

Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel

Victória Huch Duarte¹, Marlon Heitor Kunst Valentini^{2*}, Gabriel Borges dos Santos³,
Willian Cezar Nadaletti⁴, Bruno Vieira⁵

¹Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

²Doutorando em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Brasil (*Autor correspondente: marlon.valentini@hotmail.com)

³Doutorando em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Brasil

⁴Professor Doutor, Universidade Federal de Pelotas, Brasil

⁵Professor Doutor, Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 16/05/2022 – Revisado em: 26/06/2022 – Aceito em: 25/07/2022

RESUMO

O domínio e consequente dependência global dos combustíveis fósseis como fonte de energia vem gerando preocupações diante dos elevados índices de poluição ambiental e sua característica não renovável. Fontes alternativas renováveis e promissoras de energia, como, por exemplo, o biodiesel, têm sido amplamente estudadas e discutidas na busca de um futuro mais sustentável. Este trabalho revisa as perspectivas de produção dos biocombustíveis, com foco particular no biodiesel. O presente estudo busca definições que esclarecem sobre os processos de produção de biodiesel, bem como relaciona estudos que demonstram as diferenças entre as matérias primas utilizadas na sua produção. Ainda, demonstra que os subprodutos do biodiesel podem ser utilizados como uma fonte potencial de energia tornando possível reaproveitar o que seria tratado como resíduo para produzir energia e reduzir os custos dos biocombustíveis. Conforme apresentado neste artigo de revisão, o biodiesel apresenta-se como uma possível solução de energia renovável e sustentável para a crescente demanda mundial por energia. Ainda, nesta revisão, foi possível analisar os benefícios e limitações de cada geração de biodiesel. Em relação aos biocombustíveis de primeira geração, entende-se que não são a melhor opção para substituir os combustíveis fósseis devido à competição com as necessidades alimentares. Em contraste, os biocombustíveis oriundos de resíduos e algas mostram-se escolhas mais promissoras porque não envolvem essa competição alimento-combustível.

Palavras-Chaves: Bioenergia, Transesterificação, Glicerol.

Biofuels: a review of the historical panorama, production and applications of biodiesel

ABSTRACT

The dominance and consequent global dependence on fossil fuels as a source of energy has generated concerns in the face of high levels of environmental pollution and its non-renewable characteristic. Renewable and promising alternative sources of energy, such as biodiesel, have been widely studied and discussed in the search for a more sustainable future. This work reviews the prospects for producing biofuels, with a particular focus on biodiesel. The present study seeks definitions that clarify the processes of biodiesel production, as well as lists studies that demonstrate the differences between the raw materials used in its production. Furthermore, it demonstrates that biodiesel by-products can be used as a potential source of energy, making it possible to reuse what would be treated as waste to produce energy and reduce the costs of biofuels. As presented in this review article, biodiesel presents itself as a possible renewable and sustainable energy solution for the growing world demand for energy. Still, in this review, it was possible to analyze the benefits and limitations of each generation of biodiesel. Regarding first generation biofuels, it is understood that they are not the best option to replace fossil fuels due to competition with food needs. In contrast, biofuels from waste and algae are more promising choices because they do not involve this food-fuel competition.

Keywords: Bioenergy, Transesterification, Glycerol.

Duarte, V., Valentini, M.H., Santos, G.B., Nadaletti, W., Vieira, B. (2022). Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.4, n.2, p.50-68.



1. Introdução

O crescente aumento dos níveis de poluição ambiental gerado pelas emissões veiculares vem causando uma séria preocupação em relação ao aquecimento global, além disso o consumo excessivo para a produção de energia acaba aumentando a ameaça de um possível esgotamento dos combustíveis fósseis (Kiwjaroun et al. 2009). Neste contexto, surgem os biocombustíveis como uma opção promissora para a produção de energia sustentável, auxiliando também na redução de forma significativa da emissão de gases que contribuem para o agravamento do efeito estufa (González-González et al., 2018).

A produção de biocombustíveis ocorre a partir de fontes renováveis como a biomassa (Cheng & Timilsina, 2011) e podem ser utilizados para complementar ou substituir os combustíveis fósseis (Kokorin et al., 2015). Apesar da queima de biocombustíveis liberar dióxido de carbono (CO₂), o biocombustível é considerado neutro em carbono, pois todo carbono emitido na combustão do biocombustível é consumido pelas plantas (Subramaniam & Masron, 2020).

Dentre os biocombustíveis, o biodiesel é o que mais vem se destacando como substituto ao óleo diesel utilizado no setor de transportes (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2018). Além disso, ele vem se mostrando um dos biocombustíveis mais promissores, apresentando benefícios como biodegradabilidade, sustentabilidade e baixa emissão de poluentes e GEE (Syafiuddin et al., 2020). Implementado no Brasil em 2004, atualmente o biodiesel conta com um percentual mínimo no diesel de 13% (B13), sendo que, de acordo com o cronograma estabelecido, o teor mínimo será estendido 1% a cada ano, até atingir o percentual de 15% em 2023 (ANP, 2021a).

Atualmente, o tipo de matéria-prima utilizada para a produção de biodiesel é um tema que vem sendo foco de discussões. Segundo Bhuiya et al. (2020), ocorre um aumento no preço global dos alimentos quando a produção de biocombustíveis utiliza matérias-primas advindas da produção de alimentos, pois acaba reduzindo a quantidade para alimentação humana. Devem, portanto, ser utilizadas matérias-primas que não gerem concorrência com a produção de alimentos e que proporcionem um valor competitivo para o biodiesel, tornando-o economicamente viável (Cardoso, 2017). Sendo assim, a utilização de matérias primas alternativas, como óleos residuais, resíduos sólidos, biomassa lignocelulósica (Somerville et al., 2010) e algas (Chia et al., 2018) são promissoras na produção de biocombustíveis. O biocombustível de quarta geração, ou seja, tecnologia de biologia sintética, também vem sendo foco de estudos, porém as pesquisas ainda estão no estágio inicial (Singh et al. 2019).

Tendo em vista que as fontes de combustíveis renováveis estão ganhando destaque e se mostrando possíveis substitutas aos combustíveis fósseis, é primordial que a implementação destas no mercado seja mais competitiva. No que concerne ao biodiesel, uma alternativa é utilizar os coprodutos de sua produção como fontes potenciais de energia. Desta forma é possível reaproveitar o que seria tratado como resíduo para produzir energia e reduzir os custos dos biocombustíveis (Veroneze et al., 2019).

O contexto atual do biodiesel retrata um mercado em expansão, mas desprovido de pesquisas e desenvolvimento. Logo, estudos de revisão colaboram para um maior conhecimento na área de energias limpas. Sendo assim, o objetivo desse estudo é realizar uma ampla revisão afim de trazer de forma conjunta as informações mais relevantes provenientes de outras pesquisas ligadas as áreas de bioenergia, com foco em biodiesel. Ainda, essa revisão tem o intuito de descrever, analisar e relacionar estudos sobre biodiesel, esclarecendo as principais definições e processos acerca da utilização deste biocombustível alternativo aos combustíveis fósseis.

2. Material e Métodos

O presente trabalho foi elaborado por meio de uma revisão na literatura, ou seja, é um trabalho baseado em uma pesquisa exploratória onde se extraiu dados nacionais e internacionais de pesquisas na área de

bioenergias com o foco em biodiesel. Para tanto, foram empregados os bancos de dados ScienceDirect e Google Acadêmico, bem como sites de órgãos referentes à área energética, tais como: Agência Internacional de Energia (IEA), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Balanço Energético Nacional (BEN), Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE), Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS), Empresa de pesquisa energética (EPE) e Ministério de Minas e Energia (MME).

