



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LAURA DE ANDRADE DE ALMEIDA

**PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO PARA USO
EM MISTURAS COMO BIOBUNKER E BIOQUEROSENE**

SEROPÉDICA, 2026



LAURA DE ANDRADE DE ALMEIDA

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO PARA USO EM
MISTURAS COMO BIOBUNKER E BIOQUEROSENE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração: Tecnologia Química.

Orientadora: Prof^a Dr^a Marisa Fernandes Mendes

SEROPÉDICA, 2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

AA447p

Almeida, Laura de Andrade de . 2000-
PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO
PARA USO EM MISTURAS COMO BIOBUNKER E BIOQUEROSENE /
Laura de Andrade de Almeida. - Seropédica, 2026.
63 f.

Orientadora: Marisa Fernandes Mendes.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO DE
ENGENHARIA QUÍMICA , 2026.

1. Biodiesel de Rícino . 2. Bioquerosene . 3.
Biobunker . 4. Biocombustíveis . 5. Hidroxiapatita. I.
Mendes, Marisa Fernandes, 1972-, orient. II
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA III.
Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LAURA DE ANDRADE DE ALMEIDA

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO PARA USO EM
MISTURAS COMO BIOBUNKER E BIOQUEROSENE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração: Tecnologia Química.

Dissertação aprovada em 20 de Março de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Marisa Fernandes Mendes, D.Sc., DEQ – Orientadora – UFRRJ/DEQ

Roberto Barbosa De Castilho, D.Sc., DQF – UFRRJ

Fabiola Oliveira Da Cunha, D.Sc., DEQ – UFRRJ

Ana Karine Furtado de Carvalho – USP



DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS Nº 9635/2026 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 15/06/2026 14:45)

FABIOLA OLIVEIRA DA CUNHA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CoordCGEngQ (12.28.01.00.00.00.36)
Matrícula: ###345#9

(Assinado digitalmente em 15/06/2026 13:56)

MARISA FERNANDES MENDES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)
Matrícula: ###224#2

(Assinado digitalmente em 16/06/2026 08:54)

ROBERTO BARBOSA DE CASTILHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
PROFQUI (11.39.00.27)
Matrícula: ###141#1

(Assinado digitalmente em 15/06/2026 18:27)

ANA KARINE FURTADO DE CARVALHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.513-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **9635**, ano: **2026**,
tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS**, data de emissão: **15/06/2026** e o código de verificação: **4b5df0450d**

AGRADECIMENTOS

Quero, primeiramente, agradecer a Deus, por Sua infinita graça, amor e misericórdia, que me sustentaram e me trouxeram até aqui. Sem Ele, nada disso seria possível.

Ao meu marido, pelo amor, paciência e serenidade, que tornaram essa fase mais leve, mesmo nos momentos em que tudo parecia difícil.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio constante, pelo amor, por me ouvirem, e por caminharem comigo em cada desafio, vivendo de perto cada etapa desta jornada. Aos meus queridos avós, pelas orações, pelo cuidado e por estarem sempre disponíveis para me ouvir e acolher.

Aos meus tios e demais familiares, pelo incentivo e apoio ao longo dessa trajetória.

Às minhas tríades do trabalho, por ouvirem, aconselharem e, muitas vezes, participarem ativamente desse processo comigo.

À minha orientadora, Prof^a. Marisa, pela confiança no meu trabalho, por ser amiga, pelos ensinamentos, pela motivação, compreensão e, sobretudo, pela rica troca de experiências que construímos ao longo desses anos.

Às minhas IC's Maria Eduarda Pinto e Maria Corrêa que me ajudaram em todo momento, dividindo conhecimento e construindo esse projeto junto comigo.

À minha empresa e aos meus gestores, pelo apoio, incentivo e compreensão, que foram fundamentais para que eu alcançasse essa conquista.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

“Pois eu bem sei os planos que estou projetando para vós, diz o Senhor; planos de paz, e não de mal, para vos dar um futuro e uma esperança.”

Jeremias 29:11

RESUMO

A transição energética global e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por combustíveis renováveis para os setores aéreo e marítimo, tradicionalmente provenientes de derivados fósseis. Nesse contexto, o desenvolvimento de biocombustíveis avançados a partir de matérias-primas não alimentares apresenta-se como alternativa estratégica. O óleo de rícino (*Ricinus communis*) destaca-se por seu elevado teor de ácido ricinoleico e por suas propriedades químicas que favorecem diferentes rotas de conversão. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso do óleo de rícino como matéria-prima para a produção de biodiesel e sua aplicação na formulação de misturas sintéticas com potencial utilização como bioquerosene de aviação (SAF) e *biobunker* marítimo. O biodiesel foi obtido por meio de reações de transesterificação sob diferentes condições operacionais, variando razão molar álcool/óleo, concentração de catalisador e tempo reacional, utilizando catalisadores homogêneos e heterogêneos, com ênfase na hidroxiapatita. As amostras produzidas foram caracterizadas quanto às propriedades físico-químicas relevantes, incluindo densidade, viscosidade cinemática, ponto de fulgor, pH e composição química por cromatografia. Os resultados foram comparados com especificações normativas aplicáveis aos setores aeronáutico e marítimo. Os resultados indicaram conversões satisfatórias na produção do biodiesel de rícino e propriedades compatíveis para formulação de misturas combustíveis. Observou-se maior aderência às especificações do setor marítimo, demonstrando potencial mais imediato para aplicação como *biobunker*. Para o bioquerosene, as misturas apresentaram propriedades promissoras, embora ainda dependam de ajustes adicionais para pleno atendimento às normas aeronáuticas. Pode-se concluir que o óleo de rícino constitui matéria-prima viável para biocombustíveis avançados, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para as metas de descarbonização dos transportes.

Palavras-chave: biodiesel de rícino; bioquerosene; *biobunker*; biocombustíveis; hidroxiapatita.

ABSTRACT

The global energy transition and the need to reduce greenhouse gas emissions have intensified the search for renewable fuels for the aviation and maritime sectors, which are traditionally dependent on fossil-derived fuels. In this context, the development of advanced biofuels from non-food feedstocks has emerged as a strategic alternative. Castor oil (*Ricinus communis*) stands out due to its high ricinoleic acid content and chemical properties favorable to different conversion routes. Therefore, this study aimed to evaluate the feasibility of using castor oil as a feedstock for biodiesel production and its application in synthetic blends with potential use as sustainable aviation fuel (SAF) and marine biobunker. Biodiesel was produced through transesterification reactions under different operating conditions, varying alcohol-to-oil molar ratio, catalyst concentration, and reaction time, employing both homogeneous and heterogeneous catalysts, with emphasis on hydroxyapatite. The obtained samples were characterized according to relevant physicochemical properties, including density, kinematic viscosity, flash point, pH, and chemical composition by gas chromatography. The results were compared with technical specifications and regulatory requirements applicable to aviation and maritime fuels. The results indicated satisfactory conversion rates in castor biodiesel production and properties compatible with fuel blend formulation. Greater compliance with maritime fuel standards was observed, demonstrating more immediate potential for biobunker applications. For biojet fuel, the blends showed promising characteristics, although further adjustments are still required to better meet aviation specifications. It was concluded that castor oil is a viable feedstock for advanced biofuels, contributing to energy matrix diversification and transport decarbonization goals.

