) abrangem 6,2 milhões de hectares (69,4%) do território continental nacional. As áreas florestais, que incluem terras arborizadas e temporariamente desflorestadas (áreas cortadas, queimadas e em regeneração), constituem a principal ocupação do solo nacional (36%).

Durante o período entre 1995-2010 o uso do solo agrícola sofreu uma diminuição significativa (12%) e os espaços urbanos registaram um aumento na ordem dos 35%, sendo mais significativo no período 1995-2005 (26%), e mais reduzido entre 2005-2010 (7%) (Uva, 2015).

Já em 2015, verificou-se uma inversão da tendência de diminuição da área florestal, observada desde 1995, tendo este inventário registado um aumento de 60 mil hectares (1,9%) face a 2010 (data da última avaliação). Grande parte da floresta nacional é constituída por espécies florestais nativas (72%), embora algumas ocupem territórios maiores do que a sua origem geográfica (IFN6, 2015).

A distribuição das espécies na área florestal portuguesa até o ano 2015 é apresentada na Figura 8.

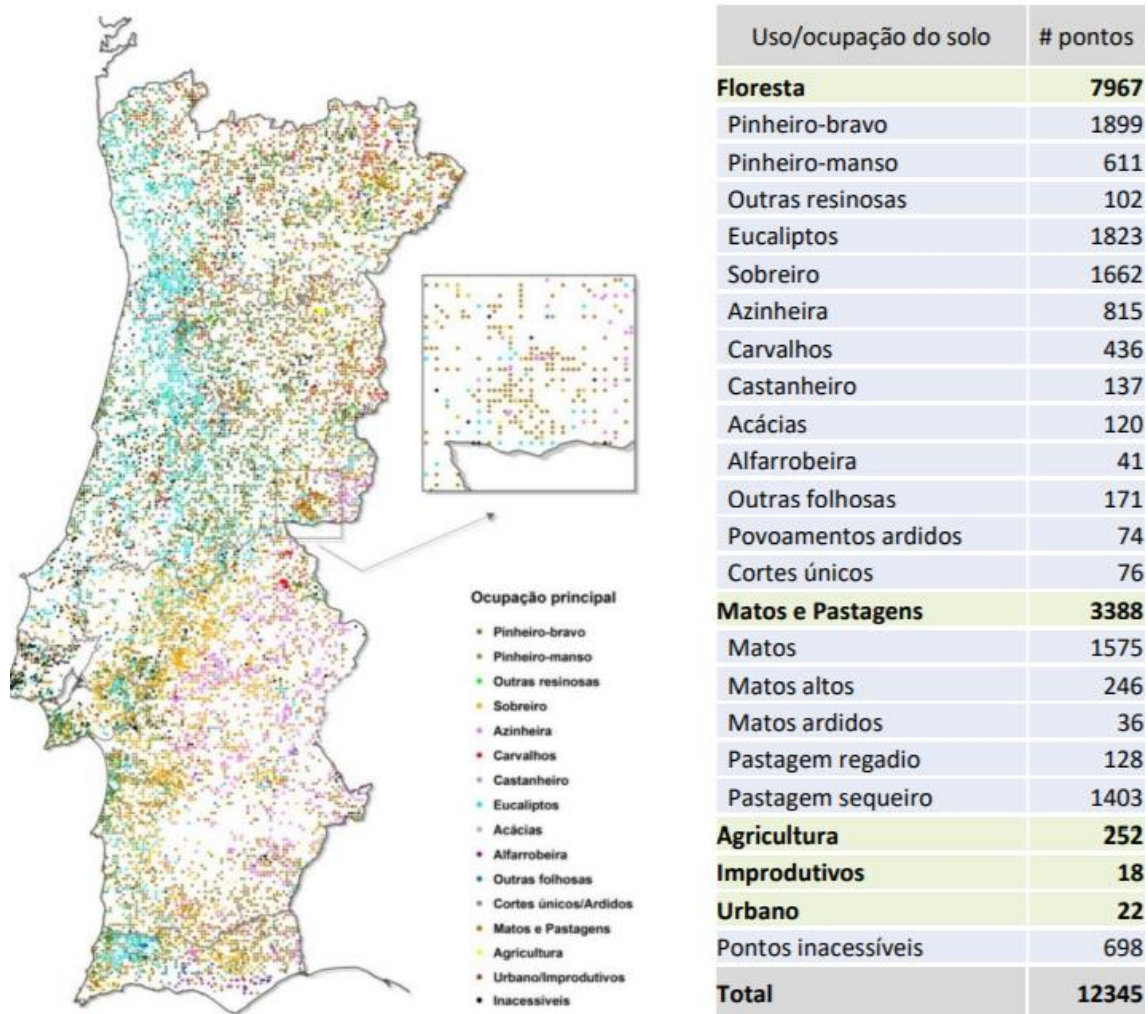


Figura 8 - Distribuição por uso/espécie florestal dos pontos de amostragem no terreno (IFN6,2015).

Segundo a 3.^a revisão do inventário florestal nacional (DGRF, 2001), as espécies com maior representatividade nas florestas portuguesas eram o pinheiro-bravo, o eucalipto e o sobreiro, e representavam 30%, 21% e 20% da área florestal em Portugal continental, respetivamente (Agroportal, 2020).

No decorrer dos anos tem havido uma redução progressiva da área do pinheiro-bravo com base nos dados de 2007 que correspondem a 31% da área florestal e, desde então, as áreas tem vindo a diminuir, principalmente para o eucalipto, a uma média de 6,5 mil hectares por ano. Em 2007, a área de eucalipto correspondia a 24% da área florestal, registou um aumento anual médio de 7,6

mil hectares (Infografia, 2020). Na figura seguinte pode ser observado a taxa de ocupação da floresta portuguesa das diferentes espécies.

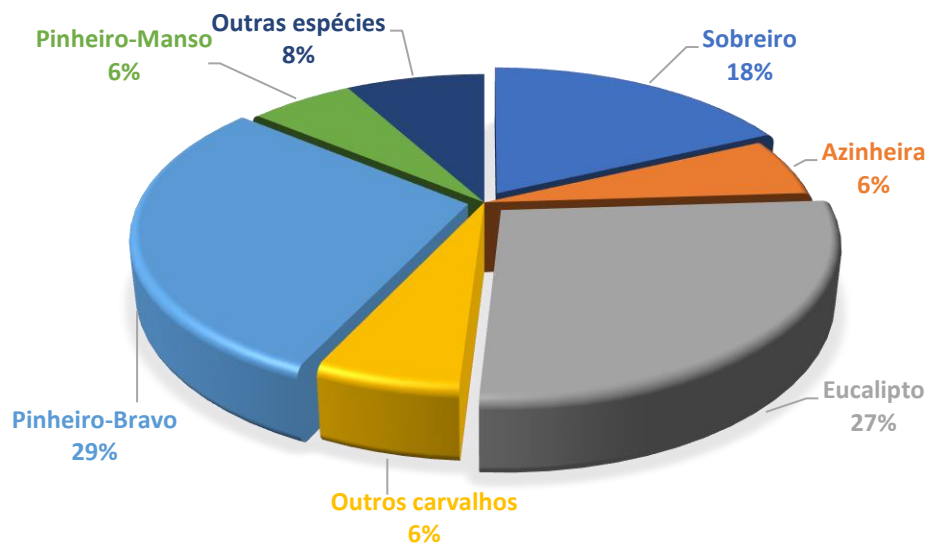


Figura 9 - Ocupação da floresta portuguesa em 2018 (Infografia, 2020).

Durante um horizonte temporal mais curto (2015-2018), houve uma perda de 1.600 hectares de floresta (0,05%), sobretudo nas zonas agrícolas e territórios artificiais.

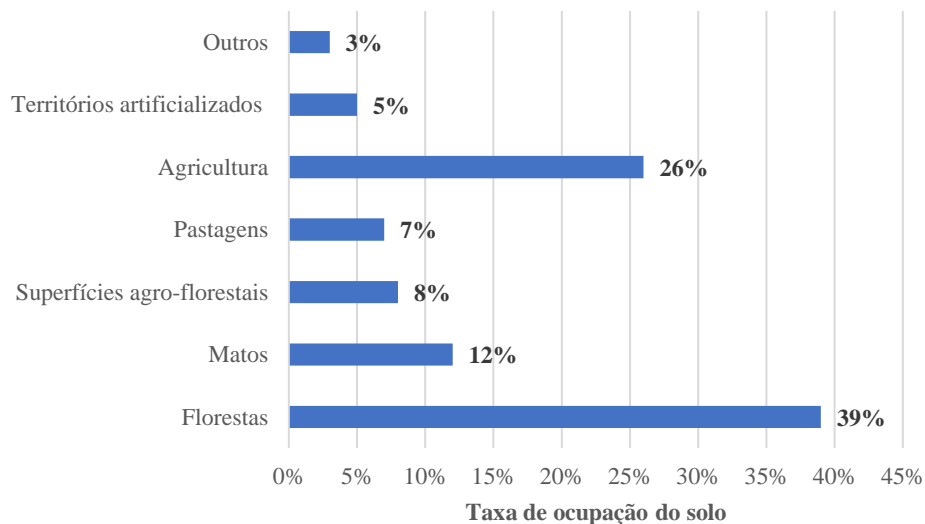


Figura 10 - Uso e ocupação do solo (Portugal continental) (Infografia, 2020).

No decorrer da história, a extensão da área florestal em Portugal tem variado muito (Fig. 11). Em 1874, a área florestal estimada era de cerca de 640.000 hectares, ou cerca de 7% da área total de

Portugal. Este valor reflete o processo de desflorestação para a construção naval nos finais do século XV e início do século XVI, bem como a necessidade de produzir alimentos, emigração e guerras. Com a criação das bases dos Serviços Florestais a partir de 1886, iniciou-se a reflorestação de áreas não cultivadas e o estabelecimento de dunas com pinheiros (Agroportal, 2020).

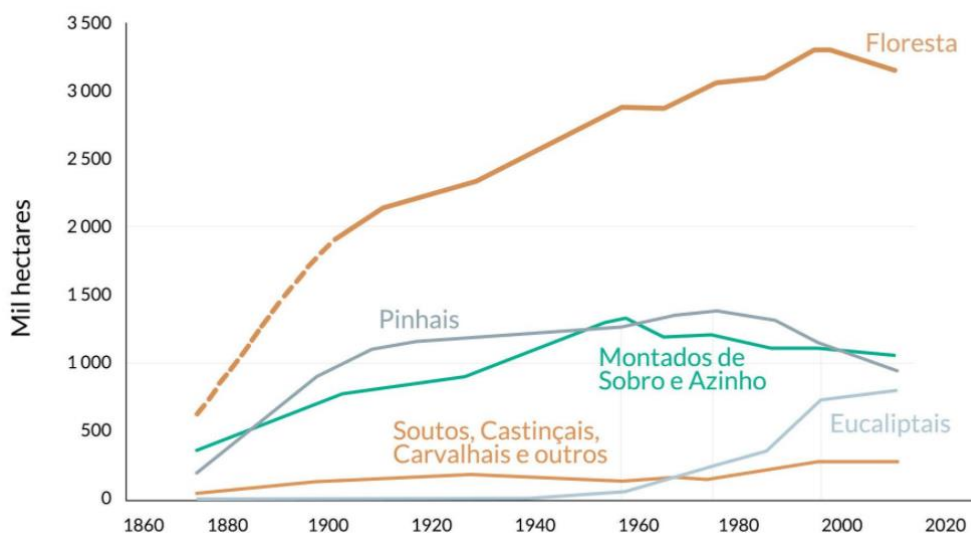


Figura 11 - Evolução histórica da área florestal, 1860 – 2020 (Agroportal, 2020).

Durante o século XX, a área florestal aumentou significativamente até aos anos 70 devido à plantação de pinheiros, bem como sobreiros e azinheiras e, desde os anos 50 o eucalipto. No ano de 1995, a área florestal atingiu 3,3 milhões de hectares (Agroportal, 2020)

Através da utilização de biomassa residual, é possível reduzir a dependência a nível nacional relativamente aos combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, incentivar a gestão das áreas florestais, reduzindo assim os riscos de incêndio (Agriterria, 2020).

A crescente procura pelas fontes de energia endógenas e renováveis como meio de produção de eletricidade alterou a composição do mix de produção de eletricidade em Portugal. A figura que se apresenta adiante mostra que a partir de 2005, as energias renováveis têm desempenhado um papel cada vez mais importante na demanda de eletricidade.

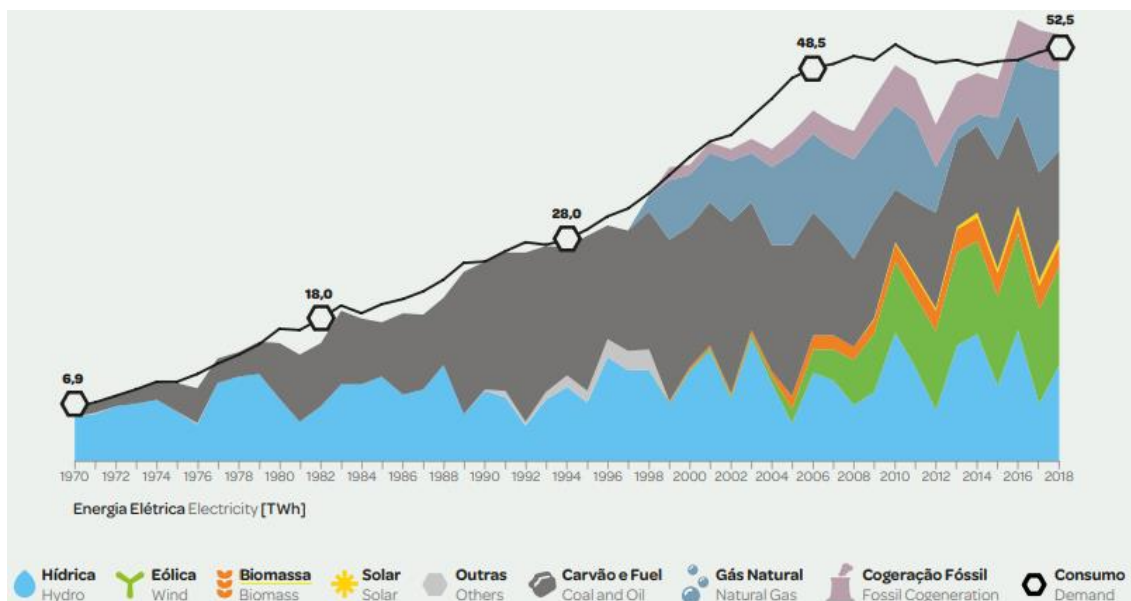


Figura 12 - Evolução da matriz elétrica portuguesa ao longo dos anos (1970-2018) (APREN, 2019).

A biomassa assegurou em 2010 mais de 50% da produção de energia renovável em Portugal tendo sido atingido o pico em 2012, ano em que a biomassa contribuiu com 60,1% do total. Tendo caído para 50,8% em 2013, entre 2015 e 2017, houve novamente uma tendência ascendente (Agriterra, 2020).

De acordo com a Direção Geral de Energia e Geologia (2020), no final do ano 2019, a contribuição das energias renováveis na matriz energética foi de aproximadamente 29% (Figura 13).

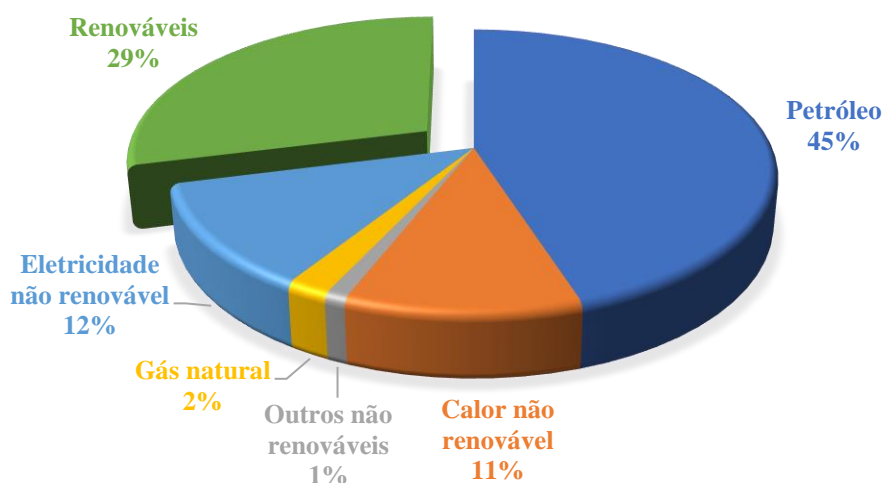


Figura 13 - Consumo de Energia Final 2019 (DGEG, 2020).

A biomassa continuou sendo uma das principais fontes de energias renováveis, tendo um contributo de 43% na produção de energia, a hidroeletricidade com 14% e a eólica com 20%, como pode ser observado na Figura 14.

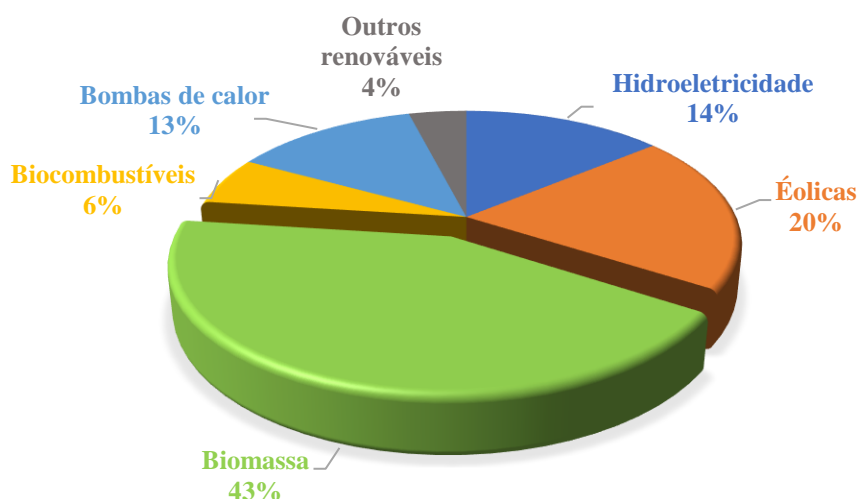


Figura 14 - O Contributo da Energia Renovável no Consumo de Energia Final 2019 (DGEG, 2020).

Pode concluir-se que o peso da biomassa é bastante relevante em Portugal, não só por ser uma energia mais antiga ou apenas propaganda, mas é de suma importância.

3.4. Cabo Verde

Em Cabo Verde, a dependência energética em relação ao exterior é elevada, razão pela qual é fundamental procurar soluções internas que possam aliviar a deficitária balança económica do país. O gasóleo (49%), a biomassa (lenha) (19%) e a gasolina (16%) foram as principais fontes de energia em 2008. O custo da energia é 70% superior à média da União Europeia, o que é explicado pela insularidade e deficiências no setor energético nacional. O aumento do preço do barril de crude é, portanto, uma ameaça que paira constantemente sobre a economia (SE4ALL, 2015).

As Figuras 15 e 16 ilustram a taxa de produção das diferentes fontes de energia ao nível nacional, comparando dados de todas as ilhas habitáveis de Cabo Verde.

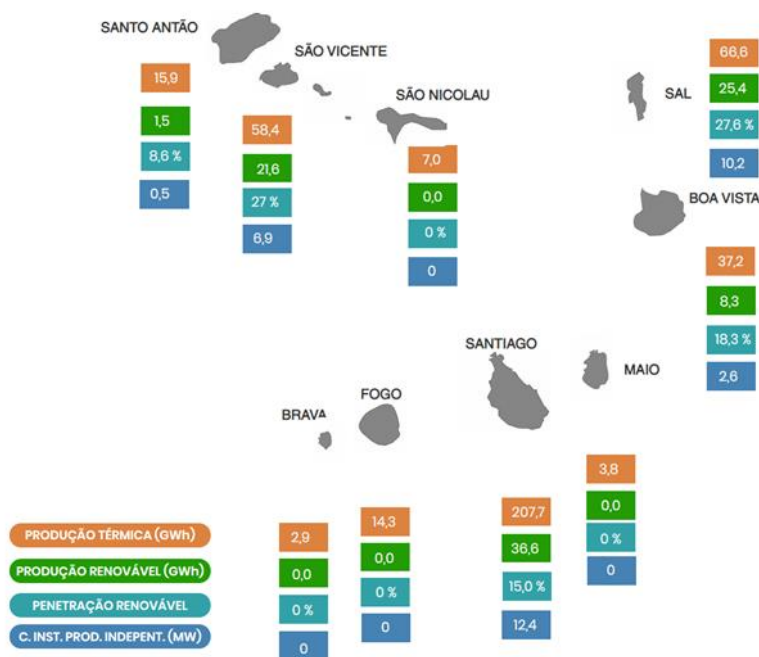


Figura 15 - Taxa de produção de energia em Cabo Verde (ER, 2020).

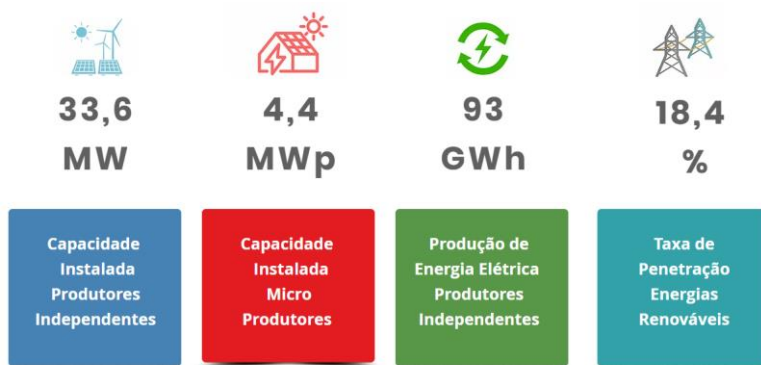


Figura 16 - Cenário atual em Cabo Verde (ER, 2020).

O cenário observado na figura anterior é bastante positivo comparado ao do ano 2003 (Figura 17) em que a percentagem de energias renováveis na matriz elétrica de Cabo Verde era bem menor do que na atualidade.

É possível crer que Cabo Verde estará numa posição de liderança no setor das energias renováveis o que, por si só, não só é uma mais-valia para um destino turístico sustentável, mas também terá um impacto económico significativo.

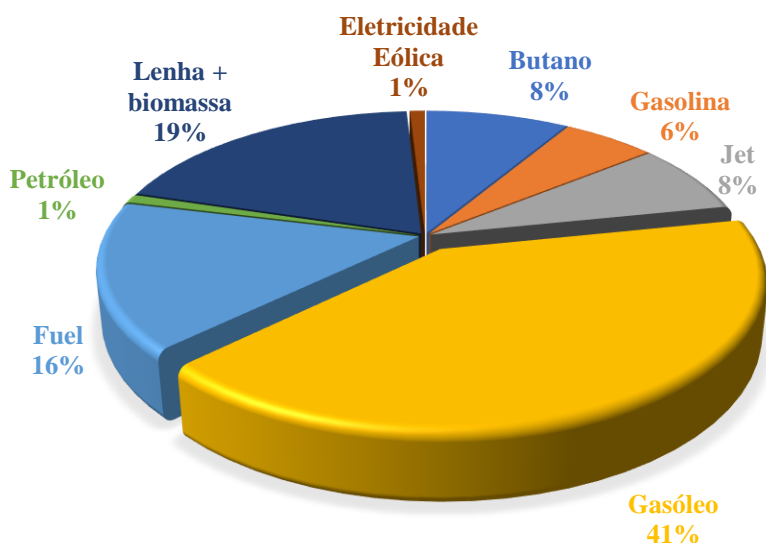


Figura 17 - Repartição do Consumo Interno Bruto de Energia em 2003 (SED, 2005).

