

Diesel Verde: Aspectos de Produção e Perspectivas

Green Diesel: Production Aspects and Perspectives

Gabriel Felizola de Soroa,^a Grace Ferreira Ghesti,^{a,*} Juliana Petrocchi Rodrigues,^b Paulo Anselmo Ziani Suarez^b

^aUniversidade de Brasília, Instituto de Química, Laboratório de Materiais, Combustíveis e Bioprocessos Cervejeiros, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil

^bUniversidade de Brasília, Faculdade do Gama, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil

*E-mail: grace@unb.br

Submissão: 05 de Fevereiro de 2025

Aceite: 20 de Agosto de 2025

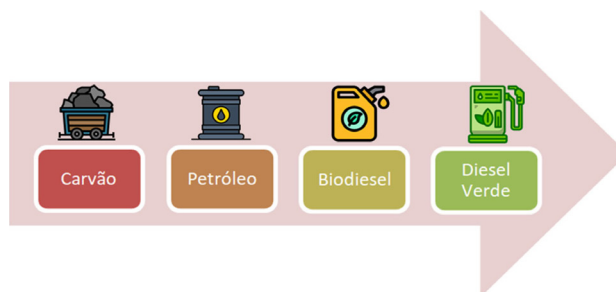
Publicado online: 29 de Agosto de 2025

This article addresses the challenges of the energy transition, focusing on reducing dependence on fossil fuels. It aims to analyze how Brazilian public policies have influenced the country's energy matrix, significantly contributing to the development and commercial use of biofuels. Additionally, it critically evaluates the necessary measures for the adoption of green diesel, a fuel more similar to mineral diesel that can be used in its entirety, without requiring a blend, as opposed to biodiesel. To achieve this, the key differences between these two types of fuels are discussed, including an evaluation of established and emerging raw materials, highlighting their economic and environmental advantages and disadvantages. The article also explores the main production routes for biodiesel and green diesel, emphasizing their technical aspects and the role of catalysis in the synthesis of biofuels. Finally, the need for investments in biofuel synthesis is analyzed to expand sustainable production, significantly contributing to the reduction of gas emissions and enhancing the country's energy security.

Keywords: Biofuels; sustainability; energy; catalysis; policies; hydrotreatment.

1. Introdução

O rápido crescimento industrial, diretamente atrelado à demanda energética, proporcionou diversos benefícios para a humanidade.¹ No entanto, as consequências causadas pela atividade industrial começam a ser cada vez mais notáveis ao longo dos anos, em forma de mudanças climáticas.¹⁻³ Diversos esforços são feitos para reduzir o impacto ambiental causado pelo ser humano, sendo o principal deles a mudança de uma matriz energética puramente sustentada no petróleo para uma mais diversificada e sustentável. Com isso, ao longo da última década, ocorreu o advento dos biocombustíveis.⁴⁻⁶



Esquema 1. Transição de matriz energética em transportes

Muito se comenta sobre o impacto que o biodiesel proporcionou no transporte rodoviário;⁷ contudo a necessidade de complementação da matriz energética com combustíveis que sejam mais socioeconômico e ambientalmente melhores é essencial.⁸ Nesse contexto, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)⁹ da Organização das Nações Unidas (ONU) desempenham um papel central, especialmente no que diz respeito à transformação do setor energético. O avanço em direção a uma matriz energética sustentável está diretamente alinhado com diversas metas estabelecidas pelos ODS, como o objetivo de assegurar energia limpa, promover uma industrialização sustentável e tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas. Associados a tais fatores, o desenvolvimento de novas tecnologias foi impulsionado, e um dos resultados mais relevantes é a produção do diesel verde.¹⁰

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) define como biocombustível qualquer biomassa renovável que tenha passado por processos químicos para substituir, de forma total ou parcial, combustíveis fósseis na geração de energia, em especial

para motores a combustão interna.¹¹ Por essa definição tanto o biodiesel quanto o diesel verde são caracterizados como biocombustíveis, contudo ambos apresentam diferenças cruciais. Diferentemente do biodiesel, que é obtido por meio de reações de esterificação ou transesterificação, nas quais os triglicerídeos são convertidos em ésteres, o diesel verde pode ser produzido por diversas rotas tecnológicas.¹²

De acordo com a Resolução nº 842/2021 da ANP, o diesel verde pode ser obtido a partir de cinco processos principais: conversão de biomassa em gás de síntese *via* processo Fischer-Tropsch; fermentação de carboidratos oriundos de biomassa; oligomerização de álcoois, como etanol ou isobutanol; hidrotermólise catalítica; e hidrotratamento de óleos vegetais (in natura ou residuais), óleo de algas, gordura animal e ácidos graxos derivados de biomassa.¹³ Dentre essas rotas, destaca-se o processo de hidrotratamento de óleos vegetais, conhecido como HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), por ser a alternativa mais consolidada e amplamente adotada em escala comercial.¹² Nesse processo, os triglicerídeos são convertidos em hidrocarbonetos por meio de reações de hidredesoxigenação, descarboxilação e descarbonilação, resultando em um combustível com propriedades similares às do diesel fóssil. Logo, percebe-se que uma diferença crucial entre estes combustíveis é a presença de oxigênio,¹⁴ a qual acarretará diversas outras. Uma das principais é o fato de que o biodiesel é mais suscetível a sofrer oxidações e polimerizações durante seu transporte e armazenamento,¹⁵ além de ser pouco verossímil ao diesel mineral em termos de propriedades físico-químicas,¹⁶ conforme elencado na Tabela 1.

Esta revisão tem como objetivo analisar a principal rota de obtenção de biocombustíveis, com ênfase na *via* mais consolidada em escala industrial, o processo HEFA. São discutidas as distinções técnicas e estruturais entre o diesel verde e o biodiesel, bem como as principais matérias-primas empregadas em sua produção, abrangendo desde fontes tradicionalmente utilizadas até alternativas emergentes. A revisão também contempla os aspectos catalíticos envolvidos, com destaque para a seletividade dos catalisadores. Por fim, são abordadas as principais dificuldades à inserção dos biocombustíveis na matriz energética global, assim como suas perspectivas frente à transição energética e às metas de sustentabilidade.

1.1. Contexto brasileiro

Assim como muitos países estipularam políticas

públicas para estimular o desenvolvimento e a adoção de biocombustíveis em suas matrizes energéticas, com o objetivo de reduzir a dependência do petróleo, no Brasil não foi diferente.¹⁸ A Figura 1 ilustra como o petróleo ainda se faz presente na matriz brasileira, mesmo com diferentes fontes energéticas.

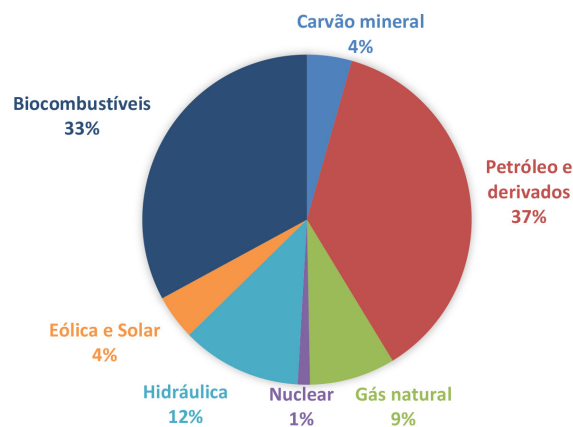


Figura 1. Matriz energética brasileira em 2023 (adaptado da referência 19)

Suarez *et al.*²⁰ retratam a evolução das políticas de biocombustíveis no Brasil a partir da década de 1970. Devido à crise do petróleo em 1973, o governo brasileiro criou o Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), em 1975, que tinha por objetivo regular e implementar o uso de etanol anidro em mistura com a gasolina, inicialmente com 5% de álcool.²¹ Atualmente, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabelece os valores de 18 e 27,5% como os limites inferior e superior de etanol na gasolina, respectivamente.²² Esse aumento nos limites contribuiu diretamente para o aumento da produção de etanol, conforme mostra a Figura 2.

Posteriormente, teve-se a criação em 1980, do Plano de Produção de Óleos Vegetais para fins energéticos (PROOLEO) o qual tinha como meta inicial estabelecer uma mistura de 30% de óleos vegetais ou derivados com diesel mineral. Contudo, tal plano foi descontinuado em 1986 devido à redução dos preços do barril de petróleo.²⁰ Somente em 2003, as discussões sobre o uso de biocombustíveis, em especial o biodiesel, reacenderam, levando à criação do Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel (PROBIODIESEL), com o objetivo de desenvolver biodiesel oriundo de óleos vegetais, em parceria com centros de pesquisa, para que fosse adicionado ao diesel

Tabela 1. Propriedade físico-químicas do biodiesel, diesel verde e diesel mineral (adaptado da referência 17)

Tipo de Combustível	Oxigênio (%)	Densidade (kg m ⁻³)	Viscosidade (mm ² s ⁻¹)	Poder Calorífico Inferior ^a (MJ Kg ⁻¹)	Número de Cetano ^b
Biodiesel	10,6	850 a 900	3 a 6	37	60
Diesel Verde	0	770 a 790	2 a 4	44	70
Diesel Mineral	0	815 a 850	2 a 4,5	42	48

^a Poder calorífico inferior refere-se à quantidade de calor gerada pela combustão de uma quantidade específica tendo a água resultante em seu estado gasoso;

^b Número de cetano é um indicador da velocidade de combustão e compressão necessário para a ignição do combustível.

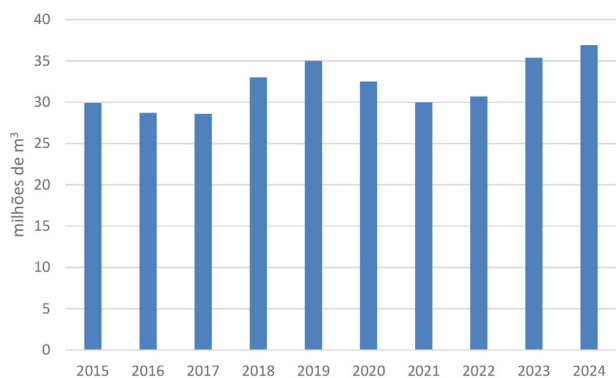


Figura 2. Evolução da produção de etanol (adaptado da referência 23)

derivado do petróleo.²⁴

Entretanto, o Brasil só começou sua consolidação como um dos principais produtores de biodiesel do mundo a partir da criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) em dezembro de 2004, conforme Coronado *et al.*²⁵ O programa adotou uma variedade de aspectos nacionais, como a relevância da agricultura familiar e as principais matérias-primas disponíveis, para estabelecer as bases de produção e comercialização de biodiesel.²⁶ Contudo, somente com a lei 11.097 de 2005, foi adotada a implementação de uma mistura de 5% de biodiesel com 95% de diesel.²⁷ Atualmente, a porcentagem obrigatória de biodiesel definida pelo CNPE é de 14% para a mistura, com aumento de 1% anualmente a partir de março de 2025, até atingir 20% em 2030.²⁸ O acréscimo constante de biodiesel e sua consequente produção, conforme elencado na Figura 3, possibilitam uma mudança gradual na matriz energética que se adapte à produção interna, algo positivo para a economia brasileira.

