

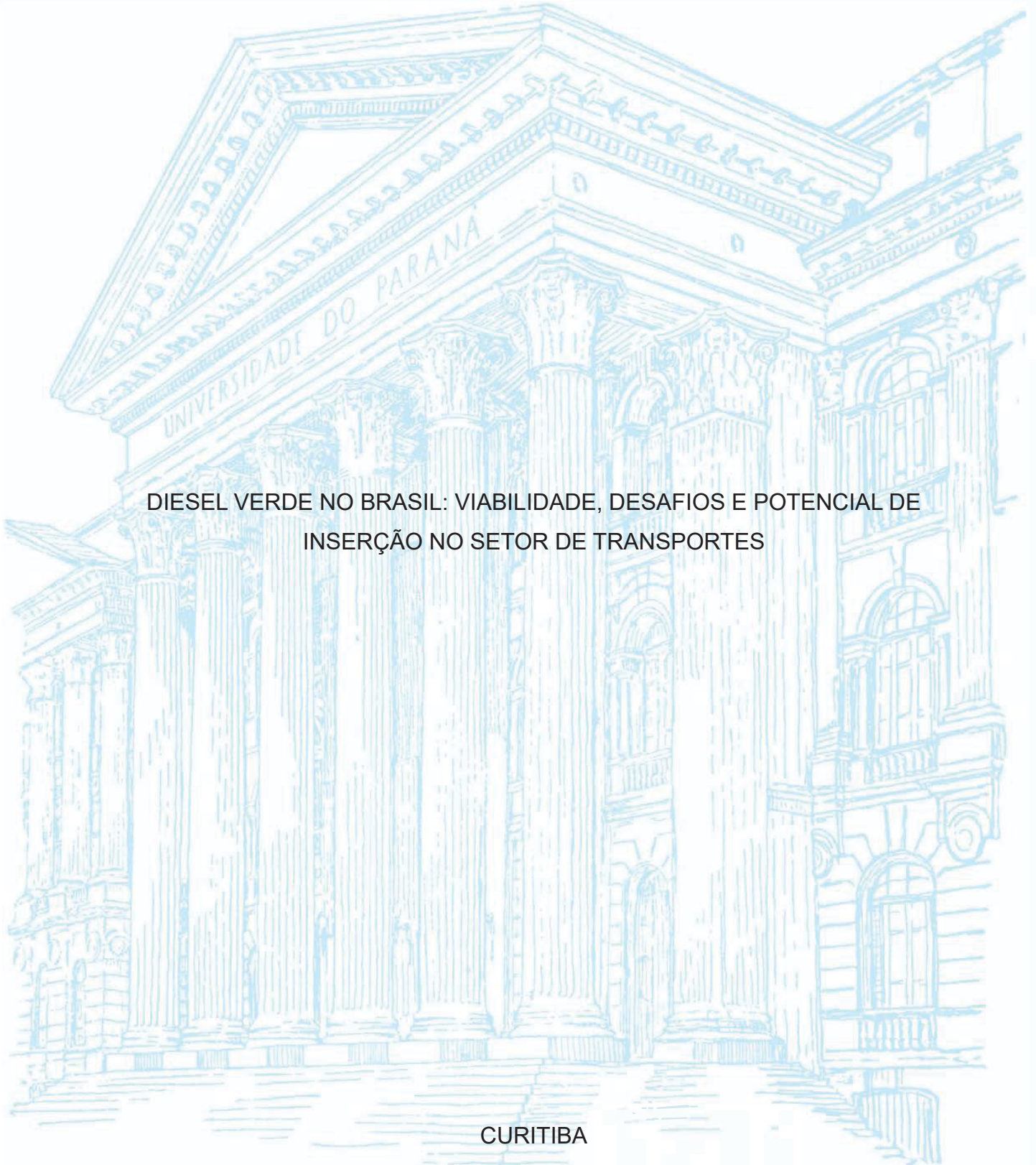
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CASSIANO BACHIEGA

DIESEL VERDE NO BRASIL: VIABILIDADE, DESAFIOS E POTENCIAL DE
INSERÇÃO NO SETOR DE TRANSPORTES

CURITIBA

2025



CASSIANO BACHIEGA

DIESEL VERDE NO BRASIL: VIABILIDADE, DESAFIOS E POTENCIAL DE
INSERÇÃO NO SETOR DE TRANSPORTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação Lato Sensu, MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica de Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Mileo Taher

CURITIBA

2025

RESUMO

A crescente demanda energética e os impactos ambientais decorrentes da utilização de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de alternativas renováveis para o setor de transportes. Entre os biocombustíveis avançados, o diesel verde se destaca por sua equivalência química ao diesel fóssil e plena compatibilidade com a infraestrutura petroquímica já existente. Este trabalho, desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica narrativa, buscou analisar a viabilidade, os desafios e o potencial de inserção do diesel verde na matriz energética brasileira. Verificou-se que a rota de hidrotratamento de óleos vegetais apresenta o maior grau de maturidade tecnológica, mas ainda enfrenta barreiras econômicas e técnicas, como a elevada demanda por hidrogênio e os altos custos de produção, o que pode torná-lo mais caro que o diesel fóssil e biodiesel. Apesar desses entraves, o Brasil apresenta vantagens estratégicas, como a experiência consolidada na produção de biocombustíveis, disponibilidade de matérias-primas e o avanço de políticas públicas, como a Lei do Combustível do Futuro e o Programa Nacional do Diesel Verde. Estratégias como a integração em refinarias existentes, o uso de matérias-primas residuais e a produção de hidrogênio a partir de subprodutos podem ampliar sua competitividade, viabilidade e escalabilidade. Conclui-se, portanto, que o diesel verde se configura como uma oportunidade estratégica para o Brasil no contexto da transição energética, permitindo diversificar a matriz, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e fortalecer a posição do país no cenário global da descarbonização.

Palavras-chave: diesel verde; biocombustíveis avançados; matriz energética; transição energética, setor de transportes.

ABSTRACT

The growing energy demand and the environmental impacts resulting from the use of fossil fuels have driven the development of renewable alternatives for the transportation sector. Among advanced biofuels, green diesel stands out due to its chemical equivalence to fossil diesel and full compatibility with the existing petrochemical infrastructure. This study, developed through a narrative literature review, sought to analyze the feasibility, challenges, and potential for integrating green diesel into the Brazilian energy matrix. It was found that the hydrotreated vegetable oil route presents the highest level of technological maturity but still faces economic and technical barriers, such as high hydrogen demand and elevated production costs, which can make it more expensive than fossil diesel and biodiesel. Despite these obstacles, Brazil has strategic advantages, including consolidated experience in biofuel production, availability of raw materials, and advances in public policies such as the Fuel of the Future Law and the National Green Diesel Program. Strategies such as integration into existing refineries, the use of residual feedstocks, and hydrogen production from by-products can enhance its competitiveness, feasibility, and scalability. Therefore, green diesel emerges as a strategic opportunity for Brazil in the context of the energy transition, allowing for diversification of the energy matrix, reduction of fossil fuel dependence, and strengthening of the country's position in the global decarbonization agenda.

Key-words: green diesel; advanced biofuels; energy matrix; energy transition; transport sector.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
1.1.1	Matriz energética brasileira e o setor de transportes.....	6
1.1.2	Biocombustíveis	8
1.1.3	Biocombustíveis avançados	10
1.1.4	Diesel verde	10
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	11
2	METODOLOGIA	11
3	DESENVOLVIMENTO.....	12
3.1	POLÍTICAS E MARCOS REGULATÓRIOS DO DIESEL VERDE NO BRASIL	12
3.2	ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DO DIESEL VERDE	14
3.2.1	Hidrotratamento de óleos vegetais	14
3.2.2	Gás de síntese proveniente da biomassa, via processo Fischer-Tropsch.....	15
3.2.3	Fermentação de carboidratos presentes na biomassa.....	16
3.2.4	Oligomerização de etanol e isobutanol.....	17
3.2.5	Hidrotermólise catalítica de óleo vegetal	17
3.3	CLASSIFICAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	18
3.4	AVALIAÇÕES ECONÔMICAS DA PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE	19
3.5	STATUS DA PRODUÇÃO NACIONAL E MUNDIAL DE DIESEL VERDE.....	21
3.5.1	Produção nacional de diesel verde	21
3.5.2	Produção mundial de diesel verde	23
4	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

Os recorrentes impactos ambientais resultantes do uso exacerbado de combustíveis fósseis reforçam a urgência pela busca de fontes energéticas mais sustentáveis e menos poluentes (Mohiddin *et al.*, 2021), e incentivam medidas globais e nacionais para aumentar a participação de energias renováveis em suas matrizes energéticas (Cao *et al.*, 2019).