A biomassa é um recurso escasso em Cabo Verde e a atual taxa de uso é superior á taxa natural de reposição. Em 2030, e no cenário eficiência, prevê-se que o uso de lenha no meio urbano será residual (inferior a 2%) e que, no meio rural, permanecerão ainda cerca de 10% das famílias com preferência pela lenha na cocção como pode ser observado na figura seguinte (Figura 18). Não se pretende eliminar a utilização de lenha, mas sim reduzi-la para que, por um lado, a sua utilização seja sustentável e, por outro, seja uma escolha para cada família e não a única opção. Parte desta redução seria consequência natural da urbanização. Esta redução, associada à eliminação do uso do fogão de três pedras (com redução do consumo específico para valores da ordem dos 50%), o consumo cairia das quase 90.000 toneladas em 2010 para um pouco mais de 17.000 toneladas em 2030 (SE4ALL, 2015)

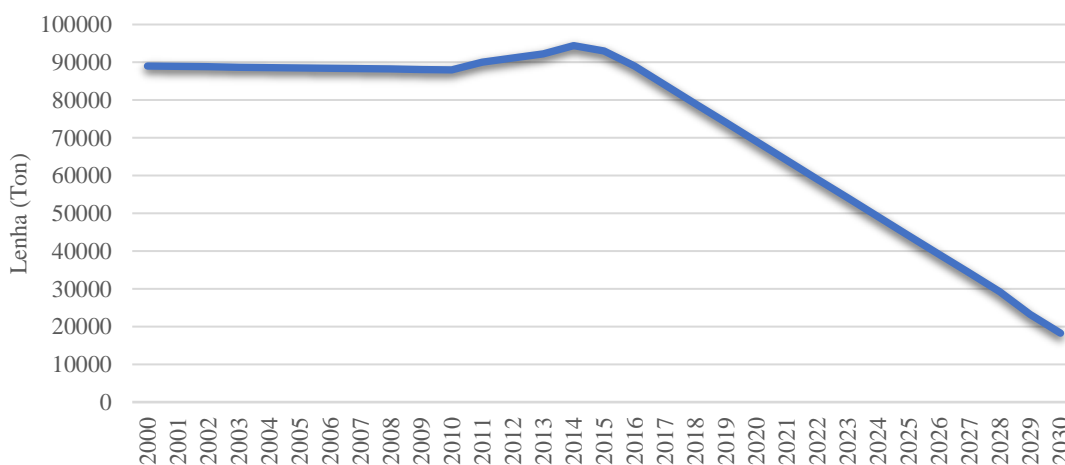


Figura 18 - Evolução da Procura Total de Lenha pelas Famílias em Cabo Verde (SE4ALL, 2015).

A produção de biocombustível pode também constituir uma fonte de rendimento alternativo para a população rural, podendo contribuir para a redução da pobreza, e melhores condições de vida em regiões carenciadas, sobretudo nos países não produtores de petróleo. De salientar que, atualmente, alguns países africanos estão na lista dos principais produtores mundiais de biocombustíveis (Correia, 2009). Recentemente, a aposta na energia eólica tem vindo a aumentar, estando prevista a construção de mais parques eólicos. A energia solar e a geotermia são outras vertentes em que se pretende apostar.

No que concerne aos biocombustíveis, a *Jatropha curcas*, conhecida em Cabo Verde como purgueira, é a única opção viável no arquipélago, onde subsiste há séculos, podendo ser aproveitada para extração do óleo e fornecer dividendos ao país. A pouca exigência em água e nutrientes coaduna-se com o solo semiárido, não existindo o problema de ocupação de solos aráveis que se adequariam a culturas alimentares. Pode ser fonte de rendimento para pequenos agricultores, servindo o óleo para exportação ou uso local (SE4ALL, 2015; Correia, 2009).

4. Conversão da biomassa

A conversão da biomassa é realizada através de vias tecnológicas e produtivas amplamente diversificadas, como pode ser observado na Figura 19. São várias as fontes, entre as quais a agrícola, silvícola, industrial, urbana e, consoante a viabilidade técnica e económica, mesmo as culturas cultivadas especificamente para este fim. De modo a tirar proveito da energia presente em tais fontes, foram desenvolvidos diversos processos de conversão, que são caracterizados de acordo com a natureza dos processos primários aplicados à biomassa em: termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos (Junior, 2015; Marafon, 2016).

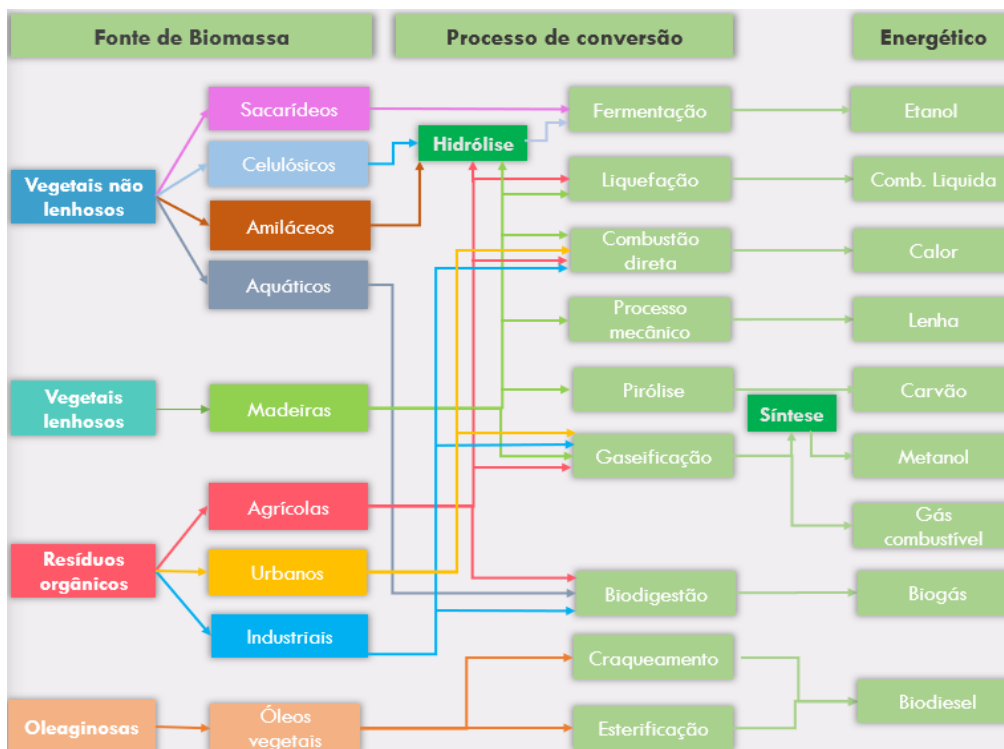


Figura 19 - Fontes de biomassa e seus processos de conversão (Marafon, 2016).

O aproveitamento da biomassa para geração de energia pode ser feito por meio de combustão direta, cogeração (produção combinada de energia térmica e mecânica), processos termoquímicos específicos (gaseificação, hidrólise, pirólise, craqueamento, liquefação e transesterificação) e/ou processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (Marafon, 2016).

A conversão caracteriza-se pelo tipo de conversão da fonte de energia, sendo dividida nos seguintes processos (Freitas, 2016):

- Conversão termoquímica - nesta classe estão inclusos procedimentos de combustão direta, gaseificação e pirólise;
- Conversão físico-química - que inclui a prensagem, extração e esterificação.

- Conversão bioquímica ou biológica - processo que inclui digestão anaeróbica, fermentação e os procedimentos de hidrólise.

4.1. Processos termoquímicos de conversão

A conversão termoquímica é de facto uma das formas mais eficazes de converter biomassa em biocombustível. Trata-se de um processo mais vantajoso em comparação com a via bioquímica devido à sua facilidade de manipulação de vários tipos de biomassa e é também uma das vias mais diretas, rápidas e simples do método de conversão. Neste processo, a decomposição térmica das matérias orgânicas ocorre a temperaturas muito elevadas, onde a biomassa se decompõe e forma bio óleos e gases. É um dos processos mais promissores, que se subdivide em quatro processos diversos, tais como torrefação, pirólise, gaseificação e processo hidrotermais (Chen *et al.*, 2015; Pritam *et al.*, 2021).

O esquema apresentado na Figura 20 descreve uma visão geral das conversões termoquímicas e as suas classificações. Novamente as principais classificações dividem-se em subclassificações tais como o processo de torrefação é ainda classificado como convencional, de micro-ondas, húmido e de torrefação oxidativa. Algumas das principais vantagens do processo de torrefação são a maior fiabilidade e estabilidade com facilidade de controlo. Maior custo operacional e tempo de residência são as limitações do processo. O processo hidrotérmico é outra subcategoria do processo termoquímico que se classifica em carbonização hidrotérmica, liquefação hidrotérmica e gaseificação hidrotérmica. A deposição sólida e a corrosão no reator são as principais desvantagens do processo devido às suas condições de funcionamento a temperaturas e pressões muito elevadas consideradas como críticas (Pritam *et al.*, 2021).

O processo de pirólise também é subdividido em quatro categorias, tais como processo lento, rápido, de micro-ondas e de pirólise catalítica. Um dos métodos mais rentáveis e altamente eficazes é o processo de pirólise rápida. Este processo é mais vantajoso em termos de armazenamento e transporte de combustíveis líquidos em comparação com outros processos, enquanto a pirólise lenta é vantajosa para aplicações de maior rendimento petrolífero. Contudo, a maior desvantagem do processo de pirólise lenta é o seu maior tempo de residência. Este processo requer um maior consumo de energia devido à menor taxa de aquecimento com tempo de residência elevado. Em comparação com todos os processos a pirólise por micro-ondas representa a maior eficiência energética devido ao seu menor consumo de energia e à menor produção de cinzas do que outros métodos (Chen *et al.*, 2015a; Pritam *et al.*, 2021).

Do mesmo modo, o processo de gaseificação é subdividido em processo convencional ou Gaseificação em água supercrítica. A principal vantagem do processo de gaseificação em água supercrítica é que o rendimento de H₂ vai aumentando à medida que aumenta a temperatura de

gaseificação. Este processo é um processo eficiente em termos energéticos, uma vez que a biomassa pode ser alimentada sem secagem, poupando-se assim os custos de secagem da mesma forma que o método de gaseificação hidrotérmica. A limitação relatada é que a eficácia da gaseificação diminui com o uso repetido de catalisadores durante o processo (Raheem *et al.*,2017).

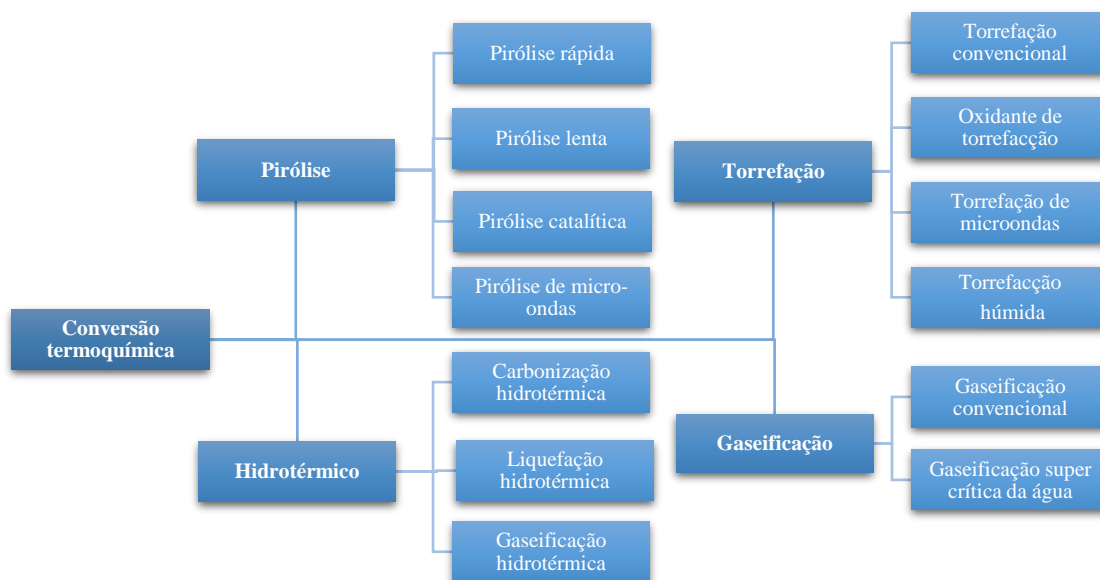


Figura 20 - Esquema do processo termoquímico e das suas classificações (Pritam *et al.*, 2021).

Nos processos termoquímicos utiliza-se uma fonte de calor para converter biomassa em biocombustíveis. Para espécies herbáceas de baixa humidade, tais como biomassa derivada de pastagens, vegetação lenhosa inadequada para a produção de madeira ou resíduos florestais e agrícolas, estes processos são adequados. A pirólise, a combustão e a gaseificação representam os processos termoquímicos abordados, visto que a quantidade de oxigénio presente no decorrer do processo é o fator que mais difere entre eles (Ferreira, 2015). Na Figura 21 apresenta-se um esquema resumido com os diferentes métodos de conversão termoquímica e depois uma breve explicação dos mesmos.

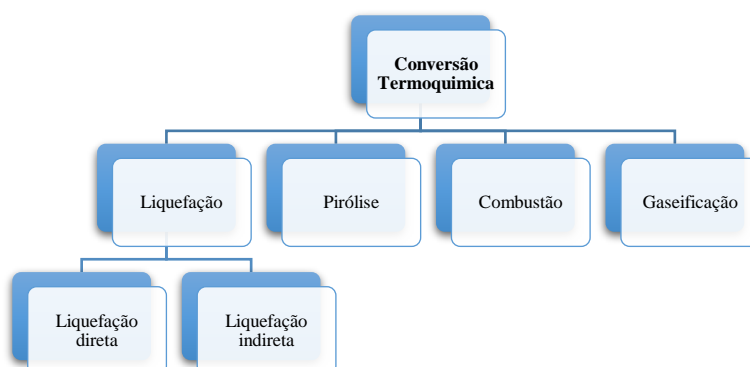


Figura 21 - Processos termoquímicos da conversão da biomassa (Moura, 2016)

4.1.1. Liquefação

A Liquefação designa um processo de transformação da biomassa, ou outras fontes de carbono fóssil, principalmente em produtos líquidos. É possível fazê-lo de duas maneiras: diretamente ou indiretamente. A última forma consiste em produzir gás de síntese (uma mistura de gases contendo principalmente hidrogénio, monóxido de carbono e frequentemente algum dióxido de carbono), através da gaseificação e com um catalisador, sendo transformado em metanol ou hidrocarboneto. Já na liquefação direta ocorre a conversão direta da biomassa em combustíveis líquidos, em que a reação se realiza em uma atmosfera redutora de hidrogénio ou mediante uma mistura de hidrogénio e monóxido de carbono.

A reação de despolimerização da biomassa, no processo de liquefação, é realizada na presença de um catalisador, sendo os fragmentos formados instáveis e reativos, polimerizam-se de forma simultânea formando assim o bio óleo. Por sua vez, o processo de pirólise de biomassa não envolve um catalisador e os fragmentos decompostos são transformados em bio óleo através de reações homogêneas que ocorrem na fase gasosa (Moura, 2016).

4.1.2. Combustão

O processo de combustão consiste na transformação da energia química dos combustíveis em calor, mediante as reações dos elementos constituintes com o oxigénio fornecido. A biomassa é queimada a altas temperaturas na presença de oxigénio, produzindo vapor a alta pressão. Este vapor é geralmente utilizado em caldeiras ou para mover turbinas, sendo a taxa de conversão de energia de 20-25% (Santos, 2008; Cardoso, 2012).

A combustão direta ocorre essencialmente para fins energéticos em fogões (cozinha alimentar), fornos (metalurgia, por exemplo) e caldeiras (geração de vapor, por exemplo). Embora seja muito prático e por vezes conveniente, o procedimento de combustão direta é geralmente muito ineficiente. Além disso, a elevada humidade (20% ou mais no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos, etc.) representam um outro problema de combustão direta, o que torna difícil o seu armazenamento e transporte (Cardoso, 2012).

Durante todo este processo, é fornecida uma quantidade suficiente de oxigénio a fim de atingir a combustão completa da biomassa. Em resultado desta combustão existe um gás de combustão com temperatura elevada composto principalmente de dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e azoto (N₂) (Cardoso, 2012).

4.1.3. Gaseificação

Em 1996 foram descobertas enzimas de duas formas de bactérias resistentes ao calor onde o gás hidrogénio é libertado a partir de moléculas de glicose, uma em montes de escória de carvão

queimado sem chama e outra em aberturas vulcânicas profundas no pacífico. A gaseificação é uma tecnologia termoquímica com alteração da estrutura da biomassa a altas temperaturas na presença de um agente de gaseificação, o que resulta numa maior produção de produtos gasosos e em pequenas quantidades de carvão, alcatrão e cinzas, sendo classificadas de acordo com o agente de gaseificação: ar, vapor, vapor de água e oxigénio, vapor, ar enriquecido com oxigénio, etc... (Rodrigues, 2019).

O processo de gaseificação pode ocorrer quer diretamente (utilizando ar ou oxigénio para produzir calor através de reações exotérmicas), quer indiretamente (utilizando uma fonte de calor externa).

Na gaseificação, a biomassa é submetida a pirólise parcial sob condições subestequiométricas com suprimento de ar controlado, sendo utilizado 1,5 a 1,8 kg de ar por kg de biomassa. A mistura obtida a partir dos gases gerados durante o processo de gaseificação é designada por gás pobre e é composta por monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e água (H₂O), bem como outros compostos, tais como alcatrão e material particulado, os quais, dependendo da aplicação, devem ser removidos.

Os processos de gaseificação de biomassa estão representados na Figura 22:

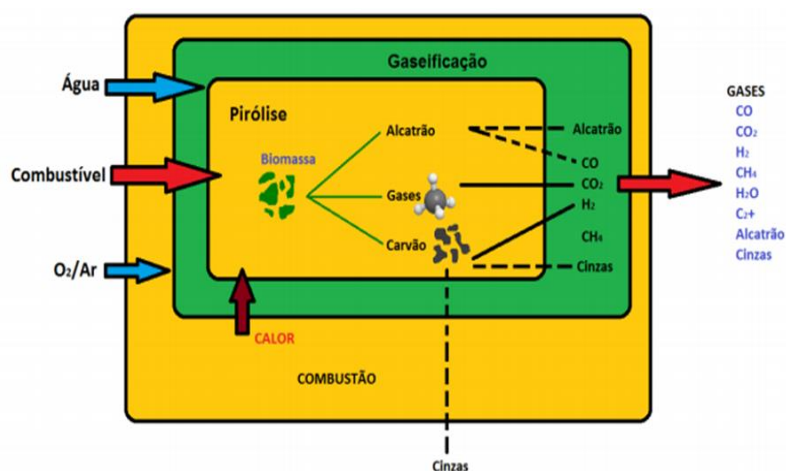


Figura 22 - Processo da gaseificação da biomassa (Ardila, 2015).

O processo de gaseificação ocorre em uma série de etapas que envolvem diversas reações, esses processos podem ser descritos como:

1. **Secagem:** é o primeiro estágio do processo de gaseificação e se dá na parte superior do reator. Nessa etapa ocorre a evaporação da água contida na biomassa, a qual é produzida pela transferência de calor fornecido pela zona de combustão. A secagem implica a redução da quantidade de humidade na matéria da biomassa. O teor de humidade na matéria-prima depende do tipo de matéria-prima utilizada. Por exemplo, o carvão betuminoso contém uma humidade de quase 10%. Outros tipos de carvão, tais como

lenhina e carvão sub-betuminoso, contêm maior humidade em comparação com o carvão betuminoso. No entanto, a antracite contém a menor quantidade de humidade em comparação com todos os outros três tipos. De forma similar, a biomassa compreende a humidade de 5% a 40%. O principal objetivo da secagem é minimizar o teor de humidade (menos de 2%) porque quanto menor for o teor de humidade, à medida que as partículas de combustível se deslocam para zonas de despoluição e redução, maior é a qualidade do carvão ou biomassa como combustível. A secagem é um processo endotérmico e utiliza o calor latente da evaporação que é quase 2400 kJ/kg para a água (Aranda *et al.*, 2016; Janajreh *et al.*, 2021).

2. **Pirólise:** é a desvolatilização, ou simplesmente a decomposição térmica da biomassa. Em síntese, a pirólise é o resultado da transformação térmica da biomassa a uma temperatura inferior a 600 °C, ou seja, mediante o calor, o sólido original é decomposto em uma mistura de sólido (carvão ou carbono), líquido (alcatrão, hidrocarbonetos pesados e água) e gás (CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₆H₆, etc.). As proporções destas partes dependem da composição química da biomassa e das condições de operação do gaseificador.
3. **Combustão:** é a reação do material com oxigénio. Esse processo é responsável pelo fornecimento de calor para as demais etapas. Essa fase pode ocorrer no próprio reator principal, em um gerador de vapor ou em câmara de combustão. O que se queima podendo ser: parte do próprio gás de síntese, outros produtos da gaseificação (líquidos e sólidos), e até o combustível primário. As emissões de CO e CO₂ resultam do processo de oxidação quando a biomassa carbonizada sólida reage com algum oxigénio no ar. Ademais, a oxidação do hidrogénio também tem lugar, o que está disponível na biomassa. Devido à oxidação tanta do hidrogénio como do carbono, liberta-se uma quantidade significativa de calor. Contudo, o monóxido de carbono pode ser produzido se o oxigénio estiver disponível em quantidades estequiométricas. Além disso, o oxidante é considerado como um parâmetro de controlo de temperatura e, portanto, a sua quantidade na forma pura ou diluída, como no caso do ar, é ajustada de acordo com a temperatura da gaseificadora estipulada e desejada. Até o CO₂, H₂O e N₂ são referidos como moderadores, visto que geralmente a sua indução reduz a temperatura ambiental da gaseificadora, uma vez que se alimentam do seu calor sensível. A sua regeneração a alta temperatura é, portanto, necessária sob integração do sistema para assegurar uma elevada eficácia do processo, como no caso da integração de ciclo combinado. Reações de oxidação são sempre fortemente exotérmicas e são responsáveis pelo fornecimento do calor da gaseificadora necessária para todas as reações endotérmicas subsequentes. (Mahamulkar *et al.*, 2016).

4. **Redução:** ocorre quando o carbono e os hidrocarbonetos do combustível reagem parcialmente com o oxigênio, dando origem a combustíveis como o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio (H₂). Esse processo ocorre na zona de redução. Este tipo de reação ocorre quando a quantidade de oxigênio disponível é bastante baixa. Deste modo, na presença subestequimétricas de oxigênio, um número de reações de oxidação/redução ocorre nas condições de alta temperatura de 800-1000°C. De um modo geral, as reações de redução são do tipo endotérmico que incluem reações de Boudouard, reações de água-gás, reações de deslocamento e de metano. Estas reações são promovidas pela proporção de gás de síntese ou CO/H₂ desejada para a gaseificadora. Por exemplo, para a produção de hidrogênio, como para a síntese de amoníaco ou simples membrana de troca de prótons (PEM), é visada a aplicação em células de combustível, deslocamento de CO e reação reformada CH₄ sob a presença de vapor. Caso contrário, para a célula de combustível de óxidos sólidos onde o CO é o produto desejado, a moderação e redução sob CO₂ é a solução natural procurada (Janajreh *et al*, 2021; Díaz-Rey *et al.*, 2015).

Para uma análise detalhada, o processo de gaseificação pode ser categorizado em secagem, desvolatilização ou pirólise, combustão volátil, combustão de carvão e redução. Estas etapas ocorrem sucessivamente. A redução das espécies oxidadas em gás de síntese também está envolvida durante as fases de combustões. A Figura 23 ilustra a sequência destas etapas e é aqui mais detalhada.

