



Alternativa Energética Sustentabilidade dos Biocombustíveis

Daniel Alexandre Fonseca Lorga

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Manuel Oliveira Fael

Novembro de 2024

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Daniel Lorga, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10598 do Mestrado em Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 09 /11 /2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Lorga', written in a cursive style.

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

Folha em branco

Agradecimentos

Gostaria de começar por expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Fael, pela sua constante disponibilidade e pelas valiosas sugestões, que foram fundamentais para a elaboração desta dissertação. A sua orientação cuidadosa e a partilha do seu vasto conhecimento foram de um valor inestimável.

Não posso deixar de dedicar um agradecimento especial aos meus pais, João Lorga e Sónia Lorga, cujo apoio incondicional e presença constante constituíram o alicerce deste percurso académico. Sem o seu amor, encorajamento e sacrifícios, esta dissertação, assim como todo o meu trajeto académico, simplesmente não teriam sido possíveis.

Por fim, gostaria de manifestar a minha gratidão aos meus amigos e colegas, que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada, proporcionando apoio moral, trocas de ideias e momentos de descontração, essenciais para me manter motivado.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, deixo o meu mais sincero agradecimento. Esta dissertação é também fruto do esforço coletivo de tantas pessoas que acreditaram no meu potencial e me incentivaram a perseguir os meus objetivos académicos.

Folha em branco

Prefácio

Na atualidade enfrenta-se diariamente o desafio de encontrar soluções que reduzam a pegada ecológica. Cada avanço levanta a questão da viabilidade a longo prazo dessas soluções. No caso dos veículos elétricos, as baterias representam um ponto crítico, pois têm um limite de vida útil após o qual não podem ser aproveitadas. Surge então a dúvida: "Será que compensa ao ponto de inviabilizar os veículos com motor de combustão interna?"

A produção de baterias elétricas depende de elementos químicos como o lítio, cuja extração é altamente prejudicial para o meio ambiente. Essa realidade gera controvérsia, já que a produção e transformação desse elemento essencial para um modo de transporte menos poluente resulta na emissão de poluentes.

A avaliação da sustentabilidade dos veículos envolve uma análise complexa, tendo em conta fatores como os quilômetros percorridos pelo proprietário. É necessário, portanto, fazer um balanço ambiental que considere a poluição gerada durante a produção do veículo, o impacto do abate do veículo em circulação e os benefícios da substituição por um veículo menos poluente.

Com a existência de 1,4 bilhões de veículos em circulação no mundo, é inevitável questionar se a sua substituição por veículos elétricos resultará em um impacto positivo. Quais serão as consequências desse abate em larga escala e qual será o impacto total da substituição dessa frota? (Freitas, 2019)

Diante da constante evolução do mercado automóvel, surgem protótipos de teste que utilizam combustíveis mais limpos. Os veículos em utilização também podem utilizar combustíveis mais limpos, exemplo é a utilização de biocombustíveis, que pode ser produzido a partir de uma variedade de matérias-primas, incluindo resíduos. (Knothe, et al., 2015)

A utilização de resíduos para a produção de biocombustíveis tem um duplo impacto positivo, pois não apenas reduz a poluição decorrente do acumular desses resíduos em aterros, que podiam ser terrenos a uso para a produção agrícola ou na preservação da fauna e flora, como também são uma fonte de energia mais limpa que os combustíveis fósseis. (Sims, et al., 2009)

A avaliação do impacto ambiental dos biocombustíveis considera a sua origem, classificando-os em primeira, segunda ou terceira geração. Quanto mais avançada a geração, menor é o impacto ambiental associado ao biocombustível.

Esta dissertação procura analisar essas e outras questões relacionadas à sustentabilidade dos biocombustíveis, e oferece uma visão abrangente sobre os desafios e as oportunidades de tornar a mobilidade mais amigável do ambiente.

Folha em branco

Resumo

Os métodos de produção de biocombustíveis são diversos e podem ser escolhidos em função da composição química da matéria-prima e da transformação química mais adequada. A digestão anaeróbica destaca-se como a que mais se adapta, capaz de processar uma ampla gama de nutrientes em diferentes matérias-primas. (Boyle, 1996)

A digestão anaeróbica é a reação química que ocorre quando um grupo de bactérias decompõe as moléculas de um nutriente. Este processo é de interesse para esta dissertação devido à produção intrínseca de metano. O processo de fermentação também é utilizado para quebrar moléculas, neste caso, de glicose, para produzir álcool. (Antonopoulou, 2016)

Em alguns casos, os álcoois podem ser produzidos por ambos os processos simultaneamente, ao utilizar famílias restritas de bactérias que excluem as famílias que decompõem as moléculas de açúcar. Introduce-se a fermentação no final do processo anaeróbico - as ligações moleculares são quebradas através da digestão anaeróbica até produzir um produto rico em açúcar - para criar uma solução alcoólica. (Vogel, et al., 2008)

Outro biocombustível de elevado interesse como substituto dos combustíveis fósseis é o biodiesel, que pode ser produzido por esterificação e microemulsão, utilizando gorduras e óleos como matérias-primas. (Demirbas, 2008)

A pirólise é outro processo com elevado interesse devido à variedade de produtos que podem ser produzidos. A pirólise é o processo de separação da matéria volátil dos produtos florestais que aumenta a densidade energética de um dos subprodutos. A matéria volátil que é dispensada possui um potencial energético significativo que pode ser aproveitado. (A. Alalwan, et al., 2019)

A pirólise tradicional é um processo de decomposição térmica da matéria orgânica na ausência de oxigénio, onde a matéria-prima é aquecida para quebrar as moléculas complexas em moléculas mais simples, resultando em produtos como carvão, gases e bio-óleo. Existem variantes como a pirólise rápida, que utiliza altas temperaturas e aquecimento rápido para maximizar a produção de bio-óleo. Já a pirólise de alta pressão, embora menos comum, pode ser usada para ajustar o rendimento e a composição dos produtos. (A. Alalwan, et al., 2019)

A solvólise, por outro lado, é um processo químico distinto onde se utiliza um solvente para quebrar ligações na biomassa. O produto final da solvólise é um bio-óleo semelhante ao petróleo bruto, que pode ser refinado para produzir combustíveis semelhantes aos combustíveis fósseis. (Chan, et al., 2014)

Para melhorar a qualidade dos biocombustíveis e torná-los mais semelhantes aos combustíveis fósseis, têm sido feitos avanços na hidrogenação de biocombustíveis. Este processo envolve a adição de hidrogénio a moléculas de carbono presentes nos biocombustíveis, resultando em combustíveis mais estáveis e com características adequadas para utilização eficiente em motores modernos. Este processo é uma parte crucial na produção de biocombustíveis de alta qualidade que podem substituir os combustíveis fósseis em diversas aplicações. (Gandía, et al., 2013)

Palavras-chave

Biocombustíveis; Digestão anaeróbica; Fermentação; Esterificação; Microemulsão; Pirólise; Bio-óleo;

Folha em branco

Abstract

The methods of producing biofuels are diverse and can be chosen based on the chemical composition of the raw material and the most suitable chemical transformation. Anaerobic digestion stands out as the most adaptable, capable of processing a wide range of nutrients in different raw materials. (Boyle, 1996)

Anaerobic digestion is the chemical reaction that occurs when a group of bacteria breaks down the molecules of a nutrient. This process is of particular interest to this dissertation due to the intrinsic production of methane. The fermentation process is also used to break down molecules, in this case, glucose, to produce alcohol. (Antonopoulou, 2016)

In some cases, alcohols can be produced by both processes simultaneously, by using restricted families of bacteria that exclude the families that break down sugar molecules. Fermentation is introduced at the end of the anaerobic process—molecular bonds are broken through anaerobic digestion until a sugar-rich product is produced—to create an alcoholic solution. (Vogel, et al., 2008)

Another biofuel of great interest as a substitute for fossil fuels is biodiesel, which can be produced through esterification and microemulsion, using fats and oils as raw materials. (Demirbas, 2008)

Pyrolysis is another process of significant interest due to the variety of products that can be produced. Pyrolysis is the process of separating volatile matter from forest products, which increases the energy density of one of the by-products. The volatile matter that is released has significant energy potential that can be harnessed. (A. Alalwan, et al., 2019)

Traditional pyrolysis is a thermal decomposition process of organic matter in the absence of oxygen, where the raw material is heated to break complex molecules into simpler ones, resulting in products such as charcoal, gases, and bio-oil. There are variants such as fast pyrolysis, which uses high temperatures and rapid heating to maximize bio-oil production. High-pressure pyrolysis, although less common, can be used to adjust the yield and composition of the products. (A. Alalwan, et al., 2019)

Solvolysis, on the other hand, is a distinct chemical process where a solvent is used to break bonds in biomass. The final product of solvolysis is a bio-oil similar to crude oil, which can be refined to produce fuels similar to fossil fuels. (Chan, et al., 2014)

To improve the quality of biofuels and make them more similar to fossil fuels, advances have been made in the hydrogenation of biofuels. This process involves adding hydrogen to carbon molecules present in biofuels, resulting in more stable fuels with characteristics suitable for efficient use in modern engines. This process is a crucial part of producing high-quality biofuels that can replace fossil fuels in various applications. (Gandía, et al., 2013)

Keywords

Biofuels; Anaerobic Digestion; Fermentation; Esterification; Micro emulsion; Pyrolysis; Bio oil;

Folha em branco

Índice

| | |
|--|----|
| Motivação | 2 |
| 1. Resíduos..... | 3 |
| 1.1. Entidades Gestoras dos resíduos..... | 4 |
| 1.1. Gestão de Resíduos na Europa..... | 5 |
| 1.3. Diretivas europeias | 6 |
| 1.3. Gestão de Resíduos em Portugal | 8 |
| 1.3.1. Relatório Representativo do Estado Ambiental..... | 10 |
| 1.3.2. Estratégia Nacional de Consumo de Energia..... | 11 |
| 1.5. Economia Circular | 12 |
| 1.6. Conclusão..... | 13 |
| 2. Gerações de Biocombustível | 15 |
| 2.1. Biocombustíveis de 1ª Geração | 16 |
| 2.1.1. Factos Históricos..... | 16 |
| 2.1.2. Vantagens e Desvantagens..... | 16 |
| 2.2. Biocombustíveis de 2ª Geração | 18 |
| 2.3. Biocombustíveis de 3ª Geração | 19 |
| 2.4. Biocombustíveis de 4ª Geração | 20 |
| 2.5. Políticas Impulsionadoras | 21 |
| 2.5.1. Impulso Legislativo | 21 |
| 2.5.2. Benefícios da Sustentabilidade da Matéria-Prima | 22 |
| 2.5.3. Limitações..... | 23 |
| 2.6. Conclusão..... | 24 |
| 3. Processos de Produção..... | 26 |
| 3.1. Fermentação Alcoólica | 26 |
| 3.2. Digestão Anaeróbica..... | 28 |
| 3.3. Pirólise | 29 |
| 3.4. Gás Síntese..... | 30 |
| 3.5. Transesterificação | 31 |
| 4. Conclusão..... | 33 |
| Bibliografia | 35 |

Folha em branco

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma de Gestão de Resíduos e Respetivos Responsáveis (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024)..... | 4 |
| Figura 2 - Fluxograma de produção de bioetanol a partir de soro de queijo | 27 |
| Figura 3 - Fluxograma de produção de bioetanol a partir de algas..... | 28 |

Folha em branco

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela I Percentagem de biocombustível a ser incorporado nos combustíveis para consumo final no setor dos transportes (Artigo 11º do Decreto-Lei nº 117/2010)..... | 21 |
| Tabela II Valor Equivalente relacionado com a sustentabilidade da matéria-prima utilizada na produção dos biocombustíveis. | 22 |
| Tabela III Microrganismos e nutrientes decompostos durante a digestão anaeróbica (Saravanan, Senthil Kumar, Jeevanantham, Karishma, & N. Vo, 2021)..... | 29 |

Folha em branco

Lista de Acrónimos

| | |
|-----------------|---|
| UBI | Universidade da Beira Interior |
| APA | Agência Portuguesa do Ambiente |
| SILiAmb | Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente |
| 3Rs | 3 Erres da Reciclagem: Reduzir, Reciclar e Reutilizar |
| AIA | Avaliação do Impacto Ambiental |
| TdB | Título de Combustível |
| IPPC | Prevenção e Controlo Integrado da Poluição |
| MTD | Melhores Técnicas Disponíveis |
| EPR | Extended Producer Responsibility |
| TEP | Tonelada Equivalente de Petróleo |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| EFT | Entrepasto Fiscal de Transformação |
| DGEG | Direção Geral de Energia e Geologia |
| CO | Monóxido de Carbono |
| H ₂ | Hidrogénio |
| FT | Fischer-Tropsch |
| NO _x | Óxidos de Azoto |

Folha em branco

Introdução

Perante o cenário energético mundial atual, assiste-se a um crescente interesse na investigação de novos métodos de conversão de energia em todos os domínios. Desde os primórdios da indústria automóvel, tem-se verificado uma constante procura por fontes alternativas de energia. No começo do século XX, os veículos elétricos emergiram como uma solução, que, contudo, não se consolidou devido à ineficácia das baterias da época. Confrontados com a crise petrolífera na segunda metade desse século, diversificaram-se os combustíveis, explorando-se produtos agrícolas e a sua transformação química como fonte alternativa, prática que se mantém até hoje. (Sovacool, 2009)