Keywords: *castor biodiesel; biojet fuel; biobunker; biofuels; hydroxyapatite.*

LISTA DE ABREVIATURAS

AGL	Ácidos Graxos Livres
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATJ	Alcohol to Jet
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CBIO	Crédito de Descarbonização
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
GEE	Gases de Efeito Estufa
GC MS	Espectrometria de Massas
HAp	Hidroxiapatita
HEFA	Hydrotreated esters and fatty acids
IATA	International Air Transport Association
FT SPK	Fischer Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene
MME	Ministério de Minas e Energia
PCF	Programa Combustível do Futuro
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
QAV	Querosene De Aviação
SAF	Sustainable Aviation Fuel
TAN/NAT	Número de Acidez Total

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Previsões de consumo de querosene no mundo.....	18
Figura 2. Emissões de CO por tipo de movimentação.....	18
Figura 3. Produção de óleo vegetal.....	34
Figura 4. Estrutura química do ácido ricinoleico.....	36
Figura 5. Processo de Transesterificação.....	37
Figura 6. Cromatograma TIC da amostra AP obtido por GC-MS.....	51
Figura 7. Cromatograma TIC da amostra A1 obtido por GC-MS.....	51
Figura 8. Cromatograma TIC da amostra A2 obtido por GC-MS.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Voos comerciais fazendo o uso de bioquerosene.....	21
Tabela 2. Rotas e proporções encontradas na literatura para produção do <i>biobunker</i>	31
Tabela 3. Teor de óleo em plantas oleaginosas.....	35
Tabela 4. Matérias-primas para produção de biodiesel e combustíveis renováveis.....	37
Tabela 5. Planejamento experimental fatorial completo.....	41
Tabela 6. Amostras selecionadas de biodiesel.....	48
Tabela 7. Densidade do biodiesel de rícino corrigida para 15 °C.....	48
Tabela 8. Amostras selecionadas para Cromatografia Gasosa (GC-MS)	50
Tabela 9. Densidade das amostras de biodiesel + diesel S500 corrigida para 15°C.....	53
Tabela 10. Resultados de pH das amostras de biodiesel + diesel S500 corrigida para 15 °C.....	54
Tabela 11. Viscosidade cinemática (40 °C) das amostras de biodiesel + diesel S500.....	55
Tabela 12. Ponto de fulgor das amostras de biodiesel + diesel S500.....	56
Tabela 13. Amostras selecionadas para a mistura de biodiesel + Jet-A1.....	56
Tabela 14. Correção da densidade para 15 °C (ASTM D1250/API MPMS 11.1) para as quatro misturas sintéticas de biodiesel + Jet-A1.....	56
Tabela 15. Resultados de pH das misturas sintética de biodiesel + diesel S500...	58

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade Do Fluido
μ	Viscosidade Dinâmica
ν	Viscosidade Cinemática
β	Coefficiente Volumétrico
ΔT	Variação De Temperatura (°C);

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
OBJETIVO GERAL	Erro! Indicador não definido.
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	Erro! Indicador não definido.
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Erro! Indicador não definido.
2.1. HISTÓRICO DO USO DO COMBUSTÍVEL FÓSSIL NO BRASIL	Erro! Indicador não definido.
2.2. QUEROSENE DE AVIAÇÃO E SUAS PROPRIEDADES	Erro!
Indicador não definido.	
2.2.1. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO QUEROSENE DE	Erro! Indicador não definido.
AVIAÇÃO	
2.3. DIESEL	Erro! Indicador não definido.
2.3.1. DIESEL NO TRANSPORTE MARÍTIMO	Erro! Indicador não
definido.	
3. BIOCOMBUSTÍVEL NO BRASIL.....	Erro! Indicador não definido.
3.1. BIOQUEROSENE	Erro! Indicador não definido.
3.2. BIOBUNKER	Erro! Indicador não definido.
3.3. MATÉRIA-PRIMA	Erro! Indicador não definido.
3.3.1. PRODUÇÃO DE BIODIESEL, BIOQUEROSENE E BIOBUNKER A	Erro! Indicador não definido.
PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO	
4. CATALISADORES HETEROGÊNEOS NA PRODUÇÃO DE	Erro! Indicador não definido.
BIOCOMBUSTÍVEIS.....	
5. MATERIAIS E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido.
5.1. MATERIAIS	Erro! Indicador não definido.
5.2. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	Erro! Indicador não definido.
5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	Erro! Indicador não definido.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E PRODUTOS.....	Erro!
Indicador não definido.	
5.4.1. PH E ACIDEZ	Erro! Indicador não definido.
5.4.2. CROMATOGRAFIA GASOSA	Erro! Indicador não definido.
5.5. ANÁLISE DE CARACTERIZAÇÃO DA MISTURAS SINTÉTICAS (BIODIESEL + DIESEL S500 E BIODIESEL + JET-A1).....	Erro! Indicador não definido.
5.5.1. PONTO DE FULGOR	Erro! Indicador não definido.
5.5.2. DENSIDADE E VISCOSIDADE CINEMÁTICA.....	Erro! Indicador não definido.
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	Erro! Indicador não definido.
6.1. MISTURA SINTÉTICA: BIODIESEL + DIESEL S500.....	Erro! Indicador não definido.
6.2. MISTURA SINTÉTICA : BIODIESEL + JET-A1.....	Erro! Indicador não definido.
7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	Erro! Indicador não definido.
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos líderes mundiais na utilização de biocombustíveis (GUTERRES, 2019), que são combustíveis de origem orgânica não fóssil, produzidos a partir da biomassa ou de seus derivados. Diferentemente dos combustíveis fósseis tradicionais, os biocombustíveis contribuem para a neutralização da pegada de carbono, reduzindo significativamente as emissões de gases do efeito estufa (GEE). Essa redução se dá pela absorção do carbono durante seu ciclo de produção, compensando o CO₂ liberado na sua queima. Além disso, são fontes de energia renováveis, uma vez que utilizam recursos que podem ser constantemente reaproveitados (APROBIO, 2021).