A pesquisa realizada, ou seja, o levantamento de informações aconteceu durante os meses de janeiro a junho de 2021. Utilizaram-se os descritores (palavras-chaves) na língua portuguesa “bioenergia”, “produção do biodiesel” e “aplicação do biodiesel” e equivalentes na língua inglesa (“bioenergy”, “biodiesel production” e “application of biodiesel”).

Os critérios de elegibilidade utilizados na inclusão dos trabalhos para a revisão foram: priorização de estudos e dados de referências publicadas a partir de 2010, documentos escritos tanto nas línguas portuguesa quanto inglesa, artigos indexados e originais, publicações em revistas científicas, trabalhos acadêmicos e sites da área. Os critérios de exclusão foram os documentos que não atenderam aos critérios de elegibilidade mencionados anteriormente, como por exemplo, referências anteriores ao ano de 2010. Pós-seleção do material escolhido, que foi, 56 artigos, 3 trabalhos acadêmicos e 7 sites da área, estudou-se os mesmos no intuito de conceber este trabalho.

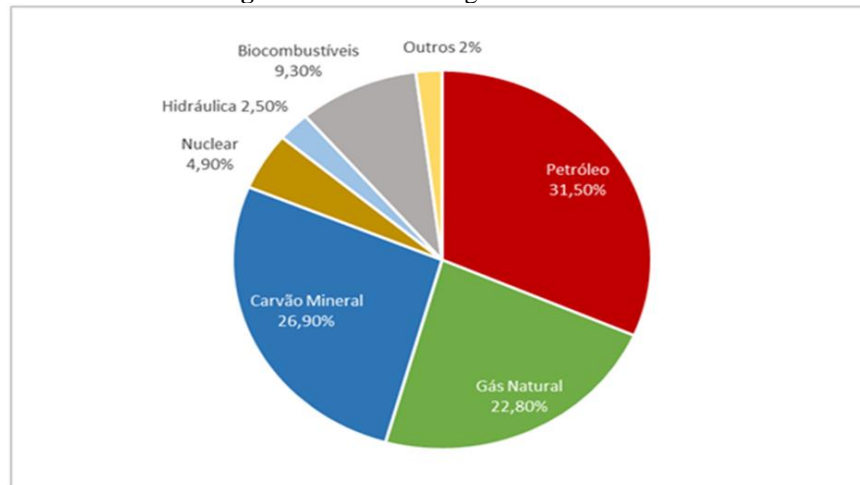
3. Desenvolvimento

3.1 Matriz energética mundial e brasileira

A utilização e fornecimento de energia é um indicador primordial referente ao desenvolvimento e crescimento econômico de um país, utilizado para diversas finalidades dentro do setor industrial, comercial, doméstico e outros. Além disso, a energia também se tornou um fator responsável pelo bem-estar e qualidade de vida da população (Da Paixão & De Miranda, 2018).

De acordo com Mantovani et al. (2017), a energia pode ser oriunda de fontes renováveis ou não renováveis. As fontes de energia não renováveis são consideradas limitadas e esgotáveis pois a sua regeneração na natureza demanda muito tempo. Dentre as fontes não renováveis encontram-se os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e a energia nuclear (fissão). Já as fontes de energia renováveis não são esgotáveis e se apresentam disponíveis na natureza por um longo período. Dentre as fontes renováveis encontram-se a radiação do sol (energia solar), os ventos (energia eólica), a água (energia hídrica) e a biomassa (energia da matéria orgânica), entre outras (Mantovani et al., 2017).

Conforme é possível observar na Figura 1, o consumo global de energia ainda é baseado em fontes de energia não renováveis, fornecendo aproximadamente 86,1% das necessidades energéticas totais globais em 2018 quando somados os percentuais referentes ao petróleo, gás natural, carvão e nuclear (IEA, 2021).

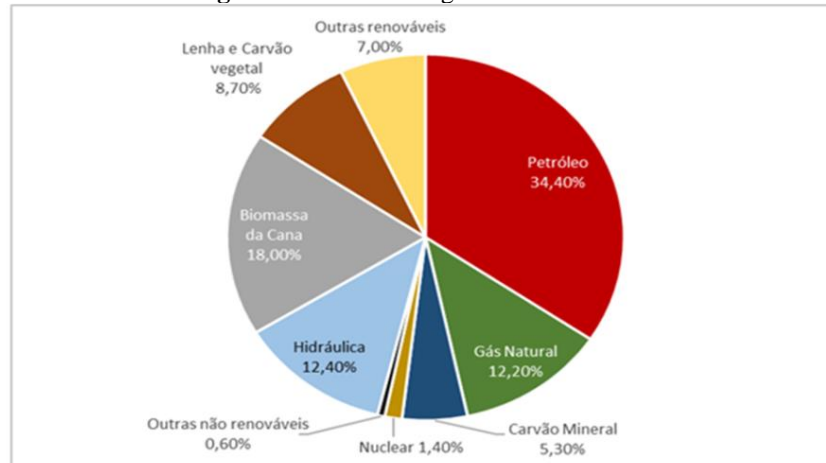
Figura 1 – Matriz energética mundial em 2018.

Fonte: Autoria Própria.

Segundo Axon e Darton (2021), a energia produzida a partir dos combustíveis fósseis que apresentavam preços acessíveis acabou por facilitar o vasto crescimento da sociedade e proporcionar uma melhoria dos padrões de vida no último século, tornando mais difícil a sua substituição. Porém, o domínio e consequente dependência global dos combustíveis fósseis como fonte de energia vem gerando preocupações frente aos altos índices de poluição ambiental e sua característica não renovável, ou seja, esgotável (EPE, 2017).

Segundo González (2018), essa dependência por combustíveis fósseis, em especial o petróleo, pode vir a causar uma possível escassez desses recursos ainda neste século, diminuindo o consumo e induzindo uma mudança na matriz energética mundial. O Brasil, por exemplo, encontra-se na sétima posição em relação ao uso de petróleo no mundo, com um aumento de 1% em comparação ao ano anterior, totalizando um consumo médio de 3,1 milhões de barris/dia de petróleo (ANP, 2019a).

A Figura 2, por sua vez, apresenta a matriz energética brasileira referente ao ano de 2019, cujo gráfico evidencia a predominância do petróleo e biocombustíveis como principais fontes energéticas. Ao comparar a matriz energética nacional com a matriz energética mundial (Figura 1), é possível observar que 46,1% da energia produzida no Brasil é oriunda de fontes renováveis no ano de 2019, quando somados os percentuais referentes à geração hidráulica, biocombustíveis, solar, eólica e outras fontes renováveis, enquanto no panorama mundial somente 13,8% são advindas de energias renováveis. Dessa forma, o Brasil é responsável por emitir uma quantidade menor de GEE em comparação com os demais países do mundo (EPE, 2020).

Figura 2 – Matriz energética brasileira em 2019.

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com o estudo de Aboagye et al. (2021), tendo em vista as desvantagens oriundas da utilização de combustíveis fósseis citadas anteriormente, as fontes de energias renováveis têm ganhado cada vez mais espaço na matriz energética mundial. Além disso, para incentivar a implementação dessas fontes limpas, políticas e planos de energia renovável com metas obrigatórias vem sendo inseridas em diversos países, proporcionando o crescimento desse setor. Segundo Li et al. (2020), além do Brasil possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, foi um dos primórdios a iniciar a utilização de combustíveis oriundos da biomassa como fonte de energia, se tornando o maior produtor e consumidor de biomassa.