A demanda por transporte no Brasil deve aumentar ao longo do próximo decênio, e o setor rodoviário continuará predominante no transporte de passageiros e cargas, mantendo como principal fonte energética do setor, o óleo diesel fóssil, com crescimento médio projetado de 2,1% ao ano, representando um incremento de 14 bilhões de litros equivalente de óleo até 2034 (EPE, 2024a).

As emissões decorrentes da combustão ao utilizar combustíveis fósseis podem ser reduzidas e causar menores impactos ambientais ao substituir totalmente ou parcialmente os combustíveis fósseis por combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis (Mohammed *et al.*, 2023). Os biocombustíveis apresentam características biodegradáveis e menor toxicidade se comparados aos de origem não renovável, podendo ser considerados as melhores alternativas para mitigar os desafios mencionados (Panahi *et al.*, 2019).

Diante deste cenário, o presente trabalho propõe analisar o papel dos biocombustíveis avançados, com ênfase no diesel verde, visando ampliar o conhecimento científico e contribuir para uma diversificação produtiva estratégica, sustentável e economicamente viável, capaz de reduzir os impactos ambientais e garantir maior renovabilidade ao setor de transportes.

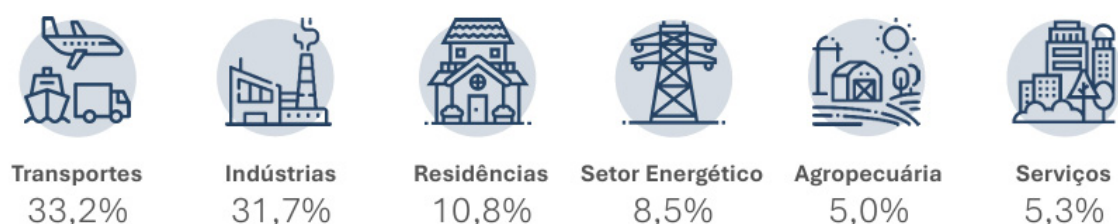
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

1.1.1 Matriz energética brasileira e o setor de transportes

O setor de transportes correspondeu por 33,2% do consumo energético nacional no ano de 2024, um aumento de 2,7% em relação ao ano anterior. Em comparação, as indústrias e as residências, ocuparam a segunda e a terceira posição, com 31,7% e 10,8%, respectivamente, como ilustrado na Figura 1.

Apesar da proximidade percentual do consumo energético entre os transportes e as indústrias, enquanto o setor de transportes alcançou o patamar de 25,7% de participação de fontes renováveis em sua matriz energética, o maior em sua série histórica, o setor industrial apresentou uma matriz energética fortemente baseada em energias renováveis, com um índice expressivo de 64,4% de renovabilidade (EPE, 2025a).

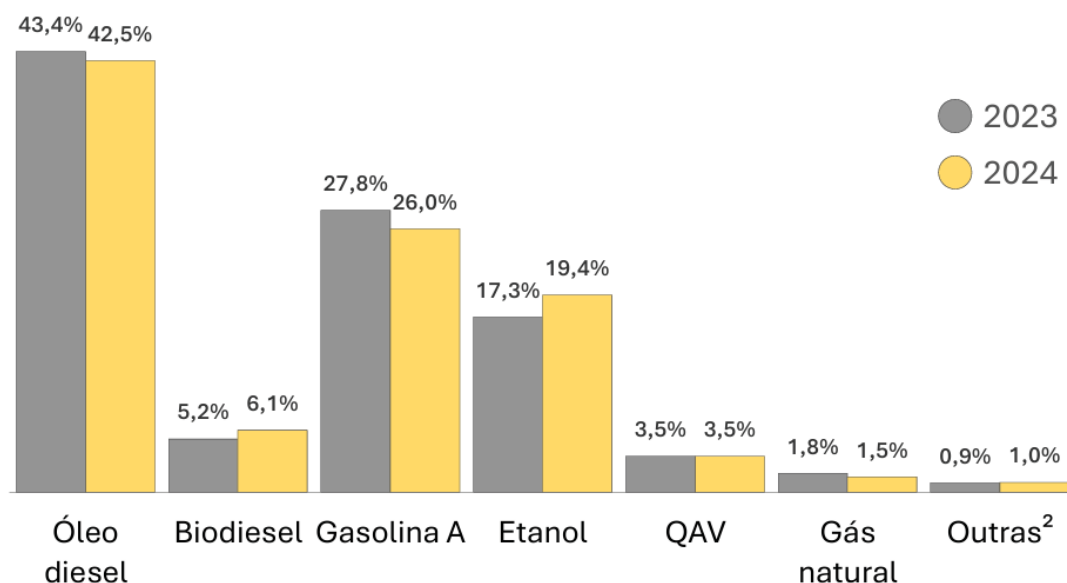
FIGURA 1 – PARTICIPAÇÃO DOS SETORES NO CONSUMO ENERGÉTICO NACIONAL (2024)



FONTE: EPE (2025a).

Os principais destaques na participação das fontes energéticas no setor de transportes foram os aumentos na participação de biocombustíveis, como ilustrado pela Figura 2. Em grande parte, esses aumentos foram impulsionados pelo aumento da mistura obrigatória de biodiesel ao diesel para 14% a partir de março de 2024, e o etanol, visto que a sua produção tem crescido significativamente. Embora a participação dos derivados fósseis permaneça predominantes, o óleo diesel e a gasolina, os principais combustíveis de origem fóssil, registraram redução no consumo em comparação ao ano de 2023 (EPE, 2025a).

FIGURA 2 – PARTICIPAÇÃO DAS FONTES ENERGÉTICAS NO SETOR DE TRANSPORTES



FONTE: EPE (2025a).

Em 2024, as emissões provenientes dos processos relacionados à matriz energética brasileira totalizaram 431,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (Mt CO₂ eq). Além de apresentar o maior consumo energético, o setor de transportes foi o setor que apresentou maior percentual de emissões antrópicas associadas a matriz energética brasileira, emitindo um total de 214,3 Mt CO₂ eq, representando 49,7% do total (EPE, 2025a).

Diante desse cenário, os biocombustíveis apresentam-se como uma das principais alternativas para suprir à demanda energética, reduzir a emissão de gases de efeito estufa, especialmente CO₂, promover um desenvolvimento sustentável e contribuir para a diversificação da matriz energética (Scaldaferri, 2019).

1.1.2 Biocombustíveis

O biodiesel e o etanol são os biocombustíveis mais representativos em participação no setor de transportes, como ilustrado na Figura 2. Em 2024, a produção nacional somou aproximadamente 46 bilhões de litros produzidos de biodiesel e etanol. A produção de etanol atingiu a marca histórica de 37 bilhões de litros, com a cana-de-açúcar sendo a principal matéria-prima, seguido do milho, com produção de aproximadamente 7,5 bilhões de litros de etanol (ANP, 2025). A produção de biodiesel, alcançou aproximadamente 9 bilhões de litros, um aumento de 20,4% em relação a

2023. A principal matéria-prima utilizada foi o óleo de soja, responsável por cerca de 74,0% da produção (ANP, 2025).

O biodiesel é um biocombustível composto por ésteres alquílicos de ácidos graxos provenientes de matérias-primas graxas de origem animal e vegetal (ANP, 2023). A principal rota de obtenção é por meio da reação de transesterificação, um processo químico, onde geralmente se utiliza o metanol para converter os triglicerídeos em ésteres metílicos de ácidos graxos e glicerina, na presença de um catalisador alcalino homogêneo como KOH ou NaOH, a uma temperatura de cerca de 60 °C a pressão atmosférica (Ma *et al.*, 2018).