Para assegurar um futuro sustentável, torna-se essencial identificar soluções a curto, médio e longo prazo que respondam às necessidades energéticas globais e mitiguem o impacto inflacionário dos produtos petrolíferos. Por este motivo, tem-se assistido a uma reconfiguração no mercado automóvel, na distribuição de energia e nos sistemas de conversão de energia. (IEA, 2020)

A expansão da diversidade nas formas de conversão de energia tem fomentado o surgimento de novas profissões, oportunidades de emprego e uma maior liberdade económica e energética. Este desenvolvimento tem um impacto social positivo, na medida em que permite a cada país desenvolver métodos próprios de geração de energia para o consumo interno. A tendência atual centra-se na conversão de energia térmica em energia elétrica, dada a sua facilidade de transporte, apesar de ser maioritariamente armazenada sob a forma de energia química. (IRENA, 2020)

Ao mesmo tempo, os avanços tecnológicos e as políticas governamentais a nível global e europeu têm desempenhado um papel fundamental ao impulsionar a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis. A crescente consciencialização da sociedade civil sobre a urgência da transição energética e os movimentos em prol de uma economia mais verde e de baixo carbono também estão a influenciar significativamente essa mudança de paradigma. ((IEA), 2021)

Várias marcas produtoras de veículos têm apostado de forma estratégica na mobilidade elétrica, visando a redução da poluição ligada aos veículos de combustão interna. Paralelamente, outras marcas, adotam uma perspetiva ligeiramente distinta, e exploram combustíveis alternativos, sem desconsiderar o potencial dos motores de combustão interna. (BloombergNEF, 2021)

Motivação

Devido ao vasto potencial encontrado na utilização de materiais anteriormente considerados desperdício, transformando-os em fontes de energia útil, surgiu o interesse que motiva a presente dissertação. Neste contexto, é fundamental reconhecer os desafios ambientais globais enfrentados pela sociedade atualmente e a urgente necessidade de encontrar soluções sustentáveis para mitigá-los. A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a degradação ambiental e a escassez de recursos naturais têm impulsionado a busca por alternativas energéticas mais limpas e eficientes.

O objetivo desta dissertação é aprofundar o conhecimento sobre formas de gerir resíduos e produzir combustíveis sustentáveis e alternativos, enquanto se investigam as mais recentes soluções políticas a serem aplicadas nas empresas do mercado automóvel. Ao compreendermos o papel dessas empresas na promoção de práticas mais sustentáveis e na adoção de tecnologias inovadoras, podemos identificar oportunidades para impulsionar a transição para uma mobilidade mais sustentável.

A ideia de promover uma mobilidade mais sustentável não só beneficia o ambiente, mas também oferece oportunidades para análises económicas e sociais mais abrangentes. Este estudo concentra-se particularmente na Europa, com destaque para Portugal. No entanto, as perspetivas transmitidas são igualmente aplicáveis a muitos outros continentes desenvolvidos e potencialmente ainda mais benéficas em países em desenvolvimento, onde as soluções inovadoras podem ter um impacto significativo na melhoria da qualidade de vida e na redução das desigualdades.

1. Resíduos

Em Portugal, a gestão de resíduos é uma responsabilidade partilhada por todas as entidades, sejam elas municípios ou empresas que gerem esses resíduos. Os custos envolvidos incluem a separação dos resíduos e o seu tratamento adequado. (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024)

Neste capítulo, serão identificadas as diferentes entidades envolvidas na gestão de resíduos, conforme definido pela legislação em vigor para este tipo de produtos. O objetivo deste capítulo é destacar potenciais pontos de gestão de resíduos que possam levar a oportunidades nas indústrias de produção de energia através do reaproveitamento.

A legislação portuguesa em matéria de gestão de resíduos é abrangente e visa assegurar a proteção ambiental e a saúde pública, promovendo a reutilização, a reciclagem e a recuperação de resíduos. De acordo com o Decreto-Lei n.º 178/2006, que estabelece o regime geral da gestão de resíduos, as entidades gestoras devem adotar práticas que minimizem a produção de resíduos e incentivem a sua valorização. Este decreto-lei também define as obrigações de produtores e detentores de resíduos, bem como as responsabilidades das autoridades competentes.

Adicionalmente, a Política Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR) estabelece estratégias para a redução da geração de resíduos e a promoção da sua gestão sustentável. A PNGR está alinhada com as diretivas da União Europeia, como a Diretiva 2008/98/CE, que define a hierarquia de resíduos e estabelece metas para a reciclagem e a recuperação.

Entre as entidades envolvidas na gestão de resíduos, destacam-se os Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU), que são responsáveis pela recolha e tratamento de resíduos domésticos, e os Sistemas Integrados de Gestão de Resíduos (SIGRE), que gerem resíduos específicos, como embalagens, equipamentos elétricos e eletrónicos, e baterias. Estes sistemas trabalham em parceria com os municípios e as empresas para garantir o tratamento adequado dos resíduos.

Além disso, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) desempenha um papel crucial na supervisão e regulação das atividades de gestão de resíduos, assegurando o cumprimento das normas ambientais e promovendo a adoção de melhores práticas.

Neste contexto, é importante considerar as oportunidades que a gestão eficiente de resíduos pode oferecer para a produção de energia. A valorização energética dos resíduos, através de tecnologias como a incineração com recuperação de energia, a digestão anaeróbia e a produção de biogás, representa uma alternativa viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases de efeito estufa.

A integração de sistemas de gestão de resíduos com as indústrias de produção de energia pode criar sinergias que beneficiam tanto o meio ambiente quanto a economia. A transição para uma economia circular, onde os resíduos são vistos como recursos valiosos, é essencial para alcançar os objetivos de sustentabilidade e combater as mudanças climáticas.

1.1. Entidades Gestoras dos resíduos

Para garantir o correto tratamento dos resíduos, as entidades devem contratar um comerciante de resíduos, uma empresa responsável pelo transporte e tratamento dos mesmos, ou uma entidade licenciada para gerir e tratar os resíduos. As empresas geradoras também podem ser certificadas no tratamento dos próprios resíduos.

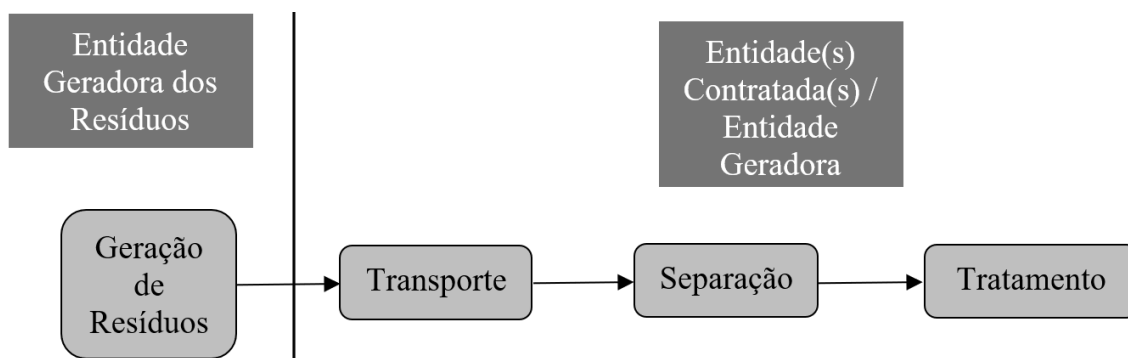


Figura 1 - Fluxograma de Gestão de Resíduos e Respetivos Responsáveis (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024)

Os operadores de tratamento de resíduos são certificados de acordo com a capacidade e as condições para cada tipologia de tratamento. Os transportes de resíduos são obrigatoriamente acompanhados por uma guia eletrónica própria para o efeito. Os transportes e gestão dos resíduos devem ser documentados no SILiAmb (Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente). ((APA), 2021)

O custo do tratamento dos resíduos cabe à entidade que os detenha que inicialmente é a geradora. Estes custos podem ser mitigados através de uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos, com auxílio dos 3Rs da reciclagem com ênfase no segundo "R": reutilizar. Esta prática permite às entidades responsáveis pelo tratamento dos resíduos obter preços mais competitivos e uma matéria-prima com elevado potencial económico. (Agência Portuguesa do Ambiente, 2024)

Além dos procedimentos formais de gestão de resíduos, Portugal tem implementado diversas iniciativas e programas destinados a promover práticas mais sustentáveis. Destaca-se, por exemplo, o Programa de Valorização de Resíduos Urbanos, que incentiva a recolha seletiva e a reciclagem em comunidades locais. Também são realizadas campanhas de sensibilização ambiental em escolas, empresas e comunidades, visando educar e criar um compromisso com a população na redução do desperdício e na adoção de comportamentos mais responsáveis. ((APA), 2020)

Também a promoção da economia circular tem sido uma prioridade no país, com investimentos em projetos de reutilização e reciclagem de materiais. Iniciativas como a criação de ecopontos comunitários e programas de compostagem doméstica têm contribuído para a redução do volume de resíduos enviados para aterros sanitários. ((APA), 2020)

No contexto da União Europeia, Portugal tem participado ativamente em programas e projetos de cooperação internacional para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis na gestão de resíduos. A troca de experiências e boas práticas com outros países tem sido fundamental para impulsionar o progresso nesta área. A UE estabeleceu metas ambiciosas para a gestão de resíduos, incluindo a redução do envio de resíduos para aterros sanitários e o aumento das taxas de reciclagem. ((APA), 2023)

Além disso, é importante incentivar a investigação e desenvolvimento de tecnologias verdes e promover parcerias público-privadas para a implementação de práticas sustentáveis em diferentes setores da economia.

Em suma, a gestão de resíduos em Portugal não se limita apenas aos processos técnicos, mas também envolve uma abordagem abrangente que inclui educação, sensibilização e colaboração internacional. Essas iniciativas visam não apenas mitigar os impactos ambientais, mas também promover uma cultura de sustentabilidade e responsabilidade ambiental em toda a sociedade.

1.1. Gestão de Resíduos na Europa

Todas as medidas a serem implementadas pelos Estados-Membros da União Europeia têm por base diretivas criadas pelos organismos responsáveis para esse efeito. Com base nestas diretivas, cada Estado-Membro cria a sua legislação. Seguir as diretivas europeias permite que a cooperação entre Estados-Membros seja mais simples, devido à utilização de estruturas semelhantes. (Europeia C. , 2020)

É importante destacar que as diretivas da União Europeia estabelecem objetivos comuns, mas deixam margem para que cada país determine a melhor forma de os alcançar, respeitando as suas especificidades nacionais. A Diretiva 2008/98/CE, por exemplo, fornece um quadro para a gestão de resíduos, definindo princípios básicos como a hierarquia dos resíduos, que prioriza a prevenção, reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação de energia, antes da eliminação final.

A Diretiva 96/61/CE, conhecida como a Diretiva IPPC (Prevenção e Controlo Integrado da Poluição), foi fundamental para garantir que as instalações industriais utilizem as melhores técnicas disponíveis (MTD) para minimizar o impacto ambiental. Esta diretiva foi posteriormente consolidada e atualizada pela Diretiva 2010/75/UE sobre emissões industriais, que continua a exigir uma abordagem integrada para controlar e prevenir a poluição, abrangendo a gestão de resíduos, emissões atmosféricas, descargas para a água, e contaminação do solo.

Estas diretivas são essenciais para promover a sustentabilidade e proteger o ambiente, assegurando que todos os Estados-Membros adotem padrões elevados e coerentes. A adoção de uma legislação nacional baseada nas diretivas europeias facilita não só a cooperação e harmonização das políticas ambientais entre os Estados-Membros, mas também contribui para a realização dos objetivos ambientais e climáticos globais da União Europeia.

1.3. Diretivas europeias

A Diretiva 2008/98/CE, começa por citar a Diretiva 2006/12/CE, que estabelece a obrigatoriedade dos Estados-Membros em terem entidades responsáveis pelo tratamento dos resíduos e um sistema de acompanhamento dos mesmos. Alguns sistemas de gestão de resíduos em Portugal foram implementados de acordo com esta diretiva.

A Diretiva 2008/98/CE estabelece uma hierarquia de resíduos que deve ser seguida pelos Estados-Membros, priorizando a prevenção, seguida da preparação para a reutilização, reciclagem, recuperação de outros valores e, por fim, a eliminação. Esta hierarquia é um princípio fundamental para a política de resíduos da União Europeia e visa minimizar a quantidade de resíduos gerados e maximizar a reutilização e reciclagem.

Todas as diretivas em vigor são resumidas no início desta diretiva, destacando os comentários mais relevantes sobre correções resultantes das experiências obtidas entre a promulgação de alguns decretos e a execução deste decreto, além dos pontos de maior interesse na correta gestão dos resíduos, que devem ser mantidos. Além disso, a Diretiva 2008/98/CE da União Europeia também fornece orientações importantes para a gestão de resíduos e é considerada na formulação das políticas nacionais de gestão de resíduos em Portugal.

Na sequência desta diretiva, é consolidada a informação e são clarificadas todas as dúvidas provenientes dos decretos anteriores. São criadas as definições de resíduo e subprodutos, e mais especificamente, listados os resíduos considerados perigosos. São ainda fundamentados os cálculos executados para cumprir com os objetivos de gestão de resíduos.