De acordo com a revisão de Li et al. (2020) os recursos hidrelétricos no Brasil são muito abundantes, proporcionando que o país apresente o terceiro maior potencial hidráulico do mundo. Ainda, em 2017, o país apresentou um crescente potencial eólico, ocupando o oitavo lugar no mundo em capacidade instalada de produção de energia eólica. No entanto, segundo Lopes et al. (2019), essa dependência pelos recursos hídricos pode ser prejudicial quando há ausência de períodos chuvosos ou outros problemas interligados, tornando necessário um foco maior em estudos e pesquisas relacionados a utilização da biomassa para produção de energia. Ainda, de acordo com Carvalho (2014), os biocombustíveis podem ser promissores substitutos das atuais formas de energias mais utilizadas, especialmente no transporte e na produção de energia elétrica.

3.2 Biocombustíveis

A produção de energia oriunda de biocombustíveis na maioria dos países do mundo é movida basicamente pela busca de energias alternativas que proporcionem uma segurança energética, pelo desenvolvimento do setor agrícola e pela geração de empregos, dependendo das necessidades de cada país. De acordo com a ANP (2020a), os biocombustíveis podem ser definidos como “derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia”.

Atualmente, as políticas e planos governamentais que incentivam redução dos Gases do Efeito Estufa (GEE) ganharam um enfoque que propiciou a ampliação do desenvolvimento dos biocombustíveis. Segundo Ebadian et al. (2020), países relevantes na produção de biocombustíveis como os EUA, Brasil, China e Índia prezam principalmente pela busca da segurança energética e o desenvolvimento do setor agrícola. Já países membros da União Europeia e o Canadá não apresentam como foco o desenvolvimento rural, mas sim as

questões ambientais. Para países que possuem indisponibilidade de matérias primas, como o Japão, a redução de impactos ambientais tem sido o fator que impulsiona os investimentos em combustíveis limpos.

A bioenergia apresenta atualmente participação em cerca de 1/10 do suprimento mundial de energia primária (IEA, 2020). Segundo o relatório de combustível disponibilizado em outubro de 2019 pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção global de biocombustíveis bateu o recorde de 154 bilhões de litros em 2018. As previsões são que a produção de biocombustíveis cresça 25% até o ano de 2024 tendo em vista os destaques dos mercados do Brasil, EUA e principalmente a China. Ainda, segundo as previsões os EUA e o Brasil serão responsáveis por 2/3 das participações mundiais na produção de biocombustíveis em 2024 (IEA, 2019).

Historicamente destacam-se três marcos na inserção dos biocombustíveis no Brasil: primeiramente em 1975 foi lançado o Programa Nacional do Alcool, o PROALCOOL, décadas depois, em 2003, foi implementada a tecnologia flex-fuel e logo após, em 2005, foi introduzido o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) (EPE, 2017). Ainda de acordo com a mesma nota, o país encontrou nos biocombustíveis uma alternativa positiva para redução das emissões dos GEE. Recentemente, com o intuito de expandir a produção e consumo de biocombustíveis no Brasil, em dezembro de 2016 foi lançada a RenovaBio (Política Nacional de Biocombustíveis), pelo Ministério de Minas e Energia. O programa tem como objetivo principal o estabelecimento de metas visando a descarbonização, através do incentivo para a expansão dos biocombustíveis na matriz energética nacional (ANP, 2021b).

Segundo o Relatório Síntese disponibilizado pelo BEN (2020), o setor de transportes apresentou um aumento no consumo de 2,67 milhões de tep (tonelada equivalente de petróleo) em 2019, ampliação decorrente do crescimento no consumo de biocombustíveis no Brasil. O etanol, por exemplo, foi responsável por 7% do consumo de toda a energia no país, enquanto o seu subproduto, o bagaço da cana, foi responsável por aproximadamente 10,9%.

Segundo Vidal (2020), o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol (29,5%), somente atrás dos Estados Unidos que é hoje o maior produtor global (54,3%). Ainda, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a produção de etanol no Brasil alcançou a marca de 35,6 bilhões de litros na safra de 2019/2020, registrando um novo recorde histórico na produção do biocombustível.

Segundo Avinash et al. 2018, o alto custo para produção dos biocombustíveis é um dos principais empecilhos para a ampliação do consumo de energias limpas em países subdesenvolvidos. De uma forma geral, a falta de infraestrutura, tecnologias de conversão ineficazes e indisponibilidade de matérias primas são responsáveis pela elevação do custo de produção dos biocombustíveis em países em desenvolvimento, tornando essa fonte de bioenergia mais cara e menos atrativa em relação aos combustíveis fósseis.

3.3 Biodiesel

O Biodiesel pode ser definido, de acordo com a ANP (2020b), como um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação. Ainda, por meio do processo de transesterificação, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, gerando dois produtos: o éster e a glicerina, sendo que o primeiro somente pode ser comercializado como biodiesel, após passar por processos de purificação (ANP 2020b).

Os primeiros relatos do uso de óleo vegetal como biocombustível em motores a diesel surgiram durante uma feira internacional de Paris em meados de 1900, quando o alemão Rudolf Christian Karl Diesel demonstrou a utilização de óleo de amendoim como combustível no funcionamento de um motor a diesel. Durante a primeira e segunda guerra mundial, motivados pela escassez do petróleo a nível mundial, muitos países utilizaram óleos e gorduras, de fontes vegetais ou animais, como fonte de combustível. Porém, somente 30 anos após o final da Segunda Guerra, com a crise do Petróleo em meados de 1970, que foram retomadas as

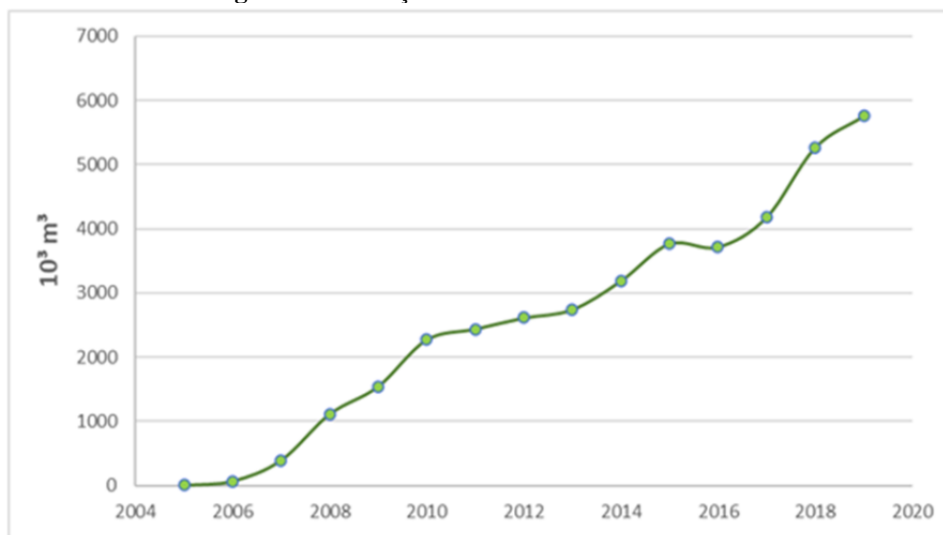
pesquisas e investimentos em biodiesel tendo em vista a necessidade de fontes alternativas de energia (Pinho & Soarez, 2017).

No Brasil, os primeiros relatos de estudos para utilização de biodiesel ocorreram em meados de 1920, após a primeira guerra mundial. Com a crise do petróleo, em 1975, o governo federal criou o programa Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pró-Óleo), cujo objetivo previa a adição de 30% de óleo vegetal ao óleo diesel, mas esse programa foi abandonado em 1986 devido à queda nos preços do petróleo (BIODIESELBR, 2014). Em 2002, o governo federal retornou à atenção para a utilização de biodiesel como combustível alternativo na matriz energética e lançou o Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel (Probiodiesel) pela Portaria MCT N° 702, de 30 de outubro de 2002. No ano seguinte, em 2003, com o intuito de promover a inclusão social na produção de biodiesel, elaborou-se um novo relatório que proporcionou a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), com seu lançamento oficial em 06 de dezembro de 2004, sendo o biodiesel inserido na matriz energética brasileira através da Lei Federal N° 11.097 de 13 de janeiro de 2005, regulamentado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Ramos et al., 2017).