Além de apresentar maior lubricidade em comparação ao óleo diesel, contribuindo para a proteção de componentes do motor, o biodiesel não contém enxofre em sua composição e os compostos oxigenados presentes em sua estrutura favorecem uma queima mais completa, resultando em uma combustão mais limpa e na redução na emissão de gases de efeito estufa (Douvartzides *et al.*, 2019).

Porém, a presença destes compostos oxigenados na estrutura dos biocombustíveis convencionais também promove algumas desvantagens como maior propensão à corrosão de peças metálicas, formação de gomas e diversas outras impurezas que impactam a estabilidade oxidativa destes biocombustíveis, resultando na contaminação dos produtos, problematizando seu armazenamento a longo prazo. Além, da característica higroscópica, que resulta na adsorção de água da atmosfera, causando desempenho reduzido em regiões de baixas temperatura e diminuindo a performance do motor (Douvartzides *et al.*, 2019). Além disso, o biodiesel apresenta compatibilidade limitada com a infraestrutura de processamento e distribuição de petróleo e seu uso em motores, requer misturas em proporções controladas, a fim de não comprometer o desempenho e não demandar adaptações estruturais (Mailaram *et al.*, 2021; Karatzos *et al.*, 2017). Atualmente, por decisão do Conselho Nacional de Política Energética, CNPE, é adotada uma mistura com 15% de biodiesel no óleo diesel (B15). Neste contexto, biocombustíveis totalmente compatíveis com a infraestrutura já existente e com características físico-químicas que possibilitam misturas em maiores teores com os combustíveis fósseis, podem contornar estes obstáculos e facilitar a expansão de produção e utilização de biocombustíveis (Karatzos *et al.*, 2017).

1.1.3 Biocombustíveis avançados

Os biocombustíveis avançados, também denominados biocombustíveis *drop-in*, são compostos por hidrocarbonetos derivados exclusivamente de biomassa (ANP, 2021). E diferentemente dos biocombustíveis convencionais, como o biodiesel e o etanol, não apresentam compostos oxigenados na sua composição e são totalmente compatíveis com a infraestrutura já existente do setor petroquímico (Rambabu *et al.*, 2023). Os hidrocarbonetos renováveis presentes nos biocombustíveis avançados, são equivalentes aos hidrocarbonetos presentes nos combustíveis fósseis, possibilitando maiores teores de misturas dentre eles, não comprometendo a qualidade do produto final e o desempenho dos motores (Rambabu *et al.*, 2023). Os principais exemplos são o combustível sustentável de aviação e o diesel verde.

1.1.4 Diesel verde

O diesel verde é um biocombustível composto por hidrocarbonetos parafínicos, obtido a partir de matérias-primas exclusivamente derivadas de biomassa renovável (ANP, 2021). É funcionalmente equivalente ao óleo diesel fóssil, com compatibilidade total com a infraestrutura de refino e distribuição utilizada para indústria petroquímica e com os motores ciclo diesel (Rambabu *et al.*, 2023). Sua obtenção pode ocorrer por meio de cinco diferentes rotas tecnológicas estabelecidas, sendo elas: i) hidrotratamento de óleo vegetal (*in natura* ou residual), óleos de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa; ii) gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch; iii) fermentação de carboidratos presentes em biomassa; iv) oligomerização de etanol ou isobutanol; e v) hidrotermólise catalítica de óleo vegetal (*in natura* ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa (ANP, 2021).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os principais impactos e desafios da implementação do diesel verde na matriz energética do setor de transportes nacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar, no contexto nacional, quais as rotas mais viáveis e as matérias-primas mais promissoras para a produção do diesel verde;
- Avaliar a viabilidade e escalabilidade da produção do diesel verde no Brasil;
- Avaliar o potencial do diesel verde para a diversificação e renovabilidade do setor de transportes nacional e os principais desafios para sua implementação.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica narrativa, cujo objetivo consiste em analisar a possibilidade de inserção, a viabilidade técnica e a potencialidade do diesel verde no contexto da matriz energética brasileira. Para tanto, foram consideradas diversas fontes de informação, abrangendo livros, artigos científicos, teses, dissertações, legislações, resoluções, além de levantamentos de dados e publicações técnicas de instituições e órgãos nacionais e internacionais.

O levantamento bibliográfico foi conduzido a partir da consulta às bases de dados Google Acadêmico, Science Direct e American Chemical Society. Para a busca, foram empregados operadores de pesquisa e termos em português e inglês, incluindo “biocombustíveis avançados” / “*advanced biofuels*”, “diesel verde” / “*green diesel*”, “perspectivas econômicas” / “*economics perspectives*”, “rotas tecnológicas” / “*technological routes*”, e “matérias-primas” / “*feedstocks*” para a produção de diesel verde, considerando o contexto brasileiro como referência, de modo a encontrar estudos pertinentes à análise de viabilidade e da potencialidade do diesel verde na matriz energética nacional. Complementarmente, foram consultados sites e documentos oficiais de instituições de referência, como a Empresa de Pesquisa

Energética (EPE), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o Ministério de Minas e Energia (MME), e a International Energy Agency (IEA).

Foram selecionadas publicações entre 2010 a 2025. O processo de seleção envolveu, em um primeiro momento, a análise de títulos, resumos e resultados apresentados. Entre as publicações científicas, destacam-se três artigos, por conta de sua atualidade e abrangência na abordagem do tema, contemplando aspectos relacionados à produção, aos desafios a serem enfrentados, à comparação com os biocombustíveis convencionais e, principalmente, à avaliação do contexto brasileiro. Estes artigos são: “*Potencial of Green Diesel To Complement the Brazilian Energy Production: A Review*”, de Cremonez; Teleken e Meier (2020); “*Industrial production of green diesel in Brazil: Process simulation and economic perspectives*”, de Barbosa et al., (2023), e “*Technological maturity and future perspectives for green diesel production in Brazil*”, de Santos, Gasparetto e Salau (2024). No que se refere as pesquisas de instituições relacionadas à temática, destacaram-se o Balanço Energético Nacional e a Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis, ambos divulgados anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A partir destes documentos, foi possível obter uma visão abrangente e detalhada sobre o setor energético brasileiro. As publicações mencionadas foram lidas integralmente e analisadas criticamente, possibilitando a sistematização das informações de modo a subsidiar o desenvolvimento e a conclusão deste estudo.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 POLÍTICAS E MARCOS REGULATÓRIOS DO DIESEL VERDE NO BRASIL

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituído pela Lei nº 13.576/2017, entrou em vigor em 2019, e apresenta como seus principais objetivos promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional e reforçar o compromisso do Brasil em reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Alinhado a esses princípios, a ANP regulamentou o diesel verde no território nacional, a partir da Resolução ANP nº 842/2021, estabelecendo a especificação do diesel verde, as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas para

que possa ser comercializado em território nacional e as rotas tecnológicas e matérias-primas que poderão ser utilizadas para a sua produção.

Recentemente, a Lei do Combustível do Futuro, Lei nº 14.993/2024, um importante marco regulatório para os biocombustíveis foi sancionada, promovendo a mobilidade sustentável de baixo carbono e a redução de emissões de gases de efeito estufa, estabelecendo metas e incentivos para o uso de biocombustíveis e institui diversos programas voltados ao desenvolvimento e uso de biocombustíveis, dentre os quais se destaca o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV).

O Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), tem como objetivo incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do diesel verde na matriz energética brasileira, complementando o esforço para a transição energética e a redução da dependência de diesel fóssil por meio da incorporação do diesel verde à matriz energética de combustíveis brasileira (EPE, 2024).

A responsabilidade por estabelecer, a cada ano, a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde ao diesel comercializado ao consumidor final será do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Para a definição deste percentual mínimo obrigatório, deverá ser analisado: i) as condições de oferta do produto; ii) o impacto no preço ao consumidor final; e iii) a competitividade internacional do diesel verde produzido internamente.