A diretiva supramencionada indica que resíduo é a substância ou objeto “de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer” (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2008). Para os resíduos perigosos existe o Anexo III, qualquer característica do resíduo que esteja presente na lista do anexo desta diretiva faz com que o resíduo seja considerado perigoso. O Anexo III inclui propriedades como inflamabilidade, toxicidade e corrosividade, entre outras.

A definição de maior interesse prende-se com os bio-resíduos, que são considerados aqueles provenientes de “resíduos de jardim biodegradáveis, os resíduos alimentares e de cozinha das habitações, dos restaurantes, das unidades de catering e de retalho e os resíduos similares das unidades de transformação de alimentos” (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2008). A gestão adequada dos bio-resíduos é crucial para reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros e promover a compostagem e outras formas de reciclagem orgânica.

A pessoa singular ou coletiva que é responsável pelos resíduos é aquela que os tenha produzido, transformado ou que seja detentora dos mesmos, sendo responsável pelo seu tratamento. A pessoa que adquire os resíduos para futura venda é designada comerciante de resíduos. Se valorizar ou eliminar os resíduos, essa pessoa é denominada corretora. Estas definições são cruciais para identificar as responsabilidades ao longo da cadeia de gestão de resíduos e assegurar a conformidade com a legislação.

É considerada gestão de resíduos todas as atividades de recolha, transporte, valorização e eliminação de resíduos e a supervisão destas operações, bem como todas as atividades indiretamente ligadas a estes processos. Na presente diretiva, são caracterizadas todas as atividades de gestão de resíduos. A valorização inclui processos como a reciclagem e a recuperação de energia, enquanto a eliminação refere-se a métodos como a incineração sem recuperação de energia e a deposição em aterro.

Segundo a diretiva, um subproduto é uma substância ou um objeto resultante de um processo de produção onde o mesmo não era o objetivo principal. Só não é considerado resíduo se existir um consumo ou utilização desse subproduto sem processamento incomum à indústria do mesmo e se esse subproduto cumprir com os requisitos ambientais e de saúde globais. Esta distinção ajuda a promover a utilização eficiente de recursos e a redução de resíduos.

No 6º artigo desta diretiva, é mencionado o fim de estatuto de resíduo quando o artigo sofre um tipo de valorização que satisfaça os seguintes critérios:

- Produto habitualmente utilizado para um determinado propósito;
- Existir uma demanda por esse produto;
- Satisfazer os requisitos específicos (legislação, normas, etc.) desse tipo de produto;
- Não acarretar impactos ambientais ou em termos de saúde adversos;

Adicionalmente, a Diretiva 2008/98/CE também promove a responsabilidade alargada do produtor (EPR – Extended Producer Responsibility), que incentiva os produtores a assumir a responsabilidade pelos impactos ambientais dos seus produtos ao longo do ciclo de vida, incluindo a fase de pós-consumo. Esta abordagem visa não só melhorar a gestão de resíduos, mas também promover o design ecológico e a inovação sustentável.

Estes artigos são muito abrangentes, onde mencionam procedimentos documentacionais, os restantes decretos que continuarão em vigor e os que serão revogados com este disposto, onde por vezes é acrescentada informação adicional para melhorar e/ou ajustar os decretos já em vigor de acordo com as dúvidas procedimentais existentes. Os artigos complementam-se num todo, neste decreto salientam-se as matérias perigosas, visto a sua importância na correta valorização dos desperdícios.

Todas as diretivas anteriores específicas continuarão em vigor, com ênfase em algumas como a Diretiva 96/61/CE. Esta diretiva incide sobre instalações e atividades industriais, garantindo que utilizam os métodos mais sustentáveis. O objetivo é avaliar as condições das instalações e a conformidade das atividades com as melhores técnicas disponíveis, visando minimizar o impacto ambiental. Além disso, a diretiva estabelece procedimentos para a emissão de licenças ambientais integradas, que exigem que as empresas demonstrem o cumprimento das normas ambientais antes de iniciar suas operações.

Esta diretiva é também importante por se aplicar à indústria da energia e gestão de resíduos. Isso implica que todos os pontos desta diretiva devem ser cumpridos, neste caso muito dinâmicos, pois o rendimento das instalações é comparado com as mais recentes tecnologias disponíveis. Uma empresa neste setor deve garantir continuamente a melhoria do seu desempenho para evitar a revogação da sua licença. Este processo contínuo de atualização tecnológica e conformidade normativa é essencial para promover práticas industriais mais limpas e sustentáveis, refletindo o compromisso da União Europeia com a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Além disso, a Diretiva 96/61/CE, posteriormente consolidada na Diretiva 2010/75/UE sobre emissões industriais, estabelece princípios para a prevenção e controlo integrado da poluição, abordando não apenas a gestão de resíduos, mas também a emissão de poluentes no ar, água e solo. Esta abordagem integrada assegura que todas as possíveis fontes de poluição são controladas de forma coordenada, promovendo uma maior eficiência ambiental.

Com base nas diretrizes da União Europeia o Decreto-Lei n.º 117/2010 define em Portugal os objetivos de percentagem de consumo de energias renováveis até 2020. Este decreto promoveu a utilização de biocombustíveis de segunda geração, que não interferem com a produção alimentar, promovendo uma maior integração entre a agricultura e o setor energético nacional. A criação de TdBs (Títulos de Biocombustíveis) também foi uma medida importante para verificar a incorporação de biocombustíveis provenientes de resíduos, garantindo o cumprimento das metas estabelecidas.

Em resumo, a gestão de resíduos em Portugal é regida por um conjunto de diretivas europeias e nacionais que estabelecem critérios rigorosos para o tratamento, reciclagem e eliminação de resíduos, com o objetivo de promover a sustentabilidade ambiental e cumprir com os compromissos internacionais.

1.3. Gestão de Resíduos em Portugal

Todos os países devem possuir regulamentações e leis específicas, bem como procedimentos adequados para o manuseamento dos resíduos, em conformidade com os objetivos políticos de gestão desses resíduos. Em Portugal, destaca-se a Lei de Bases do Ambiente n.º 19/2014, que estabelece que a realização das políticas ambientais é parte integrante da competência do Estado.

Na Lei de Bases do Ambiente n.º 19/2014 são enunciados os princípios fundamentais do ambiente, os quais, em função do impacto no meio ambiente, promovem o crescimento da sustentabilidade e o equilíbrio dos ecossistemas, de forma a não comprometer o futuro. Quando aplicável, é designado o responsável pela concretização desses objetivos em todos os projetos, sendo responsabilizado pelo não cumprimento das medidas destinadas a mitigar atividades prejudiciais ao ambiente.

O tratamento necessário dos resíduos gerados pelas atividades é atribuído ao responsável pela exploração dessas atividades, o qual deve recorrer a empresas licenciadas ou criar as condições adequadas para a gestão desses resíduos. Qualquer dano ao ambiente é sancionado, sendo o causador do dano responsável pela sua reparação, de acordo com o previamente estabelecido. ((APA), 2024)

Além disso, em Portugal, enfrentam-se desafios únicos na gestão de resíduos, como a necessidade de lidar com resíduos costeiros e marinhos devido à extensa costa do país, e a gestão de resíduos urbanos em áreas metropolitanas densamente povoadas. ((APA), 2023)

O país também está ativamente envolvido em iniciativas de economia circular, promovendo a reutilização, reciclagem e redução do desperdício. Iniciativas como o Plano de Ação para a Economia Circular e projetos piloto em diferentes setores da economia visam maximizar a eficiência dos recursos e reduzir o impacto ambiental. ((APA), 2023)

A sociedade civil desempenha um papel importante na gestão de resíduos em Portugal, com diversas organizações não governamentais e grupos comunitários envolvidos em iniciativas de sensibilização e educação ambiental como o caso da Quercus e Zero, além de projetos práticos de recolha seletiva e reciclagem. ((APA), 2023)

A gestão de resíduos também tem um impacto económico e social significativo em Portugal, contribuindo para a criação de empregos na indústria de reciclagem e para a melhoria das condições de vida em comunidades mais limpas e saudáveis. ((APA), 2023)

No que diz respeito à tecnologia e inovação, Portugal está a investir em soluções avançadas para a gestão de resíduos, incluindo tecnologias digitais e inteligência artificial para otimizar processos de recolha, triagem e tratamento de resíduos. ((APA), 2023)

Embora tenham sido feitos progressos significativos, Portugal ainda enfrenta desafios futuros na gestão de resíduos, como a necessidade de aumentar as taxas de reciclagem, melhorar a infraestrutura de gestão de resíduos e enfrentar os desafios decorrentes das mudanças climáticas. ((APA), 2023)

Anualmente, é lançado um relatório que representa o estado ambiental do país no ano anterior, fornecendo uma visão abrangente dos progressos realizados e dos desafios que ainda persistem na gestão de resíduos e nas políticas ambientais em Portugal. ((APA), 2023)

1.3.1. Relatório Representativo do Estado Ambiental

A partir do ano de 2013, foi iniciada a publicação de um relatório anual fundamental, com o intuito de apresentar o enquadramento socioeconómico nacional e analisar as medidas implementadas pelas diversas políticas ambientais do país. ((APA), 2023)

No relatório representativo do estado ambiental de 2023, é possível examinar o consumo de matéria-prima, assim como os impostos sobre produtos com um impacto ambiental significativo, visando promover a utilização racional desses produtos.

Segundo o relatório, o consumo de matérias-primas tem aumentado, e a eficiência da sua utilização não tem evoluído tanto quanto a média europeia. Ao analisar as declarações, neste caso favoráveis, dos processos de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), constata-se uma significativa conscientização sobre o impacto ambiental dos vários projetos existentes, uma vez que a maioria desses projetos é aprovada. ((APA), 2023)

No que diz respeito aos transportes, observa-se uma tendência de dependência dos produtos petrolíferos e a ausência de uma redução a curto prazo das emissões de gases com efeito de estufa provenientes desse setor. O objetivo é a utilização de meios de transporte com menor emissão de gases com efeito de estufa, como os comboios elétricos ou combustíveis neutros. ((APA), 2023)

No capítulo referente aos resíduos, estabelecem-se objetivos que visam a reutilização e reciclagem de 55%, 60% e 65% da massa de resíduos sólidos até os anos 2025, 2030 e 2035, respetivamente. Além disso, pretende-se reduzir em 10% o índice de resíduos destinados a aterros. ((APA), 2023)

Os objetivos estabelecidos para 2020 foram alcançados com um desempenho ligeiramente superior em relação ao ano anterior, demonstrando um maior empenho da população e dos municípios. A população está cada vez mais consciente da necessidade de separação do lixo, e os municípios continuam a criar constantemente mais condições para essa prática. ((APA), 2023)

Estes objetivos são de extrema importância para o âmbito desta dissertação, uma vez que, para além da diminuição da pegada carbónica criada, permite uma triagem mais eficiente entre os resíduos com potencial energético e sem potencial energético, que contribuem para um reaproveitamento de energia e matérias-primas desperdiçadas. ((APA), 2023)

Em suma, o relatório de 2023 representa um importante marco na avaliação do estado ambiental de Portugal, fornecendo informação valiosa sobre o consumo de recursos, a eficiência ambiental e os desafios enfrentados no país. Destaca-se a crescente consciencialização sobre o impacto ambiental das atividades humanas, evidenciada pelo aumento das aprovações nos processos de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). No entanto, persistem desafios significativos, especialmente no setor dos transportes e na gestão de resíduos. A análise desses desafios e a implementação de medidas corretivas são essenciais para alcançar os objetivos ambientais e promover um futuro mais sustentável para Portugal. ((APA), 2023)

1.3.2. Estratégia Nacional de Consumo de Energia

Com o decreto de lei nº 117/2010, foram definidos os objetivos de percentagem de consumo de energias renováveis até 2020 em Portugal. Esta iniciativa foi parte de um contexto histórico de evolução das políticas energéticas e ambientais, tanto a nível nacional como da União Europeia, que culminou na adoção de metas para energias renováveis no setor dos transportes. (Assembleia da República, 2010)

No setor dos transportes, os objetivos estabelecidos indicavam a utilização de recursos endógenos na produção de biocombustíveis de segunda geração, os quais não interferem com a produção alimentar. Essa abordagem promoveu uma maior integração entre a agricultura e o setor energético nacional, resultando em benefícios económicos para ambos os setores. (Assembleia da República, 2010)

Essa estratégia visava principalmente o cumprimento dos compromissos energéticos nacionais e europeus, bem como a diversificação da origem da energia primária, a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da dependência energética externa. Além disso, destacou-se a importância da cooperação internacional e da troca de experiências e melhores práticas com outros países da União Europeia e além, visando promover o desenvolvimento sustentável e alcançar as metas globais de redução de emissões e transição para uma economia de baixo carbono. (Assembleia da República, 2010)

Após a implementação da Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, que estabeleceu a meta de incorporação de pelo menos 10% de energias provenientes de fontes renováveis no consumo final do setor dos transportes até 2020, tornou-se necessário definir critérios de qualidade obrigatórios para os biocombustíveis e/ou biolíquidos a fim de garantir sua sustentabilidade. Além disso, houve um apoio para a incorporação desses biocombustíveis no produto final a ser consumido. (Assembleia da República, 2010)

Foram criados títulos de emissão de biocombustíveis (TdB) para verificar a incorporação de biocombustíveis provenientes de resíduos, garantindo o cumprimento das metas estabelecidas ou das condições estipuladas no decreto. Essas metas estão descritas no decreto de lei 117/2010 para o período entre 2011 e 2020. (Assembleia da República, 2010)