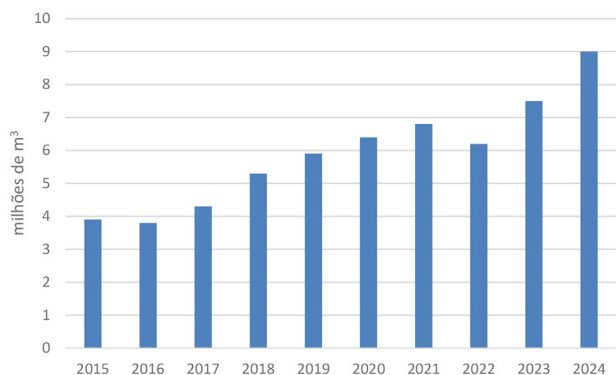


Figura 3. Evolução da produção de biodiesel no Brasil (adaptado da referência 23)

Além disso, Coronado *et al.*²⁵ ressaltam a iniciativa do Ministério de Minas e Energia (MME) com a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que avalia e propõe melhorias na política e regulamentação de biocombustíveis nacionais, propondo três pontos específicos. O primeiro ponto diz respeito à redução de gases causadores do efeito estufa (GEE), com metas até 2032. O segundo

eixo é a certificação da produção de biocombustíveis, de forma a aumentar a oferta nacional; e, por fim o crédito de descarbonização em cumprimento às metas estabelecidas pela ANP.²⁹

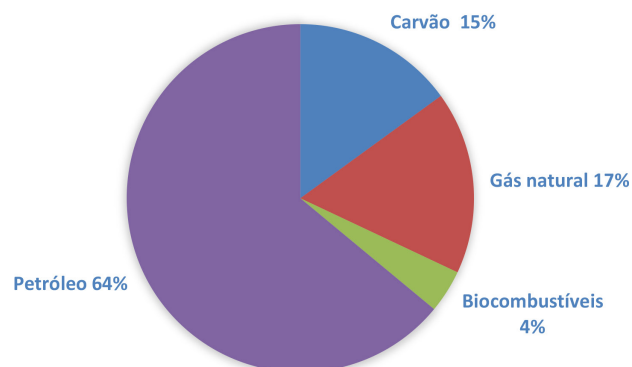
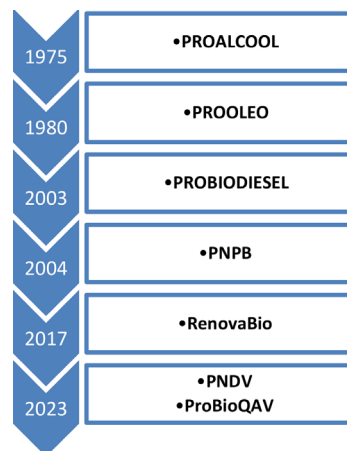


Figura 4. Emissões de Gases Causadores do Efeito no Brasil em 2021 (adaptado da referência 30)

Em 2023, o governo brasileiro instituiu o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV),³¹ juntamente com o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), os quais fazem parte do projeto de lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024, conhecido como “Lei dos Combustíveis do Futuro”, que serve para incentivar a produção desses biocombustíveis, bem como a adoção na matriz de transportes para reduzir os GEE.³²



Esquema 2. Evolução das políticas brasileiras de biocombustíveis

O Brasil não só se apresenta como o maior produtor de biocombustíveis da América Latina, como também é uma potência global, em especial na produção de etanol de 2ª geração e biodiesel.³³ Um dos motivos que levam a isso é a forte presença da agroindústria, assim como o desenvolvimento de políticas públicas instituídas de forma constante, conforme mostrado no Esquema 2, as quais contribuem significativamente para o grande uso de energias renováveis na matriz energética.

No entanto, é nítido que as iniciativas para a implementação de novas fontes, especialmente o diesel

verde, ainda se apresentam num estado imaturo quando comparadas ao biodiesel e a países desenvolvidos que apresentam alta demanda, conforme elencado na Figura 5.

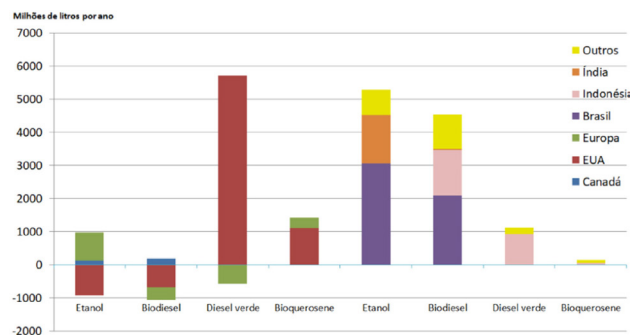


Figura 5. Demanda de biocombustíveis em 2023 (adaptado da referência 34)

Portanto, é necessário dar continuidade aos debates para o desenvolvimento de novas programas e leis voltados ao uso de biocombustíveis mais ambientalmente limpos e eficientes, como o diesel verde, e à ampliação do uso de biocombustíveis em outros meios de transporte, como no caso da aviação e do respectivo combustível sustentável de aviação (SAF).

1.2. Classificação

Assim como o diesel mineral apresenta aspectos físico-químicos diferentes dependendo da região do planeta de onde foi extraído, os biocombustíveis também apresentam propriedades diferentes, dependendo do tipo de matéria-prima utilizada.³⁵ No entanto, como a amplitude de matérias-primas é muito maior em comparação às fontes fósseis, faz-se necessário uma classificação dos biocombustíveis. Segundo Nigam e Singh,³⁶ os biocombustíveis são divididos em quatro gerações, baseadas no tipo de matéria-prima utilizada para sua produção. Essa classificação é aplicada tanto ao biodiesel quanto ao diesel verde, conforme adotado por Cremonez.²⁴ A 1ª geração faz referência aos biocombustíveis obtidos a partir de óleos vegetais de uso comercial, como de soja, canola e girassol. Em contrapartida, a 2ª geração envolve o uso de óleos não consumíveis. O uso de óleos residuais, como óleo de cozinha, bem como de gorduras e resíduos orgânicos em geral, enquadra-se na 3ª geração de biocombustíveis. Por fim, a 4ª geração utilizada uma matéria-prima menos conhecida e pouco desenvolvida tecnologicamente, que é o óleo obtido a partir de microalgas.

1.2.1. Primeira geração (óleos vegetais)

A 1ª geração é a principal contribuinte na produção de biocombustíveis. Isso se deve ao seu processamento já estar consolidado e ser adotado em diversas biorrefinarias ao redor do mundo.³⁷ Apesar de existirem diversas espécies vegetais que possuem óleos, é necessário que alguns critérios sejam atendidos para que uma espécie seja considerada viável, conforme abordado por Gui *et al.*,³⁸ em seu trabalho. A mais

lógica é o teor de óleo da planta, visto que algumas possuem alta razão de massa de óleo por hectare. A segunda diz respeito à composição do óleo em si, pois cada óleo apresenta uma composição de ácidos graxos diferente, que influencia diretamente nos aspectos físico-químicos do biocombustível. Os requisitos de cultivo das biomassas também são relevantes, visto que certas espécies são mais bem adaptadas a climas específicos e têm uma época determinada de plantio e colheita. Logo, cada país faz uso de um óleo diferente. Por fim, o custo da biomassa é um fator-chave já que a maior parte do custo de produção de biocombustíveis está no preço da matéria-prima.³⁸ No Brasil, a principal fonte de biomassa usada para produção de biodiesel é a soja.³⁹ Esta é empregada em larga escala para suprir a demanda interna por biodiesel, que é adicionada em mistura ao diesel mineral por exigência legal.⁴⁰ No entanto, diversas outras espécies vegetais são estudadas para ampliar a produção brasileira, como é o caso do óleo de palma.⁴¹ Conforme mencionado anteriormente, dependendo do país, o tipo de biomassa utilizada será diferente, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Óleos comestíveis empregados na produção de diesel verde: principais matérias-primas e principais países produtores

Óleos	Principais Países Produtores	Referências
Palma	Malásia, Indonésia	42–45
Soja	Brasil, Estados Unidos	46–52
Canola/Colza	Alemanha, Canadá, França	42,52–57
Girassol	Espanha, Grécia, Rússia	52,58–62
Milho	China, Estados Unidos	52,63–65
Algodão	Índia, Paquistão, Europa	66–69

Óleos como o de palma e soja são amplamente utilizados devido à sua alta produção global, enquanto outros óleos, como os de canola e girassol, são escolhidos por suas disponibilidades regionais. Apesar do potencial dos óleos vegetais como fonte energética renovável, uma das principais objeções ao seu uso reside na concorrência por áreas aráveis para produção de alimentos e na aplicação direta desses óleos na alimentação humana, somando-se a isso o alto custo das matérias-primas.⁷⁰ No entanto, no caso brasileiro, essa dinâmica apresenta nuances distintas, já que uma parcela significativa da soja cultivada é exportada sem processamento, o que revela uma disponibilidade para produção de biocombustíveis sem comprometer a segurança alimentar. Esse contexto posiciona o Brasil de forma estratégica no cenário global, com potencial para equilibrar produção energética e demanda por alimentos de maneira mais sustentável.

Aliado a isso, e sabendo que a demanda por biocombustíveis tende a aumentar exponencialmente conforme os dados da Agência Internacional de Energia (IEA), descritos na Figura 6, é importante buscar outras fontes para produção de biocombustíveis de forma suprir essa demanda; por conseguinte, o desenvolvimento tecnológico das outras gerações tende a se acentuar.