Ressalta-se que foi estabelecido que a participação volumétrica mínima obrigatória de diesel verde em relação ao diesel comercializado não poderá exceder o limite de 3%, permitindo adição voluntária superior a esse limite, desde que seja comunicado seu uso à ANP. Comparativamente, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (PROBIOQAV), também instituído pela Lei do Combustível do Futuro, apresentou diretrizes e metas mais alinhadas aos padrões internacionais e ambiciosas, com destaque a obrigatoriedade imposta aos operadores aéreos de reduzir progressivamente as emissões de gases de efeito estufa em voos domésticos por meio do uso de combustíveis sustentáveis de aviação, iniciando com redução mínima de 1% em 2027, e continuará de forma contínua, com aumentos graduais até atingir o patamar previsto de 10% em 2037.

3.2 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DO DIESEL VERDE

Por meio da Resolução ANP n° 842/2021, foram regulamentadas cinco rotas tecnológicas para as quais o produto final pode ser comercializado como diesel verde desde que atenda as especificações de qualidade estabelecidas (ANP, 2021). Dentre elas, há diferentes graus de maturidade tecnológica, prontidão industrial e desafios operacionais. Dessa forma, para se alcançar um desenvolvimento sustentável, torna-se fundamental avaliar as implicações estratégicas e tecnológicas que devem ser enfrentados (Santos; Gasparetto; Salau, 2024).

3.2.1 Hidrotratamento de óleos vegetais

Atualmente, é a única rota que apresenta elevado grau de maturidade e prontidão industrial em escala global. Em 2022, a produção global de diesel verde por meio dessa rota tecnológica foi estimada em aproximadamente 7 bilhões de litros (Van Dyk; Su; Saddler, 2024). Nos últimos dois anos, observou-se um aumento significativo no anúncio de novas instalações, com diversos projetos em fase de construção. A produção anual de combustíveis avançados poderá alcançar cerca de 25 bilhões de litros quando todas as plantas estiverem simultaneamente em operação (Van Dyk; Su; Saddler, 2024).

O processo de hidrotratamento de óleos vegetais pode ser descrito, de forma simplificada, em dois estágios principais. No primeiro estágio, ocorre a desoxigenação dos ácidos graxos, por meio da adição de hidrogênio, ao passo que as duplas ligações são saturadas, resultando na formação de uma mistura de hidrocarbonetos. O segundo estágio, mais aplicado para a obtenção de combustíveis sustentáveis de aviação, compreende o hidrocraqueamento, que promove a clivagem dos hidrocarbonetos de cadeia longa em cadeias menores, seguido da isomerização, com o objetivo de formar moléculas com propriedades aprimoradas para desempenho em condições de baixas temperaturas (Karatzos *et al.*, 2017).

As respectivas frações e quantidade dos hidrocarbonetos formados são influenciadas diretamente pelas condições reacionais e os catalisadores empregados. No entanto, como os ácidos graxos derivados de óleos vegetais apresentam, em sua maioria, comprimentos de cadeia similares aos hidrocarbonetos presentes no diesel,

tende-se à formação majoritária de hidrocarbonetos renováveis no intervalo entre C₁₀ a C₂₂ (Karatzos *et al.*, 2017).

Como discutido por Karatzos *et al.*, (2017) e van Dyk, Su e Saddler, (2024), essa rota apresenta elevado grau de maturidade tecnológica, prontidão industrial e tem sido amplamente utilizada comercialmente. Ambos os autores destacam que os principais desafios estão relacionados ao custo, visto que a matéria-prima representa cerca de 80% do custo total da produção, e a disponibilidade das matérias-primas, por serem amplamente utilizadas pela indústria alimentícia e disputadas por outras rotas consolidadas de produção de biocombustíveis, como o biodiesel.

3.2.2 Gás de síntese proveniente da biomassa, via processo Fischer-Tropsch

A gaseificação, é uma tecnologia termoquímica na presença de agentes gaseificadores, como ar, oxigênio e vapor d'água para conversão de uma ampla variedade de matérias-primas, tais como carvão, gás natural ou biomassa. O gás de síntese, uma mistura gasosa composta majoritariamente por monóxido de carbono e hidrogênio, é o principal produto da gaseificação (Gao *et al.*, 2023). E o principal precursor no processo de Fischer-Tropsch, para a produção de hidrocarbonetos.

O gás de síntese é o principal precursor no processo de Fischer-Tropsch, que consiste na reação do gás de síntese com um catalisador metálico de transição, promovendo a formação de hidrocarbonetos. Esses compostos, posteriormente, são submetidos a etapas de melhoramento por meio de métodos convencionais de refino, como o hidrotratamento e a destilação, visando à obtenção e separação das frações de interesse (Nystrom; Bokinge; Franck, 2019).

O processo geralmente ocorre em temperaturas entre 200 e 350 °C e pressões de 10 a 60 bar, utilizando catalisadores à base de ferro ou cobalto. Quando o objetivo é a produção de hidrocarbonetos de cadeia longa, recomenda-se a utilização da síntese de Fischer-Tropsch de baixa temperatura (FTLT), com operação na faixa de 200 a 240 °C, pois essa condição favorece maior formação de hidrocarbonetos na faixa do diesel verde e reduz a presença de compostos oxigenados (Douvartzides *et al.*, 2019). Estes hidrocarbonetos formados, posteriormente, são submetidos a etapas de melhoramento por meio de métodos convencionais de refino, como o hidrotratamento e a destilação, visando à obtenção e separação das frações de interesse (Nystrom; Bokinge; Franck, 2019).

Conforme discutido por Kargbo; Harris e Phan (2021), alguns desafios devem ser superados para que essa rota tecnológica alcance maior escalabilidade. Entre eles, destaca-se o elevado consumo energética nas etapas de purificação do gás de síntese, uma vez que o processo de Fischer-Tropsch exige um gás de síntese com alto grau de pureza. Além disso, a baixa eficiência em etapas de pré-tratamento da biomassa, especialmente na secagem, podendo haver o consumo de até 15% da energia disponível na matéria-prima. Por fim, o processo convencional não é seletivo para obtenção de hidrocarbonetos de cadeia longa e todos os produtos gerados necessitam de etapas posteriores de melhoramento, como destilação e hidrotratamento, dificultando a obtenção de frações específicas de interesse, elevando o custo e a complexidade do processo.

3.2.3 Fermentação de carboidratos presentes na biomassa

Este processo visa empregar microrganismos e processos fermentativos para converter os carboidratos presentes na biomassa lignocelulósica diretamente em hidrocarbonetos (Davis *et al.*, 2013). A biomassa lignocelulósica é um material biológico composto principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina, que estão fortemente associadas entre si (Kumar; Sharma, 2017). Devido sua complexidade estrutural e natureza recalcitrante, etapas de pré-tratamento são obrigatórias para que ocorra a ruptura de sua estrutura complexa e promover o aumento da acessibilidade aos compostos presentes na sua estrutura (Prasad; Padhi; Ghosh, 2022).

Portanto, o processo compreende cinco etapas principais: o pré-tratamento e condicionamento da matéria-prima, hidrólise enzimática, clarificação e purificação do hidrolisado, conversão catalítica biológica e purificação do produto. Os hidrocarbonetos na faixa do diesel, por apresentar baixa solubilidade em água, podem ser separados, recuperados e obtidos facilmente utilizando processos simples de separação de fases e centrifugação (Davis *et al.*, 2013).

Como descrito por Bidy e Jones (2013), esse processo demanda avanços científicos para superar seus principais gargalos, os quais podem ser resumidos da seguinte forma: i) desenvolver estratégias compatíveis com uma maior variedade de compostos, como oligômeros e derivados da lignina; ii) minimizar os custos associados às etapas do pré-tratamento, condicionamento e purificação tanto da biomassa quanto do hidrolisado; iii) projetar catalisadores com maior seletividade para

os biocombustíveis desejados, reduzindo a formação de subprodutos; iv) aumentar a vida útil e a estabilidade dos catalisadores, afim de diminuir os custos operacionais; e v) viabilizar o uso da lignina na produção de hidrocarbonetos, por meio do desenvolvimento de métodos que permitam sua solubilização sem a formação de compostos indesejados, bem como de catalisadores capazes de converter eficientemente seus produtos sem sofrer desativação.