Todavia, à medida que avançamos no século XXI, é importante reconhecer os desafios e oportunidades futuras associados à implementação dessas políticas. Desafios como a necessidade de desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis de produção de biocombustíveis e garantir a sustentabilidade a longo prazo das cadeias de abastecimento de biomassa devem ser abordados. Ao mesmo tempo, é fundamental continuar a promover o envolvimento e a sensibilização pública sobre a importância dos biocombustíveis e a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis de consumo de energia. Isso é conseguido através do incentivo, por exemplo fiscal, e da cooperação da sociedade no processo de transição energética. ((APA), 2023)

Em última análise, a gestão eficaz de resíduos e a produção sustentável de biocombustíveis representam não apenas uma resposta aos desafios ambientais, mas também uma oportunidade para impulsionar o crescimento económico e a inovação em Portugal. Ao adotar práticas mais sustentáveis, o país pode não só cumprir os compromissos internacionais, mas também melhorar a qualidade de vida dos seus cidadãos e promover um ambiente mais saudável para as gerações futuras. Essas sugestões podem ser implementadas através de programas de incentivo à investigação e desenvolvimento de tecnologias verdes, bem como através de parcerias público-privadas para a promoção de práticas sustentáveis em diferentes setores da economia. ((IRENA), 2023)

1.5. Economia Circular

O primeiro Plano de Ações de Economia Circular da União Europeia surgiu em 2015. Nos planos de ações subsequentes, existe uma breve síntese das ações tomadas na sequência dos anteriores planos de ações, o que cria algum contexto para os problemas ainda existentes. ((APA), 2020)

Para construir um plano de ações conciso, são necessários objetivos. Por esse motivo, neste plano de ações, são levantados alguns dos pontos onde a União Europeia falha em matéria de sustentabilidade. Com este trabalho feito, torna-se mais fácil identificar soluções sustentáveis para contrariar os maus hábitos das comunidades europeias. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

De forma a este plano de ações funcionar é essencial promover a adoção de práticas sustentáveis em todos os setores da economia. Isto inclui a redução do consumo de recursos naturais, a promoção da eficiência energética, o incentivo ao uso de energias renováveis e a implementação de sistemas de gestão ambiental que minimizem o impacto ambiental das atividades económicas. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

A educação e a consciencialização pública também desempenham um papel crucial na promoção da sustentabilidade. É necessário que os cidadãos estejam informados e comprometidos com práticas sustentáveis no seu dia-a-dia, como a redução do consumo de produtos com maior pegada ecológica e a participação em programas de reciclagem e compostagem. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

No plano de ações, são mencionados estudos relativos ao impacto positivo da economia circular, que se relacionam todos com a diminuição da poluição, o que, por sua vez, reduz a aceleração do aquecimento global. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Como sugestão no Plano de Ações de Economia Circular, menciona-se incentivos para as empresas inovadoras com elevado interesse para as metas de descarbonização. As restantes empresas, já existentes ou não, são mencionadas como um potencial ponto de mudança, sendo que deve ser incentivada a recuperação ou reaproveitamento quando aplicável por forma a criar uma economia circular. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Este tipo de incentivo pode levar ao aumento da eficiência energética dos edifícios e ao aumento da eficiência das instituições, o que se aplica de início na construção dos novos edifícios, mas também na renovação dos edifícios e processos existentes para melhorar a eficiência dos mesmos. Para isso também a separação de resíduos é crucial, reutilizando os resíduos da construção onde se evite a necessidade de tantos recursos naturais. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Seguindo este ponto de vista, é destacada a importância da separação de bio-resíduos. Atualmente, apesar de não existirem contentores em Portugal com a mesma intensidade que existem contentores para plástico, metal e vidro, já existem regiões que investem em contentores de bio-resíduos. No entanto, uma das medidas em ação era assegurar a separação dos bio-resíduos até ao dia 31 de dezembro de 2023, que sem contentores para a separação na origem tem de ser garantida pelo responsável de gestão de resíduos. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

A economia circular é importante no seguimento desta dissertação porque os produtos que não podem ser reutilizados, são geralmente matéria orgânica. A matéria orgânica que pode ser transformada para gerar produtos de interesse no mercado energético, como os biocombustíveis e quando essa transformação não é possível, maioritariamente pode sofrer incineração com aproveitamento de energia. De referir que o plano de ação reitera que a transformação para produção de biocombustíveis não deve ser tratada como transformação química. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Em resumo, a sustentabilidade é um objetivo multifacetado que requer esforços coordenados entre governos, empresas e cidadãos. A implementação de uma economia circular é um passo importante, mas deve ser complementada por políticas e práticas que promovam a gestão sustentável dos recursos e a redução do impacto ambiental em todas as esferas da sociedade. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

1.6. Conclusão

O tratamento e gestão de resíduos desempenham um papel crucial na promoção da sustentabilidade e na mitigação dos impactos ambientais associados às atividades humanas. A implementação de políticas e estratégias eficazes na gestão de resíduos, como a valorização de resíduos para a produção de biocombustíveis, reflete um compromisso crescente com a economia circular e com a redução das emissões de gases com efeito de estufa. ((APA), 2023)

No entanto, a gestão de resíduos enfrenta desafios significativos, nomeadamente na sua regulamentação e na necessidade de investimentos em infraestruturas adequadas. A complexidade dos processos de triagem e tratamento, aliada aos custos elevados, pode representar um obstáculo para a plena concretização dos objetivos de sustentabilidade. É essencial que se continue a investir em tecnologias inovadoras e na melhoria das práticas de gestão de resíduos, de modo a aumentar a eficiência e reduzir os custos. ((APA), 2023)

A conscientização pública e a educação ambiental são igualmente fundamentais para o sucesso de qualquer estratégia de gestão de resíduos. O envolvimento da população, através de práticas de reciclagem e separação de resíduos na origem, é crucial para maximizar o potencial de reaproveitamento dos materiais e minimizar a quantidade de resíduos encaminhados para aterros. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Comparando as práticas de gestão de resíduos de Portugal com as de outros países europeus, verifica-se que há espaço para melhorias, particularmente na área da reciclagem e da valorização energética. Países como a Alemanha e a Suíça têm alcançado taxas de reciclagem muito superiores, graças a políticas rigorosas e ao forte envolvimento das comunidades locais. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

O futuro da gestão de resíduos em Portugal deverá focar-se na implementação de uma abordagem mais integrada e eficiente, que combine a redução na fonte, a reciclagem, a valorização energética e a minimização do desperdício. A adaptação contínua das políticas públicas e a inovação tecnológica serão determinantes para assegurar que Portugal se alinha com as melhores práticas internacionais e avança em direção a uma sociedade mais sustentável e resiliente. ((APA), 2023)

Em conclusão, a gestão de resíduos é um dos pilares fundamentais para a construção de um futuro mais sustentável. Com o apoio de políticas robustas, inovação tecnológica e o envolvimento da sociedade, é possível transformar os resíduos de um problema ambiental num recurso valioso para a economia e para o meio ambiente. ((APA), 2023)

2. Gerações de Biocombustível

Neste capítulo, será explicada a importância do capítulo anterior. Tal como em qualquer processo de produção são necessárias matérias-primas. As origens dessas matérias-primas podem ser variadas, abrangendo desde as mais sustentáveis até às menos sustentáveis, desde as mais equilibradas em termos de gestão ambiental até às menos equilibradas, e desde as mais estáveis economicamente até às mais voláteis.

As gerações de biocombustíveis diferenciam a sustentabilidade dos biocombustíveis produzidos. Em termos gerais, um biocombustível é mais sustentável se for de uma geração mais avançada. Por exemplo, os biocombustíveis de 2ª geração são considerados mais sustentáveis do que os de 1ª geração, uma vez que utilizam resíduos agrícolas e florestais, em vez de culturas alimentares. (Demirbas, , 2009)

Como será explicado a seguir, os biocombustíveis de 3ª geração podem ter especial importância em países costeiros, como é o caso de Portugal. Estes biocombustíveis são produzidos a partir de algas, que podem ser cultivadas em áreas marítimas. É relevante notar que mais de metade da área de Portugal é composta por área marítima, e não terrestre, o que oferece um enorme potencial para a produção de biocombustíveis de 3ª geração. (Chisti, 2007)

Além disso, a utilização de algas para a produção de biocombustíveis apresenta várias vantagens ambientais. As algas têm uma elevada taxa de crescimento e eficiência fotossintética, podem ser cultivadas em águas residuais e salinas, e não competem com terras agrícolas utilizadas para a produção de alimentos. Isto pode contribuir para a sustentabilidade da produção de biocombustíveis e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. (Brennan & Owende, 2009)

Por fim, é importante destacar que o desenvolvimento e a implementação de tecnologias avançadas para a produção de biocombustíveis de 3ª geração requerem investimento em investigação e desenvolvimento (I&D), bem como políticas públicas que incentivem a adoção de práticas sustentáveis e a cooperação entre setores. A transição para biocombustíveis mais sustentáveis pode, portanto, contribuir significativamente para os objetivos de energia renovável e de redução de emissões estabelecidos pela União Europeia e por Portugal. (Commission, 2020)

2.1. Biocombustíveis de 1ª Geração

Os biocombustíveis de primeira geração são produzidos a partir de matérias-primas oriundas de culturas especificamente cultivadas para esse fim. Esses biocombustíveis foram os primeiros a surgir como substitutos dos derivados do petróleo. (Naik, et al., 2009)

2.1.1. Factos Históricos

Historicamente, os biocombustíveis apareceram no final do século XIX com a apresentação do motor diesel. O motor de ignição por compressão foi inicialmente concebido para ser movido a óleo vegetal puro, sem ser transformado em biodiesel. No entanto, esta prática revelou-se inviável a longo prazo devido à formação de depósitos de carbono nos motores. (Knothe, et al., 2015)

No início do séc. XX o modelo T da Ford foi projetado com o intuito de ser alimentado por etanol, produzido localmente através da fermentação da farinha de milho. Esta prática, contudo, levantou questões relacionadas com o uso de água para a irrigação do milho e a competição com a indústria alimentar. (Boyle, 1996)

Até à Segunda Guerra Mundial, a utilização de biocombustíveis foi relativamente limitada. Durante a guerra, a escassez de combustíveis fósseis levou ao uso renovado de biocombustíveis de primeira geração, como óleos vegetais e etanol. No entanto, após a guerra, a abundância de petróleo barato resultou no abandono dessas práticas. (Sovacool, 2009)

A crise petrolífera dos anos 70 do século XX reavivou o interesse pelos biocombustíveis. Nessa década, surgiram investimentos significativos, incluindo o programa brasileiro de produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, que continua até hoje. (Pereira, et al., 2015)

Desde então, houve um movimento global para misturar biocombustíveis com combustíveis fósseis, aproveitando a capacidade de regeneração rápida desses recursos renováveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. (Naik, et al., 2009)

2.1.2. Vantagens e Desvantagens

Uma das grandes vantagens dos biocombustíveis de primeira geração, em comparação com as gerações subsequentes, está associada ao cultivo das matérias-primas. Como são culturas controladas, é possível obter matérias-primas homogêneas. Por esse motivo, não são necessários pré-tratamentos complexos para a seleção das matérias-primas, uma vez que não contêm substâncias perigosas e possuem uma homogeneidade que elimina a necessidade de separação de componentes dissimilares. (Knothe, et al., 2015)

O investimento inicial nos biocombustíveis de primeira geração, que começaram a ser desenvolvidos no final da primeira metade do século XX, foi impulsionado pela necessidade de mitigar a dependência dos produtos petrolíferos. Estes biocombustíveis apresentavam várias vantagens, como a criação de emprego, a promoção da independência energética a nível regional e a obtenção de um combustível considerado neutro em carbono. (Milanez, et al., 2017)

Estes biocombustíveis eram considerados neutros em carbono porque, numa visão simplificada, eram produzidos a partir de plantas. Quer fossem óleos ou açúcares, estes eram posteriormente transformados por transesterificação ou fermentação, respetivamente. Durante o crescimento, as plantas absorvem dióxido de carbono da atmosfera, que é depois libertado novamente quando os biocombustíveis são queimados. Este ciclo de carbono aparentemente equilibrado levou à perceção de que os biocombustíveis não aumentavam a concentração de dióxido de carbono na atmosfera. (Demirbas, 2008)

No entanto, este raciocínio simplista revelou-se insuficiente. Surgiram várias complicações que impediram o desenvolvimento global dos biocombustíveis de primeira geração. A necessidade de grandes extensões de terra para as culturas destinadas à produção de biocombustíveis criou problemas como a competição com a indústria agroalimentar, levando à desflorestação e a impactos negativos na biodiversidade. (Searchinger, et al., 2008)

Um dos problemas mais graves associados à produção intensiva de biocombustíveis de primeira geração é a gestão da água. Este recurso, já escasso, precisa de ser usado de forma racional. Para tornar as culturas economicamente viáveis, é necessário um uso intensivo de água, o que torna esta prática insustentável a longo prazo. (Menon & Rao, 2012)