De acordo com dados da OCDE/FAO (2021), o Brasil é o único país onde o uso de biocombustíveis está 10% acima da demanda de energia para o setor de transportes. Entre os biocombustíveis mais utilizados no país destacam-se o biodiesel e o etanol. No entanto, visando expandir a utilização em diferentes meios de transporte, o bioquerosene ou SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), desponta como a alternativa mais viável a curto e médio prazo para a descarbonização do setor de aviação mundial, enquanto o *biobunker* surge como solução sustentável para o setor naval, reduzindo emissões e atendendo às exigências ambientais internacionais (ROITMAN, 2018; CARVALHO, 2021).

O processo de conversão de óleos vegetais ou gorduras animais em biocombustíveis difere entre biodiesel, bioquerosene e biobunker, sendo estes dois últimos mais complexos. O biodiesel é obtido principalmente por transesterificação, reação entre óleo e álcool na presença de catalisadores, gerando combustíveis com propriedades semelhantes às fósseis (KNOTHE, 2010). O bioquerosene é produzido por

rotas como pirólise e hidrocessamento, exigindo etapas rigorosas de separação e refino, enquanto o biobunker é ajustado para uso marítimo, com menor teor de enxofre e redução de material particulado. O crescimento do setor aéreo impulsiona a demanda por combustíveis, tornando estratégico o desenvolvimento de biocombustíveis para aviação. Iniciativas como o CORSIA buscam a neutralidade de carbono até 2050 (ANAC, 2021). No Brasil, projeções indicam expansão do mercado de combustíveis sustentáveis, considerando o crescimento da aviação comercial, responsável por mais de 85% do consumo de combustíveis no país (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016). A inserção de biocombustíveis também contribui para a redução de CO₂, menor dependência de fósseis e integração do setor agrícola.

No transporte marítimo, estratégias de descarbonização incluem metas da IMO, que visam combustíveis de baixo carbono até 2030 e 2040 e neutralidade por volta de 2050 (IMO, 2023). Na União Europeia, o regulamento FuelEU Maritime estabelece reduções progressivas das emissões, de 2% até 2025 e 80% até 2050 (EUROPEAN UNION, 2023). Entre as matérias-primas, o óleo de rícino se destaca pela disponibilidade e alto teor de ácido ricinoleico, cujas propriedades influenciam os processos de conversão (KNOTHE; VAN GERPEN; KRAHL, 2010). A presença de grupo hidroxila confere maior polaridade e viscosidade, impactando reações como transesterificação, pirólise e hidrocessamento (HUBER; IBORRA; CORMA, 2006). Essas características tornam o óleo de rícino promissor para a produção de biodiesel, bioquerosene e *biobunker*, desde que utilizadas condições e catalisadores adequados (KNOTHE, 2008).

Assim, o objetivo desse estudo consiste na síntese de biodiesel a partir do óleo de rícino, para a geração de misturas sintéticas para a produção de bioquerosene e *biobunker*, avaliando as propriedades físico-químicas e caracterizando os biocombustíveis. Nesse contexto, o trabalho contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ao propor alternativas renováveis aos combustíveis fósseis; o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao promover a redução potencial das emissões de gases de efeito estufa; e o ODS 5 (Igualdade de Gênero), ao incentivar a participação

feminina na pesquisa científica e tecnológica, fortalecendo a equidade de gênero no desenvolvimento de soluções sustentáveis (ODS, 2015).

Para atender aos objetivos propostos, esta dissertação foi organizada em sete capítulos. O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando o uso de combustíveis fósseis no Brasil, com ênfase no querosene de aviação e no diesel, suas propriedades, exigências de qualidade e aplicações nos setores aéreo e marítimo. O Capítulo 3 discute os biocombustíveis no Brasil, com foco no bioquerosene e no *biobunker*, destacando suas propriedades, matérias-primas, em especial o óleo de rícino, e as principais rotas de produção. O Capítulo 4 apresenta os fundamentos da catálise heterogênea e o uso da hidroxiapatita como catalisador na produção de biocombustíveis. O Capítulo 5 descreve os materiais e métodos empregados, enquanto o Capítulo 6 apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 7 reúne as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições e perspectivas para estudos futuros.

OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade da utilização do óleo de rícino (*Ricinus communis*) como matéria-prima para a produção de biodiesel e a obtenção de misturas sintéticas com potencial aplicação como bioquerosene (SAF) e *biobunker*, por meio da otimização das condições reacionais e da caracterização das propriedades físico-químicas dos biocombustíveis obtidos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar biodiesel a partir do óleo de rícino por meio de reações de transesterificação, avaliando diferentes razões molares álcool/óleo, concentrações de catalisador e tempos reacionais;
- Investigar a eficiência catalítica de catalisadores homogêneos e heterogêneos aplicados à conversão do óleo de rícino;
- Produzir misturas sintéticas a partir do biodiesel obtido, visando simular características físico-químicas compatíveis com o bioquerosene e o *biobunker*;

- Caracterizar os biocombustíveis produzidos quanto às propriedades físico-químicas relevantes, tais como pH, composição por cromatografia gasosa, densidade, viscosidade cinemática e ponto de fulgor e
- Comparar os resultados obtidos com especificações técnicas e requisitos normativos aplicáveis aos combustíveis para os setores aéreo e marítimo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a ser apresentada contempla a utilização no setor de transporte aéreo e marítimo, de biocombustíveis, em particular, do bioquerosene e *biobunker*, assim como a caracterização, propriedades e matérias-primas utilizadas, se estendendo até às tendências futuras para estes biocombustíveis. Uma ênfase é dada para a produção de biodiesel utilizando o óleo de rícino como matéria-prima, usando como catalisador a hidroxiapatita, de forma a gerar uma mistura sintética para a produção dos biocombustíveis.

2.1. HISTÓRICO DO USO DO COMBUSTÍVEL FÓSSIL NO BRASIL

Os combustíveis fósseis abastecem setores industriais, automotores e elétricos de grande parte do mundo. A matriz energética brasileira é considerada uma das mais renováveis do mundo, apesar do uso de combustíveis fósseis no Brasil ainda ser alto. O país é dependente do seu uso, sendo em torno de 36% constituído por combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral (UBRABIO, 2025).

Após a I Guerra Mundial, a procura por fontes de energia desenvolveu a busca pelo investimento de companhias estrangeiras de petróleo na América Latina, impulsionada pela abertura dos setores de energia e transporte. O volume consumido entre 1913 e 1916 de óleo para combustíveis aumentou, de forma que gerou modificações no mercado de derivados de petróleo no Brasil.