3.2.4 Oligomerização de etanol e isobutanol

Trata-se de um processo relativamente simples, e suas principais etapas realizadas nas indústrias químicas e na produção de combustíveis há décadas (Karatzos *et al.*, 2017). Nos últimos anos tem crescido o interesse em utilizar olefinas obtidas a partir de fontes renováveis, como o etileno e butilenos, obtidos a partir da desidratação do etanol e butanol, respectivamente (Mailaram *et al.*, 2021)

O processo pode ser dividido em três etapas principais: inicialmente, ocorre a desidratação do álcool, e a formação das olefinas correspondentes. Em seguida, essas olefinas são submetidas a reações de oligomerização, originando olefinas oligomerizadas, que posteriormente passam por um processo de hidrogenação, resultando em hidrocarbonetos saturados. Por fim, esses produtos são submetidos a uma etapa de purificação e fracionamento (Goh *et al.*, 2022)

Embora apresente maturidade tecnológica, pode ser economicamente desafiadora, devido ao elevado consumo energético, envolvendo reações altamente exotérmicas, e de difícil escalabilidade devido à necessidade de vários reatores e extensas instalações de trocadores de calor. Além disso, um grande desafio é que o biocombustível avançado final pode ter um preço inferior ao álcool utilizado como matéria-prima, tornando-se mais atraente comercialmente em países como o Brasil, onde o etanol é produzido em larga escala e apresenta um custo relativamente baixo (Karatzos *et al.*, 2017).

3.2.5 Hidrotermólise catalítica de óleo vegetal

O processo hidrotermal compreende uma sequência de reações químicas, tais como hidrólise, descarboxilação, craqueamento, ciclização e isomerização, responsáveis por converter os triglicerídeos presentes em substâncias graxas em uma

mistura de hidrocarbonetos. As reações ocorrem sob altas temperaturas entre 450 °C e 475 °C e pressões de aproximadamente 210 bar, na presença de água. Os produtos formados inicialmente passam por processos de melhoramento, como descarboxilação e hidrotratamento. Por fim, os produtos tratados são submetidos a uma etapa de fracionamento, permitindo a separação das frações de interesse, como o combustível sustentável de aviação e diesel verde (Wang; Tao, 2016).

Uma das principais vantagens desse processo é a possibilidade de utilizar matérias-primas úmidas, eliminando etapas de pré-tratamento exigidas por outras rotas tecnológicas. No entanto, essa tecnologia ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento e, até o momento, apresenta baixos rendimentos (Santos; Gasparetto; Salau, 2024).

3.3 CLASSIFICAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Há quatro principais categorias de matérias-primas para a produção de biocombustíveis, sendo classificadas como matéria-prima de primeira, segunda, terceira e quarta geração. Dentre essas quatro subdivisões, estão presentes diferentes vantagens, desvantagens e gargalos que devem ser administrados.

A maior parte dos biocombustíveis produzidos atualmente utilizam culturas alimentares como matéria-prima, como no caso do biodiesel ao utilizar o óleo vegetal de soja e o etanol, ao utilizar a cana-de-açúcar ou o milho, estes são os principais exemplos de biocombustíveis provenientes de matéria-prima de primeira geração. Embora apresentem como principais vantagens elevada eficiência energética, e exigir processos tecnológicos simples e baratos para a conversão e obtenção dos biocombustíveis, estes produtos levantam questões éticas sobre o crescente impacto no uso da terra, e na disponibilidade de alimentos (Sangeetha *et al.*, 2025).

Por sua vez, os biocombustíveis de segunda geração utilizam biomassa não alimentar como matéria-prima, como óleos vegetais não comestíveis, resíduos alimentares e agroindústrias. Não gerando competição com a destinação alimentícia e reduzindo os custos de aquisição de matéria-prima e a produção de resíduos, no entanto, grande parte destas matérias-primas alternativas requerem tecnologias avançadas de pré-tratamento, encarecendo o processo (Sangeetha *et al.*, 2025).

As matérias-primas de terceira e quarta geração são consideradas matérias-primas emergentes para a síntese de biocombustíveis e encontram-se em seus

estágios iniciais. As matérias-primas de terceira geração são derivadas de microrganismos como microalgas, as quais se destacam pela possibilidade de cultivo em áreas reduzidas e pelo rápido crescimento. Contudo, seu cultivo apresenta elevado custo e, em geral, baixo rendimento na produção de lipídios. O elevado teor de lipídios é geralmente uma característica de microalgas de crescimento lento. Nesse sentido, estão sendo desenvolvidos estudos voltados à identificação de espécies capazes de conciliar altos teores lipídicos com rápido crescimento, de modo a tornar o processo mais viável (Sangeetha *et al.*, 2025).

Embora esteja em estado inicial de pesquisa e desenvolvimento, a produção dos biocombustíveis de quarta geração compreende a utilização de microrganismos geneticamente modificados capazes de aumentar a produção de biocombustíveis e ampliar a captura de CO₂ da atmosfera, tendo como objetivo principal apresentar um impacto ambiental inferior as gerações anteriores (Sangeetha *et al.*, 2025).

3.4 AVALIAÇÕES ECONÔMICAS DA PRODUÇÃO DE DIESEL VERDE

A viabilidade econômica da produção do diesel verde é um fator determinante para sua inserção no mercado de biocombustíveis. De acordo com análise realizada por Barbosa *et al.*, (2023), o custo da produção do diesel verde supera o do biodiesel produzido pelo processo de transesterificação e sua viabilidade produtiva está fortemente dependente dos valores de mercado do óleo vegetal e do petróleo, presença de políticas públicas de incentivo e produção de hidrogênio.

Uma análise da produção industrial de diesel verde no Brasil, produzido a partir do óleo de soja, através da rota de hidrotratamento de óleos vegetais e suas perspectivas econômicas foi realizado por Barbosa *et al.*, (2023). Para a análise econômica, foi considerado como base o cenário econômico brasileiro entre o final do ano de 2021 e o início do ano de 2022. No cenário considerado, a produção de diesel verde no Brasil foi considerada economicamente inviável. O sistema de compressão de hidrogênio, que representou 92% do custo total em equipamentos, e o alto custo do óleo vegetal, no caso o óleo de soja, representando 55% dos custos totais de produção, são os principais desafios econômicos que afetam a viabilidade da produção no cenário proposto. Para o investimento ser compensado em 5 anos, o preço de venda do diesel verde precisaria atingir US\$ 2,08/L, tornando-o consideravelmente mais caro que os combustíveis comercializados no mercado

nacional (Barbosa *et al.*, 2023). Em comparação, no cenário econômico considerado, o preço do diesel S-10 era US\$ 0,89/L e, o preço do biodiesel era US\$ 1,27/L. Tornando o valor estipulado para a comercialização do diesel verde 2,13 vezes superior ao custo do diesel S-10 e 1,64 vezes mais caro que o biodiesel (Barbosa *et al.*, 2023).

A partir de uma revisão literária, Barbosa *et al.*, (2023), destaca a potencialidade da utilização de óleo de cozinha usado como matéria-prima e outros óleos vegetais também são comparados, entre eles o óleo de palma, carinata, pinhão-manso e camelina (Barbosa *et al.*, 2023), assim como a macaúba (Scaldaferri, 2019). Embora apresentem em sua maioria potencialidade, algumas barreiras surgem ao optar pelo uso de matérias-primas alternativas para a produção de biocombustíveis, como por exemplo, menor disponibilidade, etapas adicionais de pré-tratamento, ajustes econômicos (Barbosa *et al.*, 2023), e grande parte destas culturas oleaginosas alternativas, apresentam elevada rusticidade, ou seja, apresentam o melhoramento genético ainda incipiente e limitado a poucos estudos (Lanes; Kuki; Motoike, 2024).