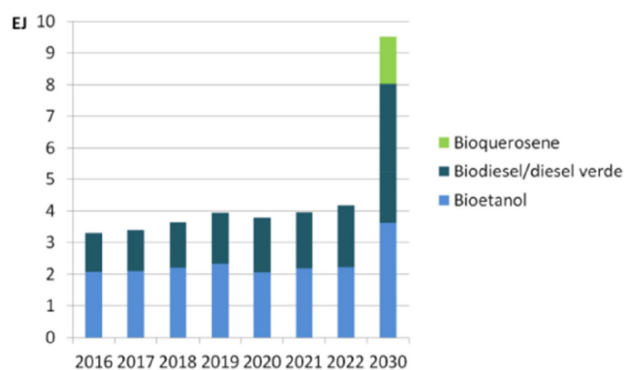


Figura 6. Demanda global de biocombustíveis em transportes (adaptado da referência 71)

1.2.2. Segunda geração (óleos não comestíveis)

Baseando-se na crítica ao uso de óleos comestíveis para geração de energia, adotou-se como alternativa a utilização de óleos não comestíveis, desde que sigam os critérios abordados anteriormente.⁷² Contudo, apesar de ainda necessitar de extensas áreas para um rendimento satisfatório de biocombustível, os países que utilizam tais matérias-primas aproveitam-se das suas condições climáticas ou topográficas para produção de seus óleos. Alguns tipos de óleos não comestíveis se encontram na Tabela 3, juntamente com os países que desenvolvem pesquisas sobre eles.

Tabela 3. Principais tipos de óleos não comestíveis para produção de diesel verde

Óleos	Países	Referência
Jatrofa	Qatar, Indonésia, Malásia	42,73-76
Pongâmia	Índia	77,78
Neem	Índia	69,79,80
Rícino/Mamona	Brasil, Colômbia	81-85
Crambe	Brasil	86-88

Portanto, os óleos não comestíveis, apesar de ainda apresentarem limitações quanto à sua produção, mostram-se como uma alternativa viável para evitar o uso de óleos comerciais, que têm um custo elevado para a produção de biocombustíveis devido à sua grande demanda para uso diário, possibilitando a diversificação de fontes para biocombustíveis, de forma a atender à demanda crescente.

1.2.3. Terceira geração (óleos residuais e gorduras)

A 3ª geração utiliza recursos comumente descartados na agroindústria, como gorduras animais, para a geração de energia. Com isso, rebate as principais críticas tanto da 1ª quanto da 2ª geração e ainda aplica os princípios da economia circular para gerar produtos de maior valor agregado. As fontes mais comuns na 3ª geração são: óleos vegetais residuais; resíduos industriais, especificamente provenientes da agroindústria; e gorduras animais, como sebo bovino e banha de porco.⁸⁹ Um dos pontos positivos é que resíduos como óleo de cozinha usado e gorduras animais podem ser utilizado em qualquer país, visto que não dependem de

condições locais específicas, como nas gerações anteriores. Ademais, o uso de resíduos, principalmente provenientes da agroindústria, corrobora para mitigação da poluição e, consequentemente, dos efeitos ambientais adversos. Por exemplo, na pesquisa de Ashok *et al.*,⁹⁰ é utilizada a casca de limão para a produção de diesel verde e combustível sustentável de aviação (SAF). No caso brasileiro, o país possui uma enorme variedade de frutas que, ao serem consumidas, geram resíduos, podendo ser suas cascas ou caroços. Muitas vezes, tais resíduos apresentam alto teor de lipídios, como é o caso do endocarpo de macaúba,⁹¹ uma palmeira tipicamente brasileira, e que tem uma composição química favorável à produção de biocombustíveis sólidos, como o biocarvão, além de biodiesel e diesel verde.⁹² Outros exemplos tipicamente brasileiros são a castanha de caju⁹³ e caroço de pequi.⁹⁴ Apesar de se ter vários exemplos de resíduos provenientes de frutas os mais consolidados globalmente para a produção de diesel verde são o óleo de cozinha⁹⁵⁻⁹⁷; gordura de frango⁹⁸ e caroço de tâmara.⁹⁹

No entanto, a obtenção de biocombustível derivado de resíduos está sujeita a três problemas. O primeiro refere-se à infraestrutura adequada para a coleta dos resíduos, líquidos ou sólidos, que são reaproveitados. O segundo considera o processo de pré-tratamento dos resíduos para se obter um óleo livre de contaminantes e impurezas, visto que tais processos podem ser custosos e complexos para garantir um produto com aspectos físico-químicos aceitáveis para aplicação como combustível. Por fim, os resíduos não podem ser armazenados por muito tempo devido à contaminação pela sua degradação natural.

1.2.4. Quarta geração (algas)

Apesar de a tecnologia para produção de biocombustíveis a partir de algas ainda ser imatura,¹⁰⁰ ela é muito promissora, visto que certas algas apresentam alto teor de lipídios. Por exemplo, as espécies *Scenedesmus dimorphus* e *Prymnesium parvum* podem apresentar até 40% de composição lipídica.¹⁰¹ As grandes vantagens da 4ª geração são o alto rendimento de biomassa e possibilidade do cultivo em regiões com condições ambientais variadas, visto que pode ser produzida tanto em águas doces, salobras e salgadas, além de apresentar um ciclo de colheita curto.¹⁰² Outro fator é que, por sua produção não ocorrer em terra, não há o risco de competição por áreas com a indústria agrícola; além disso, no crescimento, as algas necessitam absorver CO₂, o que contribui para mitigar suas emissões.^{103,104} Em relação à matéria-prima, utilizam-se dois tipos de algas: microalgas e macroalgas, sendo as primeiras preferidas por seus aspectos físico-químicos e de produção.¹⁰⁵

O trabalho de Brennan e Owende¹⁰⁶ and it involves operational efficiency, minimisation of environmental impact and socio-economic considerations; all of which are interdependent. It has become increasingly obvious that continued reliance on fossil fuel energy resources is unsustainable, owing to both depleting world reserves and the green house gas emissions associated with their use.

Therefore, there are vigorous research initiatives aimed at developing alternative renewable and potentially carbon neutral solid, liquid and gaseous biofuels as alternative energy resources. However, alternate energy resources akin to first generation biofuels derived from terrestrial crops such as sugarcane, sugar beet, maize and rapeseed place an enormous strain on world food markets, contribute to water shortages and precipitate the destruction of the world's forests. Second generation biofuels derived from lignocellulosic agriculture and forest residues and from non-food crop feedstocks address some of the above problems; however there is concern over competing land use or required land use changes. Therefore, based on current knowledge and technology projections, third generation biofuels specifically derived from microalgae are considered to be a technically viable alternative energy resource that is devoid of the major drawbacks associated with first and second generation biofuels. Microalgae are photosynthetic microorganisms with simple growing requirements (light, sugars, CO₂, N, P, and K) e) etapas de produção, processamento e extração dos biocombustíveis a partir de microalgas. A produção de microalgas apresenta dois tipos principais: cultivo em tanques abertos e em fotobiorreatores. Já os métodos de processamento mais usuais são floculação, flotação, centrifugação e filtração. As diferenças em termos de eficiência e capital são pouco significativas, sendo que o método é escolhido com base nas características das algas cultivadas como, densidade e tamanho. Por fim, a tecnologia de conversão da biomassa é dividida em duas grandes vertentes: a conversão termoquímica e conversão

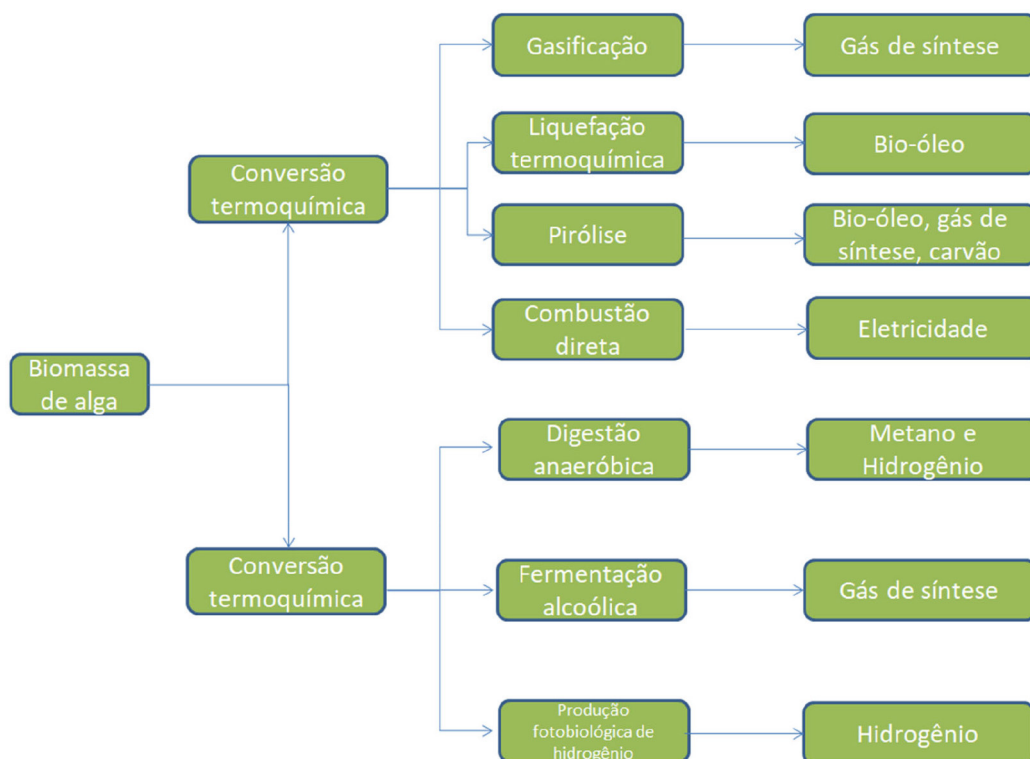
bioquímica. Cada tipo de conversão apresenta subgrupos que serão selecionados dependendo do produto final desejado, conforme elencado no Esquema 3.

Apesar de possuírem excelentes aspectos e perspectivas, os desafios para a produção de biocombustíveis de 4ª geração estão associados aos altos custos operacionais, tanto para produção quanto para extração, o que as torna economicamente inviáveis, além das dificuldades tecnológicas de escalabilidade.^{107,108} harvesting, dewatering, oil extraction, conversion, and other logistical steps. The National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts (NAABB) Portanto, é necessário um maior estudo para aprimorar as técnicas, de forma a competir com as outras gerações, que são mais consolidadas.