Novamente, as companhias estrangeiras retornaram seu interesse pela exploração de petróleo no Brasil com a I Guerra Mundial com um novo objetivo. O presidente Getúlio Vargas iniciou a campanha “O petróleo é nosso” e em resposta, a política econômica do país proveniente da exploração do petróleo progrediu, sendo criada na

década de 1950, a Petrobras e seu Centro de aperfeiçoamento e Pesquisa de Petróleo (ALMEIDA, 2008).

Com a progressão e avanço tecnológico, e a descoberta das reservas do Pré-Sal, houve a necessidade de mudança no modelo de exploração do petróleo, no intuito de promover estudos e alterações neste para um modelo mais eficiente. Dessa forma, em 2012, as reservas já constituíam 53,6% de todas as reservas de petróleo do Brasil, onde 94% delas se situam na região marítima (MARTINS; VERÍSSIMO, 2013). Hoje, o Brasil demonstra uma autossuficiência de petróleo, porém continua sendo dependente de importação de derivados do petróleo. De acordo com a ANP (2019), o Brasil importa cerca de 15 milhões de barris de derivados por ano, correspondendo principalmente a diesel, gasolina e nafta.

Diante da contínua dependência de derivados de petróleo e dos impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis, a necessidade de fortalecer políticas e tecnologias voltadas para fontes energéticas sustentáveis é iminente. Entre essas fontes sustentáveis, destacam-se o biodiesel, o bioquerosene de aviação e o *biobunker*.

2.2. QUEROSENE DE AVIAÇÃO E SUAS PROPRIEDADES

O querosene de aviação, também denominado *Jet-A1* ou QAV é um derivado de petróleo proveniente de processos de refino como fracionamento por destilação atmosférica. Esse tipo de querosene é projetado especificamente para uso em motores de turbina a gás, como os encontrados em aeronaves. É um componente crítico da indústria da aviação pois suas propriedades físico-químicas estão diretamente relacionadas à segurança, ao desempenho e à confiabilidade das aeronaves, além de desempenhar papel significativo na garantia da eficiência de aviões e helicópteros (REALPE, 2016).

Pode ser definido como uma forma refinada de querosene, a base de hidrocarbonetos. É normalmente um líquido límpido, com ponto de ebulição entre 150 °C e 275 °C (BRITANNICA, 2023). Existem diferentes tipos de querosene de aviação, sendo *Jet A* e *Jet A-1* os mais usados em todo o mundo. O *Jet A-1* ou QAV (Querosene de Aviação) é uma versão um pouco mais robusta, com padrões de controle de qualidade

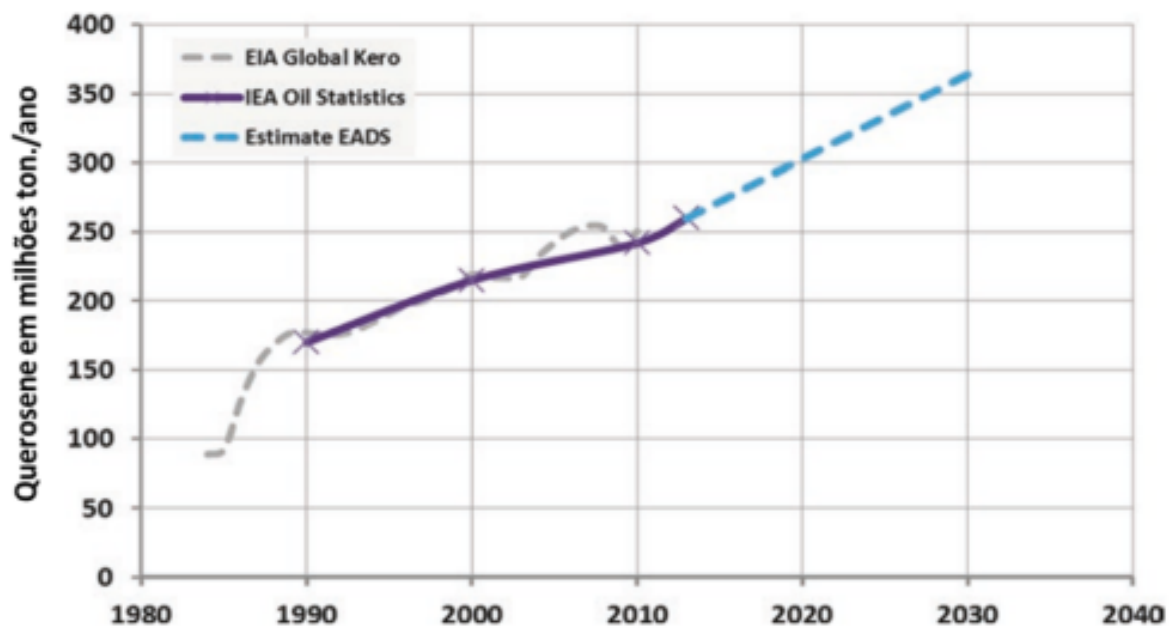
mais restritos para garantir que seja adequado para uso em uma maior faixa de temperaturas e climas (DAGAUT & CATHONNET, 2006).

Embora o querosene possa ser extraído do carvão, xisto betuminoso e madeira, ele é derivado principalmente do petróleo refinado, sendo grande emissor de poluentes. Antes da luz elétrica ser utilizada popularmente, o querosene era amplamente utilizado em lamparinas a óleo e era um dos produtos de refinaria mais importantes. Atualmente, o querosene é usado principalmente como óleo de aquecimento, como combustível em aviões motores e como solvente para sprays de inseticidas (ENERGY EDUCATION, 2023).

A Figura 1 apresenta a evolução do consumo de querosene, que se iniciou em 1990 e seu crescimento foi se desenvolvendo a uma taxa média de 2,2%/ano. A perspectiva futura até 2030, é de que o crescimento observado permaneça numa trajetória semelhante ou mesmo ligeiramente superior e com aeronaves cada vez mais eficientes, principalmente através da expansão do transporte aéreo civil (WADUD, 2015).