O processo de hidrotratamento exige uma quantidade substancial de hidrogênio, especificamente, entre 7 e 16 mol de hidrogênio por mol de triglicerídeos. Esse elevado consumo afeta diretamente o custo geral da produção e uma preocupação significativa é que esse produto normalmente se origina de fontes fósseis, contradizendo a natureza renovável do diesel verde. Algumas estratégias são propostas para reduzir o custo da aquisição do hidrogênio, bem como para mitigar os impactos ambientais para sua obtenção (Barbosa *et al.*, 2023). Reutilizar subprodutos do processo de hidrotratamento como matéria-prima para a produção de hidrogênio é uma das propostas, como por exemplo o uso de propano, um subproduto gerado durante o processo de hidrotratamento, e que pode ser convertido em hidrogênio por meio da reforma a vapor, um processo químico que reage propano com vapor em altas temperaturas para produzir óxidos de hidrogênio e carbono. Ao implementar essa estratégia, até 75% das necessidades de hidrogênio poderiam ser atendidas.

Outro caminho promissor para reduzir significativamente o custo do investimento é a integração da produção de diesel verde em infraestruturas existentes de refinaria de petróleo (Barbosa *et al.*, 2023). Iniciativas por parte da Petrobras e Acelen Renováveis, visam transformar refinarias petroquímicas existentes em biorrefinarias para a produção de biocombustíveis avançados. A Petrobras anunciou um projeto que irá transformar a Refinaria Riograndese, em Rio Grande do Sul (RS),

em uma biorrefinaria (Agência Petrobras, 2025) e, a Acelen Renováveis pretende converter a Refinaria de Mataripe, na Bahia (BA), em uma biorrefinaria para a produção de biocombustíveis avançados (Acelen, 2023).

Os créditos de carbono podem também servir como ferramentas de fundamental importância para a sustentabilidade econômica da produção e comercialização do diesel verde no Brasil (Salvador; Salim; Toniolo, 2022). O Crédito de Descarbonização (CBIO) foi instituído pelo RenovaBio, como instrumento, para fins de comprovação da meta individual de redução de emissões de carbono, podendo ser comercializado por meio de plataformas de negociação (EPE, 2025).

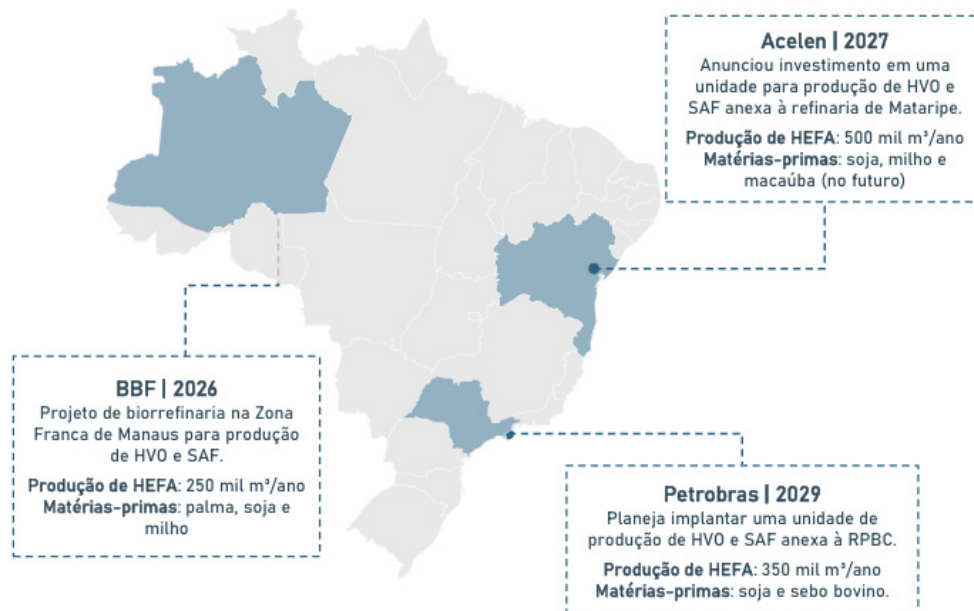
No entanto, algumas barreiras como a difícil rastreabilidade de culturas como a soja, devido principalmente à elevada diversidade de produtores e distintas possibilidades de aquisição destas matérias-primas, um grande volume de biocombustíveis produzidos não são elegíveis para a certificação (EPE, 2025). Por exemplo, enquanto as rotas de produção de etanol de cana-de-açúcar de primeira geração apresentaram 87,6% de produção certificada, a média do volume elegível à certificação nas usinas de biodiesel foi de apenas 41,8%. E enquanto 83% das usinas de etanol de cana-de-açúcar de 1º geração estão certificadas, somente 12% das usinas de biodiesel são certificadas (EPE, 2025). Evidenciando a necessidade de aprofundar a discussão sobre mecanismos e melhor estruturação do mercado de carbono para que garantam maior participação de usinas de biodiesel e diesel verde.

3.5 STATUS DA PRODUÇÃO NACIONAL E MUNDIAL DE DIESEL VERDE

3.5.1 Produção nacional de diesel verde

Os três principais projetos anunciados para a produção de biocombustíveis avançados no Brasil empregam a rota de hidrotratamento de óleo vegetal e envolvem empresas como Acelen Renováveis, Brasil BioFuels (BBF) e Petrobras, como ilustrado na Figura 3. Todas terão como matéria-prima principal ou secundário o óleo de soja. No entanto, há a perspectiva de ampliação do uso de outras matérias-primas graxas, como o óleo de palma e a macaúba, com o objetivo de diversificar a cadeia produtiva promover o desenvolvimento regional e fomentar a integração com de políticas públicas (EPE, 2024b), como o Selo Combustível Social, aplicado na cadeia produtiva do biodiesel.

FIGURA 3 – MAPEAMENTO DOS PRINCIPAIS PROJETOS DE BIORREFINARIAS NO BRASIL



FONTE: EPE (2024b).

A Brasil BioFuels (BBF) é responsável pela implementação da primeira biorrefinaria do país, localizada na Zona Franca de Manaus. A unidade, atualmente em fase de construção, tem previsão de início das operações em 2026. A principal matéria-prima será o óleo de palma cultivado pela própria empresa, complementado por óleo de soja e milho. A biorrefinaria terá capacidade para produzir 500 milhões de litros de biocombustíveis por ano (EPE, 2024c).

A Acelen Renováveis prevê investir mais de R\$ 12 bilhões dos próximos dez anos na produção de biocombustíveis avançados. A empresa está implementando, no estado da Bahia, uma biorrefinaria anexa à refinaria de Mataripe. A unidade prevê iniciar a produção no primeiro trimestre de 2026. Na fase inicial, o óleo de soja será a principal matéria-prima, devido à sua ampla disponibilidade e competitividade no país. Contudo, a empresa pretende substituir gradualmente essa matéria-prima pelo óleo de macaúba. Para isso, está previsto o cultivo da palmeira em uma área estimada de 180 mil hectares, com prioridade para o uso de terras degradadas. A capacidade de processamento da biorrefinaria será aproximadamente de 20 mil barris por dia, o que corresponde a 1 bilhão de litros por ano (Acelen, 2023)

O Programa BioRefino da Petrobras prevê investimentos da ordem de US\$ 1,5 bilhão no desenvolvimento de combustíveis avançados, conforme estabelecido no seu Plano de Negócios 2025 – 2029 (Agência Petrobras, 2025). Entre as iniciativas, destaca-se a implantação de uma biorrefinaria anexa à Refinaria Presidente Bernardes (RPBC), com capacidade estimada de 985 milhões de litros anualmente de biocombustíveis avançados, empregando uma mistura de 70% de óleo de soja e 30% de sebo bovino como matérias-primas (Agência Petrobras, 2023), com tem previsão de início das operações em 2029 (EPE, 2024). Além disso, estão em avaliação parcerias estratégicas com a Acelen e a Refinaria Riograndese, bem como estudos relacionados à rota tecnológica de oligomerização de álcoois, visando à produção de combustíveis a partir do etanol (Agência Petrobras, 2025). Há também projetos também em carteira de avaliação, sendo eles a implantação de plantas no Complexo Boaventura, com capacidade prevista de 19 mil barris por dia via hidrotratamento de óleos vegetais, e uma unidade na Refinaria de Paulínia (REPLAN), com capacidade de 10 mbpd via tecnologia de oligomerização de etanol (EPE, 2025b).