Apesar das vantagens, como a redução das emissões de gases com efeito de estufa e a compatibilidade com equipamentos existentes (motores de combustão interna, caldeiras, etc.), os biocombustíveis de primeira geração enfrentam desvantagens significativas que limitam a sua viabilidade em grande escala. A competição direta com a indústria alimentar por terras cultiváveis e a utilização de alimentos na produção de biocombustíveis aumentam o preço dos alimentos essenciais. Além disso, a desflorestação e o consumo excessivo de água para tornar estas culturas rentáveis representam obstáculos significativos. Energeticamente, o processo é ineficiente, exigindo grandes quantidades de energia para o tratamento das culturas. Adicionalmente, as plantas não aproveitam plenamente a energia recebida do sol devido às sombras provenientes das folhas mais altas, e desastres naturais podem afetar drasticamente a produção. (Brennan & Owende, 2009)

2.2. Biocombustíveis de 2ª Geração

Devido aos vários constrangimentos provenientes da sustentabilidade na produção massiva de biocombustíveis de primeira geração, no final do século XX houve um aumento significativo na procura de soluções que combatessem os problemas identificados. Este movimento levou ao desenvolvimento e incremento de biocombustíveis de segunda geração, que são mais sustentáveis e apresentam várias vantagens em relação aos de primeira geração. (Abdullah, et al., 2019)

De uma forma geral, os biocombustíveis de segunda geração utilizam resíduos como matéria-prima, o que permite uma melhor adequação aos princípios de sustentabilidade discutidos anteriormente. Estas matérias-primas variam significativamente e não estão relacionadas com a indústria agroalimentar, nem são especificamente cultivadas para este fim. Esta característica mitiga o consumo excessivo de água e a procura por terrenos férteis. (Sims, et al., 2009)

As matérias-primas mais comuns para a produção de biocombustíveis de segunda geração incluem Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), resíduos lignocelulósicos (como resíduos florestais ou agrícolas) e outras formas de biomassa não alimentar. A utilização destes materiais contribui para a redução de resíduos, promovendo uma economia circular e diminuindo a pressão sobre recursos naturais. (Gírio, et al., 2013)

Esta geração de biocombustíveis elimina a necessidade de culturas dedicadas, o que aumenta significativamente a eficiência na obtenção da matéria-prima. Como são provenientes de resíduos, reduz-se a necessidade de aterros para deposição destes materiais, promovendo o reaproveitamento da energia neles contida. A energia utilizada para obter estas matérias-primas é residual em comparação com a da primeira geração. (Sims, et al., 2009)

A segunda geração de biocombustíveis utiliza resíduos agrícolas, florestais e urbanos, o que evita a utilização de terras aráveis para o cultivo de culturas específicas para biocombustíveis. Ao utilizar resíduos como matéria-prima, reduz-se a necessidade de aterros sanitários, diminuindo o impacto ambiental associado à deposição de resíduos. (Sims, et al., 2009)

Outro ponto é que permite o reaproveitamento da energia contida nos resíduos que, de outra forma, seriam descartados, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos. A energia necessária para recolher e preparar estas matérias-primas é significativamente menor em comparação com os biocombustíveis de primeira geração, que exigem cultivo, irrigação e colheita. (Abdullah, et al., 2019)

A gestão de resíduos exige a seleção cuidadosa das matérias-primas para garantir a qualidade e a segurança do biocombustível produzido. A presença de materiais perigosos nos resíduos pode complicar o processo. Os resíduos frequentemente requerem pré-tratamentos mais rigorosos para remover impurezas e preparar a matéria-prima para a conversão em biocombustível, o que pode aumentar os custos de produção. (Brennan & Owende, 2009)

Devido à complexidade do processamento e aos tratamentos necessários, o custo final dos biocombustíveis de segunda geração pode ser mais elevado do que o dos biocombustíveis de primeira geração. A eficácia do sistema de recolha e seleção de resíduos pode ser aumentada com a sensibilização da população para a correta separação dos resíduos, minimizando a presença de materiais indesejados. (Coelho, et al., 2022)

Apesar dos desafios, a segunda geração de biocombustíveis representa um passo significativo em direção a uma produção de energia mais sustentável e menos dependente de recursos agrícolas. A utilização de resíduos como matéria-prima contribui para uma economia circular e promove uma gestão mais eficiente dos recursos disponíveis. (A. Alalwan, et al., 2019)

Os biocombustíveis de segunda geração podem contribuir para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, uma vez que utilizam resíduos que de outra forma poderiam decompôr-se e liberar metano, um gás com efeito de estufa mais nocivo que o dióxido de carbono. (A. Alalwan, et al., 2019)

Ao incorporar resíduos como uma fonte de energia, os biocombustíveis de segunda geração ajudam a diversificar as fontes de energia e a reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A utilização de resíduos como matéria-prima para biocombustíveis é um exemplo claro de economia circular, onde os resíduos são reutilizados para criar produtos, minimizando o desperdício e maximizando o valor dos recursos. (Antonopoulou & Lyberatos, 2016)

O desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração pode impulsionar a inovação tecnológica em áreas como a biotecnologia e a engenharia química, levando a processos mais eficientes e sustentáveis. ((IEA), 2021)

2.3. Biocombustíveis de 3ª Geração

A terceira geração de biocombustíveis é especialmente relevante para um país como Portugal, que possui uma costa marítima muito extensa. Estes biocombustíveis são produzidos a partir de algas, que podem crescer em regiões marítimas e em águas residuais, sem afetar a água potável. (Yentekakis & Goula, 2017)

As algas possuem uma percentagem elevada de lípidos, que podem ser transformados em biodiesel. Como têm uma taxa de crescimento elevada, é possível colher as algas várias vezes por ano, tornando o processo muito mais produtivo quando comparado aos processos das gerações adjacentes. O facto de não ser necessária água potável é extremamente vantajoso, além de que as algas ajudam a purificar as águas residuais, o que é benéfico do ponto de vista de uma economia circular. (Almutairi, 2015)

Como a área de exploração necessária não é semelhante à utilizada pela indústria agroalimentar e como as algas podem ter múltiplos propósitos, como a produção de biodiesel, adubos e suplementos alimentares, o custo de produção de biocombustíveis de terceira geração pode ser drasticamente reduzido. (Brennan & Owende, 2009)

É impossível ter uma única tecnologia que satisfaça o consumo de energia atual. Apesar de esta geração de biocombustíveis oferecer inúmeras vantagens ecológicas, deve ser utilizada com cautela devido ao facto de ser uma tecnologia recente, cuja investigação começou por volta do ano 2000, e pode ter consequências a longo prazo ainda não previstas. (Naik, et al., 2009)

Por ser um processo relativamente novo, ainda é necessário um investimento significativo em investigação e desenvolvimento para torná-lo mais sustentável, aumentando o rendimento económico e produtivo. A colheita e transformação das algas precisam de melhorias em termos de eficiência energética para tornar o processo verdadeiramente sustentável. (Meng, et al., 2008)

2.4. Biocombustíveis de 4^a Geração

A geração mais recente de biocombustíveis, ao contrário das anteriores, utiliza os mesmos processos, mas com uma base tecnológica mais avançada. Esta geração de biocombustíveis emprega os métodos descritos na segunda e terceira geração, acrescidos do conhecimento na área da genética. (Abdullah, et al., 2019)

A quarta geração de biocombustíveis integra tecnologias de engenharia genética para aumentar a produtividade das culturas energéticas, como as algas. As matérias-primas são geneticamente modificadas para melhorar a eficiência dos processos de produção. Além disso, esta geração incorpora técnicas de captura e armazenamento de carbono (CCS – Carbon Capture and Storage), o que permite que os biocombustíveis resultantes tenham um impacto positivo nas emissões de CO₂ em comparação às restantes gerações. Esta combinação torna a produção mais eficiente e sustentável, mitigando ainda mais os efeitos das emissões de gases de efeito estufa. (Coelho et al., 2022)

Na prática, os biocombustíveis de quarta geração beneficiam da engenharia genética para modificar as algas utilizadas na terceira geração e incorporam a captura de CO₂ no processo de combustão para ser utilizado pelas algas no processo de fotossíntese. A integração da CCS é uma inovação significativa, resultando em emissões negativas de carbono. Isto significa que o processo de produção pode, potencialmente, capturar mais CO₂ do que é emitido, ajudando a combater o aquecimento global. (Abdullah, et al., 2019)

Os principais desafios incluem o elevado custo e a complexidade técnica da captura e armazenamento de carbono, bem como a aceitação pública e regulamentação das culturas geneticamente modificadas. O desenvolvimento e implementação desta tecnologia exigem investimentos significativos em pesquisa e infraestrutura. Por ser um processo relativamente novo, que começou a ser investigado por volta de 2010, ainda há muitas barreiras técnicas e legislativas a superar. (Abdullah, et al., 2019)

Os biocombustíveis de quarta geração representam um avanço significativo no campo da energia renovável, combinando inovações em biotecnologia e técnicas de captura de carbono para criar uma solução mais sustentável e eficiente. No entanto, esforços contínuos em pesquisa, desenvolvimento e políticas públicas são necessários para superar as barreiras existentes e promover a sua adoção em larga escala. (A. Alalwan, et al., 2019)

2.5. Políticas Impulsionadoras

Tal como acontece com a gestão de resíduos, os biocombustíveis devem seguir a legislação existente que define estratégias nacionais alinhadas com as políticas e estratégias globais. Essas estratégias têm como base objetivos comuns, destacando-se as políticas de redução das emissões de gases com efeito de estufa libertados para a atmosfera durante a utilização da energia. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2008)

As políticas e legislações devem atender às necessidades de sustentabilidade, diferenciando as origens da matéria-prima e as características específicas de cada uma. Esta diferenciação é essencial para favorecer matérias-primas locais que estejam em consonância com a flora local, promovendo assim uma produção mais sustentável e adaptada ao ambiente regional. ((APA), 2024)

2.5.1. Impulso Legislativo

De acordo com o Decreto-Lei nº 117/2010, os biocombustíveis podem ser comercializados no seu estado puro ou misturados com combustíveis fósseis pelos produtores de biocombustíveis, sendo estes reconhecidos como Entrepósito Fiscal de Transformação (EFT). Essas transações devem ser obrigatoriamente comunicadas à Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG). (Assembleia da República, 2010)

Com este decreto, foram estabelecidas metas de incorporação de biocombustíveis nos produtos petrolíferos destinados à venda ao público. Ao longo dos anos, a taxa de incorporação de biocombustíveis aumentou progressivamente, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental resultante do uso de combustíveis fósseis. Os valores estipulados são os seguintes:

Tabela I Percentagem de biocombustível a ser incorporado nos combustíveis para consumo final no setor dos transportes (Artigo 11º do Decreto-Lei nº 117/2010)

| Ano | Percentagem de Biocombustível a Ser Incorporado |
|-------------|---|
| 2011 a 2012 | 5 % |
| 2013 a 2014 | 5,5% |
| 2015 a 2016 | 7,5% |
| 2017 a 2018 | 9% |
| 2019 e 2020 | 10% |

A partir de 2020, a percentagem incorporada foi aumentada, mas não foi emitida nenhuma legislação subsequente que obrigue a incorporação de uma percentagem superior a 10%. Devido às metas de eletrificação das frotas que se sucederam após 2020, houve uma redução na intensidade das restrições impostas ao desenvolvimento de motores de combustão interna, visando cortar as emissões de gases com efeito de estufa através do investimento em soluções de mobilidade elétrica. ((APA), 2024)

No entanto, os motores de combustão interna ainda não são uma solução obsoleta, e há opiniões contrárias sobre a sua viabilidade para um futuro sustentável. Por essa razão, a investigação contínua sobre biocombustíveis permanece relevante, especialmente quando associada ao aumento da eficiência dos motores de combustão interna. Além disso, foi estabelecida a meta mínima de 14% de energias renováveis a serem utilizadas nos transportes rodoviários até 2030, o que inclui a implementação dos biocombustíveis necessários. ((APA), 2024)

Para avaliar a sustentabilidade do biocombustível produzido, foi criado um sistema de medida que varia conforme a origem da matéria-prima e é baseado nos Títulos de Biocombustíveis (TdB), representando a quantidade proporcional a uma Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP). (Abdullah, et al., 2019)

2.5.2. Benefícios da Sustentabilidade da Matéria-Prima

Como suprarreferido, no Decreto-Lei nº 117/2010 é definido um valor equivalente a ser multiplicado a cada TdB produzido se as matérias-primas forem mais sustentáveis. O Laboratório Nacional de Energia e Geologia tem a tarefa de analisar o tipo de matéria-prima utilizada e criar um sistema de registo como base de dados. De acordo com o tipo de matéria-prima, é utilizado o seguinte valor equivalente por cada TdB:

Tabela II Valor Equivalente relacionado com a sustentabilidade da matéria-prima utilizada na produção dos biocombustíveis.

| Matéria-Prima Utilizada | Valor Equivalente |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Resíduos ou Detritos | 2 |
| Material Celulósico Não Alimentar | 2 |
| Material Lenho-Celulósico | 2 |
| Origem Endógena Não Alimentar | 1,3 |
| Origem Endógena Agrícola | 1,1 |

A definição dos valores equivalentes visa incentivar a utilização de matérias-primas mais sustentáveis na produção de biocombustíveis. Por exemplo, ao utilizar resíduos ou detritos como matéria-prima, que têm um valor equivalente de 2, um produtor de biocombustíveis pode dobrar os TdBs obtidos, aumentando assim os seus benefícios fiscais e incentivos. Este sistema de multiplicação incentiva os produtores a escolherem matérias-primas que tenham um menor impacto ambiental. A medida do valor equivalente de 2 para resíduos ou detritos, material celulósico não alimentar e material lenho-celulósico é também mencionada na Diretiva 2009/28/CE. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