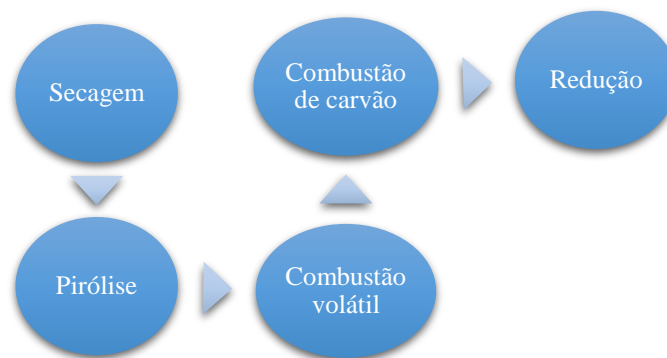


Figura 23 - Ilustração da sequência das etapas de gaseificação (Janajreh *et al.*, 2021).

O processo de gaseificação é geralmente classificado em dois tipos, tais como a gaseificação convencional e em água supercrítica. A Figura 24 apresenta um esquema detalhado e parâmetros do processo de gaseificação.

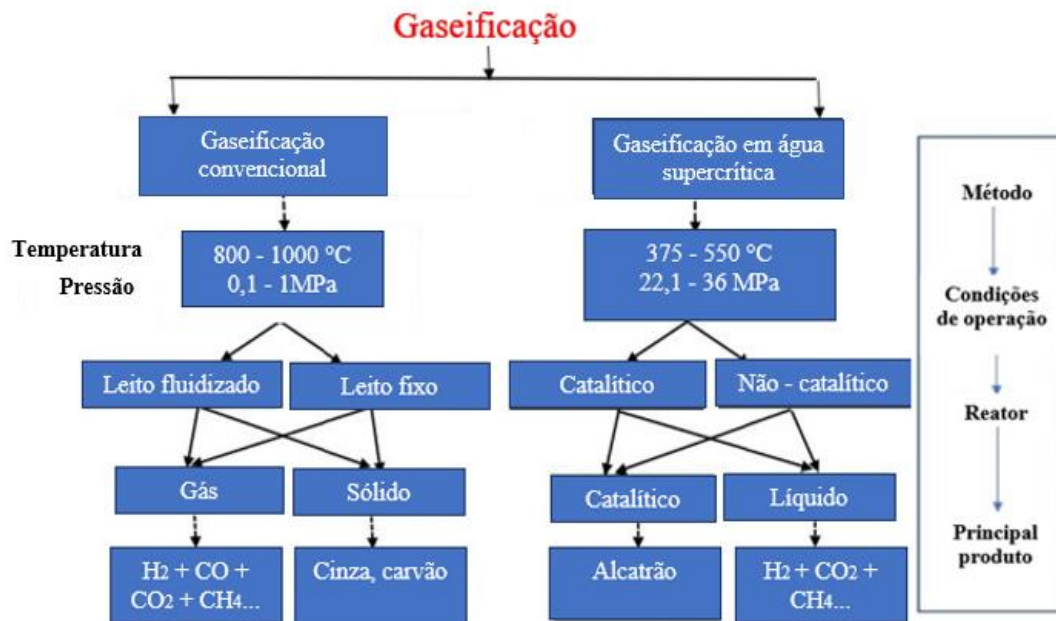


Figura 24 - Uma representação esquemática do processo da gaseificação (Das *et al.*, 2021).

1. **Gasificação convencional:** na gaseificação convencional, a biomassa é seca e depois é sujeita a processo de pirólise. Por outras palavras, pode dizer-se que o processo de gaseificação é uma oxidação parcial da biomassa na presença de ar/oxigénio/vapor num gaseificador. A gaseificação convencional ocorre com a gama de temperaturas de 800 a 1000°C e a gama de pressões entre 0,1 e 1 MPa. O processo de conversão de biomassa em biocombustível pode ser descrito em diferentes etapas (Figura 24). Vários produtos tais como bio carvão, alcatrão, bio óleo e gás de síntese são produzidos a partir deste processo (Che *net al.*, 2015).
2. **Gaseificação em água supercrítica (SWG):** no SWG, a biomassa húmida (quase 80% da humidade) pode ser processada sem secagem da biomassa, de modo a poupar o custo da secagem. O método SWG proporciona maior eficiência térmica em comparação com o método convencional, mas as técnicas comerciais do processo ainda se encontram em fase de desenvolvimento. O seu intervalo de temperatura de processo é de 375 a 550°C e há certos casos, a temperatura aumentou até 700°C. A gama de pressão é de 22,1 a 36 MPa. Este processo era utilizado para decompor a biomassa em moléculas mais pequenas. A biomassa no processo SWG é convertida em biocombustível em vários processos, tais como pirólise, hidrólise, condensação e desidrogenação. Os produtos primários do processo SWG são H₂, CO, CO₂ e CH₄ etc. e os produtos secundários são o carvão, o alcatrão e as cinzas. A presença de catalisadores condiciona a produção final do processo, mas depende em grande parte da composição da biomassa (Jin *et al.*, 2014; Khoo *et al.*,

2013). A temperatura para o SWG é considerada um dos parâmetros com mais influência, mesmo que se utilize ou não um catalisador. Com o aumento da temperatura, decompõe-se o produto sólido, convertem-se os produtos líquidos intermediários em moléculas de baixo peso e aumenta a formação de gases. Geralmente no que concerne aos produtos líquidos obtidos no decorrer do processo, o aumento da temperatura favorece a redução da fase líquida (Borges, 2020).

Tipos de reatores utilizados durante o processo de gaseificação

São principalmente três os reatores utilizados tanto em processos de gaseificação convencionais como supercríticos. São eles: reator de leito fixo, reator de leito fluidizado e reatores catalíticos e não catalíticos. Estes reatores são abordados de forma mais aprofundada em seguida.

1. Reator de leito fixo

No caso de reator de leito fixo, a unidade de gaseificação é fixada onde a matéria-prima é mantida. Os gases que passam através da biomassa para que a reação ocorra. Os principais componentes do reator de leito fixo são: sistema de alimentação, câmara de gaseificação, sistemas de reforma de gás de síntese e sistemas de arrefecimento. Após o processo de pirólise, a biomassa parcialmente decomposta é introduzida no gasificador para que a gaseificação possa ter lugar com a presença de oxigénio. O gás de síntese produzido é separado e submetido a um tratamento posterior onde se procede à sua dessulfuração e secagem. Com base no fluxo de gás no gasificador, os tipos de leito fixo são ainda classificados em contracorrente (“updraft”), concorrente (“downdraft”) e de fluxo cruzado (“cross-flow”). O gasificador de *updraft* tem maior eficiência térmica, menor queda de pressão e formação de escória, enquanto o gasificador de *downdraft* tem produtos gasosos de maior qualidade e menor teor de alcatrão. Este método é utilizado para a produção de energia para aplicações de pequena escala. O gasificador de fluxo cruzado é favorável à produção de gás de síntese e mostra maior flexibilidade no processo de gaseificação da biomassa (He *et al.*, 2021; Caputo *et al.*, 2016).

2. Reator de leito fluidizado

No caso de leito fluidizado, as partículas de biomassa são colocadas através do agente gaseificador e convertidas em substância semelhante a um fluido, para que a distribuição uniforme da temperatura e um melhor contato com o gás sólido possam ser mantidos. Este reator de leito fluidizado é uma das tecnologias de maior preferência para aplicações à escala industrial devido à sua vantagem de alta inércia térmica e manipulação de vários tipos de biomassa. O sistema de gaseificação consiste principalmente em câmara de gaseificação, sistema de alimentação, sistema de limpeza para tratamento de gás de síntese e um sistema de fornecimento de ar. As condições de funcionamento necessárias, tais como temperatura e pressão são mantidas na câmara de

gaseificação e o ar é pré-aquecido com um aquecedor externo para servir como gás fluidizado antes de entrar na câmara. O sistema de alimentação é utilizado para fornecer biomassa continuamente para a câmara de gaseificação. O sistema de alimentação tem na realidade dois sistemas principais. São eles; uma tremonha com duas válvulas de comporta pneumática para bloquear o fluxo de ar e um parafuso de alimentação que se liga ao gaseificador. Um ciclone é utilizado para a limpeza primária onde o carvão é separado. O purificador húmido é ligado à saída do gaseificador para recolha do gás de síntese (Ebadi e Hisoriev, 2019; He *et al.*, 2021).

3. Reator de leito catalítico e não-catalítico

Catalíticos e não catalíticos são os outros dois tipos de reatores utilizados no processo de gaseificação. Este processo é mais vantajoso devido à sua maior eficiência onde a biomassa é convertida em biocombustível com ou sem a presença de catalisadores. Os principais produtos do processo de gaseificação dependem de vários parâmetros do processo, tais como taxa de aquecimento, tipo de gaseificador, tipos de alimentação, bem como condições de funcionamento (temperatura, pressão, agente oxidante, etc.) (Peterson *et al.*, 2008).

O rendimento da gaseificação da biomassa está baseado nas reações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Estequiometria das reações (Ardila, 2015).

Estequiometria	Nome da reação
Biomassa → Carvão + alcatrão + H₂O + gases (CO + CO ₂ + H ₂ + CH ₄ + C ₂ H ₂)	Desvolatilização da biomassa
Combustão do carvão	
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	Combustão parcial
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Combustão completa
Gaseificação do carvão	
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	Reação de <i>Boudouard</i>
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	Reação de gás-água ou carbono-vapor
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Formação de metano
Reações homogêneas	
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidação do monóxido de carbono
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Oxidação do hidrogénio
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	Oxidação do metano
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	Reação de deslocamento Água-gás
$H_2 + S \rightarrow H_2S$	Formação de sulfeto de hidrogénio
$0,5N_2 + 1,5H_2 \rightarrow NH_3$	Formação de amoníaco
Reações do alcatrão	
$C_nH_m + \left(\frac{n}{2}\right)O_2 \rightarrow nCO + (m/2)H_2$	Oxidação parcial
$C_nH_m + nCO_2 \rightarrow (m/2)H_2 + (2n)CO$	Reforma a seco
$C_nH_m + nH_2O \rightarrow \left(\frac{m}{2} + n\right)H_2 + nCO_2$	Reforma a vapor
$C_nH_m + (2 + m/2)H_2 \rightarrow nCH_4$	Hidrogenação
$C_nH_m \rightarrow \left(\frac{m}{4}\right)CH_4 + (n - m/4)C$	Craqueamento térmico

Como mostrado na Tabela 6, a etapa inicial da gaseificação é representada pela primeira equação, que é a decomposição da biomassa ou pirólise, formando carvão e voláteis. Após a decomposição inicial, uma variedade de reações gás-gás e gás-sólido a partir destes produtos pirolíticos acontecem (Ardila, 2015).

Gaseificador

Gaseificador é um equipamento composto por um reator e seus componentes. No reator, a biomassa passa por diversos processos: perde humidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz, tendo como produto final uma mistura de combustíveis gasosos (gás pobre). O reator é o principal elemento do gaseificador. É nele que as partículas de biomassa reagem com o ar para produzir o gás pobre.

Consoante os diversos conceitos de funcionamento existem diversos tipos de gaseificadores. Este pode ser classificado em função do tipo de “leito” e o deslocamento relativo entre o combustível e o meio de oxidação. Esta classificação pode ser observada na figura apresentada a seguir:

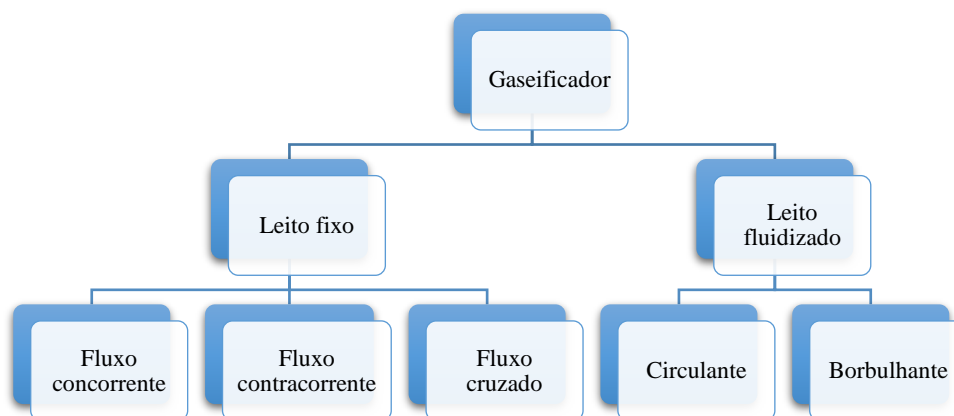


Figura 25– Esquema de diferentes tipos de gaseificadores existentes (Castanheira, 2017).

Castanheira, 2017 realizou um estudo bastante relevante sobre os gaseificadores de leito fixo, demonstrando os seus princípios de funcionamento assim como as principais vantagens e desvantagens de cada caso. Na Tabela 7 apresenta-se alguma desta informação.

Tabela 7 - Funcionamento, vantagens e desvantagens de diferentes tipos de gaseificadores de leito fixo (Castanheira, 2017).

	Fluxo co-corrente	Fluxo contracorrente	Fluxo cruzado
Funcionamento	O combustível é inserido na parte superior. O ar, como agente oxidante, é introduzido na zona de combustão e escoar no sentido do combustível. O gás produzido sai na parte inferior.	O combustível é inserido na parte superior. O agente oxidante introduzido na zona de combustão, escoar no sentido contrário ao combustível. Saindo o gás na parte superior.	O combustível é inserido na parte superior. O agente oxidante, é introduzido na zona de combustão e sai na mesma zona, após respetiva combustão e redução.
Vantagens	Baixo teor de alcatrão e partículas.	Temperaturas superiores podendo levar à eliminação de partículas indesejáveis; Aumento do PCI devido ao elevado teor do alcatrão.	Construção simples Elevada circulação na zona quente do gaseificador; Temperatura inferior que permite o uso de componentes mais baratos.
Desvantagens	Limitação do tamanho do combustível assim como do tamanho do gaseificador; Produtos com baixo PCI; Sensível à humidade do combustível.	Elevados valores de alcatrão; Produtos com baixo PCI; Limitação do tamanho do combustível assim como do tamanho do gaseificador.	Difícil de operar; Elevado teor de carbono nas cinzas.

Como as características de operação variam em função do tipo de gaseificação logo os produtos resultantes da gaseificação variam, este fator é evidenciado na tabela seguinte (Tabela 8) para os 3 diferentes tipos de gaseificadores.

Tabela 8 - Composição volumétrica dos gases para diferentes gaseificadores a ar (Castanheira, 2017).

Compostos [z (%)]	Leite fixo contracorrente	Leite fixo co-corrente	Leite fluidizado circulante
CO	15-20	10-22	13-15
H₂	10-14	15-21	15-22
CH₄	2-3	1-5	2-4
CO₂	8-10	11-13	13-15
PCI [MJ/m³]	3,7-5,3	4-5,6	3,6-5,9

4.1.3.1. Aspetos sócio-ambientais

A gaseificação da biomassa é uma via lucrativa para explorar diversos materiais residuais, aumentar a eficiência dos recursos e diminuir as alterações climáticas adversas. Embora a gaseificação seja uma tecnologia bastante significativa na utilização de resíduos de biomassa, a mesma gera muitas ameaças com grande influência sobre a sociedade e o ambiente em geral. Um dos problemas preocupantes é a potencial emissão de monóxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de azoto, compostos orgânicos voláteis, e partículas tais como dioxinas, e hidrocarboneto aromático policíclico. Estes poluentes entram em contacto com seres humanos e animais através da inalação, ingestão e contacto dérmico. A sua interação representa um sério risco para a saúde humana. (Sikarwar *et al.*, 2016).

A gaseificação é um sistema suscetível ao fogo e à explosão, uma vez que os gaseificadores funcionam a uma pressão e temperatura elevadas. Esta possibilidade aumenta consideravelmente quando o gás H_2 é o produto desejado. É altamente inflamável e, portanto, necessita de um grande cuidado. As cinzas e alcatrões gerados durante a gaseificação têm um elevado potencial de contaminação ambiental. Os seus fluxos de resíduos necessitam de um sistema de eliminação adequado que cumpra todas as diretrizes legislativas.

Na ausência de vários contaminantes, tais como gases tóxicos, alcatrão, e partículas, os biocombustíveis sintéticos são considerados mais limpos. O elevado número de cetano torna a maioria como o combustível ideal para motores de ignição por compressão, com vantagens como a combustão limpa; no entanto, necessita de modificações na conceção dos motores. Estas tecnologias disponíveis para a maioria destes biocombustíveis estão nas suas fases iniciais de desenvolvimento no que diz respeito à produção, armazenamento e transporte. Além disso, a síntese destes combustíveis requer investimentos elevados devido aos elevados custos de instalação e produção (Sikarwar *et al.*, 2016).

Os biocombustíveis acarretam algumas outras preocupações que incluem a alteração do uso do solo e a sua sustentabilidade fiscal, juntamente com a exigência de procedimentos e medidas administrativas adequadas. Pelo contrário, a síntese autoconfiante destes biocombustíveis influencia positivamente a estabilidade energética à escala mundial. A ideia de instalar sistemas de gaseificação de biomassa para fornecer calor e eletricidade em áreas remotas ou escassamente povoadas ganhou muita atenção nas últimas décadas; no entanto, o progresso tem sido lento.

4.1.4. Pirólise da biomassa

A pirólise da biomassa é objeto de intensas pesquisas científicas há muitas décadas, o que está explícito nos vários artigos disponíveis na literatura científica. É um processo que pode ser resumido como a decomposição da matéria ocorrente devido as altas temperaturas (Mesquita, 2017). Esta reação pode então ser descrita pela seguinte equação:



As reações nesta etapa são exotérmicas até 300°C, sendo depois endotérmicas para temperaturas superiores (Mesquita, 2017).

A pirólise também é um fenômeno demasiadamente complexo em que acontecem simultaneamente reações endotérmicas e exotérmicas (Oliveira, 2009). É um processo em que se decompõe o combustível, biomassa, devido ao aquecimento do mesmo com ausência de agente oxidante. Trata-se de um fenômeno que ocorre em temperaturas superiores a 250°C em que as moléculas maiores, dependentes do combustível, se decompõem em moléculas mais pequenas e carvão (Castanheira, 2017).

Como pode ser observado na figura 26, há vários tipos de pirólise dos quais o mais antigo é a carbonização, normalmente utilizada com madeira, e a destilação a seco ou destrutiva. Na carbonização, as baixas temperaturas são utilizadas para maximizar a produção de carvão vegetal. Na destilação seca, são utilizadas temperaturas mais elevadas de forma a maximizar a produção de líquidos. O fracionamento das substâncias orgânicas ocorre de forma gradual (Mesquita, 2017).

Normalmente são obtidos três produtos: gás, licor pirolenhoso e carvão vegetal em quantidades relativas que dependem do método de pirólise e dos parâmetros de reação. A pirólise rápida, é utilizada, por exemplo, para a maximização da produção de produtos líquidos consoante a temperatura utilizada, enquanto a pirólise lenta é designada por carbonização e é utilizada para a maximização da produção de carvão sólido (Lisboa, 2016).

Com o passar do tempo, houve mudanças na produção dos compostos da pirólise através do aumento das taxas de aquecimento e das variações da temperatura final do processo (Mesquita, 2017).

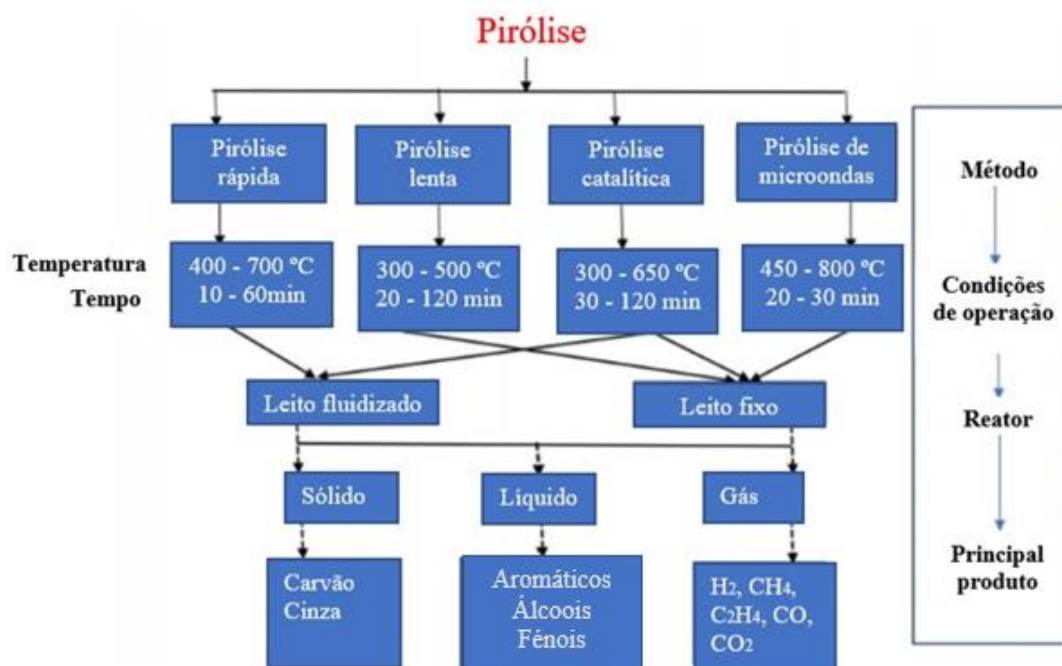


Figura 26 - Uma representação esquemática do processo de pirólise (Das *et al.*, 2021).

Há três etapas principais durante a o processo da pirólise, são elas: desidratação, desvolatilização e decomposição. A desidratação é efetuada a uma temperatura inferior a 200°C, enquanto a desvolatilização que é um dos procedimentos mais importantes de pirólise ocorre na gama de temperaturas entre 200-550°C e a etapa final, a decomposição da biomassa sólida é efetuada acima dos 550°C. Durante o processo de pirólise, a decomposição dos hidratos de carbono e proteínas ocorre a uma temperatura inferior a 400°C, porém a decomposição dos lípidos ocorre a uma temperatura superior a 550°C (Das *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2015).

4.1.4.1. Tipos de processos de pirólise

Dependendo da taxa de aquecimento, a presença de catalisadores, e/ou via de aquecimento, a pirólise pode ser categorizada em quatro modos: (1) pirólise rápida, (2) pirólise lenta, (3) pirólise catalítica, e (4) pirólise de micro-ondas. Dois tipos diferentes de reator com um reator de leito fixo e o outro de leito fluidizado são frequentemente utilizados. Os reatores de leito fixo têm sido amplamente utilizados em pirólise lenta, catalítica e de micro-ondas; os reatores de leito fluidizado são geralmente utilizados para a pirólise rápida. A combinação de modos e reatores de pirólise é dada na Figura 26.

1. **Pirolise rápida:** quanto à pirólise rápida, a taxa de aquecimento é muito elevada (600-36000°C/min) com menos tempo de residência/tempo de permanência (0,003-0,05 min). Na ausência de ar, este processo ocorre a altas temperaturas (400-700°C). Começa-se por secar e moer a biomassa com o tamanho de partícula de 1 mm ou menos antes de entrar no reator. Esta pequena biomassa granulométrica é aquecida rapidamente e decomposta em moléculas e gases de menor cadeia no reator. Por fim, é arrefecida para a formação de biocombustíveis líquidos. A fim de maximizar a produção de petróleo, é necessário que a biomassa obtenha uma maior taxa de aquecimento, uma temperatura mais elevada e um menor tempo de residência com um arrefecimento rápido. De um modo geral, o rendimento do petróleo situa-se na faixa dos 60-75%, enquanto os produtos sólidos e gasosos se situam na faixa dos 15-25% e 10 a 20%, respetivamente (Sahoo *et al.*, 2021; Maniscalco *et al.*, 2020). Esta é a principal razão pela qual o modo de pirólise rápida está a chamar a atenção na produção de bio óleo.

O rendimento do bio-óleo produzido a partir deste processo é uma mistura de água e outros compostos orgânicos. O rendimento do bio óleo obtido tem um teor mais elevado de compostos oxigenados e uma quantidade muito reduzida de hidrocarbonetos. O processo global de pirólise rápida é um dos métodos mais rentáveis e altamente eficientes (Chen *et al.*, 2015b). É mais vantajoso em termos de armazenamento e transporte de combustíveis líquidos em comparação com outros processos.