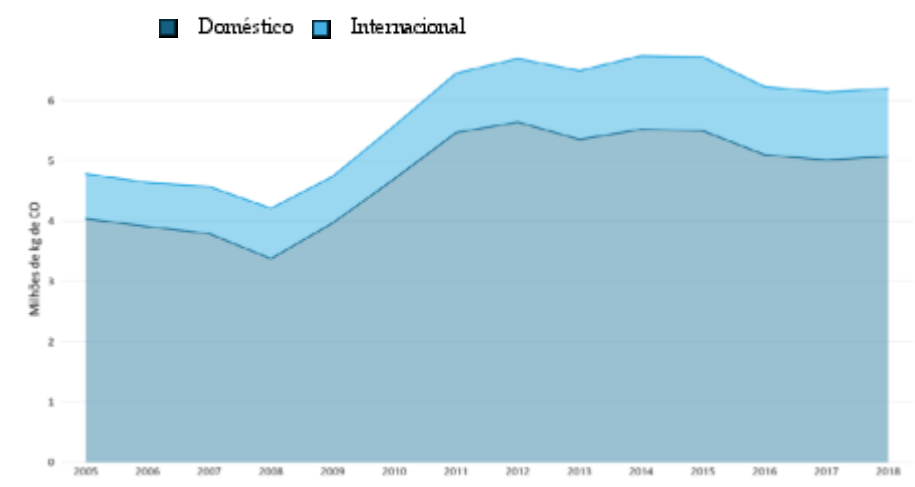
Com o aumento do consumo de querosene, como combustível mais utilizado no transporte aéreo, o efeito resultante é o aumento das emissões de CO₂ como a representada na Figura 2. Sendo o principal combustível de aviação devido ao seu custo significativamente mais barato que a gasolina, sua queima dá origem a diversos poluentes perigosos, que contribuem com o aquecimento global, como o monóxido e o dióxido de carbono, os hidrocarburetos gasosos e os óxidos de nitrogênio (ECYCLE, 2023).

Figura 1. Previsões de consumo de querosene no mundo



Fonte: Adaptado de Airbus/EADS, 2015.

Figura 2. Emissões de CO por tipo de movimentação



Fonte: Adaptado de ANAC, 2019.

Assim, a indústria da aviação trabalha continuamente para reduzir o impacto ambiental do querosene de aviação, desenvolvendo motores mais eficientes e explorando combustíveis alternativos. Os Combustíveis Sustentáveis De Aviação (SAF's) são uma dessas iniciativas que visam reduzir as emissões de gases com efeito estufa provenientes da aviação.

2.2.1. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO

A diferença dos tipos de querosene de aviação ocorre em relação ao ponto de congelamento e ao ponto de fulgor, apresentando, quando necessárias, adequações do produto às questões de segurança e necessidades específicas, como por exemplo, no uso militar (REALPE, 2016).

Uma das propriedades importantes do querosene de aviação é o seu baixo ponto de congelamento, que é crucial para aeronaves que operam em grandes altitudes, onde as temperaturas podem reduzir drasticamente. O ponto de congelamento específico pode variar dependendo do grau e da região, mas normalmente mantém-se bem abaixo das altitudes típicas de cruzeiro. Em contrapartida, possui ponto de inflamação relativamente alto, tornando-o menos sujeito à ignição em condições normais. Este é um recurso de segurança para evitar incêndios acidentais durante o manuseio e armazenamento (DAGAUT & CATHONNET, 2006).

Ademais, o querosene possui uma classificação de viscosidade menor durante o período de voo quando comparado à gasolina, o que significa que ele não possui característica tão espessa como a gasolina. Essa característica torna-se crucial pois combustíveis altamente viscosos podem causar entupimento nos canais internos do motor de um avião. Como o querosene apresenta um ponto de congelamento menor do que a gasolina, ele consegue se manter menos viscoso do que a gasolina durante os voos (APROBIO, 2023).

A especificação brasileira para o querosene de aviação é estabelecida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), atualmente

regulamentada pela Resolução ANP nº 856, de 6 de dezembro de 2021 (BRASIL, 2021). Essa norma define os requisitos de qualidade para os querosenes de aviação de origem fóssil (*JET A* e *JET A-1*), bem como para os querosenes de aviação alternativos, também denominados combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), estando alinhado às especificações internacionais, como as normas ASTM e as diretrizes adotadas pela aviação civil internacional (FARAH, 2012). Resumidamente, as principais características físico-químicas dos querosenes de aviação, particularmente para os combustíveis de aviação comercial englobam os seguintes aspectos (BRASIL, 2009):

- Composição e caracterização química (teor de aromáticos, teor de enxofre, índice de acidez);
- Propriedades de escoamento, como viscosidade cinemática, densidade, pressão de vapor e ponto de congelamento e
- Propriedades térmicas, como conteúdo energético do combustível em relação à sua massa específica, ponto de fulgor e estabilidade térmica (formação de goma).

Em paralelo, a Resolução ANP nº 856/2021 também regulamenta o uso de querosenes de aviação alternativos, produzidos a partir de matérias-primas renováveis ou rotas tecnológicas específicas, tais como HEFA (Ésteres e Ácidos Graxos Hidrotratados), FT-SPK (Querosene Parafínico Sintético de Fischer-Tropsch), ATJ-SPK (Querosene Parafínico Sintético de Álcool para Jato) e outras rotas aprovadas internacionalmente. Embora esses biocombustíveis apresentem origem distinta e menor intensidade de carbono, a norma brasileira exige que, após a mistura com o querosene fóssil, o combustível final atenda aos mesmos limites físico-químicos e critérios de desempenho estabelecidos para o *JET A* e o *JET A-1* convencionais, garantindo plena compatibilidade com os sistemas aeronáuticos existentes (BRASIL, 2021).

As exigências de qualidade para uso em turbinas aeronáuticas são as seguintes (BRASIL, 2011):

- Proporcionar máxima autonomia de voo;

- Vaporizar-se adequadamente no interior da câmara de combustão da turbina, proporcionando “chama limpa”, minimizando assim a formação de fuligem;
- Proporcionar partidas fáceis e seguras, e ter facilidade de combustão;
- Minimizar a formação de resíduos e cinzas por combustão;
- Escoar facilmente em baixa temperatura;
- Ser estável química e termicamente;
- Não ser corrosivo aos materiais da turbina;
- Minimizar a tendência à solubilização de água;
- Ter aspecto límpido, indicando ausência de sedimentos e de alteração de cor;
- Não apresentar água livre, evitando o desenvolvimento de microrganismos e a obstrução de filtros e
- Oferecer segurança no manuseio e na estocagem.

2.3. DIESEL

O diesel é um combustível derivado do petróleo, composto majoritariamente por hidrocarbonetos de cadeia longa, obtido através da destilação fracionada do óleo cru. Sua faixa de ebulição se encontra entre 200 e 370 °C, e sua composição química é dominada por parafinas, naftenos e aromáticos. Amplamente utilizado em motores de ignição por compressão, o diesel apresenta elevada densidade energética, o que o torna um dos principais combustíveis no transporte terrestre, marítimo e industrial (SANTOS *et al.*, 2022).