Recentemente, um acordo firmado entre a Raízen Energia S.A e a companhia SAFPAC Ltd., de Hong Kong, estabeleceu as bases para uma parceria estratégica voltada à produção de biocombustíveis avançados na região Ásia-Pacífico, com o uso de etanol brasileiro como insumo principal (MME, 2025).

3.5.2 Produção mundial de diesel verde

Mercados emergentes, como na América Latina, estão crescendo rapidamente, mas atualmente, os principais mercados de diesel verde estão localizados na Europa e nos Estados Unidos, os principais exemplos são a empresa Neste Oil Corporation e Diamond Green Diesel, as quais ocupam respectivamente, o primeiro e segundo posição de maiores produtores de diesel verde no mundo e chegam a produzir anualmente, cerca de 6 milhões de toneladas (Das, 2025).

A empresa finlandesa Neste Oil Corporation está entre as principais empresas mundiais na produção de diesel verde e combustível sustentável de aviação. Suas quatro unidades produtivas estão localizadas na Finlândia, em Roterdã e em Cingapura. A sua principal unidade, localizada em Cingapura, que atende toda a região europeia e a América do Norte, recebeu um investimento de 1,4 bilhão de euros em 2018, para expandir sua capacidade produtiva de 1,3 milhão de toneladas para

4,5 milhões de toneladas por ano até o ano de 2023. Atualmente, com capacidade produtiva de 4,5 milhões de toneladas por ano, é a líder mundial na produção de biocombustíveis *drop-in*. A tecnologia empregada pela empresa é comercializada sob a marca NExBTL®, *Next Generation Bio-to-Liquid* (Aslam *et al.*, 2022).

Em seguida, a empresa americana Diamond Green Diesel, a maior produtora de diesel verde na América do Norte e a segunda maior produtora mundial. Suas operações se iniciaram em 2013, com uma capacidade de produção inicial de 160 milhões de galões por ano, e atualmente apresenta capacidade produtiva de 1,2 bilhão de galões por ano, utilizando como matéria-prima gorduras animais, óleo de cozinha usado e óleo de milho não comestível (Diamond Green Diesel, 2025).

Apesar da relevância do tema, ainda é um desafio identificar com precisão a quantidade de plantas industriais em operação ou em construção no mundo, bem como seus respectivos volumes produtivos e capacidades instaladas. tornando a análise do panorama global do setor com enfoque principalmente nas principais industriais e empresas produtivas.

4 CONCLUSÃO

O uso excessivo e a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado medidas voltadas à redução da participação de energias não renováveis na matriz energética e ao desenvolvimento e utilização de fontes alternativas. No contexto nacional, aliado à vasta experiência técnica e ao conhecimento científico consolidado na produção de biocombustíveis convencionais, bem como às condições edafoclimáticas favoráveis e à ampla disponibilidade de matérias-primas, o Brasil apresenta elevada capacidade de desenvolvimento de biocombustíveis avançados, em especial o diesel verde.

Atualmente, a rota de maior maturidade e viabilidade tecnológica para sua produção é o hidrotratamento de óleos vegetais. Entretanto, sua competitividade frente aos biocombustíveis convencionais, como o biodiesel, ainda enfrenta barreiras econômicas e técnicas relacionadas à elevada demanda por hidrogênio, ao alto custo operacional, à maior complexidade dos processos envolvidos e aos grandes investimentos necessários para a implantação de novas biorrefinarias, podendo alcançar um valor de comercialização, em torno de US\$ 2,08/L, 2,13 vezes superior ao diesel S-10 (US\$ 0,89/L) e 1,64 vezes ao biodiesel (US\$ 1,27/L).

Esses desafios reforçam a importância do desenvolvimento e aplicação de estratégias que ampliem a competitividade, agreguem valor ao produto e garantam maior previsibilidade ao setor. Entre elas, destacam-se a integração da produção de diesel verde em refinarias petrolíferas já existentes, como em projetos conduzidos pela Petrobras e Acelen Renováveis, e o aproveitamento de óleos vegetais residuais e alternativos, que fortalecem a sustentabilidade ambiental e econômica e reduzem a dependência de culturas alimentícias, como a soja. Soma-se ainda a possibilidade de produção de hidrogênio a partir de subprodutos gerados no próprio processo, capaz de suprir até 75% da demanda interna, diminuindo a dependência externa e os gastos com a compra deste insumo.

Do ponto de vista regulatório, a Lei do Combustível do Futuro e o Programa Nacional do Diesel Verde representam avanços relevantes. No entanto, a Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2025, com base em dados de 2024, apontou que, enquanto o etanol de primeira geração alcançou 87,6% de produção certificada pela RenovaBio, o biodiesel registrou apenas 41,8%. Esse resultado decorre, sobretudo, da dificuldade em rastrear a matéria-prima oleaginosa, proveniente de múltiplos produtores e diferentes distribuidores, diferentemente do etanol, cuja produção e distribuição ocorrem próximas às plantas industriais. Tal contraste evidencia os desafios na certificação dos créditos de carbono e na agregação de valor sob os créditos de carbono a biocombustíveis como o biodiesel e, futuramente, o diesel verde.

Soma-se a isso a necessidade de amadurecimento das políticas públicas específicas para o setor, com vistas a ampliar a competitividade, garantir maior previsibilidade regulatória e econômica e impulsionar a adoção de estratégias que consolidem esse mercado. Apesar dos gargalos técnico-econômicos, conclui-se que o diesel verde se configura como uma oportunidade estratégica para o Brasil no contexto da transição energética, permitindo diversificar e expandir a participação de fontes renováveis na matriz energética, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e posicionar o país na liderança do cenário global de descarbonização.

REFERÊNCIAS

ACELEN. Acelen inova em combustíveis renováveis e investirá mais de R\$ 12 bi. 2024. Disponível em: [Acelen inova em combustíveis renováveis e investirá mais de R\\$ 12 bi - Comunicação | Acelen - Energia para acelerar](#). Acesso em: 10 set. 2025.

AGÊNCIA PETROBRAS. Com tecnologia Petrobras, Refinaria Riograndense é a primeira a produzir combustíveis com conteúdo celulósico no Brasil. 2025. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/com-tecnologia-petrobras-refinariariograndense-e-a-primeira-a-produzir-combustiveis-com-conteudo-celulosico-no-brasil>. Acesso em: 08 ago. 2025.

AGÊNCIA PETROBRAS. Petrobras contrata tecnologia para produção de bioquerosene de aviação e diesel 100% renovável. 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-contrata-tecnologia-para-producao-de-bioquerosene-de-aviacao-e-diesel-100-renovavel>. Acesso em: 08 ago. 2025.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº842/2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle de qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializam em território nacional. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, n. 91, p. 65, 17 mai. 2021. Disponível em: [Página 65 do Diário Oficial da União - Seção 1, número 91, de 17/05/2021 - Imprensa Nacional](#). Acesso em: 26 mai. 2025.

ASLAM, M.; KUMAR, H.; SARMA, K. A.; KUMAR, P. Current Status of the Green Diesel Industry. *In*: ASLAM, M.; MAKTEDAR, S. S.; SARMA, K. A. **Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel**. Singapura: Springer Nature, 2022. p. 264-283.

BARBOSA, I. V.; SCAPIM, L. A.; CAVALCANTE, R. M.; YOUNG, A. F. Industrial production of green diesel in Brazil: process simulation and economic perspectives. **Renewable Energy**, v. 219, p. 119591, dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119591>.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas. **Journal Of Transport Literature**, v. 10, n. 3, p. 15-19, set. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v10n3a3>.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 162, n. 196, p. 1, 9 out. 2024. Disponível em: [Página 1 do Diário Oficial da União - Seção 1, número 196, de 09/10/2024 - Imprensa Nacional](#).

CAO, X.; LI, L.; SHITAO, Y.; LIU, S.; HAILONG, Y.; QIONG, W.; RAGAUSKAS, A. J. Catalytic conversion of waste cooking oils for the production of liquid hydrocarbon biofuels using in-situ coating metal oxide on SBA-15 as heterogeneous catalyst. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, v. 138, p. 137-144, mar. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2018.12.017>.