2. **Pirolise lenta:** A pirólise lenta se realiza num ritmo de aquecimento mais baixo (3,5-10°C/min) com tempo de permanência/residência muito longo (20-120 min). Em consequência deste tempo de permanência mais longo, forma-se um aumento de bio-carvão e gases não condensáveis tais como CO₂, H₂, CH₄ e C₂H₄ durante a conversão da biomassa. Este processo tem uma taxa de reação muito lenta por natureza. O tratamento de pré-aquecimento é realizado neste processo para remover o teor de humidade da biomassa de algas e rutura da ligação. Mais tarde decompõe-se em lípidos, hidratos de carbono e proteínas, o que leva à formação de produtos tais como bio carvão, líquido ou gases. Finalmente, o bio carvão decompõe-se em resíduos sólidos ricos em carbono. Diferentes condições de processo, tais como temperatura e tempo de residência, influenciam largamente o rendimento dos biocombustíveis. A maior desvantagem do processo de pirólise lenta é o elevado tempo de permanência/residência. Este processo consome maior quantidade de energia devido à menor taxa de aquecimento com tempo de residência elevado. Por conseguinte, a pirólise lenta é mais adequada para aplicações de maior rendimento petrolífero em comparação com outros processos (Das *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2015).

3. **Pirólise catalítica:** O óleo produzido a partir do processo de pirólise rápida tem uma viscosidade mais elevada, valor de aquecimento inferior com compostos oxigenados mais elevados e teor de água mais elevado. Este problema pode ser superado através da adição de catalisador para que a qualidade e o rendimento do petróleo possam ser melhorados e este processo é designado por pirólise catalítica. Os catalisadores podem quebrar os compostos moleculares mais elevados e torná-los mais leves durante o processo. A fissuração secundária dos vapores gerados ocorre em líquidos e produtos gasosos. No modo de pirólise catalítica, a biomassa algal é convertida em biocombustíveis na presença de catalisadores. A temperatura pirolítica e a relação entre catalisador e biomassa são de 300 500°C e 0,2 a 5, respetivamente. O processo de pirólise catalítica melhorou quase 40% em termos de recuperação de energia e as propriedades do biocombustível também podem ser significativamente aumentadas (Das *et al.*, 2021). Em resumo, o óleo produzido a partir do processo de pirólise catalítica tem uma maior quantidade de aromáticos, valor de aquecimento inferior e menor acidez. Para além das condições do processo de pirólise, os tipos de catalisadores utilizados, a taxa de carga catalítica, os tipos de matéria-prima são os principais fatores que influenciam o rendimento e a qualidade do produto durante o processo (Zhang *et al.*, 2020).

4. **Pirólise por micro-ondas.** O processo de pirólise de micro-ondas realiza-se com aquecimento assistido por micro-ondas. Os raios eletromagnéticos que passam através da biomassa geram a energia térmica necessária para o processo. No entanto, o método convencional de pirólise necessita de uma superfície externa aquecida para aquecer a biomassa. Com este aquecimento assistido por micro-ondas, cria-se uniformidade no aquecimento termal da biomassa. Isso depende principalmente de dois mecanismos, como a condução iónica e a polarização dipolar, em que a condução iónica tem um grande impacto nas capacidades de produção de calor. A maior parte dos componentes deste sistema é a mesma que o sistema convencional de pirólise adicionado com um forno de micro-ondas. Este forno é composto por materiais transparentes de micro-ondas como o quartzo ou o vidro borossilicato. Quando se utiliza este material, a temperatura do recipiente de reação/forno de micro-ondas é mais baixa e a temperatura da mistura de reação é mais alta. Este aquecimento é diferente do aquecimento convencional porque depende da temperatura e potência das configurações de micro-ondas com capacidade de absorção de micro-ondas e composição química da biomassa. Tem lugar no intervalo de temperatura pirolítica de 433 a 800°C. Quanto à temperatura, varia de 500 a 2250 W (Borges *et al.*, 2014; Das *et al.*, 2021). Em termos gerais, este processo é eficiente em termos energéticos, fácil de manusear onde o aquecimento e o arrefecimento durante o processo podem ser feitos através do controlo da irradiação por micro-ondas. Em

comparação com outros métodos convencionais de pirólise, os outros méritos são menor consumo de energia necessária e menos geração de cinzas. Também se reduz o tempo de residência ou de permanência, devido à taxa de aquecimento avançada. Isto promove significativamente o rendimento do gás de síntese, mas também depende da composição do gás pirolítico da biomassa (Das *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2015).

Existem vários fatores que influenciam o desempenho do processo, tais como as condições de funcionamento da pirólise, a composição da matéria-prima, e os tipos de reatores utilizados. Alguns outros fatores que também condicionam o processo, são a taxa de carga catalítica, o tamanho da partícula, o gás transportador e a taxa de fluxo de gás. Controlando adequadamente estes fatores durante o processo, a qualidade e o rendimento do produto podem ser aperfeiçoados (Das *et al.*, 2021).

4.1.4.2. Tipos de reatores utilizados durante o processo de pirólise

Para o processo de pirólise, utilizam-se geralmente dois tipos de reatores. São eles, o reator de leito fluidizado para o processo de pirólise rápida e o reator de leito fixo para o processo de pirólise lenta, catalítica e de micro-ondas. Estes reatores de leito fixo e fluidizado podem melhorar o desempenho do processo de pirólise, bem como a qualidade do rendimento em óleo. Os referidos reatores serão abordados mais detalhadamente mais adiante.

1. Reator de leito fixo

O reator de leito fixo consiste principalmente em três componentes, nomeadamente tubo cilíndrico, sistema de limpeza e sistema de arrefecimento. A biomassa é seca e triturada até à granulometria desejada, sendo a sua granulometria reduzida. É carregada no tubo e mantida no interior do reator. Mantém-se o reator dentro de uma fornalha que é aquecida externamente e a temperatura é controlada no interior do reator. Durante o processo, o gás inerte (principalmente N₂, He ou Ar) circula através do reator para fornecer atmosfera ambiental inerte no interior da câmara. O conteúdo volátil da biomassa é vaporizado e transportado com o fluxo do gás portador. Os gases condensáveis chegam à câmara de arrefecimento onde se condensam aos combustíveis líquidos ou ao petróleo. Os vapores não condensáveis descarregados da câmara podem ser utilizados para fins de aquecimento. Este método é muito simples e adequado para produção em pequena escala (Aravind *et al.*, 2020; Campanella e Harold, 2012; He *et al.*, 2021).

2. Reatores de leito fluidizado

Os reatores de leito fluidizado funcionam com o princípio de que um fluido de alta velocidade é capaz de fazer um leito estacionário num contínuo semelhante a um líquido. Este fenómeno

denomina-se fluidização. A subsequente mistura das partículas e do fluido do leito é desejada uma vez que permitem uma boa transferência de calor e massa. É dada preferência comercial à utilização de reatores de leito fluidizado devido a razões tais como facilidade de operação, bom controlo de temperatura e mobilidade de escalada. A composição do reator é um leito estável de partículas de biomassa e catalisador, se necessário, juntamente com um gás fluidizante inerte. O gás inerte é misturado com areia e é depois aquecido. Esta mistura de gás é deixada na câmara de pirólise, para reagir com a biomassa. Um separador ciclone é utilizado para separar partículas sólidas (carvão) do gás. Um condensador é utilizado para recolher os vapores líquidos que são condensáveis, enquanto os não condensáveis são libertados no escape. A sua conceção permite uma característica muito importante, pois possibilita a redução da fissuração catalítica que ocorre na pirólise através da separação rápida do carvão e do vapor (Aravind *et al.*, 2020; He *et al.*; 2021).

5. Revisão bibliográfica da pirólise e da gaseificação da biomassa

Este capítulo é destinado especificamente aos últimos estudos feitos na área em estudo nos últimos anos.

ScienceDirect e *Scopus* são sites que fornecem acesso a uma grande base de dados bibliográfica de publicações científicas e médicas da editora holandesa *Elsevier*. Acompanham os fundamentos históricos da ciência, ajudam a lançar luz sobre novas investigações e percepções, e inspiram um pensamento inovador, com características inteligentes que apoiam um ensino, aprendizagem e investigação mais inteligentes. Nos campos específicos da pirólise e gaseificação de biomassa diversos estudos foram feitos ao longo dos últimos anos, desde o ano 2000 até 2021. De acordo com a evolução dos gráficos a seguir apresentados (ver Figuras 27 e 28), é possível observar que o interesse pela conversão termoquímica da biomassa através de pirólise e gaseificação têm vindo a aumentar consideravelmente.

Fazendo uma pesquisa com as palavras-chaves “Biomass gasification” e “Biomass pyrolysis nos bancos de dados da *Scopus* e *ScienceDirect* em setembro de 2021, foi observado que o número de publicações de estudos relacionados com a pirólise da biomassa (Figura 27) tem vindo a aumentar consideravelmente, já que segundo o *ScienceDirect* no ano de 2021 houve um aumento de 934% em comparação com o ano de 2008, enquanto no *Scopus* o aumento foi de 1580%.

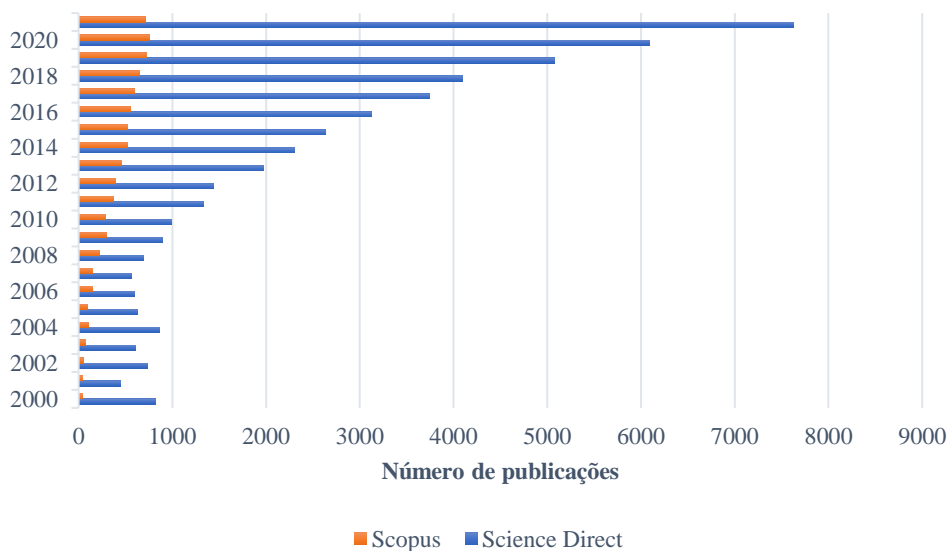


Figura 27 - Número de publicações da pirólise da biomassa nos bancos de dados *Scopus* e *ScienceDirect*.

Na Figura 28 é possível constatar a tendência de aumento no número de publicações em ambos os bancos de dados (*Scopus* e *ScienceDirect*) da gaseificação da biomassa. De acordo com o *ScienceDirect* e o *Scopus* no ano de 2021 em comparação com o ano de 2008 houve um aumento de 454% e 891%, respetivamente.

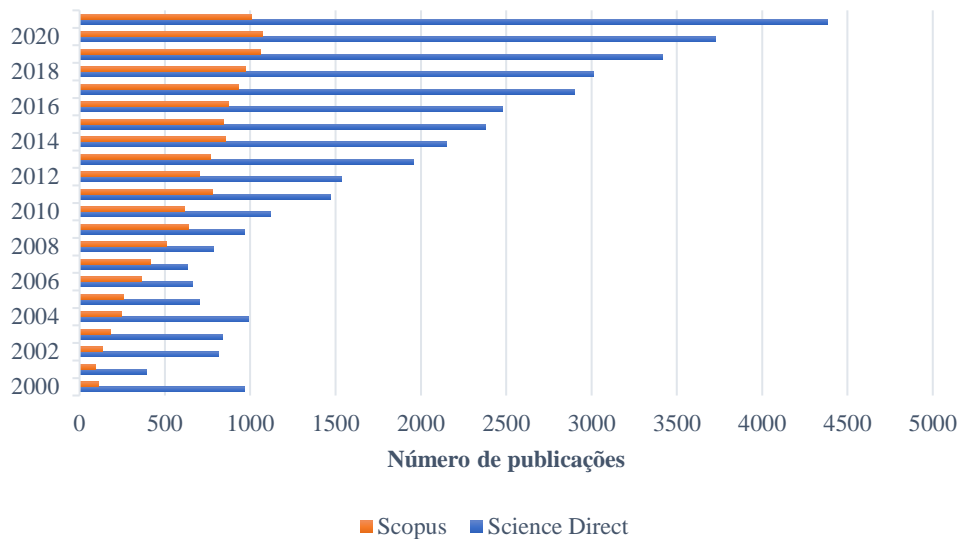


Figura 28 - Número de publicações da gaseificação da biomassa nos bancos de dados *Scopus* e *ScienceDirect*.

Os estudos realizados no âmbito da pirólise e gaseificação da biomassa permitem também acompanhar o desenvolvimento de diversas áreas científicas. Segundo os resultados exibidos nas Figuras 29 e 30 as áreas que mais se destacaram foram a Energia, a Engenharia Química, e a Engenharia.

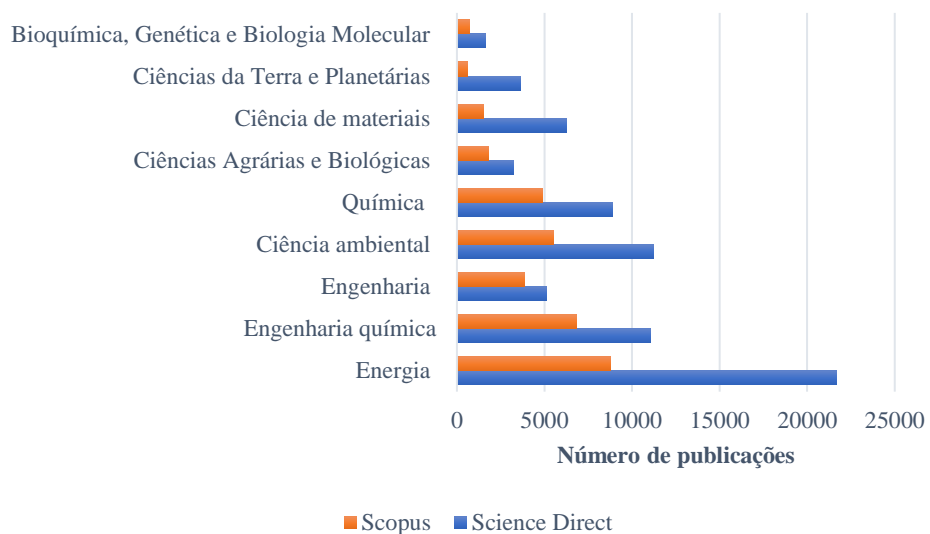


Figura 29 - Número de publicações da pirólise da biomassa por área nos bancos de dados *Scopus* e *ScienceDirect*.

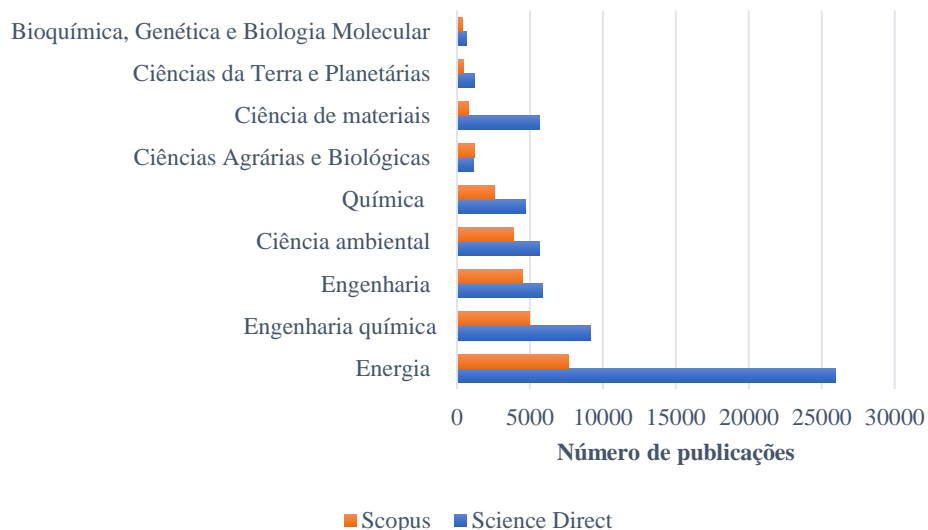


Figura 30 - Número de publicações da gaseificação da biomassa por área nos bancos de dados *Scopus* e *Science Direct*.

De acordo com os resultados obtidos das pesquisas é possível observar um cenário bastante positivo e assim acreditar num futuro promissor da conversão termoquímica da biomassa.

5.1. Pirólise - condições de operação: temperatura, pressão, tempo de reação

As condições de operação definem a intensidade das forças motrizes da reação, ou seja, a termodinâmica e a cinética.

De acordo com os estudos feitos é possível observar que os produtos predominantes durante o processo da pirólise são o bio óleo e bio carvão (Babich *et al.*, 2011). O bio óleo produzidos a partir da conversão de algas através do processo de pirólise é comparativamente mais estável do que os produzidos a partir de biomassa lenhocelulósica (Aravind *et al.*, 2020; Alvarez *et al.*, 2020).

5.1.1. Efeito da temperatura na reação

Uma vez que o processo endotérmico, pirólise/gaseificação é conduzido a determinada temperatura utilizando calor externo, é demonstrado por diversas pesquisas que a temperatura de funcionamento influencia criticamente os produtos finais. Temperaturas mais elevadas e maiores taxas de aquecimento aumentam a quebra das ligações e favorecem a produção de pequenas moléculas (Huang *et al.*, 2016; Ningbo *et al.*, 2015).

5.1.2. Efeito do tempo de reação/residência

Com base na sua taxa de aquecimento, a pirólise pode ser classificada como lenta ou rápida, podendo ser expressa mediante a relação entre a temperatura pirolítica e o tempo necessário para que a biomassa atinja essa mesma temperatura, ou seja °C/s. Esta taxa de aquecimento

condicionará o tempo de residência dos vapores no reator, de modo que quanto maior for esta taxa menor será o tempo de residência e vice-versa (Ningbo *et al.*, 2015; Trubetskaya *et al.*, 2020).

Maiores tempos de residência favorecem uma conversão secundária dos produtos primários, produzindo mais resíduo carbonoso, alcatrões, bem como produtos termicamente mais estáveis, diminuindo assim o efeito da estrutura original do polímero. De acordo com vários estudos feitos pode ser observado que o aumento do tempo de reação parece diminuir ligeiramente a formação de compostos líquidos, aumentando a fração de gases e de sólidos (Mlonka-Mędrala *et al.*, 2021).

5.1.3. Efeito da pressão na reação

Pressões baixas reduzem a condensação de fragmentos reativos formando mais resíduo carbonoso. Usar partículas menores e operar sob alta pressão e em um pico de temperatura elevado é a melhor maneira de maximizar a produção de gás de pirólise. Esta combinação também leva à minimização esperado do rendimento de bio-carvão (Nguyen *et al.*, 2016).

Na Tabela 9 encontra-se as principais características de diferentes tipos de pirólise, como a temperatura de funcionamento o tempo de residência entre outros.

Tabela 9 - Características da pirólise de diferentes biomassas (Jesus, 2017).

Tipo de pirólise	Pirólise Lenta	Pirólise Rápida	Pirólise Flash
Temperatura (°C)	277-677	577-977	777-1026
Velocidade de aquecimento (K.s⁻¹)	0,1-1,0	10-200	> 1000
Tamanho das partículas (mm)	5,0-50,0	< 1,0	< 0,2
Tempos de residência dos sólidos (s)	450-550	0,5-10,0	< 0,5
Rendimento em produtos da pirólise (%)			
Bio-óleo	30,0	50,0	75,0
Bio-carvão	35,0	20,0	12,0
Gás pirolítico	35,0	30,0	13,0

Dos recentes desenvolvimentos em matéria de pirólise e gaseificação, dos estudos realizados nos últimos anos foi feita uma seleção dos que foram considerados importantes devido a eficiência dos processos e encontram-se resumidos na Tabela 10 e Tabela 11 respectivamente, sendo posteriormente efetuada uma análise comparativa entre os mesmos.