Devido à sua eficiência termodinâmica e custo relativamente baixo, o diesel consolidou-se como um dos pilares do setor de transporte global (OLIVEIRA, 2023). Entretanto, seu uso está diretamente associado à emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (OLIVEIRA, 2023).

2.3.1. DIESEL NO TRANSPORTE MARÍTIMO

O setor marítimo é responsável por, aproximadamente, 80% do volume do comércio internacional, o que reforça a importância dos combustíveis utilizados nesse segmento (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO, 2020). Tradicionalmente, as embarcações utilizam o óleo combustível marítimo (*bunker*), derivado das frações mais pesadas do petróleo. Contudo, com o avanço das regulamentações ambientais, especialmente a IMO 2020, que limita o teor máximo de enxofre nos combustíveis marítimos a 0,5% em massa, o uso do diesel marítimo (*Marine Diesel Oil* – MDO) passou a ganhar destaque.

O diesel marítimo apresenta características intermediárias entre o diesel automotivo e o bunker convencional, destacando-se pelo menor teor de enxofre e pela melhor qualidade de combustão. No entanto, seu custo elevado e a dependência de fontes fósseis ainda representam entraves para a adoção em larga escala. A densidade do MDO varia tipicamente entre 820 e 870 kg·m⁻³ a 15 °C, enquanto a viscosidade cinemática situa-se entre 2,0 e 6,0 mm²·s⁻¹, parâmetros que influenciam diretamente o desempenho e a eficiência dos motores marítimos (RODRIGUES; SILVA; ALMEIDA, 2023). O ponto de fulgor, geralmente superior a 60 °C, garante maior segurança no armazenamento e transporte, em conformidade com a norma ISO 8217 (ISO, 2023).

Apesar dessas vantagens, a queima de diesel no transporte marítimo contribui significativamente para a poluição atmosférica, especialmente em áreas portuárias e rotas de intenso tráfego. O setor naval é responsável por cerca de 2,5% das emissões globais de CO₂, além da liberação de poluentes como SO_x e NO_x (IMO, 2021). Em resposta, têm sido adotadas estratégias como o uso de combustíveis com baixo teor de enxofre, misturas com biocombustíveis e o desenvolvimento de tecnologias híbridas.

A adoção de misturas contendo componentes de origem renovável tem sido vista como uma solução promissora para reduzir as emissões sem exigir modificações significativas nos motores. Nesse contexto, o *biobunker* surge como uma alternativa sustentável, combinando frações de diesel mineral, biodiesel e, potencialmente, hidrocarbonetos renováveis como o diesel verde ou o bioquerosene.

O *biobunker* é definido como um combustível marítimo formulado a partir da mistura de derivados fósseis e biocombustíveis, de modo a atender às especificações de

desempenho e aos requisitos ambientais do setor naval (LIMA *et al.*, 2024). O diesel desempenha papel central nessa formulação, servindo como matriz base para compatibilizar propriedades físico-químicas e melhorar a estabilidade da mistura.

Do ponto de vista técnico, o diesel contribui para:

- Ajuste da viscosidade e densidade, garantindo o bombeamento e a atomização adequados no sistema de injeção;
- Elevação do ponto de fulgor, aumentando a segurança operacional e
- Melhoria na ignição e combustão, devido ao seu alto número de cetano (entre 45 e 55) e estabilização das fases em misturas com biodiesel e compostos renováveis, minimizando a separação e a degradação oxidativa.

A incorporação de biodiesel no *biobunker* pode variar entre 30% e 70%, dependendo da disponibilidade de matérias-primas renováveis e das especificações normativas exigidas. A mistura ideal deve apresentar densidade entre 850 e 890 kg·m⁻³, viscosidade entre 3,5 e 12 mm²·s⁻¹, teor de enxofre inferior a 0,5%, e ponto de fulgor mínimo de 60 °C, de acordo com os parâmetros da ISO 8217 (ISO, 2023).

Além disso, a adição de diesel auxilia na manutenção da estabilidade térmica e oxidativa, aspectos críticos durante o armazenamento prolongado em tanques de bordo, onde o combustível pode ser exposto a variações de temperatura e contaminação por água salina.

A transição energética no setor marítimo requer combustíveis com menor pegada de carbono, mantendo desempenho e segurança equivalentes aos fósseis convencionais. Nesse cenário, o diesel ainda ocupa um papel estratégico como componente de transição, permitindo a gradual substituição por biocombustíveis avançados, como o bioquerosene (SAF).

Os projetos de co-processamento em refinarias, se mostram promissores para a conversão de óleos vegetais e gorduras residuais em hidrocarbonetos compatíveis com o diesel fóssil. Tais tecnologias possibilitam a obtenção de misturas compatíveis com motores marítimos existentes, reduzindo as emissões de CO₂ e o teor de enxofre, além de promover a valorização de resíduos agroindustriais.

3. BIOCOMBUSTÍVEL NO BRASIL

Nos últimos anos, o Brasil tem se destacado como um dos líderes mundiais na produção e uso de biocombustíveis, consolidando-se como referência em energia renovável. Esse movimento começou ainda na década de 1970, com o Programa Nacional do Alcool (Pró-Alcool), criado em resposta às crises do petróleo e voltado à produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar (BIODIESELBR, 2014).

Além do etanol, o Brasil também investiu na produção de biodiesel, outro biocombustível derivado de fontes vegetais, obtidos a partir de óleos vegetais, açúcares, amidos, lignocelulose ou outros insumos agrícolas renováveis, sendo produzido por transesterificação (ANP, 2017). O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), criado em 2004, impulsionou a mistura obrigatória de biodiesel ao diesel de petróleo, promovendo uma maior diversificação da matriz energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (LEITE & LEAL, 2007).

Logo após a entrada do Brasil, no Acordo de Paris, o RenovaBio foi criado, intervindo na política quanto à propagação do uso de biocombustíveis. Esse programa teve como objetivo expandir a aplicação de biocombustíveis na matriz energética, com ênfase em seu aumento para aproximadamente 18% até 2030 (SILVA *et al.*, 2022). Sabe-se que os biocombustíveis são considerados um combustível neutro em carbono devido ao seu processo de “sequestro” do CO₂ durante o cultivo da matéria-prima. Pensando nisso, um dos artifícios empregados pelo RenovaBio para cumprir os compromissos assumidos na COP21 foi o Crédito de Descarbonização (CBIO).