2. Rotas de Produção de Biodiesel e Diesel Verde

2.1. Transesterificação

Conforme comentado anteriormente, o biodiesel é produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais, que são ricos em triglicerídeos.¹⁰⁹ Essa matéria-prima passa por uma reação de transesterificação, na qual um álcool primário, normalmente metanol ou etanol, reage com os triglicerídeos, requerendo catalisadores como hidróxido de potássio e sódio,¹¹⁰ que são bases fortes, para formar ésteres e glicerina como subproduto. O Esquema 4 mostra a rota de transesterificação.



Esquema 3. Conversão de microalgas (adaptado da referência 106)

Os substituintes R^1 , R^2 e R^3 são referentes à cadeia de hidrocarbonetos de grande extensão, normalmente denominadas de ácidos graxos. Além de metanol e etanol, podem ser utilizados propanol, isopropanol e butanol. Quanto ao uso de catalisadores, opta-se por catalisadores básicos como NaOH e KOH devido à sua alta seletividade em comparação com catalisadores ácidos.¹¹¹

A geração de coprodutos normalmente é vista como um fator negativo quando se busca tecnologias mais sustentáveis; no entanto a glicerina obtida no processo de transesterificação pode ser utilizada em outros processos industriais, quando separada por métodos físicos, como a centrifugação.

A presença de grupos oxigenados no biodiesel gera várias consequências. Algumas das mais significativas são a baixa estabilidade oxidativa durante o armazenamento e a diferença de desempenho nos motores, devido à disparidade nas propriedades físico-químicas em relação ao diesel mineral, fator que leva à necessidade do biodiesel ser adotado em mistura com combustível fóssil nos motores.

Uma diferença pouco comentada, porém, mais relevante em ambientes de clima frio, é a ocorrência da solidificação do combustível em baixas temperaturas, o que reduz a performance e torna necessária a mistura com o diesel mineral.

Um ponto importante é a utilização de solventes químicos para a produção de biodiesel, o que afeta negativamente a avaliação ambiental do combustível em seu ciclo produtivo, pois os solventes, às vezes, não podem ser reaproveitados,

não são obtidos a partir de processos sustentáveis ou poderiam ser utilizados para outras finalidades.

2.2. Hidrotratamento

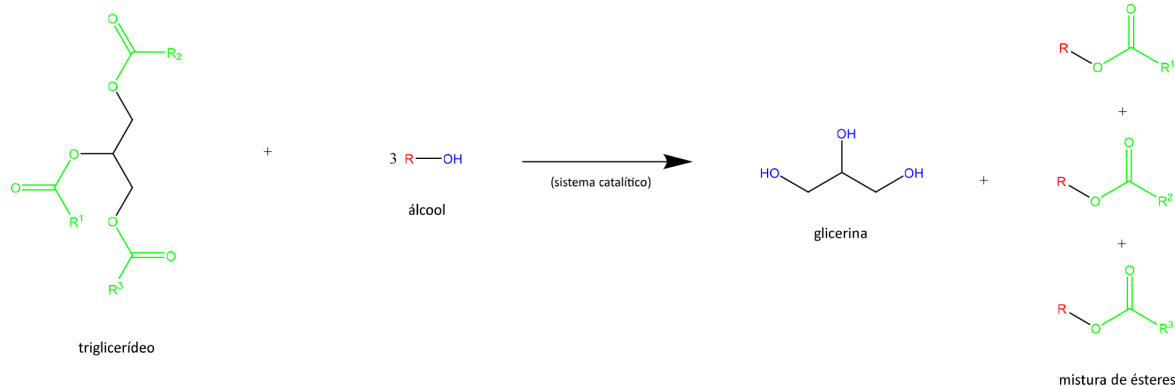
Diferentemente do biodiesel, o diesel renovável, comumente citado na literatura de *hydrotreated vegetable oil* (HVO), é obtido por meio de hidrotratamento. Esse processo pode ser simplificado como a hidrogenação dos ácidos graxos constituintes dos óleos e gorduras, submetidos a temperaturas entre 200 e 600°C e pressões entre 1 e 10 MPa na presença de um catalisador metálico,¹¹² seguida do craqueamento dos triglicerídeos hidrogenados, resultando em ácidos graxos livres que são transformados em uma mistura de hidrocarbonetos.¹¹³

A conversão dos ácidos graxos livres se dá através de três tipos de reações que se dão concomitantemente: hidrodessoxigenação, descarboxilação e descarbonilação.¹¹⁴ É importante ressaltar que o caminho da reação pode ser influenciado pelo tipo de catalisador utilizado e pelas condições reacionais.

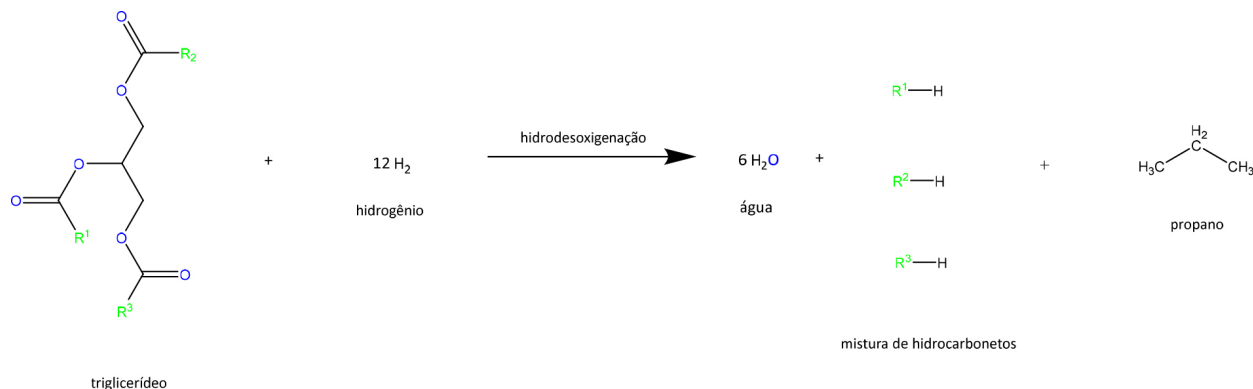
2.2.1. Hidrodessoxigenação

A hidrodessoxigenação envolve a remoção de átomos de oxigênio de moléculas de triglicerídeos através da adição de H_2 e um catalisador.

Percebe-se que a hidrodessoxigenação, apesar de necessitar de uma alta quantidade de H_2 , não gera



Esquema 4. Reação de transesterificação



Esquema 5. Reação de hidrodessoxigenação

coprodutos relacionados aos GEE, sendo que todos os produtos possuem finalidades úteis. No entanto, apesar de sua alta eficiência, essa rota é menos preferida devido aos elevados requerimentos de hidrogênio e à formação de intermediários, como aldeídos, sendo sua adoção mais comum em escala industrial, como no caso da refinaria da Neste, na Finlândia.¹¹⁵

2.2.2. Descarboxilação

O processo de descarboxilação ocorre com a remoção de grupos carboxila (-COOH) de uma molécula de triglicerídeo na presença de H_2 e um catalisador.

Diferentemente da hidrodessoxigenação, o consumo de gás hidrogênio é bastante reduzido na descarboxilação; no entanto, há a formação de CO_2 , em vez de H_2 , o que não é benéfico por ser um GEE.

2.2.3. Descarboxilação

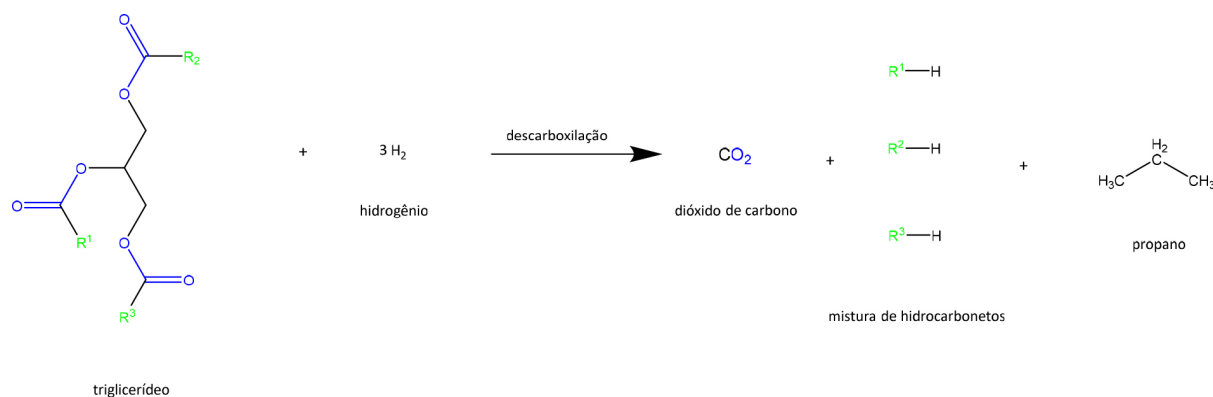
A descarboxilação acontece de forma similar a descarboxilação, no entanto ao invés de um grupo carboxila a remoção é do grupo carbonila (C=O)

A reação de descarboxilação pode ser considerada um meio termo entre as reações apresentadas anteriormente, tanto no consumo de H_2 quanto na formação de subprodutos, destacando-se a geração de monóxido de carbono, um gás mais nocivo que o CO_2 . Apesar de o diesel verde ser uma alternativa superior ao biodiesel, ainda apresenta certas limitações.