Segundo a ANP, o acréscimo de 2% de biodiesel ao diesel fóssil, entre 2005 e 2007, poderia ser voluntário, porém em janeiro de 2008 entrou em vigor de forma obrigatória a mistura de 2% (B2) em todo Brasil. Esse percentual foi continuamente ampliado ao longo dos anos: 3% (julho/2008), 4% (julho/2009), 5% (janeiro/2010), 6% (agosto/2014), 7% (novembro/2014), 8% (março/2017), 10% (março/2018), 11% (março/2019), 12% (março/2020), chegando atualmente a 13% (março/2021). De acordo com o cronograma estabelecido pela Resolução CNPE n° 16, de 29 de outubro de 2018, o percentual mínimo de biodiesel no diesel fóssil deve aumentar 1% a cada ano, até atingir 15% (B15) em março/2023 (ANP, 2021a).

De acordo com dados divulgados pelo Relatório de Gestão da ANP (2020c), com base de dados 2019, a produção de biodiesel no país saltou de 736 m³ em 2005 para 5,9 milhões m³ em 2019. A Figura 3 demonstra a evolução do consumo de biodiesel no Brasil favorecido pelos sucessivos aumentos nos percentuais obrigatórios deste biocombustível ao longo dos anos.

Figura 3 – Evolução do consumo de Biodiesel no Brasil

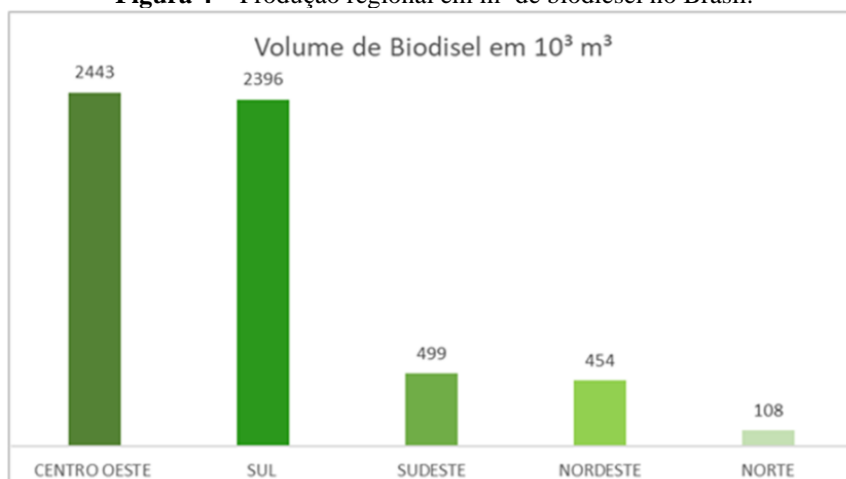


Fonte: Autoria Própria.

Já na Figura 4 é possível observar que tratando-se de produção regional, as regiões Sul e Centro Oeste são responsáveis pela maior participação na produção do biodiesel nacional e somadas foram responsáveis por

82% de toda a produção em 2019, correspondendo a cerca de 4,8 milhões de m³, enquanto as regiões Sudeste, Nordeste e Norte juntas correspondem apenas a 18% da produção (ANP, 2021c).

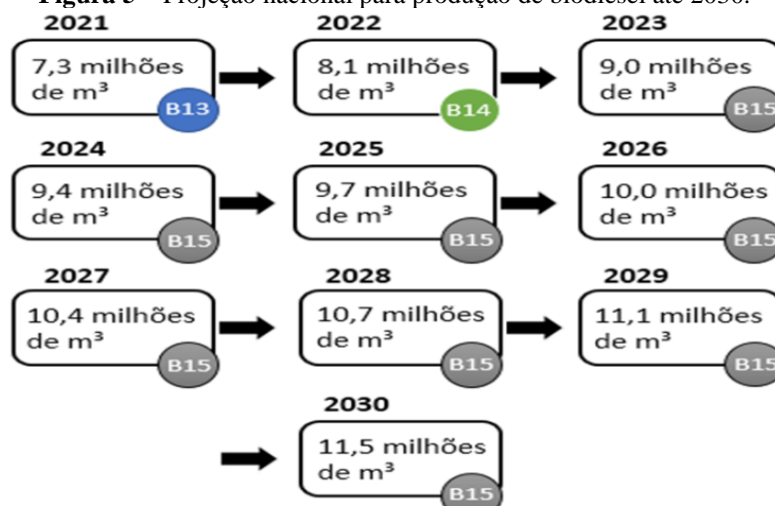
Figura 4 – Produção regional em m³ de biodiesel no Brasil.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com as projeções do Plano decenal de expansão de energia 2030 divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2021), espera-se que a capacidade efetiva nacional de produção de biodiesel alcance 11,5 milhões de m³ para o ano de 2030. Tendo em vista que o setor de biodiesel, desde o início do PNPB, vem atendendo as projeções propostas de forma folgada em relação às datas previstas, espera-se que nos próximos anos sejam implementadas novas tecnologias e investimentos que atendam a demanda prevista. Conforme o cronograma estabelecido, com o aumento de 12% para 13% em março de 2021, espera-se o equivalente a 7,3 milhões de m³ para o ano. Já para 2022, com o aumento de 13% para 14% a produção esperada será de 8,1 milhões de m³, progredindo ano a ano até chegar em 11,5 milhões de m³ em 2030 com 15% de biodiesel no diesel (Figura 5).

Figura 5 – Projeção nacional para produção de biodiesel até 2030.



Fonte: Autoria Própria.

3.3.1 Transesterificação

Dentre os métodos aplicados para a obtenção de biodiesel o mais comumente utilizado é a reação de transesterificação. Apesar dos avanços científicos nas últimas décadas quanto aos processos de produção desse biocombustível, a transesterificação segue sendo o mais utilizado por ser um dos mais econômicos ao mesmo tempo que proporciona altos rendimentos (ONG et al. 2020).

A transesterificação consiste em uma reação química na qual os óleos ou gorduras reagem com álcool (geralmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador e como resultado da reação obtém-se ésteres e glicerol (Kumar et al., 2020). A transesterificação em meio alcalino homogêneo é a técnica mais aplicada na indústria para produção do biodiesel, sendo que este método consiste na reação de uma molécula de triacilglicerol com três moléculas de um álcool de cadeia curta para resultar em três moléculas de ésteres e uma molécula de glicerol (Ferreira, 2016).

Os principais fatores que influenciam na eficiência da reação de transesterificação são a temperatura durante a reação, a proporção de álcool: óleo, o tempo reacional, tipo e concentração de catalisador utilizado, teor de ácido graxo livre e teor de água no óleo (ONG et al. 2020). O álcool mais utilizado para produção de biodiesel é o metanol tendo em vista que este apresenta um custo menor quando comparado ao etanol (Ramos et al., 2017).

Com o objetivo de acelerar a taxa de conversão, a transesterificação é realizada na presença de catalisadores básicos, ácidos ou enzimáticos (Mamtani et al., 2021). Devido à elevada taxa de reação proporcionada pela utilização do catalisador homogêneo básico, este é o mais utilizado para a produção de biodiesel.