Tabela 10 - Estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ reator	Tempo de residência/ Taxa defluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Co pirólise rápida	Madeira de <i>pinus</i> e lodo de esgoto	Leito de jorro cónico	1 s	500	Nitrogénio	55 33	Bio-óleo Carvão	Alvarez <i>et al.</i> , 2015
Hidro- pirólise	Troncos da acácia-rubra	Tubular	2 h	600	100000	37,83 34,03	Bio-óleo Carvão	Kawale e Kishore, 2021
Hidro- Pirólise	Biomassa lenhocelulósica	Tubular quartzo	30 min	500	101 325	--	Bio-óleo	He <i>et al.</i> , 2018
Pirólise	Resíduos sólidos urbanos	Leito fixo	40 min	450	Atmosfera inerte	54	Líquidos	Islam <i>et al.</i> , 2005
Pirólise catalítica	Madeira de pinho	Leito fixo	2,7 s	700	101 325	19,6 57,0 23,4	Carvão, líquido e gás	Wang <i>et al.</i> , 2010
Pirólise catalítica	<i>Chlorella</i> sp.	Leito fixo	30 min	300-450	Atmosfera inerte	35-55	Bio-óleo	Babich <i>et al.</i> , 2011
Pirólise catalítica	Óleo de girassol não comestível	Leito fixo	6 h	550	138000	62,31	Hidrocarbonetos	Zhao <i>et al.</i> , 2015
Pirólise catalítica rápida	Resíduos de <i>Jatropha</i>	--	30 s	500	Ar atmosférico	50,7 3 1	Ácidos Aromáticos Hidrocarbonetos	Vichaphund <i>et al.</i> , 2015

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise catalítica rápida	Resíduos de cogumelos	Tubular de quartzo	1 s	450	--	44,52	Hidrocarbonetos	Wang <i>et al.</i> , 2017
Pirólise catalítica rápida	Palha de arroz	Py-GC/MS	--	600	--	26,8 39,2	Aromáticos Coque	Lazaridis <i>et al.</i> , 2018
Pirólise catalítica	Troncos da acácia-rubra	Tubular	2 h	600	100000	37,83 36,48	Bio-óleo Carvão	Kawale e Kishore, 2021
Pirólise de micro-ondas	<i>Chlorella</i> sp.	--	30 min	450 -550	He	41-57	Bio-óleo	Borges <i>et al.</i> , 2014
Pirólise de micro-ondas	<i>Nannochloropsis</i> sp.	--	30 min	450 -550	He	41-59	Bio-óleo	Borges <i>et al.</i> , 2014
Pirólise de micro-ondas	Lodo de tingimento têxtil	Auger	3,3 min	750	Atmosfera inerte	63,87	Carvão de lodo	Zhang <i>et al.</i> , 2017
Pirólise de micro-ondas	Biomassa lenhocelulósica	Leito fluidizado	10 min	500	Atmosfera inerte	20 ± 2 36 ± 4 44 ± 2	Sólidos Gases Líquidos	Huang <i>et al.</i> , 2016
Pirólise de micro-ondas	Lodo de tingimento têxtil	Leito fluidizado	0,7–1,2 s	650	Atmosfera inerte	73,58 3,02	Sólidos Condensados	Ran <i>et al.</i> , 2019

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise de micro-ondas	Lodo de tingimento têxtil	Auger	1,7–3,5 s	650	Atmosfera inerte	79,8 7,98	Sólidos Condensados	Ran <i>et al.</i> , 2019
Pirólise de micro-ondas	Resíduos de furfural	Auger	30 s	550	Atmosfera inerte	3,5 21,49 1,88	Bio-óleo Condensados Compostos Fenólicos	Kang <i>et al.</i> , 2019
Pirólise contínua de micro-ondas	Estrume de vaca seco	Quartzo	20 min	650	--	68,84 39,17 24,33	Gás pirolítico Bio-carvão Bio-óleo	Luo <i>et al.</i> , 2021
Pirólise flash	Bolo de óleo de jatropa	Leito fluidizado	1,75 m ³ /h	500	Nitrogénio	64,25 31,86	Óleo Gás	Raja <i>et al.</i> , 2010
Pirólise flash	Lodo de esgoto	Leito de jorro cônico	1 s	500	Nitrogénio	48	Líquidos	Alvarez <i>et al.</i> , 2015
Pirólise flash	Capim-limão	Leito fluidizado	Taxa de fluxo de gás de varredura de 1,75 m ³ /h	450	Atmosfera inerte	50,6	Bio-óleo	Madhu <i>et al.</i> , 2018
Pirólise lenta	<i>Chlorella like</i>	--	20 min	500	He	41	Bio-óleo	Grierson <i>et al.</i> , 2009
Pirólise lenta	<i>Chlorella vulgaris</i>	--	20 min	500	He	43	Bio-óleo	Grierson <i>et al.</i> , 2009

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise lenta	Caroços da azeitona	Tubular de quartzo	30 min	270	--	82,3 7,7 1,0	Carvão Alcatrão Gases	Trubetskaya <i>et al.</i> , 2020
Pirólise lenta	Bambu	Pirolítico	1 h	400	Nitrogénio	32,2	Bio-carvão	Sahoo <i>et al.</i> , 2021
Pirólise lenta	Pellets de plásticos	Semi-batch	--	500	Nitrogénio/ atmosférica	62 34 5	Líquidos Gases Sólidos	Maniscalco <i>et al.</i> , 2021
Pirólise lenta	Madeira de pinho	Leito fixo	2,7 s	700	Ar atmosférico	57 23,4 19,6	Líquidos Gases Carvão	Maniscalco <i>et al.</i> , 2021
Pirólise lenta	Madeira de pinho	Leito fixo	2,7 s	300	Ar atmosférico	25,8 9,3 64,9	Líquidos Gases Carvão	Maniscalco <i>et al.</i> , 2021
Pirólise lenta	Palha de aveia	Vertical semi- batch	23,3 min	600	Atmosfera de azoto	24 16,3 57	Carvão Gás Líquido	Mlonka-Mędrala <i>et al.</i> , 2021
Pirólise lenta	Caule do feijão guandu	Pirolítico	1 h	400	Atmosfera de nitrogénio	29,80	Bio-carvão	Sahoo <i>et al.</i> , 2021
Pirólise não- catalítica	Troncos da acácia-rubra	Tubular	2 h	600	100000	33,52 33,35	Bio-óleo Carvão	Kawale e Kishore, 2021

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise rápida	Semente de azeitona	Tubular horizontal	18 s	426,85	--	41	Bio-óleo	Dermibas, 2007
Pirólise rápida	<i>Chlorella protothecoides</i>	Leito fluidizado	0,03–0,05 min	500	Nitrogénio	57,9	Bio-óleo	Suali e Sarbatly, 2012
Pirólise rápida	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Leito fluidizado	--	500	Nitrogénio	23,7	Bio-óleo	Suali e Sarbatly, 2012
Pirólise rápida	<i>Scenedesmus sp.</i>	Leito de jorro	2 s	480	Nitrogénio	55	Bio-óleo	Harman-Ware <i>et al.</i> , 2013
Pirólise rápida	<i>Scenedesmus sp.</i>	Leito fluidizado	0,063 min	440	Nitrogénio	22	Bio-óleo	Kim <i>et al.</i> , 2014
Pirólise rápida	Serradura de pinheiro	Leito fixo	6 min	600	101 325	51,7 25,11 22,6	Bio-óleo Carvão Gás	Ningbo <i>et al.</i> 2015
Pirólise rápida	Cacho da palmeira	Leito fluidizado	2 m ³ /h	500	Nitrogénio	48,22 31,38	Óleos Gás	Madhu <i>et al.</i> , 2016
Pirólise rápida	<i>Saccharina japónica</i>	Leito fixo	60 min	350–550	Nitrogénio	40,91	Bio-óleo	Ly <i>et al.</i> , 2016
Pirólise rápida	Palmeira (<i>Borassus flabellifer</i>)	Leito fluidizado	2 m ³ /h	500	Atmosférica	48,2 31,38	Bio-óleo Gás	Madhu <i>et al.</i> , 2016

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise rápida	Madeira de cedro	Tubular de quartzo	--	500	101325	21,8	Aromáticos	Wang <i>et al.</i> , 2020
Pirólise rápida	Óleo de argila residual	Leito fixo	17–22 min	550	-	88,4	Bio-óleo, carvão	Yuan <i>et al.</i> , 2021
Pirólise rápida	Casca de arroz	Tubular de quartzo	0,1 s	400	133,3-666,6	47	Bio-óleo	Spreafico <i>et al.</i> , 2021
Pirólise rápida não catalítica	Óleo de palma	Leito fixo	30 min	500	--	48,35 17,55 34,1	Bio-óleo Gases Carvão	Asadieraghi e Daud, 2015
Pirólise rápida catalítica assistida por micro-ondas	Substrato de cogumelo comestível	Leito fixo	--	500	--	16 2,2	Óleos Coque	Zhang <i>et al.</i> , 2017
Pirólise rápida não catalítica assistida por micro-ondas	Substrato de cogumelo comestível	Quartzo	45 min	650	Inerte	16 2,2	Óleos Coque	Zhang <i>et al.</i> , 2017

Tabela 10 - Continuação da tabela de estudos recentes sobre a pirólise.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Pirólise rápida catalítica	Madeira de cedro	Tubular de quartzo	15 s	600	50000 -350000	13,15 13,87 21,02	Compostos oxigenados Alquilbenzeno Alquilnaftaleno	Che <i>et al.</i> , 2019
Pirólise rápida catalítica	Serragem da madeira	Tubular de quartzo	15 s	600	Inerte	6,14 55,7 34,7	Aromáticos Ácidos Fenóis	Che <i>et al.</i> , 2019

As experiências de pirólise catalítica realizadas por Babich *et al.*, 2011, foram feitas num reator de leito fixo, com o tempo de residência de 30 minutos. A pressão considerada foi o ar atmosférico, enquanto a temperatura variou entre 300 a 450°C. Os resultados obtidos demonstram que o rendimento do bio óleo aumenta gradualmente com o aumento da temperatura (35% a 300°C, 55% a 450°C), sendo assim foi concluído que a pirólise a 400°C por 30 min foi suficiente para a decomposição completa da alga *chlorella*. De facto, as algas representam uma matéria-prima promissora de biomassa para a produção de bio-óleo mediante a pirólise, resultando numa recuperação de energia em produtos líquidos de 40%. O bio-óleo obtido a partir de biomassa de algas é relativamente mais estável em comparação às outras matérias-primas (Babich *et al.*, 2011). No que diz respeito aos estudos de pirólise catalítica, Zhao *et al.*, 2015 utilizaram um reator de leito fixo, com tempo de residência de 6 horas, pressão de 138000 Pa e temperatura de 550°C. O óleo de girassol não comestível é convertido em combustíveis de hidrocarbonetos para a futura produção de combustível de bio-jacto através de uma via de craqueamento catalítico, que é realizada através do catalisador ZSM-5. A temperatura de reação afeta o rendimento do combustível de hidrocarbonetos e tem uma influência reduzida na sua qualidade. O rendimento dos combustíveis é mais elevado quando a temperatura de reação é de 550°C. Quando a temperatura da reação atingiu 550°C, o teor de hidrocarbonetos aumentou ainda mais para 62,31%. Os resíduos da destilação podem ser reciclados para posterior craqueamento catalítico, uma vez que contêm mais de 78% de ácidos gordos. A temperatura de reação influencia de forma significativa o conteúdo dos componentes dos gases não condensáveis. Os gases não condensáveis produzidos a 550°C contêm o teor mais elevado de hidrocarbonetos leves, CO, CO₂ e H₂. Os gases de CO e H₂ produzidos têm grande potencial para utilização como gás de síntese no futuro.

Foram realizadas diversas experiências no âmbito da pirolise de micro-ondas, Luo *et al.*, 2021 realizaram um teste de pirólise contínua de micro-ondas utilizando o estrume de vaca seco num reator de quartzo, com o tempo de residência de 20 min. A temperatura por sua vez foi em torno de 350-650°C. Quando a temperatura aumentou de 350°C para 650°C, o rendimento do gás pirolítico aumentou de 49,93% para 68,84%, enquanto o rendimento do bio-carvão diminuiu de 39,17% para 27,84%. A taxa de aumento no rendimento do gás pirolítico obtido com o aumento da temperatura de 350°C para 650°C foi de 16,91%. Este processo é bastante propício para a geração de gás pirolítico, devido à capacidade de aquecer a matéria-prima até a temperatura alvo quase instantaneamente. Como é natural, com o aumento da temperatura da pirólise, verificou-se um aumento da produção de gás pirolítico com o aumento da temperatura, enquanto houve uma diminuição na produção de bio carvão. Zhang *et al.*, 2017 realizaram igualmente um trabalho utilizando a mesma tecnologia, usando como matéria-prima: lodo de tingimento têxtil. A experiência foi realizada num reator Auger, com o tempo de residência de 3,3 minutos, a

temperatura de 750°C, e com a atmosfera inerte. Com este estudo conseguiram produzir 63,87% de carvão de lodo. O rendimento obtido dos condensados foi aumentado de 450°C para 650°C, e atingiu o máximo a 650°C, tendo depois diminuído à medida que a temperatura aumentava. Entretanto, a produção de gás não condensável aumentou à medida que a temperatura aumentava de 450°C para 750°C.

Alvarez *et al.*, 2015 realizou um estudo sobre o aproveitamento do lodo de esgoto por pirólise *flash*. Foi efetuado num reator de leito cônico com alimentação contínua de biomassa e remoção de carvão, sob atmosfera de nitrogénio. O efeito da temperatura no rendimento e composição do produto foi estudado na gama de 450-600°C e foi obtido um rendimento líquido máximo de 48% a 500°C. O líquido com melhores propriedades de combustível foi obtido a 450°C, pois contém menos água e compostos nitrogenados. A fração de carvão retém a maior parte dos metais pesados presentes no lodo de esgoto e é um subproduto que tem de ser valorizado a fim de aumentar a viabilidade do processo. O elevado teor de cinzas, associado ao baixo teor de carbono bem como ao baixo valor calórico, torna o carvão vegetal pouco apelativo para fins energéticos, mas oferece oportunidade para a sua aplicação na alteração do solo e na agricultura ou como adsorvente em processos de tratamento de água. Raja *et al.*, 2010 também efetuaram experiências de pirólise *flash* de leito fluidizado na Atmosfera de nitrogénio gasoso com uma amostra de bolo de óleo de *jatropha* para determinar particularmente os efeitos do tamanho das partículas, temperatura de pirólise e taxa de fluxo de gás nitrogénio sobre os rendimentos da pirólise. O rendimento máximo de óleo de 64,25% foi obtido a uma taxa de fluxo de gás nitrogénio de 1,75 m³/h, dimensão das partículas de 0,7-1,0 mm, temperatura de pirólise de 500°C. O poder calorífico do óleo de pirólise foi de 19,66 MJ/kg. O gás de pirólise pode ser utilizado como combustível gasoso. O óleo de pirólise foi identificado como um excelente candidato a biocombustível.

Mlonka-Mędrala *et al.*, 2021, executaram testes de pirólise lenta em escala laboratorial, que foram conduzidos em um reator vertical semiatrelado. Realizou-se a pirólise da palha de aveia sob atmosfera de azoto no intervalo de temperatura de 300-600°C, e com o tempo de residência de 23,3 min. A faixa de temperatura foi selecionada com base no pressuposto de que temperaturas mais elevadas são propícias para melhorar o processo de pirólise, no entanto, como o consumo de energia também irá aumentar, o estudo foi realizado apenas até 600°C. Com base nos resultados experimentais obtidos, também se concluiu que uma temperatura de processo mais elevada leva a um aumento nos rendimentos de gás e líquido. O rendimento do gás aumentou de 13,1% a 300°C para 16,3% a 600°C. Com o aumento da temperatura, o rendimento do produto sólido diminuiu, e a concentração de carvão aumentou de 48% à temperatura mais baixa para 24% à temperatura mais alta. Os rendimentos em massa dos produtos líquidos seguiram uma tendência semelhante à do rendimento do gás pirolítico e o maior teor de alcatrão no valor de 57% foi obtido a 600°C. Trubetskaya *et al.*, 2020 por sua vez também realizaram um estudo sobre pirólise lenta,

os testes foram realizados em um reator de tubo de quartzo. A matéria-prima utilizada carços de azeitona, a temperatura da experiência foi de 270°C, e o tempo de residência de 30 minutos. Os rendimentos do produto da torrefação (pirólise suave) do caroço da azeitona são divididos em sólidos, líquidos e os principais gases. As quantidades de carvão, alcatrão, e gases produzidas foram de 82,3%, 7,7% e 1% respectivamente. De um modo geral, verificou-se que os rendimentos do produto provenientes da torrefação dos caroços de azeitona indicam que temperaturas superiores a 270°C levam a uma diminuição significativa do rendimento do produto sólido em comparação com o tratamento a baixas temperaturas, especialmente para os caroços de azeitona de tamanho de partícula $\geq 0,425$ mm. O prolongamento no tempo de torrefação pode também diminuir significativamente os rendimentos de carvão sólido e aumentar a formação de produtos líquidos indesejáveis que irão afetar negativamente o equilíbrio energético em grande escala. Com base nos resultados deste estudo, é realçada a potencial utilização de caroços de azeitona torrados no setor energético, com a consequente redução das emissões de CO₂.

5.2. Gaseificação - condições de operação: temperatura, pressão, tempo de reação

Os estudos realizados através de processos de gaseificação com diferentes tipos de biomassa por diversos investigadores foram recolhidos e apresentados na Tabela 11. Apresentam-se igualmente os produtos resultantes e os fatores que condicionam o desempenho dos processos. Da Tabela 11 é possível observar que no processo de gaseificação convencional, a pressão de funcionamento está na gama de 0,1 a 10 MPa enquanto no SWG, é superior à pressão crítica da água e está na gama de 24 a 36 MPa.

5.2.1. Efeito da temperatura de reação

Entre vários fatores que afetam a eficiência do processo e o rendimento do produto, a temperatura de gaseificação deve ser avaliada e otimizada a partir do compromisso entre a eficiência de gaseificação e o rácio de consumo de energia. Isto deve-se ao aumento do custo operacional e do consumo de energia com um aumento excessivo da temperatura.

Os valores de temperatura atingidos nos diversos processos de gaseificação influenciam os compostos resultantes, é possível relacionar o aumento da temperatura com um aumento na quantidade de monóxido de carbono e vapor de água, uma diminuição da fração volúmica de dióxido de carbono e metano (Janajreh *et al.*, 2021).

5.2.2. Efeito da pressão na reação

Os mecanismos do efeito da pressão sobre as características de gaseificação são complicados. Normalmente pressões mais altas no reator faz com que a concentração de CO e H₂ diminui e a concentração de CO₂ aumenta. Isso indica que a pressão mais alta promove a reação de reforma reversa do CO₂. Existem duas vias de reação concorrentes no SCWG e o hidrogénio é um produto típico das reações de radicais livres. Sob alta pressão, a reação de radicais livres é inibida e a reação iônica é facilitada. A alta pressão também tem um efeito positivo na gaseificação do SCWG, por exemplo, a alta pressão leva a um aumento da densidade da água supercrítica e dos produtos iónicos. Assim, as reações de hidrólise e a extração do componente volátil das reações de carvão e pirólise são promovidas sob alta pressão. De um modo geral, os efeitos positivos e negativos anulam-se mutuamente (Adschiri *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2020).

5.2.3. Efeito do tempo de reação/ residência

O tempo de residência está relacionado com a temperatura atingida. Quanto mais elevada for a temperatura menor será o tempo de residência necessário pois as reações envolvidas serão mais espontâneas e vice-versa. O aumento do tempo de residência permite atingir um estado mais perto do equilíbrio químico assim como uma decomposição mais eficiente do alcatrão formado (Sansaniwal *et al.*, 2017).

Tabela 11 - Estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera /Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação aprimorada por sorção	Celulose microcristalina	Leito fixo de dois estágios	3,9 min	650	50 mL/min de N ₂	21,93 vol 46,11 vol	H ₂ CO	Mbeugang <i>et al.</i> , 2021
Gaseificação a vapor	Casca da avelã	Leito fluidizado borbulhante	2,9 s	775	Pressão atmosférica	47,80 38,52 3,51	H ₂ CO CH ₄	Karatas <i>et al.</i> , 2013
Gaseificação a vapor	Colmo do algodão	Leito fluidizado borbulhante	2,9 s	770	Pressão atmosférica	23,18 15,16 4,29	H ₂ CO CH ₄	Karatas <i>et al.</i> , 2013
Gaseificação a vapor	Carvão	Leito fluidizado	30 min	750	400000	77,98 2,73 12,06	H ₂ CO ₂ CH ₄	Wang <i>et al.</i> , 2014
Gaseificação a vapor	<i>Ficus virens</i>	Vertical de aço inoxidável	15 min	900	Pressão atmosférica	28,5 vol	H ₂	Zhang <i>et al.</i> , 2015

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação a vapor	Lodo de esgoto	Tubular de quartzo	--	700	1,5 MPa	32,42% vol 36,13% vol	H ₂ Hidrocarvão	Gai <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação a vapor	Serragem de pinho	Reator de leito fixo	10 min	950	1,5 MPa	70,8% vol	H ₂	Zhang <i>et al.</i> , 2017
Gaseificação a vapor	Caule do milho	Leito fixo de dois estágios	40 min	650	Pressão atmosférica	71,8 8,4 2,52 14,36	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Li <i>et al.</i> , 2017
Gaseificação a vapor	Resíduos de biomassa agrícola	Leito fluidizado	0,075 mL/min	500 - 650	101325	42,69% vol 28,93	H ₂ CO	Li <i>et al.</i> , 2017
Gaseificação a vapor	Alcatrão	RGIBBS (Reator de equilíbrio com minimização)	0,0 a 0,165g/min/g	710	Pressão atmosférica	62,96	Carvão vegetal	Zhou <i>et al.</i> , 2019
Gaseificação a vapor	Caule de milho	RGIBBS	--	850	101325	48,6 24,3 18,1 8,9	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Li <i>et al.</i> , 2020

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação catalítica	Esterco de cavalo	Tubular batch	45 min	600	23-25 MPa	2,54 mmol/g	H ₂	Nanda <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação catalítica	Manose	Batch	1 h	700	20,0 MPa	5,82 mol H ₂ /mol	H ₂	Madenoglu <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação convencional de água supercrítica	Lodo de esgoto	<i>Hastelloy</i>	60 min	400	25 MPa	57,36 30	Líquidos H ₂	Zhang <i>et al.</i> , 2020
Gaseificação com ar	Lenhite e carvão	Ex situ	10 e 18,5 h	400-850	--	23,1% vol 6,3% vol	H ₂ CO	Stańczyk <i>et al.</i> , 2011
Gaseificação com ar	Casca de avelã	Leito fluidizado borbulhante	2,9 s	775	Pressão atmosférica	4,98 10,67 3,27	H ₂ CO CH ₄	Karatas <i>et al.</i> , 2013
Gaseificação com ar	Talos de algodão	Leito fluidizado	90 min	800	--	39,4% vol 36,8 % vol 4,1% vol	H ₂ CO CH ₄	Hamad <i>et al.</i> , 2016

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação com ar	Talos de milho	Leito fixo	90 min	800	--	14,6% vol 50,2% vol 5,3 % vol	H ₂ CO CH ₄	Hamad <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação com ar	Palha de arroz	Leito fixo	90 min	800	--	12,9% vol 41,2% vol 6,7% vol	H ₂ CO CH ₄	Hamad <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação com biomassa	Pellets de pinho	Ciclone	7 s	900	--	16 15 37	H ₂ CO CO ₂	Chishty <i>et al.</i> , 2021
Gaseificação hidrotérmica	Microalgas <i>nannochloropsis</i>	Batch	75 min	410	--	37 42 18	H ₂ CO ₂ CH ₄	Guan <i>et al.</i> , 2012
Gaseificação intensificada por sorção	Lodo de esgoto	Leito fixo	10°C/min	650	Anóxica	27,7 17,1 37,6 17,6	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Chen <i>et al.</i> , 2020

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação por sorção	Celulose microcristalina	Leito fixo de dois estágios	3,9 min	650	50 mL/min de N ₂	66,15% vol 18,2% vol	H ₂ CO	Mbeugang <i>et al.</i> , 2021
Gaseificação em água supercrítica	Glicose	Contínuo	37 s	400	25,4 MPa	36	H ₂	Yoshida e matsumura 2009
Gaseificação em água supercrítica	Glicerol	Tubular de fluxo contínuo	5 s	600	25 MPa	50 ± 4 32 ± 3 9 ± 1 5 ± 1	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Chakinala <i>et al.</i> , 2010
Gaseificação em água supercrítica	Carvão Água Slurry	Tubular	5 kg/h	750	25 MPa	73,84	H ₂	Li <i>et al.</i> , 2010
Gaseificação em água supercrítica	Microalgas (<i>Chlorella vulgaris</i>)	Capilar de quartzo	2 min	500	24 MPa	7 24 48 12	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Chakinala <i>et al.</i> , 2010
Gaseificação em água supercrítica	Soro de leite	Autoclave fechado	120 min	300–390	9,5–24,5 MPa	40 80	H ₂ NH ₃	Muangrat <i>et al.</i> , 2011

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação em água supercrítica	Glicose	Contínuo	4 s	800	33 MPa	59	H ₂	Hendry <i>et al.</i> , 2011
Gaseificação em água supercrítica	Licor negro alcalino da palha de trigo	Tubular contínuo	5,2–12,4 s	500	±0.5 MPa	44,63–46,89 37,53–41,43 11,73–15,42 0,14–1,51	H ₂ CO ₂ CH ₄ CO	Cao <i>et al.</i> , 2011
Gaseificação em água supercrítica	Alga <i>nannochloropsis</i>	Não especificado	77 min	500	24 MPa	32 0,2 30 34	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Guan <i>et al.</i> , 2012
Gaseificação em água supercrítica	Lenhite	Leito fluidizado	5 min	700	22,5–25,5 MPa	62,64 3,46	H ₂ CH ₄	Guo e Jin, 2013
Gaseificação em água supercrítica	Lodo de esgoto	Batch	25 min	400	25 MPa	19,12	H ₂	Chen <i>et al.</i> , 2013
Gaseificação em água supercrítica	Lodo de esgoto desidratado	Batch	60 min	400	23,8 MPa	0,98 1 5,8 3,5 mol/kg de material orgânico	H ₂ CO CO ₂ CH ₄	Gong <i>et al.</i> , 2014

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/ Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação em água supercrítica	Lactose monoidratada	Tubular contínuo	60 s	700	25 MPa	15,97 mol/mol 1,69 L/g	H ₂ Gases	Nanda <i>et al.</i> , 2015
Gaseificação em água supercrítica	Frutose	Tubular contínuo	60 s	700	25 MPa	3,37 mol/mol 0,47– 3,25 mol/mol 0,14–1,2 mol/mol	H ₂ CO ₂ CH ₄	Nanda <i>et al.</i> , 2015
Gaseificação em água supercrítica	Carvão	Quartzo	15 min	850	25 MPa	50	H ₂	Su <i>et al.</i> , 2015
Gaseificação em água supercrítica	Estrume de galinha	Leito fluidizado contínuo	--	540	24 MPa	45,60	H ₂	Cao <i>et al.</i> , 2016
Gaseificação em água supercrítica	Licor negro	Batch	10–50 min	600–750	Atmosfera de reação rica em hidrogénio	42,5 2 15 42	H ₂ CO CH ₄ CO ₂	Cao <i>et al.</i> , 2017

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação em água supercrítica	Licor negro alcalino e carvão	Batch	30 min	700	24,11-26,99 MPa	56,28 10,74	H ₂ CH ₄	Cao <i>et al.</i> , 2017
Gaseificação em água supercrítica	Resíduos sólidos de diosgenina	Leito fluidizado contínuo	--	500	25 MPa	26,08	H ₂	Cao <i>et al.</i> , 2017
Gaseificação em água supercrítica	Lodo de esgoto	Reator contínuo	50 s	600	25 MPa	21 39,5 30,7	H ₂ CO ₂ CH ₄	Amrullah e matsumura, 2017
Gaseificação em água supercrítica	Guaiacol	Fluxo contínuo	94 s	600	25 MPa	13 12 1	Sólidos Alcatrão Carvão	Changsuwan <i>et al.</i> , 2018
Gaseificação em água supercrítica	Microalga <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Capilar de quartzo	60 min	500	41 MPa	9,32 28,3 3,75 40,27	H ₂ CH ₄ CO CO ₂	Duan <i>et al.</i> , 2018

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador /Reator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação em água supercrítica	Microalga <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Capilar de quartzo	60 min	600	55 MPa	10,60	H ₂	Duan <i>et al.</i> , 2018
						52,14	CH ₄	
						1,26	CO	
						24,41	CO ₂	
Gaseificação em água supercrítica	Resíduos alimentares	Batch	60 min	500	26 MPa	50,52	H ₂	Yan <i>et al.</i> , 2019
Gaseificação em água supercrítica	Lodo de esgoto	Batch	60 min	400	25 MPa	38,43 2,32	H ₂ CO	Hantoko <i>et al.</i> , 2019
Gaseificação em água supercrítica	Lodo de esgoto	Batch <i>Hastelloy</i>	60 min	460	25 MPa	50,13 33,67	H ₂ CO ₂	Hantoko <i>et al.</i> , 2019

Tabela 11 – Continuação da tabela de estudos recentes sobre a gaseificação.