O sistema de TdB (Títulos de Biocombustíveis) é um mecanismo que permite o reconhecimento oficial da quantidade de biocombustível produzido e sua equivalência em termos de redução de emissões de gases com efeito de estufa. Cada TdB representa uma quantidade de energia equivalente a uma Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP). Este sistema não só facilita a contabilização e a verificação das metas de incorporação de biocombustíveis, como também ajuda a direcionar políticas públicas e incentivos financeiros de forma mais eficaz. Este progresso é avaliado de dois em dois anos pelo relatório enviado à Comissão Europeia, de acordo com a Diretiva 2009/28/CE, tal como acontece com os detritos. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

Para entender como os TdB são aplicados no mercado, considere um produtor que utiliza 100 toneladas de resíduos para produzir biocombustível. Com um valor equivalente de 2, ele obterá TdBs correspondentes a 200 toneladas de biocombustível produzido. Este aumento incentiva o uso de matérias-primas mais sustentáveis, alinhando-se com os objetivos ambientais e econômicos definidos pelas políticas nacionais e europeias. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

O cálculo que leva à definição dos TdB é um valor médio de acordo com a metodologia do Anexo I. A redução de emissões conseguida com a utilização dos biocombustíveis é a diferença de emissões provocadas pelo consumo e produção do biocombustível em relação ao combustível fóssil de referência sobre o valor do combustível fóssil de referência. Para o biocombustível, são consideradas as emissões da extração e cultivo, a alteração do uso do solo, o processamento da matéria-prima, os transportes e a distribuição da matéria-prima e do produto acabado, bem como as reduções de carbono provenientes do cultivo das matérias-primas, da cogeração e de uma gestão agrícola melhorada. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

2.5.3. Limitações

Devido a ser uma geração recente, ainda não existem benefícios relacionados com os TdB (Títulos de Biocombustíveis) para a produção de biocombustíveis de quarta geração. (Abdullah, et al., 2019)

O processo burocrático necessário para obter as isenções existentes é demasiado complexo, o que desincentiva as pequenas empresas devido aos elevados custos de produção de biocombustíveis em comparação com os derivados de petróleo. As normas de qualidade do biocombustível tornam, por vezes, a produção inviável para os pequenos produtores, já que esses custos não são compensados pelos benefícios fiscais e incentivos em vigor. (A. Alalwan, et al., 2019)

Estas normas de qualidade são essenciais para garantir a compatibilidade com as infraestruturas existentes e para assegurar que não ocorre dano aos componentes durante a sua utilização. Também a redução de emissões com efeito de estufa dos biocombustíveis tem de ser superior a 60 por cento desde o ano de 2018 para ser considerado sustentável. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

Para melhorar este cenário, seria benéfico simplificar os processos burocráticos e aumentar os incentivos fiscais, de modo a tornar a produção de biocombustíveis mais atraente para os pequenos produtores. Além disso, investimentos em pesquisa e desenvolvimento podem ajudar a reduzir os custos de produção e melhorar a eficiência dos processos. ((APA), 2023)

A quarta geração de biocombustíveis tem um potencial significativo para contribuir para a sustentabilidade energética, mas a sua adoção em larga escala dependerá de um apoio legislativo mais robusto e de um compromisso contínuo com a inovação tecnológica. Com o tempo, espera-se que as barreiras atuais sejam superadas, permitindo uma transição mais rápida e eficiente para fontes de energia renovável. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

2.6. Conclusão

O sistema de TdBs (Títulos de Biocombustíveis) não só facilita a contabilização e verificação das metas de incorporação de biocombustíveis, como também desempenha um papel crucial na promoção de práticas mais sustentáveis no setor energético. Ao atribuir valores equivalentes mais elevados a matérias-primas com menor impacto ambiental, como resíduos e materiais celulósicos não alimentares, o sistema incentiva os produtores a optarem por fontes mais sustentáveis, alinhando-se com os objetivos de redução de emissões de gases com efeito de estufa. (Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, 2009)

No entanto, o sistema de TdBs enfrenta desafios e limitações. A complexidade do processo de certificação e os custos associados ao cumprimento das normas podem constituir um obstáculo significativo, especialmente para pequenos produtores, que frequentemente não dispõem dos recursos necessários para satisfazer todas as exigências. Estes desafios podem levar a um desinteresse por parte dos pequenos produtores, limitando assim o impacto positivo do sistema na promoção de práticas sustentáveis. (Commission, 2018)

A inovação tecnológica surge como um fator essencial para superar estas barreiras. A melhoria contínua dos processos de produção de biocombustíveis, através da aplicação de novas tecnologias e métodos mais eficientes, pode não só aumentar a quantidade de TdBs obtidos, como também reduzir os custos de produção, tornando o processo mais acessível e sustentável para todos os produtores. (Abdullah, et al., 2019)

Comparando o sistema de TdBs de Portugal com sistemas semelhantes em outras jurisdições, é possível identificar melhores práticas que poderiam ser adaptadas para fortalecer o modelo nacional. Em países como a Alemanha e a Suécia, onde a transição para energias renováveis está mais avançada, o uso de biocombustíveis é complementado por políticas fiscais robustas e incentivos financeiros que poderiam servir de exemplo para Portugal. ((APA), 2020)

Para além dos benefícios ambientais, o sistema de TdBs e a promoção dos biocombustíveis têm o potencial de gerar significativos benefícios económicos e sociais. A criação de novos postos de trabalho no setor das energias renováveis, a redução da dependência de combustíveis fósseis importados e o desenvolvimento de uma economia circular são alguns dos impactos positivos que podem resultar da expansão deste setor. (Milanez, et al., 2017)

O futuro do sistema de TdBs deverá ser moldado pelas metas de descarbonização estabelecidas para 2050. Com a evolução legislativa e as inovações tecnológicas, é provável que o sistema seja continuamente ajustado para se alinhar com as necessidades de uma economia de baixo carbono. A adaptação a novas exigências, bem como a introdução de novas tecnologias, será fundamental para garantir que o sistema de TdBs continue a ser uma ferramenta eficaz na promoção de uma transição energética sustentável. (Assembleia da República, 2014)

3. Processos de Produção

Para a produção de biocombustíveis, podem ser utilizadas diversas matérias-primas. Os biocombustíveis derivam de uma categoria de energias renováveis conhecida como biomassa. A biomassa é um termo utilizado para descrever qualquer matéria orgânica de origem animal ou vegetal que seja utilizada como fonte de energia. A biomassa pode ser transformada através de vários processos, por esse motivo é possível gerar biocombustíveis nos três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. (Knothe, et al., 2015)

Consoante a matéria-prima disponível, podem ser escolhidos os processos a serem utilizados para a produção de biocombustíveis. Dependendo do processo selecionado, obtêm-se biocombustíveis em um ou mais dos três estados físicos. Os biocombustíveis nos estados líquido e gasoso podem ser utilizados como substitutos dos combustíveis fósseis em todas as suas funções. (Mittelbach & Remschmidt, 2006)

A produção de biocombustíveis envolve processos tradicionais como a fermentação alcoólica, a digestão anaeróbica, a pirólise e a transesterificação. Ao longo dos anos, estes métodos passaram por diversas inovações, tanto em termos de avanços técnicos como de novas abordagens que resultaram em metodologias e exigências distintas. Estas melhorias têm vindo a otimizar a eficiência dos processos, tornando a produção de biocombustíveis cada vez mais adaptada às diferentes matérias-primas e necessidades energéticas. (Menon & Rao, 2012)

Novos métodos e uma maior eficiência dos processos são essenciais para alcançar uma maior sustentabilidade na produção de biocombustíveis. Através dessas melhorias, é possível reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa, tornando os biocombustíveis uma alternativa mais viável e sustentável aos combustíveis fósseis. A análise detalhada das transformações químicas que ocorrem durante a combustão desses combustíveis é crucial para uma avaliação completa da sua sustentabilidade e do seu impacto ambiental. (Brennan & Owende, 2009)

3.1. Fermentação Alcoólica

A fermentação é o processo utilizado para a produção de álcool, sendo o etanol o mais relevante para os propósitos desta dissertação. Quando derivado da biomassa, o etanol é denominado bioetanol e é considerado uma fonte de energia renovável, uma vez que a matéria-prima utilizada na sua produção pode ser regenerada em períodos relativamente curtos. (Soares, 2009)

O processo de fermentação é impulsionado por microrganismos, especificamente leveduras como *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* e *Zymomonas mobilis*, que convertem os açúcares presentes na biomassa em etanol. Cada enzima aplica-se melhor a um tipo de matéria-prima, geralmente são escolhidas segundo o PH. (Naik, et al., 2009)

Quando a matéria-prima é açúcar, a fermentação ocorre diretamente. No entanto, quando a matéria-prima é amido, é necessário proceder à hidrólise prévia deste para obter açúcares simples, utilizando enzimas como a amilase e a amilopectina. (Naik, et al., 2009)

Esses açúcares podem ser encontrados em resíduos, o que permite não só a produção de bioetanol como também a redução da poluição proveniente dessas fontes. Entre as matérias-primas destaca-se o soro de queijo, mencionado no artigo de Teixeira (2009) sobre bioetanol.

Este soro de queijo é um subproduto abundante e pode ser utilizado para a produção de bioetanol, contribuindo para a redução do desperdício de um produto com um elevado potencial. O soro de queijo é composto por permeado que é rico em lactose (lactose é o açúcar lácteo) e por um concentrado proteico. (Teixeira, 2009)

Através da ultrafiltração, é possível separar o concentrado proteico do permeado. O permeado pode ser transformado em bioetanol através do processo de fermentação. Na Figura 2 encontra-se um fluxograma representativo do processo, baseado no artigo de Teixeira (2009).

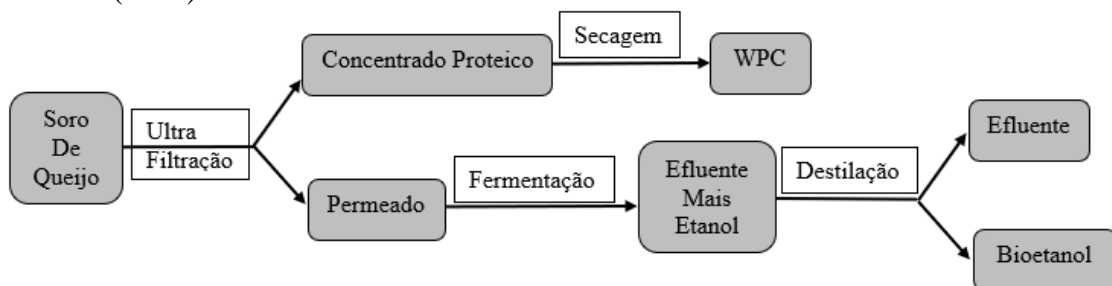


Figura 2 - Fluxograma de produção de bioetanol a partir de soro de queijo

A produção de bioetanol a partir de soro de queijo é um exemplo representativo de um biocombustível de segunda geração. Por outro lado, exemplos de biocombustíveis de primeira geração incluem o bioetanol produzido a partir do açúcar extraído da cana-de-açúcar, amplamente utilizado no Brasil, e do amido proveniente do milho, muito comum nos Estados Unidos da América. (Teixeira, 2009)

Além disso, algumas algas apresentam elevados teores de açúcar e/ou amido, que podem ser processados para a produção de bioetanol de maneira semelhante aos biocombustíveis de primeira geração, após a secagem das algas. Neste caso, o bioetanol produzido é classificado como um biocombustível de terceira geração. (Chisti, 2007)

A Figura 3 apresenta um exemplo de bioetanol produzido a partir de algas ricas em amido. No caso de a alga ser rica em açúcar, e não se pretender realizar a hidrólise do amido para convertê-lo em açúcar antes de transformá-lo em bioetanol, essa etapa de hidrólise poderia ser omitida. (Chisti, 2007)

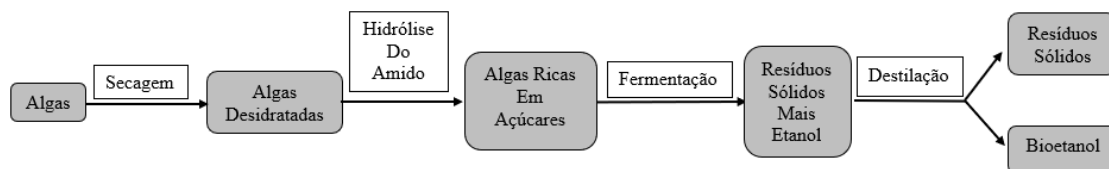


Figura 3 - Fluxograma de produção de bioetanol a partir de algas

Os resíduos sólidos gerados como subproduto da produção de bioetanol a partir de algas podem ser utilizados como biofertilizante ou submetidos à digestão anaeróbica. Como será explicado no subcapítulo seguinte, a digestão anaeróbica produz biogás, permitindo assim a produção adicional de biocombustíveis de segunda geração a partir do desperdício deste processo. (Chisti, 2007)

Para melhorar o produto principal, e de acordo com (Malode et al., 2020), o processo de secagem do bioetanol após a destilação transforma a pureza do bioetanol de noventa por cento para cem por cento.