Ainda, segundo Kumar et al. (2017), quando comparada à catálise ácida, a reação catalisada por base ocorre mais rápido, proporcionando a realização do processo em menor tempo. Dentre os catalisadores básicos mais comuns encontram-se o hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, metóxido de sódio e metóxido de potássio. Porém, a utilização do catalisador básico pode formar sabão na presença de elevadas porcentagens de ácidos graxos livres e água existente em matérias-primas de baixa qualidade, tornando necessário um pré-tratamento da matéria prima (Mohiddin et al., 2021). Já os catalisadores ácidos e enzimáticos poderiam ser usados nestas matérias-primas sem ocorrer formação de sabão, no entanto a taxa de reação é bem mais lenta e consequentemente o rendimento inferior (Hassan et al., 2020).

O glicerol, subproduto obtido a partir da síntese do biodiesel, conhecido como glicerina bruta é um coproduto do processo que corresponde a aproximadamente 10% do biocombustível gerado. Em 2019, estima-se que tenham sido produzidas no Brasil cerca de 0,5 milhão de toneladas de glicerina e sua exportação total foi de 283 mil toneladas (MME, 2020).

Dependendo da matéria-prima utilizada, da eficiência do processo catalítico e das etapas de preparação e purificação do biocombustível, as impurezas presentes na glicerina pura podem variar de 20% a 60% (Schwengber et al. 2016). Portanto, o descarte do glicerol bruto oriundo da reação de transesterificação se torna uma das preocupações ambientais ligadas à síntese de biodiesel, tendo em vista que o teor de metanol o torna um resíduo perigoso (Pradima et al. 2017).

Este coproduto da síntese de biodiesel apresenta inúmeras aplicações industriais, como, por exemplo, matéria-prima para produtos farmacêuticos, cosméticos e alimentícios, sendo as possibilidades de uso limitadas pelo grau de pureza (Monteiro et al. 2018). Muitas usinas vêm instalando equipamentos para purificação da glicerina bruta visto que a glicerina refinada apresenta melhores preços no mercado internacional (MME, 2020), porém esse processo é de alto custo e economicamente inviável para pequenos e médios produtores (Nunpilai et al. 2021).

Ainda, a quantidade de glicerina bruta não é totalmente absorvida pelo mercado e os produtores de biodiesel precisam descartá-la. Portanto, se faz necessário a investigação de novas alternativas que

transformem o glicerol em produtos de alto valor econômico agregado, minimizando assim problemas ambientais futuros oriundos do descarte e acumulação deste coproduto da produção do biodiesel (Peiter et al. 2016).

Diversos estudos têm demonstrado formas de utilização do glicerol bruto excedente como matéria prima barata, renovável e capaz de gerar energia limpa, melhorando a sustentabilidade da síntese de biodiesel. Por exemplo, Pradima e Archana (2017) relataram que a glicerina bruta representa um ótimo substrato para o crescimento de microrganismos. Ainda, Vivek et al. (2017) trazem uma abordagem sobre a utilização de glicerol bruto na produção de produtos químicos de valor agregado e discorrem tendências atuais, desafios, perspectivas futuras, abordagens metabólicas e as ferramentas genéticas desenvolvidas para a síntese aprimorada de microrganismos. Já He, Mcnutt e Yang (2017) revisaram uma série de aplicações do glicerol bruto na geração de energia renovável por meio de processos como fermentação para produção de álcool, hidrogênio e outros produtos por meio de bactérias e/ou leveduras, co-digestão para produção de biogás, gaseificação para a produção de gás de síntese, pirólise e liquefação para a produção de bioóleo, reforma a vapor para geração de hidrogênio, entre outros.

3.3.2 Matérias primas para produção de biodiesel

De acordo com Tayari et al. (2020), as matérias primas utilizadas na produção de biodiesel podem ser classificadas como de primeira, segunda e terceira geração. As matérias primas derivadas de óleos comestíveis são denominadas de primeira geração, já os óleos não comestíveis e os resíduos são denominados de segunda geração e os óleos oriundos de algas, especificamente microalgas, são denominados de terceira geração de biodiesel (Mofijur et al. 2020). A Tabela 1 a seguir apresenta algumas das matérias primas utilizadas em diferentes gerações de produção de biodiesel (ANP, 2019b; Anwar, 2021; Sakthivel et al., 2018).

Tabela 1 – Matérias-primas utilizadas em diferentes gerações de produção de biodiesel.

Óleos comestíveis (1ª geração)	Óleos não comestíveis e resíduos (2ª geração)	Outras fontes (3ª geração)
Óleo de soja	Óleo de Pongamia	Algas <i>Dunaliella salina</i>
Óleo de girassol	Óleo de pinhão manso	Algas <i>Chlorella vulgaris</i>
Óleo de palma/dendê	Óleo de mamona	<i>Botryococcus braunii</i>
Óleo de colza/canola	Óleo de fritura	
Óleo de algodão	Óleo de peixe	
Óleo de milho	Gordura de porco	
Óleo de amendoim	Gordura de frango	
Óleo de coco	Sebo bovino	

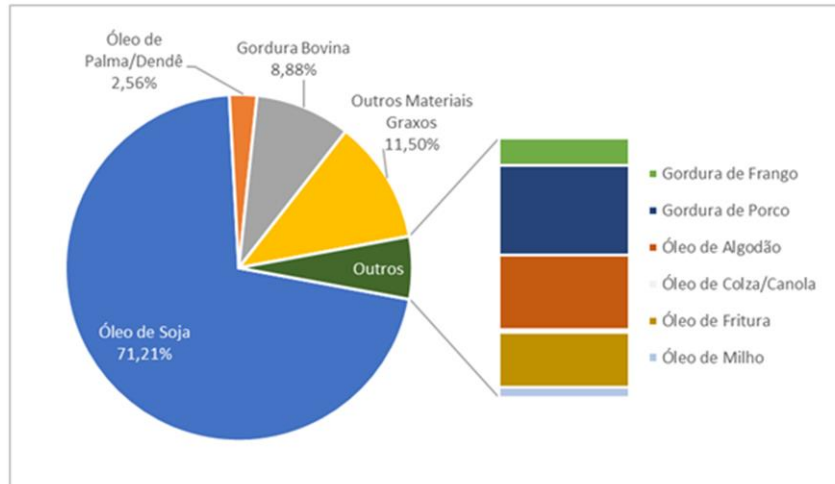
Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, a produção de biodiesel ao redor do mundo é feita a partir de diversas matérias primas. De acordo com Anwar (2021), em 2019, o óleo de soja continuou sendo a matéria prima mais utilizada para a produção de biodiesel e é acompanhada por óleo de palma, óleo de milho, óleo de cozinha residual, óleo de girassol, óleo de colza, óleo de *Jatropha*, óleo de coco, óleo de farelo de arroz, óleo de amendoim, óleo de semente de algodão, sebo, óleo de mostarda, entre outros.

Segundo dados fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo e Gás natural (ANP, 2021c), em 2020 o Brasil contou com um volume de 4.621.448 m³ de óleo de soja utilizado como matéria prima para produção de biodiesel, seguido por 576.177 m³ correspondentes ao biodiesel oriundo de gordura bovina, 166.182 m³

provenientes de óleo de palma/dendê, 1.412 m³ óleo de girassol, 746.395 de outros materiais graxos e 377.858 m³ de outras fontes. Sendo assim, o óleo de soja representou 71,21% da matéria prima utilizada na produção, seguido por 8,88% de gordura bovina, 2,56% de óleo de palma/dendê, 0,02% óleo de girassol, 11,5% outros materiais graxos e 5,82% de outras fontes, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Matérias-primas mais utilizadas na produção de Biodiesel no Brasil (2020).



Fonte: Autoria Própria.