Tecnologia	Matéria-Prima	Gaseificador/R eator	Tempo de residência/ Taxa de fluxo	Temperatura (°C)	Atmosfera/ Pressão (Pa)	Rendimento (%)	Produtos obtidos	Referência bibliográfica
Gaseificação térmica	Poda de videira e pellets de madeira	Leito fluidizado	--	800	100000	7,6	H ₂	Brito <i>et al.</i> , 2013
						16,3	CO	
						3,9	CH ₄	
						17,2	CO ₂	
Gaseificação vapor- oxigênio	Lodo de esgoto seco, pellets de palha e pellets de madeira	Leito fluidizado	30 min	850	--	40	H ₂	Schmid <i>et al.</i> , 2018
						32	CO ₂	
						20	CO	
						6	CH ₄	

A gaseificação a vapor feita por Wang *et al.*, 2014, do carvão betuminoso chinês típico para produção de hidrogénio num leito fluidizado borbulhante à escala laboratorial com CaO como solvente de CO₂ foi realizada numa gama de pressão de pressão ambiente até 4 bar. As composições dos gases do produto foram analisadas e correlacionadas com as variáveis operacionais de gaseificação que afetam a produção de H₂, tais como pressão (P), razão molar de vapor para carbono, razão molar de CaO para carbono e temperatura (T). Os resultados experimentais indicaram que a concentração de H₂ foi aumentada pelo aumento da temperatura, pressão e sob as circunstâncias constatadas. Com a presença do solvente de CaO, o CO₂ no gás de produção foi absorvido e convertido em CaCO₃ sólido, alterando assim a reação de reforma a vapor de hidrocarbonetos e gás de água para além das restrições de equilíbrio e aumentando a concentração de H₂. A concentração de H₂ foi até 78% vol (base seca) sob uma condição de 750°C, 4 bar, enquanto o CO₂ (2,7% vol) foi quase *in situ* capturado pelo adsorvente de CaO. Este estudo demonstrou que o CaO podia ser utilizado como um absorvente de CO₂ substancialmente excelente para a gaseificação a vapor pressurizado de carvão betuminoso. Para o processo de gaseificação com a presença de CaO, o gás de síntese rico em H₂ foi produzido a temperaturas e pressões muito mais baixas em comparação com as tecnologias de gaseificação de carvão comercializado. Os resultados mostraram que temperaturas e pressões mais elevadas favorecem a produção de H₂ dentro de uma determinada gama.

Em comparação com o estudo realizado anteriormente que foi uma das que obteve maior rendimento de hidrogénio, Karatas *et al.*, 2013 fizeram um ensaio apresentando os resultados experimentais da gaseificação do colmo de algodão e da casca de avelã num gasificador de leito fluidizado borbulhante à escala laboratorial, sob atmosferas de ar e vapor. A casca da avelã de acordo com os resultados é uma biomassa mais promissora do que o colmo do algodão para ambos os agentes de gaseificação. O PCI (poder calorífico inferior) aumentou 44% e 84% com a mudança do agente de gaseificação do ar para o vapor para a casca de avelã e colmo de algodão, respetivamente. Tratando-se de gaseificação com vapor, a relação vapor/combustível dificilmente altera o PCI. Portanto, a razão vapor/combustível, e, portanto, o caudal do vapor pode ser mantido no valor mínimo. Assim, o consumo de vapor pode ser mantido no valor mais baixo. Quanto à gaseificação a vapor do colmo do algodão, obtém-se um gás com as concentrações de CO, CH₄ e H₂ de 15,16%, 4,29% e 23,18%, respetivamente. No caso da gaseificação a vapor da casca de avelã, obtém-se um gás produto com as concentrações de CO, CH₄ e H₂ de 38,52%, 3,51% e 47,80%, respetivamente. Isto resulta do facto de o agente de gaseificação do vapor aumentar a produção de CO, CH₄ e H₂ através de fases sequenciais de reações de gaseificação.

Li *et al.*, 2020 propôs uma nova etapa de gaseificação faseada da biomassa para a produção de H₂, que foi proposta e estudada utilizando o *software* Aspen Plus. Foi desenvolvido e validado um modelo de equilíbrio baseado na minimização da energia livre de *Gibbs*. Os resultados

mostraram que o processo em duas etapas era mais vantajoso para a produção de H₂ em comparação com a gaseificação convencional a vapor e o processo em uma etapa. O controle independente de cada etapa permitiu realizar uma gaseificação a vapor a alta temperatura na primeira etapa e uma subsequente reforma a vapor a baixa temperatura na segunda etapa, o que promoveu assim a gaseificação da biomassa e beneficiou a reação do *water gas shift* (WGS) para produzir mais H₂. Entretanto, a absorção *in situ* de CO₂ de CaO na segunda fase poderia enriquecer a concentração de H₂ no gás do produto, e também deslocou ainda mais o equilíbrio da reação do WGS para converter mais CO em H₂. Com a introdução adicional de catalisador para a reforma do metano a vapor, poderia ser alcançado H₂ de alta pureza com a concentração de 99,7% (vol) e rendimento de 142,8g/kg de biomassa.

Na **Gaseificação em água supercrítica** (SCWG, do inglês Supercritical Water Gaseification) a alta temperatura facilita a produção de hidrogénio a partir do carvão e a gaseificação completa do carvão. Em contrapartida, quando a temperatura aumenta, o nível de tensão do reator metálico aumenta. Ademais, com temperaturas de operação mais elevadas e ambiente químico agressivo inerente, a corrosão do material do reator agravar-se-ia e aumentaria o investimento em equipamento e risco de operação. Dependendo do ambiente químico específico, pode ainda haver corrosão significativa no sistema SCWG.

Os resíduos orgânicos tais como biomassa lenhocelulósica, resíduos sólidos municipais, lamas de depuração e estrume animal têm atraído a atenção como fontes alternativas de energia. O estrume de gado, um resíduo gerado em quantidades excedentárias do confinamento, tem sido sempre uma das principais preocupações ambientais. O estudo feito por Nanda *et al.*, 2016 está centrado na identificação da possibilidade do esterco de cavalo como matéria-prima da próxima geração para a produção de biocombustíveis através da gaseificação em água supercrítica. O estrume de cavalo foi gaseificado em água supercrítica para examinar os efeitos da temperatura (400-600°C), a relação biomassa/água (1:5 e 1:10) e o tempo de reação (15-45 min) a uma gama de pressão de 23-25 MPa. A gaseificação em água supercrítica de esterco de cavalo a 600°C e a relação biomassa/água de 1:10 durante 45 min revelou rendimentos máximos de hidrogénio (5,31 mmol/g), rendimentos totais de gás (20,8 mmol/g) com maior eficiência de conversão de carbono (43,1%) e maior valor de aquecimento inferior dos produtos a gás (2920 kJ/Nm³). Os resultados propõem que a gaseificação em água supercrítica poderia ser uma tecnologia de remediação proficiente para esterco de cavalo para produzir produtos de gás ricos em hidrogénio.

A decomposição hidrotérmica da manose em água próxima e supercrítica foi analisada por Madenoğlu *et al.*, 2016 a 500-700°C e 20,0-42,5 MPa com um tempo de reação de 1 h na ausência e presença de catalisador alcalino (K₂CO₃). Foram observados produtos gasosos, produtos aquosos, e resíduos no reator descontínuo. Os gases produzidos eram dióxido de carbono, metano,

hidrogénio, monóxido de carbono, e hidrocarbonetos C2-C4. O efeito dos parâmetros de funcionamento (temperatura e pressão) na distribuição do produto foi examinado na ausência e presença de carbonato de potássio. Os rendimentos do produto gasoso foram comparados com os valores de equilíbrio teóricos que são estimados pela minimização da energia livre de *Gibbs*. Na ausência de catalisador, o rendimento do hidrogénio foi de 5,82 mol H₂/mol manose a 700°C e 20,0 MPa. Nesta condição, o rendimento teórico de equilíbrio de hidrogénio foi encontrado como 5,78 mol H₂/mol manose que estava muito próximo do valor experimental e a adição de K₂CO₃ aumentou o rendimento de hidrogénio para 10,34 mol H₂/mol manose. O rendimento em hidrogénio aumentou com o aumento da temperatura e a diminuição da pressão. O ácido acético foi o principal componente do produto aquoso na gaseificação da manose. Os resultados da gaseificação da manose podem ser avaliados para aplicações reais de biomassa para prever os produtos gasosos e aquosos que têm um potencial para serem utilizados como matéria-prima química valiosa para a indústria.

Karatas *et al.*, 2013 realizaram experiências com casca de avelã e colmo de algodão como já mencionadas anteriormente. Fizerem ensaios para a gaseificação a vapor e também com ar, podendo assim observar qual o método mais vantajoso. Para a gaseificação de casca de avelã com ar, as mudanças nas concentrações são grandes. As concentrações de CO, CH₄ e H₂ aumentam muito e a concentração de N₂ diminui significativamente com a diminuição do ER (razão de equivalência) de 0,68 para 0,25. O CO aumenta de 10,67% para 24,78%, o CH₄ aumenta de 3,27% para 8,41% e o H₂ aumenta de 4,98% para 15,63% para a casca da avelã. Na presença de oxigênio insuficiente, o carbono (carvão) é convertido em CO. O CO no reator de gaseificação ativa as reações de deslocamento e metanação. Por causa das reações entre CO e H₂, a produção de CH₄ aumenta. De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que a condição de gaseificação é bem executada para todos os casos.

A gaseificação em água supercrítica convencional (SCWG) de lodos de esgoto produz resíduos líquidos com poluentes orgânicos, metais pesados e afins. Com o intuito de contribuir para a redução dos resíduos líquidos libertados no ambiente, Zhang *et al.*, 2020 realizaram um estudo que procurou investigar a reutilização de resíduos líquidos como água de alimentação no SCWG subsequente. A experiência foi realizada num reator *Hastelloy* de 500 ml de capacidade a 400°C e acima de 25 MPa durante 60 minutos com uma proporção de 4:1 em peso seco de 10% de sólido (mistura de lodo e cacho de fruta vazia) e 90% em peso de alimento líquido. A utilização de líquido reciclado aumentou a concentração de K e Na na solução de 26 mg/L e 91 mg/L para 49 mg/L e 290 mg/L, respetivamente. Posteriormente, houve um aumento considerável na produção de gás de síntese de 9,4 para 14,1 mol/kg de matéria orgânica. Além disso, a produção de H₂ aumentou em 30%. O aumento da produção de gás de síntese pode ser atribuído aos sais alcalinos que operam como catalisadores homogêneos e à matéria orgânica no resíduo líquido. Assim, os

resultados experimentais implicam que a reciclagem de resíduos líquidos no SCWG não só melhorará a eficiência da produção de gás de síntese do sistema, como também permitirá a acumulação de metais pesados no resíduo sólido para prevenir o risco de poluição.

Hamad *et al.*, 2016 realizaram estudos experimentais para gaseificação num reator de leito fixo de diferentes resíduos de biomassa (talos de milho, palha de arroz e colmo de algodão) transportados a uma razão de equivalência de 0,25, temperatura, 800°C, tempo de reação 90 min, utilizando diferentes catalisadores (argila *marly*, dolomite, cloreto de zinco e pó de forno de cimento calcinado). Os talos de milho proporcionam o maior grau de reatividade (maior conversão de carbono) para as condições de gaseificação aplicadas, enquanto a palha de arroz foi a mais baixa. No entanto, a eficiência de gaseificação e o teor de hidrogénio foram os mais elevados para os colmos de algodão, mesmo quando não foi utilizado nenhum catalisador. Assim, o colmo de algodão é mais adequado para o processo de gaseificação, como pode ser observado na tabela seguinte:

Tabela 12 - Produtos obtidos da gaseificação da biomassa com e sem catalisador (Hamad *et al.*, 2016).

Biomassa com catalisador de pó de forno de cimento (5% em pó)	Composição do gás, % vol			H₂/CO	Eficiência de gaseificação
	H₂	CH₄	CO	Razão	
Talos de algodão	39,4	4,1	36,8	1,07	89,0
Talos de milho	32	4,3	42,0	0,76	83,8
Palha de arroz	26,4	6,4	35,0	0,75	62,6
Biomassa sem catalisador					
Talos de algodão	22,4	4,5	49,6	0,45	73,1
Talos de milho	14,6	5,3	50,2	0,29	70,6
Palha de arroz	12,9	6,7	41,2	0,31	55,6

O ensaio feito por Stańczyk *et al.*, 2011 teve como objetivo principal a comparação experimental da gaseificação do ar de camadas de lenhite e hulha simuladas no reator *ex situ*. No estudo, a lenhina e a hulha foram gaseificados com oxigénio, ar e ar enriquecido com oxigénio como agentes de gaseificação nas experiências de 50 e 30 h, respetivamente, com um teor intrínseco de carvão e de humidade dos estratos como fonte de vapor. A aplicação do ar como único agente de gaseificação foi problemática para uma rápida diminuição das temperaturas, deterioração da qualidade do gás e, finalmente, a cessação das reações de gaseificação. A utilização de uma mistura de oxigénio/ar de uma relação ótima levou a uma valiosa produção de gás. Na gaseificação de lenhite com oxigénio/ar (de 4:2 relação em volume) os conteúdos médios de H₂ e CO no gás do produto foram de 23,1% vol e 6,3% vol, respetivamente.

Guan *et al.*, 2012 determinaram os efeitos de diferentes variáveis de processo na gaseificação de *Nannochloropsis sp.*, uma microalga marinha, em água com um catalisador Ru/C a 410°C. Cerca de 45% de eficiência de gaseificação foi alcançada em 75 min com um carregamento de catalisador (massa de catalisador Ru/C/massa de biomassa de algas secas) de 1 g/g, uma densidade de água de 0,096 g/cm³, e um carregamento de 4,3% em peso de algas. Tempos de reação mais longos, cargas de catalisador e densidades de água mais altas e cargas de algas mais baixas proporcionaram maiores rendimentos de gás. O nível de carga do catalisador teve o efeito mais significativo tanto no rendimento quanto na composição dos produtos gasosos.

A gaseificação de vapor aprimorada por sorção para tratamento de lodo de esgoto é experimentalmente investigada para gerar gás de síntese rico em hidrogénio em um reator de leito fixo. O objetivo principal dos testes realizados por Chen *et al.*, 2020 foi determinar as condições ótimas e os solventes adequados para este processo. Para a gaseificação sem o solvente a 650°C, a fração molar de hidrogénio é de apenas 27,7%. As frações molares de CO, CO₂ e CH₄ são 17,1%, 37,6% e 17,6%, respetivamente. Com a adição de CaO durante a gaseificação, tanto a fração molar de hidrogénio quanto o rendimento aumentam significativamente. Para CaO a 650°C, a fração molar de hidrogénio e o rendimento aumentam para 74,1% e 0,280 m³/kg, respetivamente, e a fração molar de CO₂ diminui para 6,1%. A alta temperatura aumentou o rendimento do gás de síntese e a eficiência do gás frio, porém diminuiu a fração molar de hidrogénio. CaO-Al permitiu uma maior fração molar de hidrogénio e um maior rendimento. Além disso, como Al₂O₃ é mais barato que La₂O₃ e ZrO₂, foi selecionado como o material de suporte mais adequado para CaO, considerando tanto o seu desempenho como o seu custo. Uma elevada taxa de carga de Co melhorou o rendimento de hidrogénio e a eficiência do gás frio, mas diminuiu a fração molar de hidrogénio. Estes resultados sugerem que a gaseificação enriquecida com CaO para produzir gás de síntese rico em hidrogénio é um método apropriado para a eliminação de lodos de esgoto.

Li *et al.*, 2010 utilizaram a tecnologia da gaseificação em água supercrítica para converter o carvão num produto gasoso rico em hidrogénio de forma limpa e eficiente. O dispositivo experimental foi projetado para temperatura de até 800°C e pressão de até 30 MPa. As características de gaseificação do carvão foram investigadas dentro da faixa de condição experimental de temperatura de 650-800°C, pressão de 23-27 MPa. A fração de hidrogénio atingiu até 72,85%. Os resultados experimentais demonstraram o futuro brilhante da conversão eficiente e limpa de carvão. As características da gaseificação do carvão foram investigadas experimentalmente em um reator tubular e os resíduos sólidos foram analisados. As conclusões foram que a alta temperatura favorece a gaseificação do carvão em água supercrítica, e a pressão não tem efeito significativo nos resultados da gaseificação. A taxa de fluxo tem certo efeito nos

resultados de gaseificação; a taxa de fluxo ideal deve ser selecionada de acordo com a condição da experiência. A gaseificação oxidativa parcial em água supercrítica do carvão pode melhorar a eficiência da gaseificação e da gaseificação do carbono e diminuir a produção de carvão e alcatrão, mas a fração de hidrogênio e o rendimento do hidrogênio também diminuem.

A água supercrítica (temperatura crítica, 374,3°C e pressão crítica, 22,1 MPa) é uma fase única que possui as características de líquido e gás. Não há tensão superficial e nenhum limite de fase líquido/gás. Tem densidade suficiente para dar poder de dissolução apreciável, difusividade maior do que em líquidos e menor viscosidade para melhorar o transporte de massa. A gaseificação da lenhite foi realizada no Laboratório Estadual de Escoamento Multifásico em Engenharia de Energia por Guo e Jin, 2013. O dispositivo experimental é uma autoclave. As características de gaseificação foram: pressão de 22,5–25,5 MPa, tempo de residência de 5 min, 2% de lenhite+2% de concentração de K₂CO₃. Foi observado que conforme a temperatura aumenta de 600°C a 700°C, a fração de hidrogênio aumenta de 55,26% para 62,64%. Enquanto isso, a fração de CH₄ diminui de 4,67% para 3,46%. Conforme a temperatura aumenta de 600 para 700°C, o rendimento do hidrogênio é de 26,23 mol/kg e aumenta para 57,71 mol/kg.

Cao *et al.*, 2017 estudaram o desempenho da gaseificação de misturas licor negro/carvão em água supercrítica a 600-750°C, utilizando um reator *batch*. Foi encontrado um efeito sinérgico durante a co-gaseificação do carvão e do licor negro. A presença de licor negro melhorou a gaseificação do carvão para fornecer o álcali como catalisador. A presença de carvão faz pleno uso do catalisador alcalino e gera carvão poroso que pode estar ativo para melhorar a gaseificação do licor negro. O efeito sinérgico foi mais evidente quando a relação de mistura de carvão e licor negro era de cerca de 50:50. Tanto a análise termodinâmica como os resultados experimentais mostraram que mais hidrogênio pode ser produzido a temperaturas mais elevadas. As experiências também mostraram que o aumento da temperatura aumentou significativamente a gaseificação e melhorou a eficiência da gaseificação. A diminuição da concentração total das misturas melhorou a eficiência de gaseificação e a fração H₂ (59,26%) no produto gasoso, mas reduziu a fração CH₄, o que é consistente com a análise termodinâmica.

Um novo reator contínuo de gaseificação em água supercrítica foi concebido para investigar a gaseificação da glicose em água supercrítica a temperaturas elevadas e tempos de residência baixos. Foi realizada uma experiência fatorial completa por Hendry *et al.*, 2011 para determinar os efeitos da concentração da alimentação, temperatura e tempo de residência na gaseificação da glicose. Os níveis de temperatura (750°C e 800°C) foram mais elevados do que nunca, enquanto os tempos de residência (4 e 6,5 s) foram mais curtos do que nunca utilizados em estudos anteriores de gaseificação em água supercrítica. O reator provou ser capaz de atingir taxas de gaseificação mais elevadas do que as anteriormente demonstradas com altas eficiências e

rendimentos. Além disso, a reação de gaseificação da glucose foi modelada através da estimativa da energia de ativação e da ordem de reação da gaseificação da glucose em água supercrítica.

A gaseificação de microalgas (biomassa proteica) em água supercrítica foi testada por Chakinala *et al.*, 2010 em reatores *batch* (capilares de quartzo) e de fluxo contínuo. Testes preliminares de gaseificação de algas foram feitos com capilares de quartzo em condições operacionais variáveis, como temperatura (400–700°C), tempo de reação (1–15 min) e adição de catalisadores. Para a conversão não catalisada, verificou-se que, semelhante a estudos anteriores com biomassa lenhocelulósica, a eficiência da gaseificação das algas (*Chlorella vulgaris*) aumenta com temperaturas mais altas e concentrações mais baixas. Para a gaseificação não catalisada, a eficiência máxima de gaseificação das algas foi de 75% a 600°C para tempos de reação de 4 min e superiores. Esta seletividade máxima parece ser "cinética" e pode ser aumentada com o aumento da temperatura, a diminuição da concentração, e a aplicação de catalisadores. A adição de catalisadores (Ru/TiO₂) acelerou a eficiência de gaseificação até um máximo de 84% a 600°C e 2 min de tempo de reação com catalisadores à base de níquel. A biomassa algal pode ser mais facilmente gaseificada em água supercrítica, sendo, no entanto, necessária uma avaliação mais aprofundada das condições ótimas de processo e desenvolvimento de catalisadores para se conseguir uma gaseificação completa em condições de reação técnica e economicamente mais favoráveis.

O efeito da temperatura (380–460°C), concentração de lodo (5–30% em peso) e adição de carvão ativado (2–8% em peso) no SCWG foi estudado experimentalmente pelo Hantoko *et al.*, 2019. Os resultados mostraram que a temperatura mais alta e a concentração de lodo mais baixa favoreceram a produção de gás de síntese, levando a um maior rendimento de hidrogênio. Enquanto a pressão não teve efeito significativo no desempenho do SCWG. A adição de carvão ativado aumentou o rendimento do gás de síntese e melhorou a eficiência do gás frio. Um rendimento de gás de síntese de 6,44 mol/kg contendo 38,43% de H₂ foi obtido do SCWG a 400°C com o carregamento de carvão ativado de 8% em peso.