Apesar dos benefícios na utilização de biocombustíveis, o setor enfrenta desafios como a necessidade de maior investimento em tecnologias avançadas, além de um aprimoramento da infraestrutura de distribuição. Para incentivar o uso de fontes renováveis de energia, o Conselho Nacional de Política Energética em 2021 outorgou o Programa Combustível do Futuro (PCF), motivando o uso dessas e o desenvolvimento de tecnologia nacional atribuídos à elas. Mais ainda, tem como intuito promover uma organização interinstitucional e integração das políticas públicas relacionadas aos combustíveis. Criou-se também o Comitê Técnico Combustível do Futuro, composto por diversos órgãos e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil (MME),

responsável por propor ações relacionadas à descarbonização da matriz de transportes brasileira (BRASIL, 2017).

Olhando pela perspectiva econômica e sustentável do uso de biocombustíveis no Brasil, o biodiesel possui características que o tornam especialmente relevante quando comparado ao etanol, principalmente por causa do tipo de setor em que ele é aplicado. Enquanto o etanol é amplamente utilizado em veículos leves com motores do ciclo Otto (carros *flex*), o biodiesel é misturado ao diesel, combustível predominante no transporte pesado, como caminhões, navios, ônibus, máquinas agrícolas e equipamentos industriais; setores que apresentam maior volume de combustível utilizado e maiores emissões de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, o biodiesel destaca-se como um componente fundamental por contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos climáticos internacionais assumidos pelo Brasil, formalizados por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, que define metas como redução das emissões de gases de efeito estufa entre 59% e 67% das emissões até 2035 e alcançar neutralidade climática (net zero) até 2050 (BRASIL, 2025).

3.1. BIOQUEROSENE

O bioquerosene de aviação, também conhecido como SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), é um biocombustível produzido a partir de recursos renováveis, como óleos vegetais, gorduras animais, resíduos urbanos e outras biomassas (IEA, 2021). Os SAFs devem atender a padrões e critérios de certificação específicos para serem utilizados na aviação comercial. Para manter a qualidade e segurança dos combustíveis verdes, organizações incluindo a ASTM International e a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), estabelecem padrões para SAFs (ATSONIOS & INGLEZAKIS, 2023).

O bioquerosene deve ser livre de impurezas e compostos que possam comprometer o funcionamento do sistema de combustão a jato. A partir de sua utilização é possível reduzir em até 80% as emissões de carbono da aviação comercial. Todos os SAF's produzidos devem atender as principais propriedades para a sua caracterização que são:

a) Ponto de Congelamento

O bioquerosene deve ter um ponto de congelamento muito baixo para evitar a formação de cristais de gelo em grandes altitudes. Normalmente, o valor encontrado é de $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou mais baixo, a depender da norma e do tipo de aeronave.

b) Viscosidade

O bioquerosene precisa manter uma viscosidade adequada em diferentes temperaturas para garantir a fluidez do combustível nas tubulações e sistemas de injeção do motor, sendo seu valor máximo de $8\text{ mm}^2/\text{s}$ a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

c) Densidade

A densidade do bioquerosene deve estar dentro de uma faixa de 775 a $840\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ para garantir o desempenho e cálculo da autonomia de voo.

d) Poder Calorífico

O bioquerosene precisa oferecer um alto poder calorífico, em torno de $42,8\text{ MJ/kg}$, para garantir a eficiência energética durante o voo.

e) Pureza e Ausência de Impurezas

O bioquerosene deve ser altamente puro, livre de contaminantes inorgânicos e compostos que possam afetar negativamente o sistema de combustão ou danificar o motor a jato. Para materiais particulados, é mantido um limite rigoroso de impurezas sólidas, sendo aceitável para ambos um valor máximo de 30 ppm .

f) Ponto de Fulgor

É a menor temperatura em que o combustível pode formar uma mistura inflamável no ar. Esse ponto é crítico para a segurança no manuseio e transporte, devendo apresentar um valor mínimo de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

g) Estabilidade Térmica

O bioquerosene destinado ao uso aeronáutico deve apresentar elevada estabilidade térmica, para resistir às altas temperaturas encontradas no sistema de combustível das aeronaves, sem promover a formação de depósitos sólidos capazes de causar obstruções

em linhas, válvulas e filtros. Essa propriedade é comumente avaliada por meio do *Jet Fuel Thermal Oxidation Test* (JFTOT), conduzido conforme a norma ASTM D3241. De acordo com os critérios estabelecidos para combustíveis de aviação, o combustível é considerado termicamente estável quando apresenta classificação visual do tubo aquecido igual ou inferior a 3 e queda de pressão no filtro inferior a 25 mmHg, sob temperatura típica de ensaio de 260 °C.

h) Lubricidade

O combustível deve ter propriedades lubrificantes suficientes para minimizar o desgaste nas bombas e nos sistemas de injeção de combustível.

i) Conteúdo de Enxofre

O bioquerosene deve ter baixo teor de enxofre, com máximo de 0,002% em massa para minimizar emissões de dióxido de enxofre (SO₂), que contribuem para a poluição atmosférica.

j) Composição Química

O bioquerosene deve ser composto majoritariamente de hidrocarbonetos (parafinas, isoparafinas e cicloparafinas) que garantam o desempenho do combustível. A presença de compostos oxigenados ou aromáticos deve ser controlada.

k) Índice de Aromáticos

O teor de compostos aromáticos (hidrocarbonetos com anéis benzênicos) deve ser limitado a 25% em volume, para evitar formação excessiva de fuligem.

Essas propriedades são essenciais para garantir que o bioquerosene tenha um desempenho equivalente ao querosene de aviação convencional (*Jet A* ou *Jet A-1*) e para que ele possa ser utilizado em misturas com combustíveis fósseis em motores de aviação sem necessidade de adaptações tecnológicas nos motores das aeronaves.

Trabalhos como o de Llamas *et al.* (2012) já fazem o uso de rotas mais tradicionais, além de matérias-primas acessíveis na zona geográfica, como o óleo de palmiste e o óleo de coco. Os óleos foram sintetizados e transesterificados com metanol pelo método clássico de catálise básica homogênea. Os FAME's (*Fatty Acid Methyl*

Ester) foram submetidos a destilação fracionada no vácuo, e as frações de baixo ponto de ebulição foram misturadas com dois tipos de querosene fóssil, um corte de destilação atmosférica de execução direta (hidrotratado) e um *Jet A1* comercial. O bioquerosene de coco destilado entre 47 e 114 °C a 2 Torr teve um rendimento de 81,8% em peso com base no FAME do coco e deixando 12,6% em fração de fundo (fundo de coco). O bioquerosene de palmiste destilou entre 35 e 113 °C a 2 Torr com um rendimento de 40,8% com base no FAME do palmiste.