Assim como no Brasil, o óleo de soja é largamente usado nos Estados Unidos como matéria prima para a produção de biodiesel. Paralelo a isso, países europeus como a Finlândia, Reino Unido, Alemanha e Itália comumente utilizam o óleo de colza. No Canadá, o óleo de canola é a principal matéria-prima. Já nos países asiáticos como a Malásia e a Indonésia, o óleo de palma e o óleo de coco são as principais fontes dessa produção. Ainda, na Índia, matérias primas de segunda geração como óleo de pinhão manso e óleo de Pongamia são usados para produzir biodiesel (Sakthivel et al., 2018).

3.3.3 Biodiesel de primeira, segunda, terceira e quarta geração

Atualmente, mais de 95% da matéria-prima utilizada na produção de biodiesel é considerada de primeira geração e são, na sua maioria, oriundas de plantações de sementes oleaginosas comestíveis (Martínez et al., 2019). O óleo advindo dessas matérias primas não é utilizado somente para a produção de biodiesel, mas também para consumo humano (Boutesteijn et al., 2017). Sendo assim, embora as matérias-primas de primeira geração possuam vantagens, como a disponibilidade de culturas e de processos relativamente simples para produção de biodiesel, a principal desvantagem dessa matéria-prima é a ameaça de escassez de alimentos, o que pode levar a um aumento dos seus preços (Puricelli, 2020).

Além disso, a produção de biodiesel oriundo de matérias primas de primeira geração (óleos comestíveis) pode causar impactos negativos ao meio ambiente e vida selvagem em algumas regiões. Amplas extensões de terra são necessárias para suprir a demanda mundial de biodiesel de primeira geração e isso vem gerando desequilíbrios ecológicos tendo em vista que muitos países desmatam florestas para fins de plantio (Ahmad, 2011). Ainda, Mofijur et al. (2020) salienta que a busca por outras fontes que não compitam com a produção de alimentos deve ser incentivada, pois, apesar do biodiesel de primeira geração contribuir na produção de biocombustível, a sua produção pode vir a esgotar recursos alimentícios essenciais para o consumo humano.

Com a intenção de minimizar as desvantagens oriundas do biodiesel de primeira geração, o biodiesel de segunda geração vem sendo pesquisado utilizando-se matérias primas advindas de óleos não comestíveis. Resíduos de óleo de cozinha, óleo de jatropha, óleo de pongamia, óleo de semente de algodão, sebo, dentre outros, são exemplos de algumas das matérias primas comuns na produção de biodiesel de segunda geração (Anwar, 2021). Segundo Mofijur et al. (2020), a utilização dessas fontes não comestíveis pode colocar fim ao debate “alimento versus combustível”, tendo em vista que basicamente elimina nossa dependência por culturas alimentares na produção de biodiesel. Além disso, o biocombustível de segunda geração vem despertando interesse mundial visto que libera para a atmosfera uma quantidade menor de dióxido de carbono, se mostrando mais ecologicamente correto em comparação com as matérias-primas utilizadas para o biodiesel de primeira geração (Vidal, 2019).

Ainda, o custo da matéria prima é um parâmetro responsável por praticamente todo o custo da produção do biodiesel. Por esse motivo, os óleos não comestíveis de segunda geração são considerados uma fonte alternativa sustentável promissora, devido ao seu baixo custo de matéria-prima em comparação com os óleos comestíveis de primeira geração (Bhuiya et al., 2020).

Não obstante, é possível atingir uma maior vantagem econômica utilizando fontes residuais, como gorduras e óleos que seriam descartados. O óleo de fritura, por exemplo, é uma matéria prima barata na maioria dos países do mundo e de interesse cada vez maior, mostrando-se como uma alternativa promissora em relação ao óleo vegetal (Bhuiya et al., 2016). Segundo Zhao et al. (2021), a utilização do óleo de cozinha residual resulta em inúmeras vantagens, pois não só traz benefícios para a segurança energética, como também proporciona uma economia circular, não ameaça a escassez de alimentos e contribui positivamente de forma a reduzir a poluição ambiental decorrente do descarte incorreto desse óleo. Uma alternativa, segundo Foroutan et al. (2021), é a utilização de gorduras comestíveis, como gordura bovina, gordura suína entre outras, sendo que essas matérias primas tornam a produção do biodiesel mais econômica, visto que é oriundo de uma matéria prima desprovida de valor.

Conforme visto anteriormente, as matérias primas de primeira geração vêm se mostrando problemáticas tendo em vista o debate “alimento versus combustível”. Sendo assim, as matérias primas alternativas de segunda geração como óleos não comestíveis, óleo fritura residual e gordura animal se mostram potencialmente preferíveis. Porém, essas fontes alternativas não se apresentam em quantidades necessárias para a utilização em grande escala (Chamkalani et al., 2020).

Os biocombustíveis de terceira geração são combustíveis alternativos derivados de microrganismos fotossintéticos, como por exemplo, microalgas, que vem conquistando espaço em consequência das taxas de crescimento rápido e elevado teor de óleo (Ortiz-Martínez et al., 2019). Além disso, elas praticamente não competem com a produção de alimentos, visto que não necessitam de terras cultiváveis (Coh et al., 2019).

Além da elevada produtividade, baixo uso da terra e consequente segurança alimentar, o biodiesel produzido através de algas é eficiente no tratamento de águas residuais, removendo os componentes tóxicos da água (Khan et al., 2017). Ainda, segundo o estudo de Jacob et al. (2020), as principais vantagens do cultivo de algas são: a não utilização de produtos químicos prejudiciais, como pesticidas e herbicidas; proficiência em sequestrar CO₂; adaptabilidade de cultivo em qualquer meio, como água do mar e salobra; taxa de consumo de água baixíssima e alta taxa de crescimento.

A biomassa oriunda de macro e microalgas vem se apresentando como uma das matérias primas mais promissoras e com maior potencial na produção de biocombustíveis de 3ª geração. No entanto, apesar dos benefícios da utilização do biodiesel de algas, mais pesquisas ainda são necessárias visto que a implementação desta técnica ainda é inviável economicamente para aplicações industriais (Lee et al. 2020).

A quarta geração é classificada como um novo campo de pesquisa que necessita de estudos futuros para mais exploração, uma vez que tem o potencial de melhorar o biocombustível de forma quantitativa e qualitativa, fornecendo melhor desempenho econômico e rendimento (Syafiuddin et al., 2020). Esta geração consiste em combustíveis solares, fotobiológicos e eletrocombustíveis. A tecnologia para a produção de tais

biocombustíveis solares é um campo emergente baseado na conversão direta da energia solar em combustível usando matérias-primas que são inesgotáveis, baratas e amplamente disponíveis. Espera-se que isso seja possível através do desenvolvimento da tecnologia de biologia sintética (Aro, 2016). De acordo com Singh et al. (2020), dentre os benefícios da utilização do biodiesel de quarta geração destacam-se a maior capacidade de absorção de CO₂, alto teor de energia e taxa de crescimento rápido. Porém necessita de um elevado investimento, e as pesquisas ainda se encontram no estágio inicial.

4. Considerações Finais

Conforme apresentado neste artigo de revisão, o biodiesel apresenta-se como uma possível solução de energia renovável e sustentável para a crescente demanda mundial por energia. Ainda, o biodiesel vem se mostrando um dos biocombustíveis mais promissores e vem sendo bastante implementado no Brasil. Não obstante, entende-se que o alto custo para produção dos biocombustíveis é um dos principais empecilhos para a ampliação do consumo de energias limpas alternativas aos combustíveis fósseis em países subdesenvolvidos.

Ainda, nesta revisão, foi possível analisar os benefícios e limitações de cada geração de biodiesel. Em relação aos biocombustíveis de primeira geração, entende-se que não são a melhor opção para substituir os combustíveis fósseis devido à competição com as necessidades alimentares. Em contraste, os biocombustíveis oriundos de resíduos e algas mostram-se escolhas mais promissoras porque não envolvem essa competição alimento-combustível. A biomassa oriunda de macro e microalgas, por exemplo, vêm se apresentando como uma das matérias primas mais promissoras e com maior potencial na produção de biocombustíveis de 3ª geração. No entanto, apesar dos benefícios, mais pesquisas ainda são necessárias para a redução de custos.