No estudo de Yan *et al.*, 2019, o resíduo alimentar modelo foi gaseificado em gás de síntese rico em hidrogênio em um reator *batch* sob água supercrítica. O substrato modelo consistia em arroz, frango, repolho e óleo de cozinha. Os efeitos dos principais parâmetros operacionais, incluindo temperatura (420–500°C), tempo de residência (20–60 min) e concentração de matéria - prima (2–10% em peso) foram investigados. Sob as condições ótimas a 500°C, 2% em peso de matéria-prima e tempo de residência de 60 min, o maior rendimento de H₂ de 13,34 mol/kg e o rendimento total de gás de 28,27 mol/kg foram obtidos a partir de testes não catalíticos.

A indústria vinícola, uma importante atividade económica em Portugal, particularmente na região do Alto-Alentejo, gera grandes quantidades de resíduos, especialmente pela poda das vinhas. Várias tecnologias, incluindo aplicações energéticas e agrícolas, têm sido consideradas para a valorização económica destes resíduos. Brito *et al.*, 2013 apresentaram os resultados de um estudo sobre a potencial utilização de biomassa de poda da vinha como fonte de produção de gás de síntese por gaseificação térmica. O estudo foi realizado numa instalação piloto de gaseificação térmica, instalada no Parque Industrial de Portalegre. A unidade baseia-se em tecnologia de leito fluidizado, com uma capacidade de processamento de 70 kg/h, e funciona a 800°C. Foi desenvolvido um modelo termodinâmico para permitir a simulação do processo de gaseificação da biomassa num gasificador de leito fluidizado e para antecipar a composição do gás produzido a partir da análise elementar da biomassa e as condições operacionais prevalentes. Os resultados experimentais ajustam-se bastante bem ao modelo utilizado. As experiências mostram que as misturas de poda de vinha com *pellets* de madeira podem ser utilizadas para a produção de gás de gaseificação com composição promissora, permitindo valorização energética destes resíduos da produção de vinho.

Schmid *et al.*, 2018 fizeram um estudo sobre a gaseificação de combustíveis biogénicos de baixo custo para produção de gás de síntese com avaliação da composição do gás e das concentrações de impurezas. As experiências foram realizadas em uma instalação de leito fluidizado borbulhante com entrada de combustível de 20 kW, com vapor e oxigénio como agentes de gaseificação. Lodo de esgoto seco, *pellets* de palha e, para referência, *pellets* de madeira foram usados como combustíveis. Pode demonstrar-se que a utilização de combustíveis baratos, mas de menor qualidade, tais como *pellets* de palha e lamas de esgoto, é tecnicamente viável no que diz respeito ao funcionamento estável do gasificador. No que diz respeito aos gases permanentes, para os três combustíveis foi obtida quase a mesma composição e rendimentos de gás do produto. O gás do produto tem frações molares elevadas de H₂ e CO de 40% e 20%, respetivamente, tornando o gás de síntese geralmente adequado para várias aplicações de síntese. Uma vez que para a gaseificação de madeira e palha apenas são viáveis unidades industriais de dimensão elevada, e considerando o potencial de combustível, conclui-se que a síntese de combustíveis de transporte ou produtos químicos poderia ser uma aplicação adequada.

6. Conclusões

A biomassa é uma das principais fontes de energia renovável, para além da energia eólica e solar. Em contraste com a energia eólica e solar, a produção de energia renovável a partir da biomassa pode ser ajustada às necessidades de consumo atuais. A biomassa pode ser queimada diretamente a fim de produzir calor e eletricidade, e através de processos termoquímicos e bioquímicos pode ser convertida em biocombustível nas formas de sólido (por ex., carvão vegetal), líquido (por ex., bio-óleos, metanol e etanol), e gás (por ex., metano e hidrogénio), que pode ser ainda mais utilizado para a produção de calor e energia. Este trabalho forneceu uma visão geral dos princípios, reações e aplicações de quatro processos termoquímicos fundamentais (combustão, pirólise, gaseificação e liquefação) para a produção de bioenergia, bem como desenvolvimentos recentes nessas tecnologias.

A pirólise rápida tem vindo a despertar grande interesse, uma vez que é até à data a única tecnologia disponível industrialmente para a produção de bio-óleos. Um dos métodos mais rentáveis e altamente eficazes é o processo de pirólise rápida. Este processo é mais vantajoso em termos de armazenamento e transporte de combustíveis líquidos em comparação com outros processos, enquanto a pirólise lenta é vantajosa para aplicações de maior rendimento petrolífero. Contudo, a maior desvantagem do processo de pirólise lenta é o seu maior tempo de residência. Este processo requer um maior consumo de energia devido à menor taxa de aquecimento com tempo de residência elevado. Em comparação com todos os processos a pirólise por micro-ondas representa a maior eficiência energética devido ao seu menor consumo de energia e à menor produção de cinzas do que outros métodos. Normalmente são obtidos três produtos: gás, licor pirolenhoso e carvão vegetal em quantidades relativas que dependem do método de pirólise e dos parâmetros de reação. A pirólise rápida, é utilizada, por exemplo, para a maximização da produção de produtos líquidos consoante a temperatura utilizada, enquanto a pirólise lenta é designada por carbonização e é utilizada para a maximização da produção de carvão sólido.

Embora o mecanismo da pirólise da biomassa tenha sido pesquisado intensivamente, existem ainda muitos desafios. Para obter avanços e desvendar a complexidade própria da rede de pirólise da biomassa, sugere-se a continuação dos esforços para se concentrarem nas seguintes questões:

- Métodos convenientes para extrair, alterar ou sintetizar fragmentos estruturais específicos de biomassa. Um trabalho extensivo é necessário para revelar a correlação entre a estrutura da biomassa e a reação de pirólise.
- Tecnologias qualitativas e quantitativas rápidas e confiáveis para caracterizar compostos derivados da pirólise.

- Simulação molecular da reação de pirólise para refletir o processo real de conversão de biomassa.
- Melhoria da pirólise catalítica. Para melhorar o desempenho catalítico com maior seletividade de produtos desejáveis e menor geração de carvão, o desenvolvimento de um sistema catalisador avançado ainda é uma questão importante em pesquisas futuras sobre pirólise catalítica de biomassa.
- Coordenação da pirólise de biomassa com o pré-tratamento da matéria-prima e o pós-processamento dos produtos da pirólise.

A gaseificação em água supercrítica é uma abordagem promissora para a produção de hidrogénio a partir de matérias-primas de biomassa, especialmente aquelas com elevado teor de humidade. A principal vantagem do processo é que o rendimento de H₂ vai aumentando à medida que aumenta a temperatura de gaseificação. Este processo é um processo eficiente em termos energéticos, uma vez que a biomassa pode ser alimentada sem secagem, poupando-se assim os custos de secagem da mesma forma que o método gaseificação hidrotérmica. A limitação relatada é que a eficácia da gaseificação diminui com o uso repetido dos catalisadores durante o processo.

No entanto, as grandes instalações de gaseificação acarretam ainda riscos (por exemplo, disponibilidade de biomassa) que fazem com que os projetos diminuam a atratividade económica e podendo causar a interrupção do funcionamento das instalações de gaseificação existentes após o fim dos subsídios governamentais. Há ainda diversos tipos distintos de tecnologias de gaseificação utilizadas nas instalações de gaseificação, e os custos de investimento variam muito, o que dificulta as análises técnico-económicas e evidencia a falta de maturidade da tecnologia de gaseificação e a comprovada eficiência de custos. Estes fatores diminuem a confiança dos investidores, dificultando consequentemente a implementação de projetos de gaseificação em grande escala, particularmente para a síntese de bio produtos. Para evitar desvantagens associadas aos custos, disponibilidade e logística de biomassa e competição com o abastecimento de alimentos e outros usos da terra, a substituição de madeira de alta qualidade por matérias-primas de resíduos de baixo custo deve ser considerada. A valorização destes resíduos também pode ajudar a ultrapassar a problemática da sua eliminação, promovendo simultaneamente a sustentabilidade da gestão dos resíduos e do abastecimento energético, agindo assim de acordo com os princípios da economia circular.

Sob o ponto de vista prático, e na melhoria do processo de gaseificação, há ainda muito trabalho a ser exaustivamente investigado, designadamente; tipo de matéria-prima versus tipo de gaseificador, o dimensionamento do gaseificador, e a influência das diferentes zonas (ou seja, secagem, combustão e redução) na produção de gás de síntese. Deverão ser realizados mais estudos nas áreas de gaseificação em água supercrítica, e gaseificação de plasma devido aos

benefícios acumulados resultantes de um avanço na sua investigação. Por exemplo, a gaseificação em água supercrítica eliminaria a necessidade de secagem da biomassa húmida e reduziria a formação de alcatrão porque o gás do produto se dissolve rapidamente na água supercrítica. Além disso, um melhor gaseificador de plasma permitiria um melhor tratamento de resíduos húmidos e tóxicos, produzindo melhores valores de aquecimento e gases do produto. Outros estudos sobre a eliminação do alcatrão e a integração com outras tecnologias, tais como a digestão anaeróbia, deveriam ser explorados.

Em suma, é necessário um maior trabalho de otimização para que a conversão termoquímica da biomassa seja comercializada. Com base nesta revisão, algumas medidas produtivas devem ser tomadas para desenvolver e compreender processos químicos importantes para o desenvolvimento da tecnologia da conversão termoquímica da biomassa.

Referências

- Abdol Ebadi e Hikmat Hisoriev (2019). Gasification of algal biomass (*Cladophora glomerata* L.) with CO₂/H₂O/O₂ in a circulating fluidized bed, *Environmental Technology*, 40 (6), 749 – 755. Obtido por: <https://iahr.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2017.1406538>.
- Adschiri T., Sato T., Shibuichi H., Fang Z., Okazaki S., Arai K., (2000). Extraction of Taiheiyo coal with supercritical water–HCOOH mixture. *Fuel*, 79 (3–4), 243-248. Obtido por: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00158-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00158-1).
- Agriterra, (2020). Renováveis: biomassa assegura 56% da produção. *Redação Induglobal*. Obtido por: <https://www.agriterra.pt/Artigos/316467-Renovaveis-biomassa-assegura-56-por-ciento-da-producao.html>.
- AGROPORTAL, (2020). Floresta portuguesa ocupa mais de um terço do país. Obtido por: <https://www.agroportal.pt/floresta-portuguesa-ocupa-mais-de-um-terco-do-pais>., visitado em 12 de dezembro de 2020.
- Alvarez J., Amutio M., Lopez G., Barbarias I., Bilbao J., Olazar M., (2015). Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 273, 173-183. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.047>.
- Alvarez J., Amutio M., Lopez G., Bilbao J., Olazar M., (2015). Fast co-pyrolysis of sewage sludge and lignocellulosic biomass in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 159, 810-818. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.039>.
- Amrullah A., Matsumura Y., (2018). Supercritical water gasification of sewage sludge in continuous reactor. *Bioresource Technology*, 249, 276-283. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.002>.
- APREN, (2018). A Importância da Biomassa no Mix Energético Nacional. ISA – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. Obtido por: <https://www.apren.pt/contents/documents/solange-araujo.pdf>.
- APREN, (2019). Anuário – Portugal precisa da nossa energia. Obtido por: <https://www.apren.pt/contents/documents/anuario-2019-aprenebook-v2.pdf>
- Aranda G, Grootjes A, Van der Meijden C, Van der Drift A, Gupta D, Sonde R, *et al* (2016). Conversion of high-ash coal under steam and CO₂ gasification conditions. *Fuel Process Technol*; 141:16–30. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382015300333>.

- Aravind S., Kumar P.S., Kumar N.S., Siddarth N., (2020). Conversion of green algal biomass into bioenergy by pyrolysis. A review. *Environ Chem, Lett*, 18, 829–849. Obtido por: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00990-2>.
- Ardila, C. (2015). Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo. Dissertação, Campinas. Obtido por: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/reposip/266052/1/ardila_yuranycamacho_d.pdf.
- Asadieraghi M. e Daud W., (2015). In-situ catalytic upgrading of biomass pyrolysis vapor: Co-feeding with methanol in a multi-zone fixed bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 92, 448-458. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.082>.
- Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), 2020. Obtido por: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>. Visitado em 08 de dezembro de 2020.
- Aysu, T., Sanna, A., 2015. Nannochloropsis algae pyrolysis with ceria-based catalysts for production of high-quality bio-oils. *Bioresour. Technol*, 194, 108–116. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.027>.
- Babich I., Hulst M., Lefferts L., Moulijn J., O'Connor P., Seshan K., (2011). Catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality liquid bio-fuels. *Biomass and Bioenergy*, 35 (7), B3199-3207. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.043>.
- Barbosa, M., (2008). Análise da utilização de biomassa e resíduos florestais para a produção de pellets. Dissertação de mestrado, Aveiro. Obtido por: <https://core.ac.uk/download/pdf/15562671.pdf>.
- BCSD, (2007). Biomassa: Resumo Temático I Energia e Clima. Obtido por <http://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2013/11/publ-2007-Biomassa.pdf>. Visitado em 10 de dezembro de 2020.
- Belotti G., Caprariis B., Filippis P., Scarsella M., Verdone N., (2013). Effect of *Chlorella vulgaris* growing conditions on bio-oil production via fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 61, 187-195. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.011>.
- Borges F., Xie Q., Min M., Muniz L., Farenzena M., Trierweiler J., Chen P., Ruan R., (2014). Fast microwave-assisted pyrolysis of microalgae using microwave absorbent and HZSM-5 catalyst. *Bioresource Technology*, 166, 518-526. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.100>.

- Borges, A. C. (2020). GASEIFICAÇÃO DE CAVACO DE EUCALIPTO EM ÁGUA SUPERCRÍTICA NA PRESENÇA DO CATALISADOR NiFe₂O₄. Tese doutoramento - Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador. Obtido por: https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/32553/1/Tese_AneCarolinePereiraBorges_VERS%C3%83O%20FINAL%20CORRIGIDA.pdf.
- Brito P., Oliveira A., Rodrigues L., (2013). Energy Valorization of Solid Vines Pruning by Thermal Gasification in a Pilot Plant. *Waste Biomass Valor*, 5, 181–187. Obtido por: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12649-013-9246-7.pdf>.
- Campanella A., Harold M., (2012). Fast pyrolysis of microalgae in a falling solids reactor: Effects of process variables and zeolite catalysts. *Biomass and Bioenergy*, 46, 218-232. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.08.023>.
- Cao C., Guo L., Chen Y., Guo S., Lu Y., (2011). Hydrogen production from supercritical water gasification of alkaline wheat straw pulping black liquor in continuous flow system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (21), 13528-13535. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.101>.
- Cao C., He Y., Wang G., Jin H., Huo Z., (2017). Co-gasification of Alkaline Black Liquor and Coal in Supercritical Water at High Temperatures (600–750 °C). *Energy Fuels*, 31, 13585–13592. Obtido por: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03044>.
- Cao C., Xu L., Ele Y., Guo L., Jin H., Huo Z., (2017). High-Efficiency Gasification of Wheat Straw Black Liquor in Supercritical Water at High Temperatures for Hydrogen Production. *Energy Fuels*, 31 (4), 3970–3978. Obtido por: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03002>.
- Cao W., Cao C., Guo L., Jin H., Dargusch M., Bernhardt D., Yao X., (2017). Gasification of diosgenin solid waste for hydrogen production in supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (15), 9448-9457. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.115>.
- Cao W., Cao C., Guo L., Jin H., Dargusch M., Bernhardt D., Yao X., (2016). Hydrogen production from supercritical water gasification of chicken manure. *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, 22722 – 22731. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.031>.
- Caputo G., Dispenza M., Rubio P., Scargiali F., Marotta G., Brucato A., (2016). Supercritical water gasification of microalgae and their constituents in a continuous reactor. *The*

Journal of Supercritical Fluids, 118, 163-170. Obtido por:
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.08.007>.

- Cardoso, B. (2012) Uso da Biomassa como Alternativa Energética. Projeto de graduação, Rio de Janeiro. Obtido de <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/10-08-2015/000844833.pdf>
- Castanheira, D. F. (2017). Estudo de um sistema de gaseificação para cogeração estudo experimental e de aplicação. Dissertação de mestrado, Porto.
- Castro, V. 2016). Estudo em Simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional de Modelo Cinético de Secagem de Biomassa em Gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante. Projeto de Graduação, Rio de Janeiro. Obtido por <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018316.pdf>.
- Chakinala A., Brilman D., Swaaij W., Kersten S., (2010). Catalytic and Non-catalytic Supercritical Water Gasification of Microalgae and Glycerol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 1113-1122. Obtido por: <https://doi.org/10.1021/ie9008293>.
- Changsuwan P., Paksung N., Inoue S., Inoue T., Kawai Y., Noguchi T., Tanigawa H., Matsumura Y., (2018). Conversion of guaiacol in supercritical water gasification: Detailed effect of feedstock concentration. *The Journal of Supercritical Fluids*, 142, 32-37. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.024>.
- Che Q., Yang M., Wang X., Chen X., Chen W., Yang Q., Yang H., Chen H., (2019). Aromatics production with metal oxides and ZSM-5 as catalysts in catalytic pyrolysis of wood sawdust. *Fuel Processing Technology*, 188, 146-152. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.02.016>.
- Che Q., Yang M., Wang X., Yang Q., Chen Y., Chen X., Chen W., Hu J., Zeng K., Yang H., Chen H., (2019). Preparation of mesoporous ZSM-5 catalysts using green templates and their performance in biomass catalytic pyrolysis. *Bioresource Technology*, 289, 121729. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121729>.
- Chen J., Wang Q., Xu Z., Jiaqiang E., Leng E., Zhang F., Liao G., (2021). Process in supercritical water gasification of coal: A review of fundamentals, mechanisms, catalysts and element transformation. *Energy Conversion and Management*, 237, 114122. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114122>.
- Chen S., Zhao Z., Soomro A., Ma S., Wu M., Sun Z., Xiang W., (2020). Hydrogen-rich syngas production via sorption-enhanced steam gasification of sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, 138, 105607. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105607>.

- Chen W.H., Lin B.J., Huang M.Y., Chang J.S., (2015). Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review. *Bioresource Technology*, 184, 314-327. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.050>.
- Chen Y., Guo L., Jin H., Yin J., Lu Y., Zhang X., (2013). An experimental investigation of sewage sludge gasification in near and super-critical water using a batch reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (29), 12912-12920. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.076>.
- Chishty M., Umeki K., Risberg M., Wingren A., Gebart R., (2021). Numerical simulation of a biomass cyclone gasifier: Effects of operating conditions on gasifier performance. *Fuel Processing Technology*, 218. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106861>.
- Correia, M., (2009). Avaliação do potencial de jatropha curcas l. Para produção de biodiesel (Santiago - Cabo Verde). Dissertação de mestrado, Lisboa. Obtido por: <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/1601/1/Tese.pdf>.
- Das P., Chandramohan V.P., Mathimani T., Pugazhendhi A., (2021). A comprehensive review on the factors affecting thermochemical conversion efficiency of algal biomass to energy, *Science of The Total Environment*. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720377445>.
- Das P., Chandramohan V.P., Mathimani T., Pugazhendhi A., (2021). Recent advances in thermochemical methods for the conversion of algal biomass to energy. *Science of The Total Environment*, 766. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720381390>.
- Demirbas A., (2007). Producing Bio-oil from Olive Cake by Fast Pyrolysis. *Energy Sources, Part A*, 30 (1). Obtido por: <https://doi.org/10.1080/00908310600626747>.
- Dermibas, T.; Dermibas, C., (2009). Fuel properties of Wood Species, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v.31, n.16, p.1464-1472. Obtido por: <https://doi.org/10.1080/15567030802093153>.
- DGEG, (2020). Estatísticas rápidas - nº 191. Direção-Geral de Energia e Geologia 3. Obtido por: <https://www.dgeg.gov.pt/media/vwrlxq1y/dgeg-arr-2020-10.pdf>.
- Díaz-Rey M, Cortés-Reyes M, Herrera C, Larrubia M, Amadeo N, Laborde M, *et al* 2015. Hydrogen-rich gas production from algae-biomass by low temperature catalytic gasification. *Catalysis Today*, 257:177–84. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092058611400409X>.

- Duan P., Li S., Jiao J., Wang F., Xu Y., (2018). Supercritical water gasification of microalgae over a two-component catalyst mixture. *Science of The Total Environment*, 630, 243-253. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.226>.
- Embrapara, (2012). Briquetagem e Peletização de Resíduos Agrícolas e Florestais. Obtido por: <https://core.ac.uk/download/pdf/15443464.pdf>.
- ER, (2020). ESTATÍSTICAS: dados de 2019. Obtido por: <https://www.energiasrenovaveis.cv/copia-estatisticas-2019-1>, visitado em 12 de dezembro de 2020.
- Eurostat, (2019). EU energy in figures statistical pocketbook. Obtido por <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Biomass>. Visitado em 10 de dezembro de 2020
- Eurostat, (2021). Glossary: Biomass. Obtido por: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/41488d59-2032-11ec-bd8e-01aa75ed71a1/language-en>. Visitado em 26 de dezembro de 2021.
- Faria, C., (2016). Setor da biomassa para combustíveis em Portugal: estudo dos custos logísticos associados à exportação de pellets. Dissertação do mestrado, Covilhã. Obtido por https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/6551/1/4924_9779.pdf.
- Ferreira, A., (2015). Culturas energéticas: produção de biomassa e bioenergia. Dissertação de mestrado, Coimbra. Obtido por: https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/38787/1/Culturas%20energeticas_producao%20de%20biomassa%20e%20bioenergia.pdf.
- Ferreira, O., (2013). Caracterização de vários tipos de biomassa para valorização energética. Dissertação de mestrado, Aveiro. Obtido por: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/12119/1/Caracterizacao%20de%20varios%20tipos%20de%20biomassa%20para%20valorizacao%20energetica.pdf>.
- Fonte, A., Trianoski, R., Iwakiri, S., Anjos, R. (2017). Propriedades físicas e químicas da madeira de cerne e alburno de *Cryptomeria japónica*. Obtido por: <https://core.ac.uk/download/pdf/234149253.pdf>.
- Freitas, G. (2016). Biomassa, uma fonte de energia, universidade federal do rio de janeiro. Projeto de graduação, rio de janeiro. Obtido de <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018701.pdf>.