3.2. Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica é um processo natural que ocorre na natureza. Durante este processo, a matéria orgânica é decomposta por uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias e arqueias, que produzem metano e outros gases. Embora o metano seja um gás de efeito de estufa e contribua para o aquecimento global, é importante notar que o metano não é diretamente prejudicial ao ambiente em si, mas sim o seu impacto ambiental, que é significativo devido ao seu potencial de aquecimento global, muito superior ao do dióxido de carbono. (Antonopoulou & Lyberatos, 2016)

Os resíduos que são colocados em aterros acabam por se decompor através do processo de digestão anaeróbica, resultando na produção de metano. Contudo, a separação e o tratamento dos resíduos em sistemas controlados, como digestores anaeróbicos, podem ter um impacto muito positivo para o meio ambiente. Isso ocorre porque, quando geridos adequadamente, esses sistemas permitem a captura e utilização do metano como fonte de energia renovável, reduzindo assim as emissões de gases com efeito de estufa e aproveitando os resíduos para gerar biocombustíveis. (Resolução do Parlamento Europeu, 2021)

Para melhor compreender na tabela III são enumerados os microrganismos responsáveis pela quebra dos nutrientes no processo de digestão anaeróbica.

Tabela III Microrganismos e nutrientes decompostos durante a digestão anaeróbica (Saravanan, et al., 2021)

| Microrganismos | Nutrientes |
|------------------------|--|
| Bactérias Hidrolíticas | Transformam Proteínas, Carboidratos e Lípidos em Açúcares e Aminoácidos. |
| Bactérias Acidogênicas | Transformam os açúcares e os aminoácidos em ácidos orgânicos, álcoois e gases. |
| Bactérias Acetogênicas | Transformam os ácidos orgânicos em ácido acético, hidrogénio e dióxido de carbono. |
| Metanogênicos | Transforma o ácido acético, hidrogénio e o dióxido de carbono em metano. |
| Arqueias Metanogênicas | Transformam os diversos nutrientes simplificados pelas bactérias em metano da mesma forma que os metanogênicos, mas com capacidade de processar mais tipo de nutrientes. |

Com a colaboração dos microrganismos, essencial neste processo, as moléculas são progressivamente decompostas até se obterem compostos mais simples. Conforme mencionado, quando se pretende obter etanol através da fermentação alcoólica, podem ser utilizadas principalmente bactérias hidrolíticas, que irão decompor previamente os compostos mais complexos em açúcares. (Kazamia & G. Smith, 2014)

A digestão anaeróbia é um processo de grande interesse, pois consegue processar quase todos os tipos de bio-resíduos. A vantagem deste método reside no facto de requerer um menor custo em pré-tratamentos, que são necessários apenas para aumentar a eficiência do processo. (Antonopoulou & Lyberatos, 2016)

3.3. Pirólise

A pirólise é um processo que utiliza biomassa lignocelulósica como matéria-prima. A lignocelulose é o principal constituinte de árvores, palhas e outros materiais vegetais. A pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa lignocelulósica na ausência de oxigénio ou na sua existência controlada, resultando na separação dos componentes voláteis da biomassa e na produção de carvão vegetal. Inicialmente, o interesse principal deste processo residia na obtenção de carvão vegetal, devido à sua elevada densidade energética. (Chan, et al., 2014)

Grande parte da matéria-prima é composta por substâncias voláteis, que tradicionalmente são queimadas durante o processo de pirólise. No entanto, este método leva a um desperdício significativo de energia. Além da perda de energia térmica, se esta energia não for aproveitada através de processos como a cogeração, ocorre a libertação de gases com efeito de estufa, como metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogénio e vapor de água. (Chan, et al., 2014)

O metano pode ser utilizado diretamente como combustível após a separação dos restantes gases. O syngas, ou gás de síntese, é uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogénio (H₂), com pequenas quantidades de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). Este gás pode ser processado para obter um biocombustível líquido conhecido como metanol ou ser transformado em combustíveis sintéticos através do processo de Fischer-Tropsch, além de poder ser utilizado para a produção de hidrogénio. (Steynberg, 2004)

Outra vertente é a pirólise rápida, um processo realizado a alta temperatura e com um tempo de residência curto, pode ser realizada num tanque estanque, mas não necessariamente sob pressões elevadas. O objetivo é maximizar a produção de bio-óleo a partir da biomassa. O bio-óleo é um produto semelhante ao petróleo bruto, que pode ser refinado para produzir combustíveis líquidos e gasosos. (Naik, et al., 2009)

Com o aumento de temperaturas a matéria volátil é desintegrada, o que leva ao aparecimento deste bio-óleo ao invés de ser produzido o syngas. Os mesmos constituintes químicos que existem no syngas acabam por existir no bio-óleo, ou seja, Carbono, Hidrogénio e Oxigénio. (Naik, et al., 2009)

Existe ainda a solvólise, que utiliza um solvente para dissolver a biomassa, retendo a matéria volátil nesse solvente. A mistura resultante obtida deste processo é também um bio-óleo. As temperaturas necessárias para conseguir o bio-óleo não são tão elevadas como na pirólise rápida. (Naik, et al., 2009)

3.4. Gás Síntese

Embora não seja um processo, mas sim um produto, o gás de síntese, ou syngas, merece destaque. Sendo uma mistura rica em monóxido de carbono e hidrogénio, é possível utilizá-lo para produzir hidrocarbonetos de diferentes formas, com o objetivo de obter combustíveis verdes. A partir do syngas, é possível produzir gasolina sintética, gasóleo sintético, metanol e até hidrogénio, que pode ser extraído da mistura. (Gandía, et al., 2013)

Qualquer um destes produtos contribui para um impacto ambiental positivo, reduzindo a dependência de produtos derivados do petróleo. O syngas pode ser obtido através de processos como a pirólise, a gaseificação do carvão e a gaseificação de RSU. (Gandía, et al., 2013)

O processo Fischer-Tropsch (FT) é uma reação química que utiliza um catalisador, normalmente ferro ou cobalto, para converter syngas — uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogénio (H₂) — em longas cadeias de hidrocarbonetos. Estes hidrocarbonetos podem ser refinados para produzir combustíveis sintéticos como gasolina, gasóleo e querosene, oferecendo alternativas mais sustentáveis aos combustíveis fósseis tradicionais. (Steynberg, 2004)

Além disso, através da catalisação do monóxido de carbono e do hidrogénio presentes no syngas, é possível produzir metanol. O metanol serve como combustível eficiente e de queima limpa, sendo amplamente utilizado no desporto motorizado de competição

devido ao seu alto rendimento energético e menor impacto ambiental. Adicionalmente, o metanol é um intermediário químico versátil, utilizado na produção de diversos produtos, incluindo plásticos, solventes, adesivos e até mesmo como componente em processos de síntese de outros combustíveis. O seu potencial para substituir a gasolina derivada de combustíveis fósseis contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a promoção de uma economia mais sustentável. (A. Vogt, et al., 2008)

Dado que o syngas contém uma proporção significativa de hidrogénio, este pode ser separado dos outros componentes gasosos da mistura para diversas aplicações. O hidrogénio é considerado um vetor energético promissor devido à sua capacidade de gerar energia de forma limpa e eficiente. Pode ser utilizado diretamente como combustível em motores de combustão interna modificados ou, de forma mais eficiente, em fuel cells para a produção de eletricidade, cuja única emissão é água. Esta característica torna o hidrogénio fundamental na transição para fontes de energia renováveis e na diminuição da dependência de combustíveis fósseis. (Gandía, et al., 2013)

A produção e utilização de syngas contribuem para uma gestão mais eficiente dos recursos e para a mitigação dos impactos ambientais associados à energia.

3.5. Transesterificação

A transesterificação é o processo químico mais utilizado para a produção de biodiesel a partir de óleos vegetais ou gordura animal, embora esta última seja menos comum. Este processo ocorre quando o óleo ou a gordura, cujo principal componente são os triglicerídeos, reage com um álcool – geralmente metanol ou etanol – na presença de um catalisador. A reação entre o álcool e os triglicerídeos resulta na formação de ésteres, que correspondem ao biodiesel, e de glicerol, que é um subproduto do processo. (Demirbas, 2009)

O glicerol pode ser facilmente separado do biodiesel devido à sua densidade, que é muito superior à do biodiesel, depositando-se assim no fundo do reservatório. Após a separação, o biodiesel – que pode ser ácido ou básico, dependendo do tipo de catalisador utilizado – está pronto para ser utilizado como substituto do diesel refinado a partir do petróleo. (Knothe, et al., 2015)

A transesterificação apresenta várias vantagens. É um processo relativamente simples e eficiente, com uma alta taxa de conversão de triglicerídeos em biodiesel. Por outro lado, existem também algumas desvantagens associadas ao processo. Por exemplo, a produção de biodiesel por transesterificação exige grandes quantidades de metanol, um produto derivado de combustíveis fósseis, o que pode comprometer a sustentabilidade do processo. Além disso, a purificação do biodiesel e a gestão do subproduto glicerol podem ser desafiadoras e aumentar os custos de produção. (Knothe, et al., 2015)

Existem diferentes tipos de catalisadores que podem ser utilizados no processo de transesterificação. Os catalisadores homogêneos, como o hidróxido de sódio ou potássio, são amplamente utilizados, mas apresentam a desvantagem de serem difíceis de separar após a reação, o que requer etapas adicionais de purificação. Uma alternativa em estudo são os catalisadores heterogêneos, como os óxidos metálicos, que podem ser facilmente separados do biodiesel, reduzindo a necessidade de purificação adicional. Existem também variações do processo de transesterificação, que podem oferecer vantagens específicas. Uma delas é a transesterificação supercrítica, que utiliza metanol ou etanol em condições de alta temperatura e pressão, sem a necessidade de catalisadores. Este método é capaz de processar, mas requer equipamentos mais sofisticados. (Demirbas, 2009)

Outra variação é a transesterificação enzimática, que utiliza enzimas como catalisadores. Esta abordagem oferece uma alternativa mais ecológica e seletiva, reduzindo a formação de subprodutos indesejados e operando em condições mais brandas. Embora seja uma tecnologia emergente, a transesterificação enzimática tem o potencial de se tornar uma solução viável para a produção de biodiesel. (Knothe, et al., 2015)

É importante mencionar que vários artigos sobre biodiesel apontam para a possibilidade de um aumento nas emissões de gases NO_x (óxidos de azoto) com a sua utilização. Contudo, como destacado na tese de doutoramento de Ventura Serrano (2012), esse aumento é mais notável em condições de operação exigentes, nas quais a elevação da temperatura de combustão resulta numa maior produção de NO_x.

Em condições de operação menos exigentes, o biodiesel apresenta diversas vantagens. O único ponto negativo significativo é o aumento da temperatura de combustão em situações mais exigentes. Por outro lado, o biodiesel oferece um melhor poder de lubrificação, não promove a carbonização dos componentes do motor, especialmente quando se utilizam óleos sintéticos, e, embora tenha uma densidade energética inferior, não necessariamente leva a um aumento do consumo de combustível. Isto sugere que o biodiesel pode melhorar a eficiência dos motores de combustão interna por compressão. (Ventura Serrano, 2012)

Outro desafio associado ao biodiesel é a sua maior viscosidade e densidade em comparação com o diesel convencional, o que pode causar problemas de fluidez em temperaturas muito baixas, como no inverno. No entanto, existem processos alternativos para melhorar essas características. Um exemplo é a microemulsão, que, embora não seja amplamente utilizada, consiste numa mistura de biodiesel com o álcool utilizado na transesterificação, o que ajuda a aumentar a fluidez do biodiesel. (Ventura Serrano, 2012)

4. Conclusão

É crucial encontrar novas soluções para obter energia de forma eficiente e sustentável. Por esse motivo, existe um esforço global na investigação, desenvolvimento e industrialização de novos processos de produção de energia renovável, cujas fontes primárias divergem entre o sol, o vento e a força das ondas do mar. No entanto, essas fontes de energia têm um ponto em comum: são imprevisíveis e incontroláveis.

A biomassa é uma fonte de energia que se apresenta em formas variadas e com densidades energéticas muito diferenciadas, o que torna difícil a contabilização precisa da quantidade de energia disponível. Contudo, através de uma cooperação eficaz entre a gestão de resíduos e a produção e aproveitamento de energia proveniente da biomassa, é possível reduzir significativamente a pegada ecológica associada ao consumo de energia e à gestão de resíduos.

Gerir os resíduos existentes de forma eficiente é um desafio, pois estes apresentam-se em diversas formas. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) têm uma rede de distribuição bem definida e pontos de recolha fixos, mas há inúmeros outros resíduos, como os florestais e agrícolas, que necessitam de ser geridos individualmente pelos proprietários dos terrenos, sendo de mais difícil acesso e gestão a nível global.

Os biocombustíveis não são produzidos apenas a partir de resíduos, abrangendo os três estados físicos da matéria. Por isso, é necessária uma gestão de recursos que tenha como objetivo satisfazer as necessidades nacionais e globais. Como mencionado, existem quatro gerações de biocombustíveis, e a diferença entre as três primeiras gerações reside principalmente na matéria-prima utilizada.

A primeira geração de biocombustíveis é a menos sustentável e, por essa razão, deve ser evitada. Esta geração compete diretamente com os recursos alimentares por terrenos férteis e por produtos que poderiam ser destinados à alimentação. A necessidade de cultivo acarreta gastos energéticos e a gestão de recursos essenciais, como a água, tornando esta geração de biocombustíveis inviável.