O presente trabalho conclui, ainda, que a valorização dos coprodutos da indústria da produção de biodiesel contribui significativamente para a sustentabilidade da sua geração, resultando em um maior aproveitamento do processo. Desta forma é possível reaproveitar o que seria tratado como resíduo para produzir energia e reduzir os custos dos biocombustíveis.

5. Referências

Aboagye, B., Gyamfi, S., Ofosu, E. A., Djordjevic, S. (2021). Status of renewable energy resources for electricity supply in Ghana. **Scientific African**, 11, e00660.

Ahmad, A. L., Yasin, M. N. H., Derek, C. J. C., Lim, J. K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (1), 584-593.

AKBAY, H. E. G., DIZGE, N., KUMBUR, H. (2021). Enhancing biogas production of anaerobic co-digestion of industrial waste and municipal sewage sludge with mechanical, chemical, thermal, and hybrid pretreatment. **Bioresource Technology**, 340, 125688.

ANP – Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural. (2019a). **Panorama internacional**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-texto-secao-1.pdf>>. Acesso em: 08/02/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2019b). **Anuário Estatístico 2019 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel (B100) no Brasil – 2010-2018**. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dataset/t4-13-anuario-estatistico-2019-materias-primas-utilizadas-na-producao-de-biodiesel>>. Acesso em: 17/02/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2021b). **RenovaBio**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>> Acesso:

24/02/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2020b). **Especificação do biodiesel**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>>. Acesso em: 02/03/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2020c. **Relatório de gestão**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/images/Auditoria/relatorio-de-gestao-anp-2019.pdf>>. Acesso em: 02/03/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2021c). **Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel>>. Acesso em: 02/03/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2020a. **Biocombustíveis**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>>. Acesso em: 04/03/2021.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2021a). **Biocombustíveis. Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 13% a partir de hoje (1/3)**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canal_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3>. Acesso em: 30/04/2021.

ANWAR, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. **Fuel**, 283, 119204.

ARO, E. M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. **Ambio**, 45(1), 24-31.

Avinash, A., Sasikumar, P., Murugesan, A. (2018). Understanding the interaction among the barriers of biodiesel production from waste cooking oil in India-an interpretive structural modeling approach. **Renewable Energy**, 127, 678-684.

Axon, C. J., Darton, R. C. (2021). Sustainability and risk—a review of energy security. **Sustainable Production and Consumption**, 27, 1195-1204.

BEN – Balanço Energético Nacional. (2020). **Relatório Síntese**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf> Acesso em: 09/02/2021.

Bhuiya, M. M. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N. (2020). Biodiesel production and characterisation of poppy (*Papaver somniferum* L.) seed oil methyl ester as a source of 2nd generation biodiesel feedstock. **Industrial Crops and Products**, 152, 112493.

Bhuiya, M. M. K., Rasul, M., Khan, M., Ashwath, N., Mofijur, M. (2020). Comparison of oil extraction between screw press and solvent (n-hexane) extraction technique from beauty leaf (*Calophyllum inophyllum* L.) feedstock. **Industrial Crops and Products**, 144, 112024.

Bhuiya, M. M. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., Azad, A. K. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 55, 1109-1128.

- BIODIESELBR. (2014). **História Brasil**. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/oleos-vegetais-biodiesel-brasil>> Acesso em: 01/03/2021.
- Boutesteijn, C., Drabik, D., Venus, T. J. (2017). The interaction between EU biofuel policy and first-and second-generation biodiesel production. **Industrial Crops and Products**, 106, 124-129.
- Cardoso, L. C. (2017). **Caracterização de óleo de peixe e potencial de produção de biodiesel**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.
- Carvalho, J. F. (2014). Energia e sociedade. **Estudos avançados**, 28 (82), 25-39, 2014.
- Chamkalani, A., Zendejboudi, S., Rezaei, N., Hawboldt, K. (2020). A critical review on life cycle analysis of algae biodiesel: current challenges and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 134, 110143.
- Cheng, J. J., Timilsina, G. R. (2011). Status and barriers of advanced biofuel technologies: a review. **Renewable Energy**, 36 (12), 3541-3549.
- Chia, S. R., Ong, H. C., Chew, K. W., Show, P. L., Phang, S. M., Ling, T. C., Nagarajan, D., Lee, D. J., Chang, J. S. (2018). Sustainable approaches for algae utilisation in bioenergy production. **Renewable energy**, 129, 838-852.
- CONAB. (2021). **Análise Mensal Cana-de-açúcar Outubro/novembro de 2021**. Disponível em: <<file:///C:/Users/Windows%207/Downloads/Cana-de-acarZ-ZAnaliseZMensalZ-ZOutubro-NovembroZ2020.pdf>>. Acesso em: 23/02/2021.
- Da Paixão, M. A. S., De Miranda, S. H. G. (2018). Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China. **Pesquisa & Debate. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política**, 29(1), 53.
- Ebadian, M., Van Dyk, S., McMillan, J. D., Saddler, J. (2020). Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. **Energy Policy**, 147, 111906.
- EPE – Empresa de pesquisa energética. (2020). **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em: 08/02/2021.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2017). **Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/EPE%20-%20NT1%20-%20PAPEL%20DOS%20BIOCOMBUST%3%8DVEIS%20-%20ARQUIVO%201.pdf>>. Acesso em: 24/02/2021.
- Ferreira, M. C. (2016). **Cinética de transesterificação de óleo de palma em meio alcalino**. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Universitário FEI, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, São Bernardo do Campo.
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Ramavandi, B. (2021). Waste glass catalyst for biodiesel production from waste chicken fat: Optimization by RSM and ANNs and toxicity assessment. **Fuel**, 291, 120151.
- Coh, B. H. H., Ong, H. C., Cheah, M. Y., Chen, W. H., Yu, K. L., Mahlia, T. M. I. (2019). Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 107, 59-74.

- González, C. G. M. (2018). **Transição energética global e desenvolvimento sustentável: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- González-González, L. M., Correa, D. F., Ryan, S., Jensen, P. D., Pratt, S., & Schenk, P. M. (2018). Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, 1137-1148.
- Hassan, A. A., Alhameedi, H. A., Smith, J. D. (2020). Using ethanol for continuous biodiesel production with trace catalyst and CO₂ co-solvent. **Fuel Processing Technology**, 203, 106377.
- Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Khanali, M., Demirbas, A. (2018). A comprehensive review on the environmental impacts of diesel/biodiesel additives. **Energy Conversion and Management**, 174, 579-614.
- IEA - Agência Internacional de Energia. (2019). **Análise e previsão de mercado de 2019 a 2024**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2019/transport#abstract>>. Acesso em 24/02/2021.
- IEA - Agência Internacional de Energia. (2020). **Bioenergia**. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>>. Acesso em: 24/02/2021.
- IEA - Agência Internacional de Energia. Dados e estatísticas. (2021). Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>>. Acesso em: 08/02/2021.
- Jacob, A., Ashok, B., Alagumalai, A., Chyuan, O. H., Le, P. T. K. (2020). Critical review on third generation micro algae biodiesel production and its feasibility as future bioenergy for IC engine applications. **Energy Conversion and Management**, 228, 113655.
- Khan, S., Siddique, R., Sajjad, W., Nabi, G., Hayat, K. M., Duan, P., Yao, L. (2017). Biodiesel production from algae to overcome the energy crisis. **HAYATI Journal of Biosciences**, 24(4), 163-167.
- Kiwjaroun, C., Tubtimdee, C., Piumsomboon, P. (2009). LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanol methods. **Journal of Cleaner Production**, 17(2), 143-153.
- Kokorin, A. O., Lipka, O. N., Sulyandziga, R. V. (2015). Climate change. Glossary of terms used by the UNFCCC.
- Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I. S., Tsang, D. C. W. (2020). Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. **Science of the Total Environment**, 716, 137116.
- Kumar, M., Morya, R., Gnansounou, E., Larroche, C. & Thakur, I. S. (2017). Characterization of carbon dioxide concentrating chemolithotrophic bacterium *Serratia* sp. ISTD04 for production of biodiesel. **Bioresource technology**, 243, 893-897.
- Lee, X. J., Ong, H. C., Gan, Y. Y., Chen, W. H., Mahlia, T. M. I. (2020). State of art review on conventional and advanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for biochar, bio-oil and bio-syngas production. **Energy Conversion and Management**, 210, 112707.
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., Wang, X., Zhao, Y. (2020). Review and Outlook on the International Renewable Energy Development. **Energy and Built Environment**, 14 (16), 4811 .