- Gai C., Guo Y., Liu T., Peng N., Liu Z., (2016). Hydrogen-rich gas production by steam gasification of hydrochar derived from sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (5), 3363-3372. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.188>.
- Galembeck, Fernando, Barbosa, César Augusto Sales, & Sousa, Rafael Arromba de. (2009). Aproveitamento sustentável de biomassa e de recursos naturais na inovação química. *Química Nova*, 32 (3), 571-581. Obtido de: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300003>.
- Goldemberg J., Coelho S., Guardabassi P., (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 36, 2086– 2097. Obtido por: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_CENBIO_IEE_-_The_sustainability_of_ethanol_production_from_sugarcane_.pdf.
- Gong M., Zhu W., Xu Z., Zhang h., Yang h., (2014). Influence of sludge properties on the direct gasification of dewatered sewage sludge in supercritical water. *Renewable Energy*, 66, 605-611. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.006>.
- Graça, V., (2015). Plano de gestão de resíduos sólidos urbanos - Uma Proposta para a Cidade de Porto Novo, Ilha de Santo Antão, Cabo Verde. Dissertação de mestrado, Lisboa.
- Grierson S., Strezov V., Ellem G., Mcgregor R., Herbertson J., (2009). Thermal characterisation of microalgae under slow pyrolysis conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85 (1–2), 118-123. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.10.003>.
- Guan Q., Wei C., Savage P., (2012). Hydrothermal Gasification of *Nannochloropsis* sp. with Ru/C. *Energy & Fuels*, 26 (7), 4575-4582. Obtido por: <https://doi.org/10.1021/ef3007992>.
- Guan Q., Savage P., Wei C., (2012). Gasification of alga *Nannochloropsis* sp. in supercritical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, 61, 139-145. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.09.007>.
- Guo L., Jin H., (2013). Boiling coal in water: Hydrogen production and power generation system with zero net CO₂ emission based on coal and supercritical water gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (29), 12953-12967. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.089>.
- Goldemberg J., Coelho S., Guardabassi P., (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 36, 2086– 2097. Obtido por: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_CENBIO_IEE_-_The_sustainability_of_ethanol_production_from_sugarcane_.pdf

- Hamad M., Radwan A., Heggo D., Moustafa T., (2016). Hydrogen rich gas production from catalytic gasification of biomass. *Renewable Energy*, 85, 1290-1300. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.082>.
- Hantoko D., Antoni, Kanchanatip E., Yan M., Weng Z., Gao Z., Zhong Y., (2019). Assessment of sewage sludge gasification in supercritical water for H₂-rich syngas production, *Process Safety and Environmental Protection*, 131, 63-72. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.035>.
- Harman-Ware A., Morgan T., Wilson M., Crocker M., Zhang J., Liu K., Stork J., Debolt S., (2013). Microalgae as a renewable fuel source: Fast pyrolysis of *Scenedesmus* sp. *Renewable Energy*, 60, 625-632. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.016>.
- He Q., Guo Q., Umeki K., Ding L., Wang F., Yu G., (2021). Soot formation during biomass gasification: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110710. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110710>.
- He S., Boom J., van der Gaast R., *et al* (2018). Hydro-pyrolysis of lignocellulosic biomass over alumina supported Platinum, Mo₂C and WC catalysts. *Front. Chem. Sci. Eng.* 12, 155–161. Obtido por: <https://doi.org/10.1007/s11705-017-1655-x>.
- Hendry D., Venkitasamy C., Wilkinson N., Jacoby W., (2011). Exploration of the effect of process variables on the production of high-value fuel gas from glucose via supercritical water gasification. *Bioresource Technology*, 102 (3), 3480-3487. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.003>.
- Huang Y., Chiueh P., Kuan W., Lo S., (2016). Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy*, 100, 137-144. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.088>.
- IEA (2019), *Global Energy Review 2019*. IEA, Paris. Obtido por: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>.
- IFN6, (2015). 6.º Inventário Florestal Nacional - Relatório Final 2015. Obtido por: http://www2.icnf.pt/portal/florestas/ifn/resource/doc/ifn/ifn6/IFN6_Relatorio_completo-2019-11-28.pdf, visitado em 12 de dezembro de 2020.
- Infografia (2020). *Uso e ocupação do solo em Portugal continental (2018)*, Direcção-Geral do Território. Obtido por: <https://www.publico.pt/2020/08/12/infografia/retrato-floresta-portuguesa-512>

- Islam M., Islam M., Beg M., Islam M., (2005). Pyrolytic oil from fixed bed pyrolysis of municipal solid waste and its characterization. *Renewable Energy*, 30 (3), 413-420. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.002>.
- Janajreh I., Adeyemi I, Raza S. S., Ghenai C, (2021). A review of recent developments and future prospects in gasification systems and their modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307917>.
- Jesus, N., (2017). Biomassas alternativas para a produção de bio-óleo por pirólise catalisada. Instituto superior de engenharia de Lisboa, Lisboa. Obtido por: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/8328/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>.
- Jin H., Lu Y., Guo L., Zhang X., Pei A., (2014). "Hydrogen Production by Supercritical Water Gasification of Biomass with Homogeneous and Heterogeneous Catalyst", *Advances in Condensed Matter Physics*, 2014, 9. Obtido por: <https://doi.org/10.1155/2014/160565>.
- Junior, H., (2015). Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Obtido por <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/10-08-2015/000844833.pdf>.
- Kaa G. V., Kamp L., Rezaei J., (2017). Selection of biomass thermochemical conversion technology in the Netherlands: A best worst method approach. *Journal of Cleaner Production*, 166, 32-39. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617314804?via%3Dihub>.
- Kang Q., Mao X., Siyal A., Liu Y., Ran C., Deng Z., Fu J., Song W., Dai J., (2019). Microwave-assisted pyrolysis of furfural residue in a continuously operated auger reactor: Characterization and analyses of condensates and non-condensable gases. *Energy*, 187, 116103. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116103>.
- Karatas H., Olgun H., Akgun F., (2013). Experimental results of gasification of cotton stalk and hazelnut shell in a bubbling fluidized bed gasifier under air and steam atmospheres. *Fuel*, 112, 494-501. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.025>.
- Kawale H., Kishore N., (2021). Comprehensive study on thermochemical putrefaction of *Delonix Regia* in non-catalytic, catalytic and hydro-catalytic pyrolysis atmospheres. *Renewable Energy*, 173, 223-236. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121005036>.

- Khoo H., Koh C., Shaik M., Sharratt P., (2013). Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion – Life cycle energy balances and CO₂ emissions. *Bioresource Technology*, 143, 298-307. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.004>.
- Kim S., Koo B., Lee D., (2014). A comparative study of bio-oils from pyrolysis of microalgae and oil seed waste in a fluidized bed. *Bioresource Technology*, 162, 96-102. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.136>.
- Lazaridis P., Fotopoulos A., Karakoulia S., and Triantafyllidis K., (2018). Catalytic Fast Pyrolysis of Kraft Lignin with Conventional, Mesoporous and Nanosized ZSM-5 Zeolite for the Production of Alkyl-Phenols and Aromatics. University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece. Obtido por: <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00295>
- Li B., Mbeugang C., Liu D., Zhang S., Wang S., Wang Q., Xu Z., Hu X., 2020. Simulation of sorption enhanced staged gasification of biomass for hydrogen production in the presence of calcium oxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (51), 26855-26864. 26864. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.121>.
- Li B., Yang H., Wei L., Shao J., Wang X., Chen H., (2017). Absorption-enhanced steam gasification of biomass for hydrogen production: Effects of calcium-based absorbents and NiO-based catalysts on corn stalk pyrolysis-gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (9), 5840-5848. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.031>.
- Li B., Yang H., Wei L., Shao J., Wang X., Chen H., (2017). Hydrogen production from agricultural biomass wastes gasification in a fluidized bed with calcium oxide enhancing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (8), 4832-4839. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.138>.
- Li Y., Guo L., Zhang X., Jin H., Lu Y., (2010). Hydrogen production from coal gasification in supercritical water with a continuous flowing system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (7), 3036-3045. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.023>.
- Lisboa, F., (2016). Carbonização e gaseificação de resíduos da macaúba, tucumã e cupuaçu para geração de eletricidade. Dissertação, universidade de Brasília, Brasília. Obtido por: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/21026/1/2016_f%c3%a1biocordeirodelisboa.pdf.
- Lourinho, G., (2012). Avaliação do potencial energético em biomassa do alto alentejo. Instituto Politécnico de Portalegre, Portalegre. Obtido por:

https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/16925/1/Trabalho_Avaliação_Biomassa_vfinal.pdf.

- Luo J., Sun S., Chen X., Lin J., Ma R., Zhang R., Fang L., (2021). In-depth exploration of the energy utilization and pyrolysis mechanism of advanced continuous microwave pyrolysis. *Applied Energy*, 292, 116941. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116941>.
- Ly H., Kim S., Choi J., Woo H., Kim J., (2016). Fast pyrolysis of *Saccharina japonica* alga in a fixed-bed reactor for bio-oil production. *Energy Conversion and Management*, 122, 526-534. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.019>.
- Madenoglu G. T., Sağlam M., Yüksel M., Ballice L., (2016). Hydrothermal gasification of biomass model compounds (cellulose and lignin alkali) and model mixtures. *The Journal of Supercritical Fluids*, 115, 79-85. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.04.017>.
- Madenoglu T., Cengiz N., Sağlam M., Yüksel M., Ballice L., (2016). Catalytic gasification of mannose for hydrogen production in near- and super-critical water. *The Journal of Supercritical Fluids*, 107, 153-162. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.09.003>.
- Madhu P., Kanagasabapathy H., Manickam I., (2016). Flash pyrolysis of palmyra palm (*Borassus flabellifer*) using an electrically heated fluidized bed reactor. *Energy Sources, Part A*, 38 (12). Obtido por: <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.956192>.
- Madhu P., Livingston T., Kanagasabapathy H., (2018). Flash Pyrolysis of Lemon Grass (*Cymbopogon flexuosus*) for Bio-Oil Production in an Electrically Heated Fluidized Bed Reactor. *Waste Biomass*, 9, 1037–1046. Obtido por: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9872-6>.
- Maggio, Gnicita, A., Squadrito, G. (2019). How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review from recent literature. *ScienceDirect*, 14.
- Mahamulkar S., Yin K., Agrawal PK., Davis RJ., Jones CW., Malek A., *et al* (2016). Formation and oxidation/gasification of carbonaceous deposits: a review. *Ind Eng Chem Res* 55:9760–818.
- Maniscalco M., Paglia F., Iannotta P., Caputo G., Scargiali F., Grisafi F., Brucato A., (2021). Slow pyrolysis of an LDPE/PP mixture: Kinetics and process performance. *Journal of the Energy Institute*, 96, 234-241. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.03.006>.

- Marafon, A., Santiago, A., Amaral, A., Bierhals, A., Paiva, H., Guimarães, V., (2016). Uso da biomassa para a geração de energia. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju. Obtido por: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/155329/1/Doc-211.pdf>
- Marques, A. (2015). Utilização Energética da Biomassa em Portugal Caso de estudo da Tratalix. Dissertação de mestrado, Lisboa.
- Mbeugang C., Li B., Lin D., Xie X., Wang S., Wang S., Zhang S., Huang Y., Liu D., Wang Q., (2021). Hydrogen rich syngas production from sorption enhanced gasification of cellulose in the presence of calcium oxide. *Energy*, 228, 120659. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120659>.
- McKendry P., (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37-46. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852401001183>.
- MECC, (2005). Estratégia Nacional para Energias Domésticas em Cabo Verde. Ministério da Economia, Crescimento e Competitividade. Obtido por <http://www.portaldoconhecimento.gov.cv/bitstream/10961/3810/1/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20Energias%20Domesticas%20em%20Cabo%20Verde.pdf>.
- Mesquita, g. B. (2017). Gaseificação de biomassa fecal humana: análise do processo via aspen plus e estudo do gás de síntese como combustível em um motor de combustão interna. Universidade federal do espírito santo, espírito santo.
- Mlonka-Mędrala A., Evangelopoulos P., Sieradzka M., Zajemska M., Magdziarz A., (2021). Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations. *Fuel*, 296, 120611. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120611>.
- Moura, K., (2016). Produção de gás de síntese através da eletrólise da água usando biomassa liquefeita. Dissertação de mestrado, Lisboa.
- Muangrat R., Onwudili A. J., Williams T. P., (2011). Alkaline subcritical water gasification of dairy industry waste (Whey). *Bioresource Technology*, 102 (10), 6331-6335. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.056>.
- Nanda S., Dalai A., Gökalp I., Kozinski J., (2016). Valorization of horse manure through catalytic supercritical water gasification. *Waste Management*, 52, 147-158. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.049>.
- Nanda S., Reddy S., Hunter H., Dalai A., Kozinski J., (2015). Supercritical water gasification of fructose as a model compound for waste fruits and vegetables. *The Journal of*

- Supercritical Fluids, 104, 112-121. Obtido por:
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.05.009>.
- Nanda S., Sivamohan N. S., Howard N. H., Butler S. I., Kozinski A. J., (2015). Supercritical Water Gasification of Lactose as a Model Compound for Valorization of Dairy Industry Effluents. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 54, 9296–9306. Obtido por:
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02603>.
- Netto, C., (2008). Potencial da biomassa florestal residual para fins energéticos de três concelhos do distrito de Santarém. Dissertação de mestrado, Lisboa. Obtido por:
https://run.unl.pt/bitstream/10362/1394/1/Netto_2008.pdf
- Nguyen T.S., He S., Raman G., Seshan K., (2016). Catalytic hydro-pyrolysis of lignocellulosic biomass over dual Na₂CO₃/Al₂O₃ and Pt/Al₂O₃ catalysts using n-butane at ambient pressure. *Chemical Engineering Journal*, 299, 415-419. Obtido por:
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.104>.
- Ningbo G., Baoling L., Aimin L., Juanjuan L., (2015). Continuous pyrolysis of pine sawdust at different pyrolysis temperatures and solid residence times. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 155-162. Obtido por:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237015300450>.
- Nunes, L., Matias, J., & Catalao, J. (2015). Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. *Renewable Energy*, 85, 1011–1016.
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.065>
- Nunes, M., (2012). Cadeias de Abastecimento de Biomassa - Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho. Obtido por:
<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/19596/1/Miguel%20Filipe%20da%20Silva%20Nunes.pdf>.
- Obernberger I. (1998). Decentralized biomass combustion: state of the art and future development. *Biomass and Bioenergy*, 14, 33-56.
- Oliveira, P. (2009). Torrefação como pré-condicionamento da biomassa para uso. Em livro de gaseificação. Escola de combustão ii. Obtido por:
https://agritrop.cirad.fr/568282/1/document_568282.pdf.
- Peterson A.A., Vogel F., Lachance R.P., Fröling M., Antal M.J., J.W. Tester J.W., (2008). Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub- and supercritical water technologies. *Energy Environ. Sci.* Obtido por: 10.1039/b810100k.

- PORDATA, (2020). Obtido por: <https://www.pordata.pt/DB/Europa/Ambiente+de+Consulta/Tabela>, visitado em 12 de dezembro e 2020.
- PORDATA, (2020). Produção primária de energias renováveis: total e por tipo de energia renovável. Obtido por: <https://www.pordata.pt/Europa/Produ%C3%A7%C3%A3o+prim%C3%A1ria+de+energias+renov%C3%A1veis+total+e+por+tipo+de+energia+renov%C3%A1vel-1369>, visitado em 12 de dezembro de 2020.
- PÚBLICO, (2020). Produção primária de energias renováveis: total e por tipo de energia renovável. Obtido por: <https://www.publico.pt/2019/10/15/infografia/energia-europa-379>, visitada em 14 de dezembro de 2020.
- Raheem, A., Dupont, V., Channa, A.Q., Zhao, X., Vuppaladiyam, A.K., Taufq-Yap, Y.H., Zhao, M., Harun, R., 2017. Parametric characterization of air gasification of *Chlorella vulgaris* biomass. *Energy Fuels* 31, 2959–2969.
- Raja A., Kennedy R., Pillai C., Lee R., (2010). Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor. *Energy*, 35 (7), 2819-2823. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.011>.
- Ran C., Liu Y., Siddiqui A., Siyal A., Mao X., Kang Q., Fu J., Ao W., Dai J., (2019). Pyrolysis of textile dyeing sludge in fluidized bed and microwave-assisted auger reactor: CoMParison, migration and distribution of heavy metals. *Energy*, 182, 337-348. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.219>.
- Rego, F., Fernandes, P., Silva, J., Azevedo., J., Moura, J., Oliveira, E., Cortes, R., Viegas, D., & Caldeira, D., Santos, F., (2020). Redução do risco de incêndio através da utilização de biomassa lenhosa para energia. Obtido por: <https://www.researchgate.net/publication/340862859>.
- Ren J., Liu YL., Zhao XY., Cao JP., (2020). Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. *Journal of the Energy Institute*, 93, 1083-1098. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967119308335>.
- REN21, (2014). RENEWABLES 2014: GLOBAL STATUS REPORT. Obtido por: https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf

- Rodrigues, D. M. (2019). Sistema de Produção de Hidrogénio através da Eletrólise da Água alimentado por um Aerogerador – Análise económica. Instituto Politécnico de Bragança, Engenharia de Energias Renováveis, Bragança.
- Rodrigues, S., Almeida, A., Ribeiro, A., Neto P., Ramalho E., Pilão R., (2020). Gaseificação de Resíduos de Cortiça em Reator de Leito Fluidizado. *Waste Biomass Valor* 11, 1159–1167. Obtido por: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0335-5>.
- Russo, M., (2003). Tratamento de resíduos sólidos. Universidade de coimbra. Obtido por: http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes_antigas/Tratamentos_Residuos_Solidos.pdf
- Sahoo S., Vijay V., Chandra R., Kumar H, (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100101. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101>.
- Saião, M. (2009). Implementação de uma central a biomassa - análise de sustentabilidade ambiental e económica. Dissertação para obter o grau de mestre em Engenharia do Ambiente, Lisboa.
- Santos, F. A., (2008). Biocombustíveis: prós e contras. Obtido por: <https://fsantos.utad.pt/pub-fas/09Biocombustiveis.pdf>.
- Santos, P., (2013). Biomassa - A maior e mais utilizada fonte de energia renovável na Europa e em todo o mundo desenvolvido. Obtido por: <https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/apresentacao0e.pdf>.
- Schmid M., Beirow M., Schweitzer D., Waizmann G., Spörl R., Scheffknecht G., (2018). Product gas composition for steam-oxygen fluidized bed gasification of dried sewage sludge, straw pellets and wood pellets and the influence of limestone as bed material. *Biomass and Bioenergy*, 117, 71-77. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.011>.
- SE4ALL, (2015). Agenda de Ação para a Energia Sustentável para Todos – Cabo Verde. Obtido por: https://www.se4all-africa.org/fileadmin/uploads/se4all/Documents/Country_AAs/Cabo_Verde___Action_Agenda_PT.pdf.
- SED, (2005). República de Cabo Verde - ministério da economia crescimento e competitividade: Estratégia Nacional para Energias Domésticas em Cabo Verde. Obtido por: <http://www.portaldoconhecimento.gov.cv/bitstream/10961/3810/1/Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20para%20Energias%20Domesticas%20em%20Cabo%20Verde.pdf>, visitado em 20 de dezembro de 2020.

- Sikarwar VS, Zhao M, Clough P, *et al.* (2016) An overview of advances in biomass gasification. *Energy & Environmental Science*. <http://dx.doi.org/10.1039/c6ee00935b>
- Sikarwar, Vineet & Zhao, Ming. (2017). Biomass Gasification. Obtido por: https://www.researchgate.net/publication/315849347_Biomass_Gasification
- Silva N., (2014). A estrutura composicional dos textos de estudantes sobre ciclos de materiais: evidências de uso e apropriação da linguagem científica. *Ciência educação (Bauru)*, 20 (4). Obtido por: <https://doi.org/10.1590/1516-73132014000400003>.
- Singh N.B., Kumar A., Rai S. (2014). Potential production of bioenergy from biomass in an Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 65-78.
- Smartfire, (2020). Diferença entre briquetes e pellets. Obtido por: <https://www.smartfire.pt/diferenca-entre-briquetes-e-pellets>, visitado em 10 de dezembro de 2020.
- Spreafico C., Russo D., Spreafico M., (2021). Investigating the evolution of pyrolysis technologies through bibliometric analysis of patents and papers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 105021. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105021>.
- Stańczyk K., Howaniec N., Smoliński A., Świądrowski J., Kapusta K., Wiatowski M., Grabowski J., Rogut J., (2011). Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification. *Fuel*, 90 (5), 1953-1962. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.007>.
- Su X., Jin H., Guo L., Guo S., Ge Z., (2015). Experimental study on Zhundong coal gasification in supercritical water with a quartz reactor: Reaction kinetics and pathway. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (24), 7424-7432. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.110>.
- Suali E., Sarbatly R., (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6), 4316-4342. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.047>.
- Trubetskaya A., Grams J., Leahy J., Johnson R., Gallagher P., Monaghan R., Kwapinska M., (2020). The effect of particle size, temperature and residence time on the yields and reactivity of olive stones from torrefaction. *Renewable Energy*, 160, 998-1011. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.136>.

- Uva, J., (2015). Inventário Florestal Nacional - A dinâmica da ocupação florestal do solo desde o séc. XIX a 2050. Revista Cultivar. 2. 83-91. Obtido por: file:///C:/Users/berin/Downloads/RevistaGPP_CULTIVAR2_IFN_JSUva.pdf.
- Vichaphund S., Aht-ong D., Sricharoenchaikul V., Atong D., (2015). Production of aromatic compounds from catalytic fast pyrolysis of *Jatropha* residues using metal/HZSM-5 prepared by ion-exchange and impregnation methods. *Renewable Energy*, 79, 28-37. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.013>.
- Wang J., Cao J., Zhao X., Liu S., Huang X., Liu T., Wei X., (2020). Comprehensive research of in situ upgrading of sawdust fast pyrolysis vapors over HZSM-5 catalyst for producing renewable light aromatics. *Journal of the Energy Institute*, 93 (1), 15-24. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.04.013>.
- Wang J., Zhong Z., Ding K, Xue Z., (2017). Catalytic fast pyrolysis of mushroom waste to upgraded bio-oil products via pre-coked modified HZSM-5 catalyst. *Bioresource Technology*, 212, 6-10. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.005>.
- Wang Q., Rong N., Fan H., Meng Y., Fang M., Cheng L., Cen K., (2014). Enhanced hydrogen-rich gas production from steam gasification of coal in a pressurized fluidized bed with CaO as a CO₂ sorbent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (11), 5781-5792. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.153>.
- Wang Y., Zhu Y., Liu Z., Wang L., Xu D., Fang C., Wang S., (2019). Catalytic performances of Ni-based catalysts on supercritical water gasification of phenol solution and coal-gasification wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (7), 3470-3480. ISSN 0360-3199. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.218>.
- Wang Z., Wang F., Cao J., Wang J., (2010). Pyrolysis of pine wood in a slowly heating fixed-bed reactor: Potassium carbonate versus calcium hydroxide as a catalyst. *Fuel Processing Technology*, 91, 942-950. Obtido por: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009002926>.
- Yan M., Su H., Hantoko D., Kanchanatip E., Hamid F., Zhang S., Wang G., Xu Z., (2019). Experimental study on the energy conversion of food waste via supercritical water gasification: Improvement of hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (10), 4664-4673. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.193>.
- Yoshida T., Matsumura Y., (2009). Desenvolvimento de reator para gaseificação de água supercrítica de solução de glicose 4,9 % em peso a 673 K usando dinâmica de fluido

- computacional. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, pp. 8381 – 8386. Obtido por: <https://doi.org/10.1021/ie9002188>.
- Yuan C., Liu Q., Li P., Barati B., Viswanathan K., Zhao S., Wang S., Cao B., Hu Y., (2021). Biofuel characteristic of waste clay oil pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105117. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105117>.
- Zhang B., Tan G., Zhong Z., Ruan R., (2017). Microwave-assisted catalytic fast pyrolysis of spent edible mushroom substrate for bio-oil production using surface modified zeolite catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 123, 92-98. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.022>.
- Zhang B., Zhang L., Yang Z., He Z., (2017). An experiment study of biomass steam gasification over NiO/Dolomite for hydrogen-rich gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (1), 76-85. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.044>.
- Zhang B., Zhang L., Yang Z., Yan Y., Pu G., Guo M., (2015). Hydrogen-rich gas production from wet biomass steam gasification with CaO/MgO. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (29), 8816-8823. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.075>.
- Zhang D., Guo L., Zhao J., Jin H., Cao W., Wang R., Wei W., Chen J.,(2018). Kinetics study for sodium transformation in supercritical water gasification of Zhundong coal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (30), 13869-13878. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.011>.
- Zhang H., Gao Z., Ao W., Li J., Liu G., Fu J., Ran C., Mao X., Kang Q., Liu Y., Dai J., (2017). Microwave pyrolysis of textile dyeing sludge in a continuously operated auger reactor: Char characterization and analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 334, 112-120. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.03.048>.
- Zhang, H., Zhang, S., Weng, Z., Mubeen I., Zhang C., Yan M., Fauziah S., (2020). Gaseificação de água supercrítica catalisada por álcali de lodo de esgoto: efeito da reutilização de resíduos líquidos como catalisador homogêneo. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17, 2845–2852. Obtido por: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02697-x>.
- Zhao X., Wei L., Julson J., Qiao Q., Dubey A., Anderson G., (2015). Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over ZSM-5 for hydrocarbon bio-jet fuel. *New Biotechnology*, 32, 300-312. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2015.01.004>.
- Zhou L., Yang Z., Tang A., Huang H., Wei D., Yu E., Lu W., (2019). Steam-gasification of biomass with CaO as catalyst for hydrogen-rich syngas production. *Journal of the Energy Institute*, 92 (6), 1641-1646. Obtido por: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.010>.