DAS, A. Green Diesel: A Sustainable Hydrotreated Vegetable Oil-Based Biofuel. In: DAVE, V; KUILA, A. **Nanomaterials as a Catalyst for Biofuel Production, Clean Energy Production Technologies**. Singapore: Springer Nature, 2025. p. 21-38.

DAVIS, R.; TAO, L.; TAN, E. C. D.; BIDDY, M.J.; BECKMAN, G. T.; SCARLATA, C.; JACOBSON, J.; CAFFERTY, K.; ROSS, J.; LUKAS, J.; KNORR, D.; SCHOEN, P. **Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass to hydrocarbons: dilute-acid and enzymatic deconstruction of biomass to sugars and biological conversion of sugars to hydrocarbons**. Golden, United States: National Renewable Energy Lab - NREL, 2013. Relatório técnico NREL/TP-5100-60223. DOI: <https://doi.org/10.2172/1107470>.

DIAMOND GREEN DIESEL. About Diamond Green Diesel. Disponível em: <https://www.diamondgreendiesel.com/about-us>. Acesso em: 01 set. 2025.

DOUVARTZIDES, S. L.; CHARISIOU, N. D.; PAPAGERIDIS, K. N.; GOULA, M. A. Green Diesel: biomass feedstocks, production technologies, catalytic research, fuel properties and performance in compression ignition internal combustion engines. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 809, fev. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en12050809>.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis - Ano 2023**. Brasília, DF: EPE, 2024c. Disponível em: [Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2023](#). Acesso em: 28 ago. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2024**. Brasília, DF: EPE, 2025b. Disponível em: [Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2024](#). Acesso em: 28 ago. 2025.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2024**. Brasília, DF: EPE, 2025a. Disponível em: [Balanco Energético Nacional 2024](#). Acesso em: 28 ago. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil perspectivas futuras**. Brasília, DF: EPE, 2024b. Disponível em: [Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil Perspectivas Futuras](#). Acesso em: 28 ago. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Brasília, DF: EPE, 2024a. Disponível em: [Plano Decenal de Expansão de Energia 2034](#). Acesso em: 01 ago. 2025.

GAO, Y.; WANG, M.; RAHEEM, A.; WANG, F.; WEI, J.; XU, D.; SONG, X.; BAO, W.; HUANG, A.; ZHANG, S. Syngas Production from Biomass Gasification: influences of

feedstock properties, reactor type, and reaction parameters. **Acs Omega**, v. 8, n. 35, p. 31620-31631, ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.3c03050>.

GOH, B. H. H.; CHONG, C. T.; ONG, H. C.; SELJAK, T.; KATRAŁNIK, T.; JÓZSA, V.; NG, J.; TIAN, B.; KARMARKAR, S.; ASHOKKUMAR, V. Recent advancements in catalytic conversion pathways for synthetic jet fuel produced from bioresources. **Energy Conversion And Management**, v. 251, p. 114974, jan. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114974>.

GRUPO BBF. Biorrefinaria na Zona Franca de Manaus tornará realidade o “pré-sal” verde. 2023. Disponível em: <https://www.grupobbff.com.br/noticias/biorrefinaria-na-zona-franca-de-manaus-tornara-realidade-o-pre-sal-verde/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

KARATZOS, S.; VAN DYK, J. S.; MCMILLAN, J. D.; SADDLER, J. Drop-in biofuel production via conventional (lipid/fatty acid) and advanced (biomass) routes. Part I. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, v. 11, n. 2, p. 344-362, jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1746>.

KARGBO, H.; HARRIS, J. S.; PHAN, A. N. “Drop-in” fuel production from biomass: critical review on techno-economic feasibility and sustainability. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110168, jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110168>.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and bioprocessing**, v. 4, n. 1, p. 19, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>.

LANES, E.; KUKI, N. K.; MOTOIKE, Y. S. Melhoramento genético da macaúba. *In*: MOTOIKE, S. Y.; HILGER, T. **Macaúba**. Oficina de Textos: São Paulo, 2024.

MA, Y.; GAO, Z.; WANG, Q.; LIU, Y. Biodiesels from microbial oils: opportunity and challenges. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 263, p. 631-641, set. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.028>.

MAILARAM, S.; KUMAR, P.; KUNAMALLA, A.; SAKLECHA, P.; MAITY, S. K.; Biomass, biorefinery, and biofuels. *In*: DUTTA, S.; HUSSAIN, C. H. **Sustainable fuel technologies handbook**. Academic Press, 2021. p. 51-87. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01781-5>.

MME - Ministério de Minas e Energia. Alexandre Silveira participa da assinatura de acordo para produção de SAF entre Brasil e Hong Kong. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/alexandre-silveira-participa-da-assinatura-de-acordo-para-producao-de-saf-entre-brasil-e-hong-kong>.

MOHAMMED, A. S.; ATNAW, S. M.; RAMAYA, A. V.; ALEMAYEHU, G. A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics. **Journal Of The Energy Institute**, v. 108, p. 101227, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2023.101227>.

MOHIDDIN, M. N. B.; TAN, Y. H.; SEOW, Y. X.; KANSEDO, J.; MUBARAK, N.M.; ABDULLAH, M. O.; CHAN, Y. S.; KHALID, M. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: a review. **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, v. 98, p. 60-81, jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>.

NOGUEIRA, M. Brazil's Acelen to invest \$2.44 billion in renewable diesel business. **Reuters**. Rio de Janeiro, 15 abr. 2023. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/brazils-acelen-invest-244-billion-renewable-diesel-business-executives-2023-04-15/>. Acesso em: 08 ago. 2025.

NYSTRÖM, I.; BOKINGE, P.; FRANCK, P. **Production of liquid advanced biofuels-global status**. CIT Industriell Energi AB: Goteborg, Sweden, 2019.

PANAHI, H. K. S.; DEHHAGHI, M.; KINDER, J. E.; EZEJI, T. C. A review on green liquid fuels for the transportation sector: a prospect of microbial solutions to climate change. **Biofuel Research Journal**, v. 6, n. 3, p. 995-1024, set. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18331/brj2019.6.3.2>.

PRASAD, B. R.; PADHI, R. K.; GHOSH, G. A review on key pretreatment approaches for lignocellulosic biomass to produce biofuel and value-added products. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, v. 20, n. 6, p. 6929-6944, mai. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-022-04252-2>.

RAMBABU, K.; BHARATH, G.; SIVARAJASEKAR, N.; VELU, S.; SUDHA, P.N.; WONGSAKULPHASATCH, S.; BANAT, F. Sustainable production of bio-jet fuel and green gasoline from date palm seed oil via hydroprocessing over tantalum phosphate. **Fuel**, v. 331, p. 125688, jan. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125688>.

RODRIGUES, F. Acelen Renováveis inicia plantio de macaúba na Bahia. **BiodieselBR**, 22 mai. 2025. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macaba/acelen-renovaveis-inicia-plantio-de-macaba-na-bahia-220525>. Acesso em: 08 ago. 2025.

SALVADOR, G. V.; SALIM, V. M. M.; TONIOLO, F. S. Sustainability assessment of a decentralized green diesel production in small-scale biorefineries. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, v. 16, n. 6, p. 1527-1550, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.2419>.

SANGEETHA, V.; RANI, K. M.; KANNAN, K.; BABU, S. A.; DWARAKA, S. J. B. Green diesel: a critical review of feedstock diversity, catalytic innovations, and production challenges. **International Journal Of Green Energy**, p. 1-31, jun. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2025.2516039>.

SANTOS, L. S.; GASPARETTO, H.; SALAU, N. P. G. Technological maturity and future perspectives for green diesel production in Brazil. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 10, p. 100127, dez. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clce.2024.100127>.

SCALDAFERRI, C. A. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para a produção de bioquerosene de aviação e diesel verde**. 2019. 148 f. Tese (Doutorado em Ciências – Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-BAUPRS>.

VAN DYK, S.; SU, J.; SADDLER, J. Update on Drop-In Biofuel and Co-Processing Commercialization. IEA Bioenergy: Task 39. 2024 IEA Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/IEA-Bioenergy-Task-39-drop-in-biofuels-and-co-processing-report-June-2024.pdf>.

WANG, W.; TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 53, p. 801-822, jan. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016>.