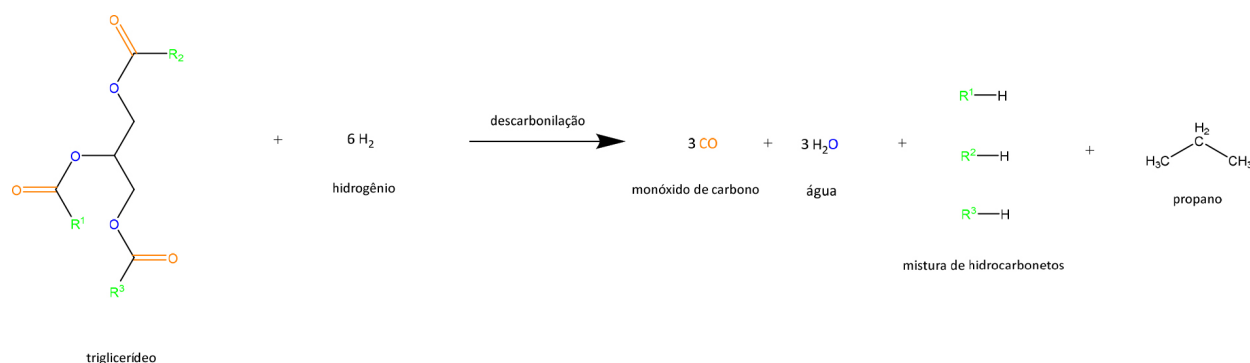
O hidrotreatamento necessário para produção de diesel verde é relativamente mais custoso que a transesterificação, devido ao uso de H_2 e dos catalisadores metálicos, já que em alguns casos metais preciosos como platina são utilizados. O requerimento de quantidades significativas de H_2 torna-se ainda mais relevante quando se considera a sustentabilidade do processo como um todo, pois, se o gás se não for obtido por meios renováveis (hidrogênio verde) podem ocorrer impactos ambientais. Por isso, o desenvolvimento de tecnologias como a reforma do biogás para obtenção de H_2 é imprescindível. Além disso, as condições operacionais, com altas temperaturas normalmente entre 200 e 600°C e pressões entre 1 e 10 Mpa, requerem equipamentos mais robustos e que com técnicas de controle de processos e segurança mais adequadas.

É notável a formação de dióxido e monóxido de carbono nas reações de descarboxilação e descarboxilação, respectivamente. Embora esses gases sejam associados ao efeito estufa, é importante destacar que, mesmo com sua geração durante o processo de produção, os biocombustíveis ainda resultam em uma redução líquida na emissão de GEE ao longo de seu ciclo de vida, especialmente quando comparados ao diesel mineral. Outro aspecto relevante é a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), que tende a ser menor na queima do diesel verde em relação ao biodiesel, devido às diferenças em suas composições químicas.

Por fim, todas as reações que podem acontecer no processo de hidrotreatamento geram propano como um



Esquema 6. Reação de descarboxilação



Esquema 7. Reação de descarboxilação

dos subprodutos. Esse gás pode ser utilizado, seguindo os princípios da economia circular, tanto para a geração de energia quanto para a conversão em produtos de maior valor agregado. Uma boa alternativa é o uso de hidrocarbonetos de cadeias mais longas, obtidos através de reforma catalítica, para que possam servir de matéria-prima para a indústria de plásticos como propeno.

3. Efeito dos Catalisadores

Com a constante necessidade de se desenvolver processos mais limpos, a catálise desempenha um papel crucial para se atender às propostas de um desenvolvimento sustentável estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU).¹¹⁶ Catálise é definida pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) como um processo que utiliza uma substância denominada catalisador para aumentar a taxa de reação sem modificar a energia de Gibbs da reação.¹¹⁷

Os catalisadores são um dos principais pilares da indústria química atual, devido à sua contribuição para diminuir o tempo reacional, aumentar a seletividade dos produtos e reduzir o gasto energético do processo.¹¹⁸ A indústria petroquímica utiliza catalisadores com a finalidade de transformar moléculas de baixa complexidade, como hidrocarbonetos, em produtos molecularmente mais diversificados e, consequentemente de maior valor agregado.¹¹⁸

No entanto, a mudança no cenário atual para a diversificação de matérias-primas de origem renovável e/ou reaproveitadas para utilização em biorrefinarias requer o desenvolvimento de catalisadores adequados. A adequação desses catalisadores está diretamente relacionada ao fato de que as fontes utilizadas são mais complexas, polifuncionais

e diversificadas; portanto, os catalisadores precisam ser mais robustos para suportar condições operacionais elevadas, como no caso do hidrotreatamento, além de poderem ser reutilizados, preservar sua atividade na presença de impurezas e apresentar seletividade para evitar a formação de coprodutos.¹¹⁹

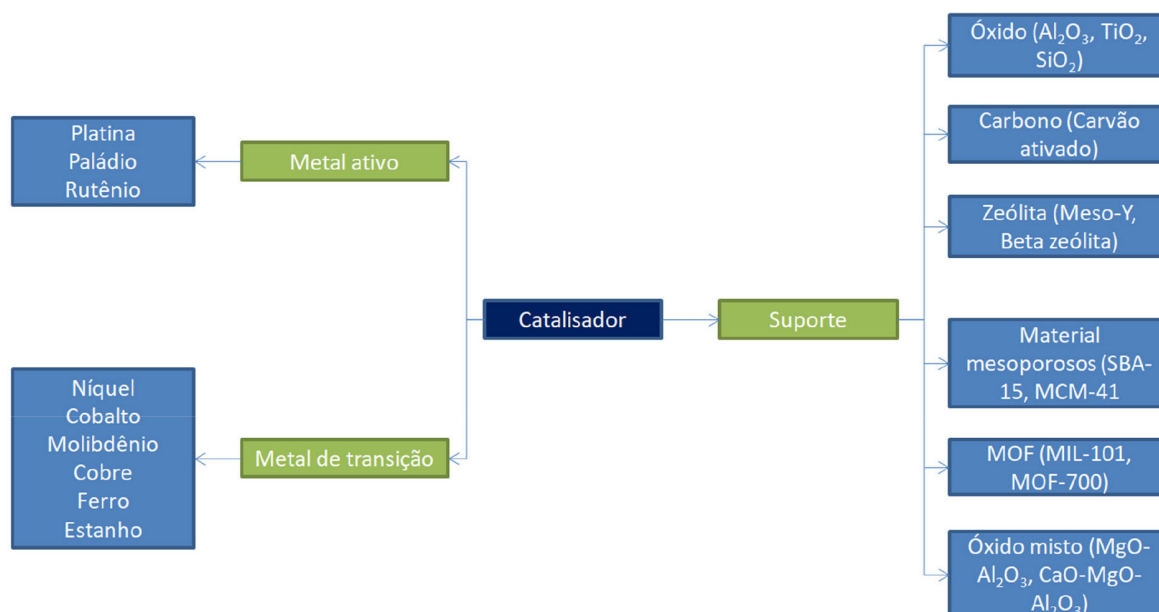
Para competir de forma economicamente viável com os combustíveis fósseis, é necessário que os catalisadores utilizados na produção de biocombustíveis não sejam custosos, evitando assim o uso de metais raros, como a platina. Logo, catalisadores que utilizam metais de transição, como níquel, cobalto e molibdênio, ganharam muito espaço não só pelo seu valor reduzido, mas também suas propriedades.

O Esquema 8 mostra a escolha de metais ativos e o suporte que devem ser levados em conta no momento de sintetizar um catalisador.

A escolha de um catalisador é um ponto crucial na performance de um processo químico, no caso de biocombustíveis como a variedade de matérias primas é muita extensa, certos catalisadores são preferidos para determinados tipos de óleos devido a suas seletividades.

Tabela 4. Catalisadores testados para determinadas matérias-primas (adaptada da referência 12)

Matéria Prima	Catalisador	Referência
Óleo de Soja	Pt/ θ - Al_2O_3 ; NiMoC/Al-SBA-15; NiMo/Mn- Al_2O_3	120-122
Óleo de Canola/Colza	CoMo/ Al_2O_3 ; Pt-Sn/ Al_2O_3	123-125
Óleo de Jatrofa	Ni-HPW/ Al_2O_3	126
Óleo de Palma	Pt/ Al_2O_3 ; Co/ Al_2O_3 Ni/ Al_2O_3	127
Óleo de Rícino	Pd/C	128
Óleo de Cozinha	Fe/AC; Fe/CMD900	129



Esquema 8. Tipos de metais ativos e suportes em catalisadores de diesel verde (adaptado da referência 12)

Assim como é necessário avançar tecnologicamente nos processos de produção de biocombustíveis, os catalisadores precisam acompanhar tais avanços. Por isso, catalisadores mais eficientes em termos de consumo de hidrogênio nas reações de hidrotreatamento; duráveis, de forma que possam ser utilizados múltiplas vezes, sendo recuperados e reativados; que diminuam as altas faixas operacionais do processo e aumentem a seletividade da mistura de hidrocarbonetos são de suma importância para melhorar a produção de diesel verde.

4. Considerações Finais sobre Viabilidade e Eficiência

Em suma, ao longo do texto foram discutidas as principais características que diferenciam o biodiesel do diesel verde, tanto do ponto de vista técnico quanto operacional e econômico. Esses dois biocombustíveis, embora sirvam como substitutos dos combustíveis fósseis, apresentam particularidades que impactam diretamente sua aplicação, desempenho e inserção no mercado.

A Tabela 6 resume essas características, permitindo uma comparação das vantagens e limitações associadas a cada combustível. Essa análise comparativa é crucial para compreender os desafios e oportunidades que cercam a adoção de biocombustíveis no contexto da transição energética.

Tabela 5. Principais diferenças entre biodiesel e diesel verde

Biodiesel	Diesel Verde
Precisa ser usado em blend	Usado em sua totalidade
Apresenta O nos compostos Consolidado	Não apresenta O nos compostos Implementação recente
Condições operacionais brandas	Condições operacionais severas
Congela em baixas temperaturas	Sofre menos polimerizações
Baixa estabilidade oxidativa	Processo mais custoso
Uso de hidróxidos como catalisadores	Uso de catalisadores metálicos

5. Conclusão e Perspectivas

A transição energética para fontes renováveis é um desafio global, e os biocombustíveis desempenham um papel fundamental nesse processo. O Brasil, com sua vasta capacidade agrícola, possui grande potencial para liderar essa mudança, especialmente por meio de políticas públicas como o Renova e o PNDV, que incentivam a pesquisa e o desenvolvimento comercial do setor. Essas iniciativas visam reduzir as emissões de gases do efeito estufa e aumentar a eficiência e sustentabilidade da produção de biocombustíveis.

Atualmente, a produção de biocombustíveis no Brasil é predominantemente baseada em matérias-primas como

soja, milho e cana-de-açúcar. No entanto, fontes alternativas, como resíduos agrícolas e óleos vegetais não comestíveis, representam oportunidades promissoras. Para viabilizar o aproveitamento dessas matérias-primas em larga escala, são indispensáveis investimentos em processos mais eficientes, como o hidrotreatamento de óleos vegetais para a produção de diesel verde. Embora esse processo envolva altos custos e elevada complexidade técnica, o diesel verde se mostra extremamente promissor, pois, ao contrário do biodiesel, não necessita ser misturado ao diesel mineral e apresenta maior eficiência energética. Esses atributos o tornam uma alternativa estratégica e atrativa para o futuro dos biocombustíveis.