- Lopes, K., Martins, E. M., Miranda, R. L. (2019). A potencialidade energética da biomassa no Brasil. **Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**, 5(1), 95-106.
- Mamtani, K., Shahbaz, K., Farid, M. M. (2021). Deep eutectic solvents–Versatile chemicals in biodiesel production. **Fuel**, 295, 120604.
- Mantovani, P. R. A., Neumann, P. N., Edler, M. A. R. (2017). Matriz Energética Brasileira: Em busca de uma nova alternativa. **Revista Interdisciplinar De Ensino, Pesquisa E Extensão-RevInt**, 4(1).
- Martínez, A., Mijangos, G. E., Romero-Ibarra, I. C., Hernández-Altamirano, R., Mena-Cervantes, V. Y. (2019). In-situ transesterification of *Jatropha curcas* L. seeds using homogeneous and heterogeneous basic catalysts. **Fuel**, 235, 277-287.
- He, Q., McNutt, J., Yang, J. (2017). Utilization of the residual glycerol from biodiesel production for renewable energy generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 71, 63-76.
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2020). **Análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2019**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise_de_Conjuntura_Ano_2019.pdf> Acesso em: 28/04/2021.
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2021). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf> Acesso em: 04/03/2021.
- Mofijur, M., Siddiki, S. Y. A., Shuvho, B. A., Djavanroadi, F., Fatah, I. R., Ong, H. C., Chowdhury, M., Mahlia, T. (2020). Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources-A mini-review. **Chemosphere**, 270, 128642.
- Mohiddin, M. N. B., Tan, Y. H., Seow, Y. X., Kansedo, J., Mubarak, N., Abdullah, M. O., Chan, Y. S., Khalid, M. (2021). Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 184, 107229 .
- Monteiro, M. R., Kugelmeier, C. L., Pinheiro, R. S., Batalha, M. O., da Silva César, A. (2018). Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 88, 109-122.
- Numpilai, T., Cheng, C. K., Seubsai, A., Faungnawakij, K., Limtrakul, J., Witoon, T. (2021). Sustainable utilization of waste glycerol for 1, 3-propanediol production over Pt/WO_x/Al₂O₃ catalysts: Effects of catalyst pore sizes and optimization of synthesis conditions. **Environmental Pollution**, 272, 116029.
- Ong, H. C., Tiong, Y. W., Goh, B. H. H., Gan, Y. Y., Mofijur, M., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Alam, M. A., Lee, H. V., Silitonga, A. S., et al. (2020). Recent advances in biodiesel production from agricultural products and microalgae using ionic liquids: Opportunities and challenges. **Energy Conversion and Management**, 113647.
- Ortiz-Martínez, V. M., Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Rios, A. P. D. L., Hernández-Fernández, F. J., Quesada-Medina, J. (2019). Approach to biodiesel production from microalgae under supercritical conditions by the PRISMA method. **Fuel processing technology**, 191, 211-222.

- Peiter, G. C., Alves, H. J., Sequinel, R., Bautitz, I. R. (2016). Alternativas para o uso do glicerol produzido a partir do biodiesel. **Revista brasileira de energias renováveis**, 5(4), 519-537.
- Pinho, D. M. M., Suarez, P. A. Z. (2017). Do óleo de amendoim ao biodiesel-Histórico e política brasileira para o uso energético de óleos e gorduras. **Revista Virtual de Química**, 9(1), 39-51.
- Pradima, J., Kulkarni, M. R. (2017). Review on enzymatic synthesis of value added products of glycerol, a by-product derived from biodiesel production. **Resource-Efficient Technologies**, 3(4), 394-405.
- Puricelli, S., Cardellini, G., Grosso, M. (2020). A review on biofuels for Light-Duty vehicles in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 110398.
- Ramos, L. P., Kothe, V., César-Oliveira, M. A. F., Muniz-Wypich, A. S., Nakagaki, S., Krieger, N., Wypich, F., Cordeiro, C. F. (2017). Biodiesel: matérias-primas, tecnologias de produção e propriedades combustíveis. **Revista virtual de química**, 9(1), 317-369.
- Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., Mohamed Shameer, P. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, 2970-2992.
- Schwengber, C. A., Alves, H. J., Schaffner, R. A., da Silva, F. A., Sequinel, R., Bach, V. R.; Ferracin, R. J. (2016). Overview of glycerol reforming for hydrogen production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 58, 259-266.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S., Sharma, S., Sharma, P. K., Jhalani, A. (2020). A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. **Fuel**, 262, 116553.
- Singh, D., Sharma, D., Filho E., Sharma, S., Kumari, D. (2019). Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review. **Fuel**, 253, 60-71.
- Somerville, C., Youngs, H., Taylor, C., Davis, S. C., Long, S. P. (2010). Feedstocks for lignocellulosic biofuels. **science**, 329(5993), 790-792.
- Subramaniam, Y., Masron, T. A. (2020). The impact of economic globalization on biofuel in developing countries. **Energy Conversion and Management: X**, p. 100064.
- Syafiuddin, A., Chong, J. H., Yuniarto, A., Hadibarata, T. (2020). The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: A review. **Bioresource Technology Reports**, p. 100608.
- Tayari, S., Abedi, R., Rahi, A. (2020). Comparative assessment of engine performance and emissions fueled with three different biodiesel generations. **Renewable Energy**, 147, 1058-1069.
- Veroneze, M. L., Schwantes, D., Gonçalves, A. C.; Richart, A., Manfrin, J., Da Paz Schiller, A., Schuba, T. B. (2019). Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses. **Journal of cleaner production**, 213, 176-184.
- VIDAL, M. F. (2020). **Produção e mercado de etanol**. Caderno setorial ETENE/BNB, Ano:5, Nº121, julho/2020. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/262/1/2020_CDS_121.pdf>. Acesso em: 23/02/2021.
- VIDAL, M. F. (2019). **Produção e Uso de Biocombustíveis no Brasil**. Caderno setorial ETENE/BNB, Ano:4º, Nº79, maio/2019. Disponível em:

<https://www.bnb.gov.br/documents/80223/5014256/78_Biocombustiveis.pdf/e0dc0c8c-e995-16ec-d63c-d477f80e0131> Acesso em: 19/02/2021.

Vivek, N., Sindhu, R., Madhavan, A., Anju, A. J., Castro, E., Faraco, V., Pandey, A., Binod, P. (2017). Recent advances in the production of value added chemicals and lipids utilizing biodiesel industry generated crude glycerol as a substrate – Metabolic aspects, challenges and possibilities: An overview. **Bioresource technology** , 239, 507-517.

Zhao, Y., Wang, C., Zhang, L., Chang, Y., Hao, Y. (2021). Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 140, 110661.