O foco desta dissertação são os biocombustíveis de segunda geração, que permitem reaproveitar energia considerada perdida, proveniente dos resíduos. A criação de um sistema simples que contabilize o contributo sustentável da matéria-prima é essencial para garantir a escolha dos métodos mais eficientes e, ao mesmo tempo, sustentáveis para a produção de biocombustíveis.

Portugal, sendo um país com uma vasta área marítima, não deve ignorar os biocombustíveis de terceira geração. Esta matéria-prima tem a vantagem de ser mais facilmente controlável do que os resíduos e é igualmente sustentável. Podem ser desenvolvidas famílias de algas que melhor atendam às exigências e necessidades do país e do mercado internacional.

A associação da quarta geração de biocombustíveis é crucial para aumentar a eficiência da produção de algas e dos processos de produção de biocombustíveis, através de melhorias genéticas na matéria-prima, nos microrganismos como as bactérias e as enzimas.

Ao analisar qual geração é a mais adequada, conclui-se que a primeira geração é inviável e insustentável. Contudo, as restantes podem ser utilizadas para mitigar as necessidades energéticas atuais. A quarta geração pode contribuir para um aumento significativo na produção de biocombustíveis de segunda e terceira geração.

Dado que existe uma vasta gama de matérias-primas com composições químicas complexas, é necessário dispor de uma ampla variedade de processos que permitam utilizar essas matérias-primas da forma mais eficiente possível, produzindo produtos de elevada qualidade para satisfazer as necessidades do mercado.

Por este motivo, é realizada uma análise concisa dos processos de produção de biocombustíveis mais relevantes. Cada matéria-prima requer pré-tratamentos e pós-tratamentos específicos, mas, conforme a matéria-prima disponível, é essencial escolher o melhor processo para maximizar o rendimento do produto, com o menor custo ambiental e financeiro possível.

À medida que avançamos para um futuro mais sustentável, é fundamental continuar a investir em investigação e inovação tecnológica para superar os desafios associados à produção de biocombustíveis. Isto inclui a otimização dos processos de produção, a redução dos custos e a mitigação dos impactos ambientais. Além disso, a integração dos biocombustíveis com outras fontes de energia renovável e o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o uso dessas fontes são cruciais para a transição energética global. A colaboração entre governos, indústrias e comunidades científicas desempenhará um papel central na criação de soluções que não apenas atendam às necessidades energéticas atuais, mas também contribuam para um planeta mais sustentável para as gerações futuras.

Assim, com a correta gestão de resíduos, a utilização de matérias-primas provenientes de fontes sustentáveis e o tratamento adequado dessas matérias-primas, é possível introduzir combustíveis sustentáveis, com baixo impacto ambiental, que substituam os combustíveis fósseis na base energética nacional e mundial.

Bibliografia

- (APA), A. P. (2020). *Estratégia Nacional para a Economia Circular*. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- (APA), A. P. (2020). *Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2020+)*. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- (APA), A. P. (2021). *Manual de Utilização do Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente (SILiAmb)*. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- (APA), A. P. (2023). *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2022*. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).
- (IEA), I. E. (2020). *World Energy Outlook 2020*.
- (IEA), I. E. (2021). *World Energy Outlook 2021*.
- (IRENA), I. R. (2020). *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020*.
- (IRENA), I. R. (2023). *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2023*. Abu Dhabi: IRENA.
- A. Alalwan, H., H. Alminshid, A., & A.S. Aljaafari, H. (28 de March de 2019). Renewable Energy Focus. *Promising evolution of biofuel generations. Subject review*, pp. 127-138.
- A. Vogt, K., J. Vogt, D., Patel-Weynand, T., Upadhye, R., Edlund, D., L. Edmonds, R., . . . G. Andreu, M. (30 de Junho de 2008). Renewable Energy. *Bio-methanol: How energy choices in the western United States can help mitigate global climate change*, pp. 233-241.
- Abdullah, B., Faua'ad Syed Muhammad, S. A., Shokravi, Z., Ismail, S., Anuar Kassim, K., Nik Mahmood, A., & A. Aziz, M. M. (25 de Fevereiro de 2019). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Fourth generation biofuels: A review on the risks and mitigation strategies*, pp. 37-49.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (04 de 2024). *APA - Agência Portuguesa do Ambiente, "Resíduos Urbanos"*. Obtido de APA - Agência Portuguesa do Ambiente / APAmbiente: <https://apambiente.pt/residuos/residuos-urbanos>
- Almutairi, A. (2015). *Production Of Biofuels From The Green Alga Tetraselmis*. Sheffield, UK: The University of Sheffield.
- Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. C. (2016). Production of biogas via anaerobic digestion. Em U. K. Esra, K. Stamatelatos, G. Antonopoulou, & G. C. Lyberatos, *Springer Handbook of Electrochemical Energy* (pp. 217-250). Woodhead Publishing.
- Assembleia da República. (2010). Decreto-Lei n.º 117/2010. *Diário da República*, 4782-4795.
- Assembleia da República. (2014). Decreto-Lei n.º 73/2014. *Diário da República*, 2400 - 2404.
- Belzunegui, P. (2018). *Biofuel chain in the Netherlands and its potential as an alternative for fossil fuels in the future*. Twente: University of Twente.
- BloombergNEF. (2021). *Electric Vehicle Outlook 2021*.
- Boyle, G. (1996). *Renewable Energy - Power for a Sustainable Future*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Brennan, L., & Owende, P. (9 de Outubro de 2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products*, pp. 557-577.

- Chan, Y. H., Yusup, S., Quitain, A. T., Uemura, Y., & Sasaki, M. (2014). Bio-oil production from oil palm biomass via subcritical and supercritical hydrothermal liquefaction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 407-412.
- Cheng, A. S., Upatnieks, A., & Mueller, C. J. (Julho de 2006). *Investigation of the impact of biodiesel fuelling on NOx emissions using an optical direct injection diesel engine*, pp. 297-318.
- Chisti, Y. (13 de Fevereiro de 2007). *Biotechnology Advances. Biodiesel from microalgae*, pp. 294-306.
- Clark, J., & Deswarte, F. (2014). *Introduction to Chemicals from Biomass*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Coelho, N. B., Meneguelo, A. P., & Chaves, G. L. (2022). Captura e armazenamento de carbono associados à recuperação avançada de óleo: uma revisão. *Latin American Journal Of Energy Research - Lajer*, 18-35.
- Commission, E. (2018). *Report on the sustainability of biofuels*. Brussels: European Commission. Brussels: European Commission.
- Commission, E. (Janeiro de 2020). *EU Science Hub*. Obtido de https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en
- Conselho da União Europeia. (1996). Diretiva 96/61/CE Do Conselho. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 26-40.
- Demirbas, A. (2008). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Turquia: Springer.
- Demirbas, A. (16 de Junho de 2009). *Energy Conversion and Management. Biofuels securing the planet's future energy needs*, pp. 2239-2249.
- Departamento de Estratégia e Análise da Agência Portuguesa do Ambiente. (2023). *Relatório do Estado do Ambiente 2022/2023*. Agência Portuguesa do Ambiente. eportugal. (30 de 03 de 2024). *Gestão de Resíduos*. Obtido de [eportugal.gov.pt: https://eportugal.gov.pt/cidadaos-europeus-viajar-viver-e-fazer-negocios-em-portugal/bens-e-mercadorias-em-portugal/gestao-de-residuos](https://eportugal.gov.pt/cidadaos-europeus-viajar-viver-e-fazer-negocios-em-portugal/bens-e-mercadorias-em-portugal/gestao-de-residuos)
- Europeia, C. (2020). *Diretivas da União Europeia: Como Funcionam e Como são Implementadas*. Comissão Europeia.
- Europeia, P. E. (s.d.). Diretiva 2008/28/CE Do Parlamento Europeu e do Conselho.
- Freitas, A. (22 de Novembro de 2019). *Sabe quantos carros existem no mundo atualmente? E em Portugal?*
- Gandía, L. M., Arzamendi, G., & Diéguez, P. M. (2013). *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Navarra: Elsevier.
- Gírio, F., Bogel-Lukasik, R., Matos, C., Oliveira, C., & Silva, L. (2013). II Workshop (Bio)Energia. *Biocombustíveis: Uma Oportunidade Ou Um Problema Para Portugal*, pp. 86-91.
- Gorren, R., & Catarina, R. (2009). *Biocombustíveis - Aspectos Sociais, E Económicos: Comparação Entre Brasil, Estados Unidos e Alemanha*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Hellier, P., & Ladommatos, N. (2015). *The influence of biodiesel composition on compression ignition combustion*. Londres: University College London.
- Hellier, P., Talibi, M., Eveleigh, A., & Ladommatos, N. (2016). *An overview of the effects of fuel*. Londres: Journal of Automobile Engineering.
- J. Malode, S., Keerthi Prabhu, K., J. Mascarenhas, R., & P. Shetti, N. (31 de Dezembro de 2020). *Energy Conversion and Management: X. Recent advances and viability in biofuel production*, pp. 1-15.

- Kazamia, E., & G. Smith, A. (2014). *Assessing the environmental sustainability of biofuels*. Cambridge: University of Cambridge.
- Kent Hoekman, S. (9 de Julho de 2008). Renewable Energy. *Biofuels in the U.S. - Challenges and Opportunities*, pp. 14-22.
- Knothe, G., Gerpen, J. V., & Krahl, J. (2015). *The Biodiesel Handbook*. Champaign, Illinois: AOCS PRESS.
- Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., & Xian, M. (10 de Julho de 2008). Renewable Energy. *Biodiesel production from oleaginous microorganisms*, pp. 1-5.
- Menon, V., & Rao, M. (17 de Março de 2012). Progress in Energy and Combustion Science. *Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals*, pp. 522-550.
- Milanez, A. Y., Mancuso, R. V., Godinho, R. D., & Poppe, M. K. (2017). Biocombustíveis. *O Acordo De Paris E A Transição Para O Setor De Transportes De Baixo Carbono: O Papel Da Plataforma Para O Biofuturo*, pp. 285-340.
- Mittelbach, M., & Remschmidt, C. (2006). *Biodiesel: The Comprehensive Handbook*. Darulaman Road, Kabul, Afghanistan: American University of Afghanistan.
- Naik, S., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (9 de Outubro de 2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, pp. 578-597.
- Nyko, D., Faria Garcia, J. L., Milanez, A. Y., & Dunham, F. B. (2010). *A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada*. BNDES.
- Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. (2008). Directiva 2008/98/CE Do Parlamento Europeu e Do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, 3-30.
- Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. (2009). Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, 16-62.
- Pereira, F. d., Bomtempo, J. V., & Alves, F. C. (21 de Janeiro de 2015). Programas de subvenção às atividades de pdi.: *Uma comparação em biocombustíveis no Brasil, EUA e Europa*, pp. 61-84.
- Processo de Produção de Biodiesel e Análise de Parâmetros de Qualidade*. (2014). Bragança: Instituto Politecnico de Bragança.
- Purushothaman, K., & Nagarajan, G. (30 de Junho de 2008). Renewable Energy. *Performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine operating on neat orange oil*, pp. 242-246.
- Resolução do Parlamento Europeu. (2021). Novo plano de ação para a economia circular. *Jornal Oficial da União Europeia*, 11-29.
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., & N. Vo, D.-V. (26 de Agosto de 2021). Bioresource Technology. *Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass*, pp. 1-11.
- Saravanan, N., & Nagarajan, G. (9 de Julho de 2008). Renewable Energy. *Performance and emission study in manifold hydrogen injection with diesel as an ignition source for different start of injection*, pp. 328-334.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A. F., Tokgoz, S., . . . Yu, T.-H. (29 de Fevereiro de 2008). Science. *Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change*, pp. 1238-1240.

- Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (5 de Dezembro de 2009). Bioresource Technology. *An overview of second generation biofuel technologies*, pp. 1570-1580.
- Soares, S. (2009). *Produção de bioetanol a partir de um resíduo orgânico proveniente da central de compostagem da LIPOR*. Porto: Instituto Politecnico do Porto.
- Sovacool, B. K. (2009). The cultural barriers to renewable energy and energy efficiency in the United States. *Technology in Society*, 365-373.
- Steynberg, A. (2004). Studies in Surface Science and Catalysis. *Chapter 1 - Introduction to Fischer-Tropsch Technology*, pp. 1-63.
- Teixeira, J. A. (Junho de 2009). Bioetanol. *Desenvolvimento De Processos Fermentativos Para A Produção De Bioetanol*, pp. 17-19.
- Unglert, M., Bockey, D., Bofinger, C., Buchholz, B., Fisch, G., Luther, R., . . . Krahl, J. (13 de Fevereiro de 2020). Fuel. *Action areas and the need for research in biofuels*;, pp. 1-18;.
- Ventura Serrano, L. M. (2012). *Análise Comparativa Do Desempenho De Motores De Combustão Interna Quando Utilizam Biocombustíveis*. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Vogel, H. C., & Todor, C. L. (2008). *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment*. Virginia, Estados Unidos da América: Elsevier Science.
- Wiffels, R. H., & Barbosa, M. J. (13 de Agosto de 2010). Scaling Up Alternative Energy. *An Outlook on Microalgal Biofuels*, pp. 796-799.
- Yentekakis, I. V., & Goula, G. (16 de Fevereiro de 2017). Biogas Management. *Advanced Utilization for Production of Renewable Energy and Added-value Chemicals*, pp. 1-18.