Além dos avanços tecnológicos, os desafios relacionados à infraestrutura e à logística são determinantes para o sucesso da produção e inserção dos biocombustíveis no mercado brasileiro. Para superar essas barreiras, torna-se essencial promover investimentos direcionados à ampliação e modernização do parque industrial de biorrefinarias. A instalação de unidades com maior capacidade produtiva e adaptabilidade às diferentes matérias-primas, incluindo resíduos agrícolas e óleos vegetais não comestíveis, pode contribuir significativamente para aumentar a eficiência e a sustentabilidade do setor. Paralelamente, é necessário fortalecer a logística de transporte, armazenamento e distribuição dos biocombustíveis, de modo a garantir sua competitividade em relação aos combustíveis fósseis. A criação de corredores logísticos estratégicos é uma medida fundamental nesse processo. Além disso, políticas públicas específicas devem ser implementadas para incentivar a diversificação das matérias-primas utilizadas, por meio de subsídios, linhas de crédito e programas de pesquisa voltados ao aproveitamento de fontes alternativas e regionais.

Com esses esforços coordenados, somados ao avanço tecnológico e ao apoio contínuo das iniciativas governamentais, o Brasil tem o potencial de se consolidar como líder global na produção de diesel verde e outros biocombustíveis, fortalecendo sua posição no cenário energético mundial e contribuindo de forma decisiva para uma transição sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de Brasília (UnB) pelo apoio institucional, bem como ao Decanato de Pesquisa e Inovação (DPI/UnB) pelo incentivo à pesquisa. Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, código 001). Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelo financiamento e fomento às atividades de pesquisa, que foram essenciais para a realização deste estudo.

Referências Bibliográficas

- Vonortas, A.; Papayannakos, N.; Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. *WIREs Energy and Environment* **2014**, *3*, 3. [Crossref]
- Millo, F.; Vlachos, T.; Piano, A.; Physicochemical and mutagenic analysis of particulate matter emissions from an automotive diesel engine fuelled with fossil and biofuel blends. *Fuel* **2021**, *285*. [Crossref]
- Hill, J.; Nelson, E.; Tilman, D.; Polasky, S.; Tiffany, D.; Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2006**, *103*, 11206. [Crossref]
- Ma, F. R.; Hanna, M. A.; Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* **1999**, *70*, 1. [Crossref]
- 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* **2019**, *12*. [Crossref]
- Alonso, D. M.; Bond, J. Q.; Dumesic, J. A.; Catalytic conversion of biomass to biofuels. *Green Chemistry*. **2010**, *12*, 1493. [Crossref]
- Barnwal, B. K.; Sharma, M. P.; Prospects of biodiesel production from vegetables oils in India. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2005**, *9*, 363. [Crossref]
- Van Gerpen, J.; Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology* **2005**, *86*, 1097. [Crossref]
- Nações Unidas Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 30 de agosto de 2024.
- Kalnes, T.; Marker, T.; Shonnard, D. R.; Green diesel: A second generation biofuel. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* **2007**, *5*. [Crossref]
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis#:~:text=Biocombust%C3%A9is%20s%C3%A3o%20derivados%20de%20biomassa,tipo%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia>>. Acesso em: 25 de abril de 2024.
- Rahmawati, Z.; Santoso, L.; McCue, A.; Jamari, N. L. A.; Ninglasari, S. Y.; Gunawan, T.; Fansuri, H.; Selectivity of reaction pathways for green diesel production towards biojet fuel applications. *RSC Advances* **2023**, *13*, 13698. [Crossref]
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-842-2021-estabelece-a-especificacao-do-diesel-verde-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-o-comercializam-em-territorio-nacional>>. Acesso em: 29 de junho de 2025.
- 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* **2023**, *219*. [Crossref]
- Ragauskas, A. J.; Williams, C. K.; Davison, B. H.; Britovsek, G.; Cairney, J.; Eckert, C. A.; Frederick, W. J.; Hallett, J. P.; Leak, D. J.; Liotta, C. L.; Mielenz, J. R.; Murphy, R.; Templer, R.; Tschaplinski, T.; The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* **2006**, *311*, 484. [Crossref]
- Knothe, G.; Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science* **2010**, *36*, 364. [Crossref]
- Julio, A. A. V.; Milessi, T. S.; Batlle, E. A. O.; Lora, E. E. S.; Maya, D. M. Y.; Palacio, J. C. E.; Techno-economic and environmental potential of Renewable Diesel as complementation for diesel and biodiesel in Brazil: A comprehensive review and perspectives. *Journal of Cleaner Production* **2022**, *371*. [Crossref]
- Cremonez, P. A.; Feroldi, M.; Cézar Nadaleti, W.; de Rossi, E.; Feiden, A.; de Camargo, M. P.; Cremonez, F. E.; Klajn, F. F.; Biodiesel production in Brazil: Current scenario and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *42*, 415. [Crossref]
- Agência Internacional de Energia. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries/brazil/energy-mix>>. Acesso em: 29 de junho de 2025.
- Pousa, G.; Santos, A. L. F.; Suarez, P. A. Z.; History and policy of biodiesel in Brazil. *Energy Policy* **2007**, *35*, 5393. [Crossref]
- Goldemberg, J.; Coelho, S. T.; Nastari, P. M.; Lucon, O.; Ethanol learning curve - the Brazilian experience. *Biomass & Bioenergy* **2004**, *26*, 301. [Crossref]
- Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-passa-a-ter-competencia-para-fixar-teor-de-etanol-anidro-na-gasolina>>. Acesso em: 12 de maio de 2024.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2025>>. Acesso em: 29 de junho de 2025.
- Cremonez, P. A.; Teleken, J. G.; Meier, T. W.; Potential of Green Diesel To Complement the Brazilian Energy Production: A Review. *Energy & Fuels* **2021**, *35*, 176. [Crossref]
- de Souza, T. A. Z.; Pinto, G. M.; Julio, A. A. V.; Coronado, C. J. R.; Perez-Herrera, R.; Siqueira, B.; da Costa, R. B. R.; Roberts, J. J.; Palacio, J. C. E.; Biodiesel in South American countries: A review on policies, stages of development and imminent competition with hydrotreated vegetable oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2022**, *153*. [Crossref]
- Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnph>>. Acesso em: 13 de maio de 2024.
- Casa Civil da Presidência da República. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/at02004-2006/2005/lei/111097.htm>. Acesso em: 16 de maio de 2024.
- Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mistura-de-14-de-biodiesel-no-diesel-comeca-a-valer-esta-sexta-feira>>. Acesso em: 27 de maio de 2025.
- Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e->>

- biocombustiveis/renovabio-1>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
30. Agência Internacional de Energia. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
31. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-nacional-de-diesel-verde-e-um-dos-pilares-do-pl-do-combustivel-do-futuro>>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
32. Senado Federal. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2024/03/22/projeto-dos-combustiveis-do-futuro-ja-esta-no-senado>>. Acesso em: 22 de maio de 2024.
33. Agência Internacional de Energia. Disponível em: <<https://www.iea.org/articles/how-competitive-is-biofuel-production-in-brazil-and-the-united-states>> Acesso em: 22 de maio de 2024.
34. Agência Internacional de Energia. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/63c14514-6833-4cd8-ac53-f9918c2e4cd9/RenewableEnergyMarketUpdate_June2023.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2024.
35. Singh, D.; Sharma, D.; Soni, S. L.; Sharma, S.; Kumari, D; Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review. *Fuel* **2019**, 253, 60. [Crossref]
36. Nigam, P. S.; Singh, A; Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science* **2011**, 37, 52. [Crossref]
37. Agarwal, A. K; Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* **2007**, 33, 233. [Crossref]
38. Gui, M. M.; Lee, K. T.; Bhatia, S; Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy* **2008**, 33, 1646. [Crossref]
39. Cavalett, O.; Ortega, E; Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2010**, 18, 55. [Crossref]
40. César, A. D.; Conejero, M. A.; Ribeiro, E. C. B.; Batalha, M. O; Competitiveness analysis of “social soybeans” in biodiesel production in Brazil. *Renewable Energy* **2019**, 133, 1147. [Crossref]
41. Kuss, V. V.; Kuss, A. V.; da Rosa, R. G.; Aranda, D. A. G.; Cruz, Y. R; Potential of biodiesel production from palm oil at Brazilian Amazon. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2015**, 50, 1013. [Crossref]
42. Uusitalo, V.; Väisänen, S.; Havukainen, J.; Havukainen, M.; Soukka, R.; Luoronen, M; Carbon footprint of renewable diesel from palm oil, jatropha oil and rapeseed oil. *Renewable Energy* **2014**, 69, 103. [Crossref]
43. Rupilius, W.; Ahmad, S; Palm oil and palm kernel oil as raw materials for basic oleochemicals and biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology* **2007**, 109, 433. [Crossref]
44. Sumathi, S.; Chai, S. P.; Mohamed, A. R; Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2008**, 12, 2404. [Crossref]
45. Hosain, A.; Boyce, A. N; Comparative Study of Biodiesel Production from Pure Palm Oil and Waste Palm Oil. *Arab Gulf Journal of Scientific Research* **2009**, 27, 33. [Link]
46. Liu, X. J.; He, H. Y.; Wang, Y. J.; Zhu, S. L.; Piao, X. L; Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst. *Fuel* **2008**, 87, 216. [Crossref]
47. Veriansyah, B.; Han, J. Y.; Kim, S. K.; Hong, S. A.; Kim, Y. J.; Lim, J. S.; Shu, Y. W.; Oh, S. G.; Kim, J; Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts. *Fuel* **2012**, 94, 578. [Crossref]
48. Li, Y.; Xu, H.; Northrup, D.; Wang, M; Effects of soybean varieties on life-cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel. *Biofuels, Bioproduction and Biorefining* **2023**, 17, 449. [Crossref]
49. Scaldaferrì, C. A.; Pasa, V. M. D; Production of jet fuel and green diesel range biohydrocarbons by hydroprocessing of soybean oil over niobium phosphate catalyst. *Fuel* **2019**, 245, 458. [Crossref]
50. Faria, D. N.; Cipriano, D. F.; Schettino, M. A.; Neto, A. C.; Cunha, A. G.; Freitas, J. C. C; Na,Ca-based catalysts supported on activated carbon for synthesis of biodiesel from soybean oil. *Materials Chemistry and Physics* **2020**, 249. [Crossref]
51. Qiu, F. X.; Li, Y. H.; Yang, D. Y.; Li, X. H.; Sun, P; Biodiesel production from mixed soybean oil and rapeseed oil. *Applied Energy* **2011**, 88, 2050. [Crossref]
52. Efe, S.; Ceviz, M. A.; Temur, H; Comparative engine characteristics of biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on DI diesel engine. *Renewable Energy* **2018**, 119, 142. [Crossref]
53. Saka, S.; Kusdiana, D; Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel* **2001**, 80, 225. [Crossref]
54. Sotelo-Boyás, R.; Liu, Y. Y.; Minowa, T; Renewable Diesel Production from the Hydrotreating of Rapeseed Oil with Pt/Zeolite and NiMo/Al₂O₃ Catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2011**, 50, 2791. [Crossref]
55. Taromi, A. A.; Kaliaguine, S; Green diesel production via continuous hydrotreatment of triglycerides over mesostructured γ -alumina supported NiMo/CoMo catalysts. *Fuel Processing Technology* **2018**, 171, 20. [Crossref]
56. Ozturk, H. H; Energy Analysis for Biodiesel Production from Rapeseed Oil. *Energy Exploration & Exploitation* **2014**, 32, 1005. [Crossref]
57. Simáček, P.; Kubicka, D.; Sebor, G.; Pospíšil, M; Fuel properties of hydroprocessed rapeseed oil. *Fuel* **2010**, 89, 611. [Crossref]
58. Granados, M. L.; Poves, M. D. Z.; Alonso, D. M.; Mariscal, R.; Galisteo, F. C.; Moreno-Tost, R.; Santamaria, J.; Fierro, J. L. G; Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide. *Applied Catalysis B-Environment and Energy* **2007**, 73, 317. [Crossref]
59. Dueso, C.; Muñoz, M.; Moreno, F.; Arroyo, J.; Gil-Lalaguna, N.; Bautista, A.; Gonzalo, A.; Sánchez, J. L; Performance and emissions of a diesel engine using sunflower biodiesel with a renewable antioxidant additive from bio-oil. *Fuel* **2018**, 234, 276. [Crossref]
60. Vujicic, D.; Comic, D.; Zarubica, A.; Micic, R.; Boskovic, G; Kinetics of biodiesel synthesis from sunflower oil over CaO heterogeneous catalyst. *Fuel* **2010**, 89, 2054. [Crossref]
61. Saydut, A.; Kafadar, A. B.; Tonbul, Y.; Kaya, C.; Aydin, F.; Hamamci, C; Comparison of the biodiesel quality produced from

- refined sunflower (*Helianthus annuus* L.) oil and waste cooking oil. *Energy Exploration & Exploitation* **2010**, 28, 499. [Crossref]
62. Zafeiropoulos, J.; Petropoulos, G.; Kordouli, E.; Kordulis, C.; Lycourghiotis, A.; Bourikas, K.; Development of nickel catalysts supported on silica for green diesel production. *Catalysis Today* **2023**, 423, [Crossref]
 63. Aydin, F.; Kafadar, A. B.; Erdogan, S.; Saydut, A.; Kaya, C.; Hamamci, C.; The Basic Properties of Transesterified Corn Oil and Biodiesel-Diesel Blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2011**, 33, 745. [Crossref]
 64. Balamurugan, T.; Arun, A.; Sathishkumar, G. B.; Biodiesel derived from corn oil - A fuel substitute for diesel. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2018**, 94, 772. [Crossref]
 65. Sathyamurthy, R.; Balaji, D.; Gorjian, S.; Muthiya, S. J.; Bharathwaaj, R.; Vasanthaseelan, S.; Essa, F. A.; Performance, combustion and emission characteristics of a DI-CI diesel engine fueled with corn oil methyl ester biodiesel blends. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2021**, 43. [Crossref]
 66. Sebos, I.; Matsoukas, A.; Apostolopoulos, V.; Papayannakos, N.; Catalytic hydroprocessing of cottonseed oil in petroleum diesel mixtures for production of renewable diesel. *Fuel* **2009**, 88, 145. [Crossref]
 67. Ahmad, M.; Zafar, M.; Khan, M. A.; Hasan, A.; Sultana, S.; Methanolysis of cottonseed oil for biodiesel: As renewable source of energy. *Asian Journal of Chemistry* **2008**, 20, 4565. [Link]
 68. Nabi, M. N.; Rahman, M. M.; Akhter, M. S.; Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. *Applied Thermal Engineering* **2009**, 29, 2265. [Crossref]
 69. Habibullah, M.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A.; Rahman, S. M. A.; Mofijur, M.; Mobarak, H. M.; Ashraful, A. M.; Potential of biodiesel as a renewable energy source in Bangladesh. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2015**, 50, 819. [Crossref]
 70. Naik, S. N.; Goud, V. V.; Rout, P. K.; Dalai, A. K.; Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2010**, 14, 578. [Crossref]
 71. Agência Internacional de Energia. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-demand-in-transport-in-the-net-zero-scenario-2016-2030-2>>. Acesso em: 20 de maio de 2024.
 72. Atabani, A. E.; Silitonga, A. S.; Ong, H. C.; Mahlia, T. M. I.; Masjuki, H. H.; Badruddin, I. A.; Fayaz, H.; Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2013**, 18, 211. [Crossref]
 73. Berchmans, H. J.; Hirata, S.; Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology* **2008**, 99, 1716. [Crossref]
 74. Asikin-Mijan, N.; Rosman, N. A.; Abdulkareem-Alsultan, G.; Mastuli, M. S.; Lee, H. V.; Nabihah-Fauzi, N.; Lokman, I. M.; Alharthi, F. A.; Alghamdi, A. A.; Aisyahi, A. A.; Taufiq-Yap, Y. H.; Production of renewable diesel from *jatropha curcas* oil via pyrolytic-deoxygenation over various multi-wall carbon nanotube-based catalysts. *Process Safety and Environmental Protection* **2020**, 142, 336. [Crossref]
 75. Asikin-Mijan, N.; Lee, H. V.; Abdulkareem-Alsultan, G.; Afandi, A.; Taufiq-Yap, Y. H.; Production of green diesel via cleaner catalytic deoxygenation of *Jatropha curcas* oil. *Journal of Cleaner Production* **2017**, 167, 1048. [Crossref]
 76. Alherbawi, M.; McKay, G.; Al-Ansari, T.; Development of a hybrid biorefinery for jet biofuel production. *Energy Conversion and Management* **2023**, 276. [Crossref]
 77. Dhanasekar, K.; Sridaran, M.; Arivanandhan, M.; Jayavel, R.; A facile preparation, performance and emission analysis of pongamia oil based novel biodiesel in diesel engine with CeO₂:Gd nanoparticles. *Fuel* **2019**, 255. [Crossref]
 78. Rawat, D. S.; Joshi, G.; Lamba, B. Y.; Tiwari, A. K.; Mallick, S.; Impact of additives on storage stability of Karanja (*Pongamia Pinnata*) biodiesel blends with conventional diesel sold at retail outlets. *Fuel* **2014**, 120, 30. [Crossref]
 79. Azam, M. M.; Waris, A.; Nahar, N. M.; Prospects and potential of fatty acid methyl esters of some non-traditional seed oils for use as biodiesel in India. *Biomass & Bioenergy* **2005**, 29, 293. [Crossref]
 80. Ragit, S. S.; Mohapatra, S. K.; Kundu, K.; Gill, P.; Optimization of neem methyl ester from transesterification process and fuel characterization as a diesel substitute. *Biomass & Bioenergy* **2011**, 35, 1138. [Crossref]
 81. Orozco, L. M.; Echeverri, D. A.; Sánchez, L.; Rios, L. A.; Second-generation green diesel from castor oil: Development of a new and efficient continuous-production process. *Chemical Engineering Journal* **2017**, 322, 149. [Crossref]
 82. Tabile, R. A.; Lopes, A.; Dabdoub, M. J.; da Camara, F. T.; Furlani, C. E. A.; da Silva, R. P.; Mamona biodiesel in interior and metropolitan diesel in agricultural tractor. *Engenharia Agrícola* **2009**, 29, 412. [Crossref]
 83. Özcanli, M.; Serin, H.; Aydin, K.; Serin, S.; Ricinus Communis (Castor Oil) methyl ester as a natural additive for biodiesel fuels. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* **2011**, 27, 331. [Link]
 84. Özcanli, M.; Serin, H.; Saribiyik, O. Y.; Aydin, K.; Serin, S.; Performance and Emission Studies of Castor Bean (*Ricinus Communis*) Oil Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2012**, 34, 1808. [Crossref]
 85. Silitonga, A. S.; Masjuki, H. H.; Ong, H. C.; Yusaf, T.; Kusumo, F.; Mahlia, T. M. I.; Synthesis and optimization of Hevea brasiliensis and *Ricinus communis* as feedstock for biodiesel production: A comparative study. *Industrial Crops and Products* **2016**, 85, 274. [Crossref]
 86. Rosa, H. A.; Wazilewski, W. T.; Secco, D.; Chaves, L. I.; Veloso, G.; de Souza, S. N. M.; da Silva, M. J.; Santos, R. F.; Biodiesel produced from crambe oil in Brazil-A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2014**, 38, 651. [Crossref]
 87. Leite, D.; Santos, R. F.; Bassegio, D.; de Souza, S. N. M.; Secco, D.; Gurgacz, F.; da Silva, T. R. B.; Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe

- biodiesel. *Industrial Crops and Products* **2019**, *130*, 267. [\[Crossref\]](#)
88. Souza, M. C. G.; de Oliveira, M. F.; Vieira, A. T.; de Faria, A. M.; Batista, A. C. F.; Methylic and ethylic biodiesel production from crambe oil (*Crambe abyssinica*): New aspects for yield and oxidative stability. *Renewable Energy* **2021**, *163*, 368. [\[Crossref\]](#)
89. Donoso, D.; Bolonio, D.; Ballesteros, R.; Lapuerta, M.; Canoira, L.; Hydrogenated orange oil: A waste derived drop-in biojet fuel. *Renewable Energy* **2022**, *188*, 1049. [\[Crossref\]](#)
90. Ashok, B.; Raj, R. T. K.; Nanthagopal, K.; Krishnan, R.; Subbarao, R.; Lemon peel oil - A novel renewable alternative energy source for diesel engine. *Energy Conversion and Management* **2017**, *139*, 110. [\[Crossref\]](#)
91. Moreira, J. D. D.; de Rezende, D. B.; Pasa, V. M. D.; Deoxygenation of Macauba acid oil over Co-based catalyst supported on activated biochar from Macauba endocarp: A potential and sustainable route for green diesel and biokerosene production. *Fuel* **2020**, 269. [\[Crossref\]](#)
92. Silva, L. N.; Fortes, I. C. P.; de Sousa, F. P.; Pasa, V. M. D.; Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C. *Fuel* **2016**, *164*, 329. [\[Crossref\]](#)
93. Scaldaferrì, C. A.; Pasa, V. M. D.; Green diesel production from upgrading of cashew nut shell liquid. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2019**, *111*, 303. [\[Crossref\]](#)
94. Guimaraes, M.; Evaristo, R.; de Macedo, J.; Ghesti, G.; Extraction and Characterization of Pequi Seed Oil for Biodiesel Production: A Green Management of Waste to Biofuel Using Ethanol and Heterogeneous Catalysis. *Journal of the Brazilian Chemistry Society* **2022**, *33*, 327. [\[Crossref\]](#)
95. Nikolopoulos, I.; Kogkos, G.; Kordouli, E.; Bourikas, K.; Kordulis, C.; Lycourghiotis, A.; Waste cooking oil transformation into third generation green diesel catalyzed by nickel - Alumina catalysts. *Molecular Catalysis* **2020**, 482. [\[Crossref\]](#)
96. Phan, A. N.; Phan, T. M.; Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel* **2008**, *87*, 3490. [\[Crossref\]](#)
97. Zhang, Y.; Dubé, M. A.; McLean, D. D.; Kates, M.; Biodiesel production from waste cooking oil:: 2.: Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology* **2003**, *90*, 229. [\[Crossref\]](#)
98. Kaewmeesri, R.; Srifa, A.; Itthibenchapong, V.; Faungnawakij, K.; Deoxygenation of Waste Chicken Fats to Green Diesel over Ni/Al₂O₃: Effect of Water and Free Fatty Acid Content. *Energy & Fuels* **2015**, *29*, 833. [\[Crossref\]](#)
99. Al-Muhtaseb, A. H.; Jamil, F.; Al-Haj, L.; Al-Hinai, M. A.; Baawain, M.; Myint, M. T. Z.; Rooney, D.; Efficient utilization of waste date pits for the synthesis of green diesel and jet fuel fractions. *Energy Conversion and Management* **2016**, *127*, 226. [\[Crossref\]](#)
100. Frank, E. D.; Elgowainy, A.; Han, J.; Wang, Z. C.; Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **2013**, *18*, 137. [\[Crossref\]](#)
101. Demirbas, A.; Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management* **2010**, *51*, 2738. [\[Crossref\]](#)
102. Kandel, K.; Anderegg, J. W.; Nelson, N. C.; Chaudhary, U.; Slowing, I.; Supported iron nanoparticles for the hydrodeoxygenation of microalgal oil to green diesel. *Journal of Catalysis* **2014**, *314*, 142. [\[Crossref\]](#)
103. Viêgas, C. V.; Hachemi, I.; Freitas, S. P.; Mäki-Arvela, P.; Aho, A.; Hemming, J.; Smeds, A.; Heinmaa, I.; Fontes, F. B.; Pereira, D. C. D.; Kumar, N.; Aranda, D. A. G.; Murzin, D. Y.; A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of *Chlorella* alga and its catalytic deoxygenation to renewable diesel. *Fuel* **2015**, *155*, 144. [\[Crossref\]](#)
104. Li, Y.; Horsman, M.; Wu, N.; Lan, C. Q.; Dubois-Calero, N.; Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress* **2008**, *24*, 815. [\[Crossref\]](#)
105. Khan, M. I.; Shin, J. H.; Kim, J. D.; The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories* **2018**, *17*. [\[Crossref\]](#)
106. Brennan, L.; Owende, P.; Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2010**, *14*, 557. [\[Crossref\]](#)
107. Schenk, P. M.; Thomas-Hall, S. R.; Stephens, E.; Marx, U. C.; Mussgnug, J. H.; Posten, C.; Kruse, O.; Hankamer, B.; Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Resources* **2008**, *1*, 20. [\[Crossref\]](#)
108. Shi, R.; Handler, R. M.; Shonnard, D. R.; Life cycle assessment of novel technologies for algae harvesting and oil extraction in the renewable diesel pathway. *Algal Research* **2019**, *37*, 248. [\[Crossref\]](#)
109. Knothe, G.; “Designer” biodiesel: Optimizing fatty ester (composition to improve fuel properties. *Energy Fuels* **2008**, *22*, 1358. [\[Crossref\]](#)
110. Meher, L. C.; Sagar, D. V.; Naik, S. N.; Technical aspects of biodiesel production by transesterification - a review. *Renew. Sustain. Energy Reviews* **2006**, *10*, 248. [\[Crossref\]](#)
111. Ma, F.; Clements, L. D.; Hanna, M. A.; The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **1998**, *41*, 1261. [\[Link\]](#)
112. Baharudin, K. B.; Abdullah, N.; Taufiq-Yap, Y. H.; Derawi, D.; Renewable diesel via solventless and hydrogen-free catalytic deoxygenation of palm fatty acid distillate. *Journal of Cleaner Production* **2020**, 274. [\[Crossref\]](#)
113. Zula, M.; Grilc, M.; Likozar, B.; Hydrocracking, hydrogenation and hydro-deoxygenation of fatty acids, esters and glycerides: Mechanisms, kinetics and transport phenomena. *Chemical Engineering Journal* **2022**, 444. [\[Crossref\]](#)
114. Cheah, K. W.; Taylor, M. J.; Osatiashiani, A.; Beaumont, S. K.; Nowakowski, D. J.; Yusup, S.; Bridgwater, A. V.; Kyriakou, G.; Monometallic and bimetallic catalysts based on Pd, Cu and Ni for hydrogen transfer deoxygenation of a prototypical fatty acid to diesel range hydrocarbons. *Catalysis Today* **2020**, *355*, 882. [\[Crossref\]](#)
115. Santillan-Jimenez, E.; Morgan, T.; Shoup, J.; Harman-Ware, A. E.; Crocker, M.; Catalytic deoxygenation of triglycerides and fatty acids to hydrocarbons over Ni-Al layered double hydroxide.

- Catalysis Today* **2014**, 237, 136. [Crossref]
116. Meneghetti, M. R.; Suarez, P. A. Z.; Meneghetti S. M. P.; Contribuições da Catálise na busca pela sustentabilidade. *Revista Virtual de Química* **2022**, 14, 443. [Crossref]
 117. Neto, B. A. D.; Rocha, R. O.; Rodrigues, M. O; Catalytic Approaches to Multicomponent Reactions: A Critical Review and Perspectives on the Roles of Catalysis. *Molecules* **2022**, 27. [Crossref]
 118. Deuss, P. J.; Barta, K.; de Vries, J. G; Homogeneous catalysis for the conversion of biomass and biomass-derived platform chemicals. *Catalysis Science & Technology* **2014**, 4, 1174. [Crossref]
 119. Whitesides, G. M; Reinventing Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition* **2015**, 54, 3196. [Crossref]
 120. Oh, M.; Jin, M.; Lee, K.; Kim, J.-C.; Ryoo, R.; Choi, M; Importance of pore size and Lewis acidity of Pt/Al₂O₃ for mitigating mass transfer limitation and catalyst fouling in triglyceride deoxygenation. *Chemical Engineering Journal* **2022**, 439, 135530. [Crossref]
 121. Vazquez-Garrido, I.; López-Benítez, A.; Guevara-Lara, A.; Berhault, G; Synthesis of NiMo catalysts supported on Mn-Al₂O₃ for obtaining green diesel from waste soybean oil. *Catalysis Today* **2021**, 365, 327. [Crossref]
 122. Wang, H.; Yan, S.; Salley, S. O.; Simon Ng, K. Y; Support effects on hydrotreating of soybean oil over NiMo carbide catalyst. *Fuel* **2013**, 111, 81. [Crossref]
 123. Tsodikov, M. V.; Chistyakov, A. V.; Gubanov, M. A.; Zharova, P. A.; Shapovalov, S. S.; Pasynskii, A. A.; Kriventsov, V. V.; Moiseev, I; Selective deoxygenation of vegetable oils in the presence of Pt-Sn/Al₂O₃ catalyst. *Russian Chemical Bulletin* **2015**, 64, 2062. [Crossref]
 124. Zharova, P. A.; Chistyakov, A. V.; Shapovalov, S. S.; Pasynskii, A. A.; Tsodikov, M. V; Original Pt-Sn/Al₂O₃ catalyst for selective hydrodeoxygenation of vegetable oils. *Energy* **2019**, 172, 18. [Crossref]
 125. Vachová, V.; Toullis, D.; Straka, P.; Simáček, P.; Stas, M.; Gdovin, A.; Beno, Z.; Blazek, J; Composition and Properties of Rapeseed Oil Hydrotreating Products over CoMo/Al₂O₃ and NiMo/Al₂O₃ Catalysts. *Energy Fuels* **2020**, 34, 9609. [Crossref]
 126. Liu, C.; Liu, J.; Zhou, G.; Tian, W. Q.; Rong, L; A cleaner process for hydrocracking of jatropha oil into green diesel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering* **2013**, 44, 221. [Crossref]
 127. Srifa, A.; Faungnawakij, K.; Itthibenchapong, V.; Assabumrungrat, S; Roles of monometallic catalysts in hydrodeoxygenation of palm oil to green diesel. *Chemical Engineering Journal*. **2015**, 278, 249. [Crossref]
 128. Meller, E.; Green, U.; Aizenshtat, Z.; Sasson, Y; Catalytic deoxygenation of castor oil over Pd/C for the production of cost effective biofuel. *Fuel* **2014**, 133, 89. [Crossref]
 129. Thangadurai, T.; Tye, C. T; Performance of Activated Carbon Supported Cobalt Oxides and Iron Oxide Catalysts in Catalytic Cracking of Waste Cooking Oil. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* **2021**, 65, 350. [Crossref]