Os resultados obtidos não atenderam aos padrões necessários de aviação. Por outro lado, as misturas de bioquerosene de palmiste e querosene fóssil de destilação atmosférica atenderam apenas aos parâmetros de densidade e viscosidade a -20 °C. As misturas de bioquerosene de coco e querosene fóssil de destilação atmosférica atenderam às seguintes especificações: densidade, viscosidade a -20 °C e lubricidade. É especialmente perceptível que todas as misturas de 5 vol.% de bioquerosene e querosenes fósseis não atenderam ao baixo poder calorífico por uma margem muito estreita, inferior a 1,0 MJ kg. Concluiu-se que seria viável misturar bioquerosenes de coco e palmiste preparados dessa maneira com o *Jet A1* comercial até 10 vol.% do primeiro.

Em seu outro trabalho, Llamas *et al.* (2012) utilizaram os óleos de babaçu e camelina, transesterificados com metanol utilizando também o método de catálise básica homogênea. O éster metílico de ácidos graxos de babaçu (FAME) foi submetido à destilação fracionada a vácuo, sendo a fração de baixo ponto de ebulição misturada com dois tipos de querosene fóssil: um corte de destilação atmosférica direta (hidrotratado) e um *Jet-A1* comercial. Por outro lado, o FAME de camelina foi diretamente misturado ao querosene fóssil, sem passar por destilação prévia. As misturas de bioquerosene de babaçu e *Jet-A1* atenderam a diversas especificações selecionadas da norma ASTM D1655, incluindo: ponto de fumaça, densidade, ponto de fulgor, viscosidade cinemática, estabilidade oxidativa e poder calorífico inferior. Em contraste, as misturas de bioquerosene de babaçu misturadas ao corte de destilação atmosférica atenderam apenas aos parâmetros de densidade e estabilidade oxidativa.

Já o biodiesel oriundo da camelina com o corte de destilação atmosférica atenderam às especificações de densidade, viscosidade cinemática a -20 °C e poder

calorífico inferior, reafirmando a conclusão de seu trabalho anterior, que ao misturar bioquerosenes de babaçu e camelina, preparados conforme descrito, com *Jet-A1* comercial, pode ser utilizado em proporções de até 10% em volume.

Assim, o desenvolvimento do bioquerosene de aviação (SAF) representa um importante avanço na busca por soluções sustentáveis para a descarbonização do setor aéreo, historicamente dependente de combustíveis fósseis. Embora ainda existam desafios técnicos, econômicos e estruturais a superar, os resultados da literatura e as iniciativas nacionais e internacionais apontam para a viabilidade e o papel estratégico do bioquerosene na transição para uma aviação mais limpa e sustentável.

No Brasil, a principal matéria-prima utilizada para fabricação de querosene vegetal é a cana-de-açúcar. Além dela, também pode-se incluir resíduos como grãos, sementes oleaginosas, algas, biomassa lignocelulósica, como madeira e palha, resíduos orgânicos e animais. Porém, para garantir viabilidade de uso, o bioquerosene deve ser misturado ao querosene de aviação (QAV) (BRASIL, 2021).

Nos últimos anos, a entrada dos biocombustíveis no setor de aviação tem ganhado espaço como uma solução promissora para reduzir as emissões de carbono e promover uma aviação mais sustentável (IRENA, 2017). O Brasil, com sua vasta experiência no uso de biocombustíveis no setor automotivo, já deu os primeiros passos para a introdução dos SAFs na aviação. O país possui um potencial significativo para a produção de biocombustíveis de aviação, graças à sua expertise na produção de etanol e biodiesel, e à abundância de matéria-prima disponível.

Consequentemente às ações criadas, surge a necessidade desses combustíveis para o alcance das metas acordadas por diversos países e companhias aéreas. Além disso, já existem rotas testadas e homologadas no Brasil para a sua produção como HEFA-SPK, FT-SPK, ATJ-SPK, dentre outras (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024) e o contexto inserido já oferece significativas oportunidades para o desenvolvimento da produção de biocombustíveis de aviação. A exemplo disso na Tabela 1 é possível ver algumas empresas aéreas que já utilizaram misturas contendo SAF e seu histórico de utilização.

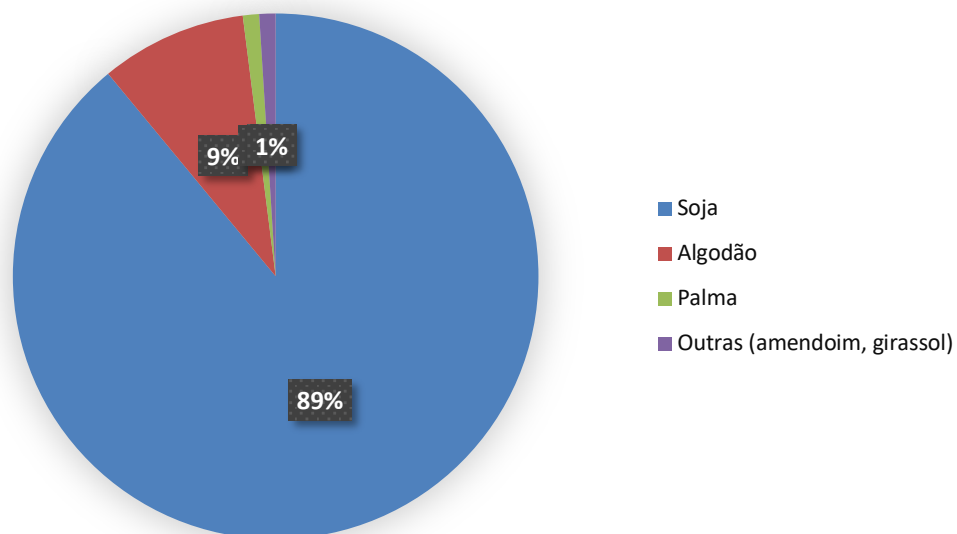
Tabela 1. Voos comerciais fazendo o uso de bioquerosene

Empresa	Matéria-Prima	Mistura	Ano	Referências
TAM	Pinhão Manso	50-50	2010	Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil, 2014
Boing/Embraer	-	10-90	2016	Nova Cana, 2016
Virgin Atlantic	Coco e Semente de Babaçu	50-50	2008	Instituto Brasileiro de Aviação, 2018
Airbus	-	65-35	2021	Aeroflap, 2021
KLM	Óleo de cozinha reutilizado	50-50	2011	Instituto Brasileiro de Aviação, 2018

3.2. MATÉRIA-PRIMA

O processo de síntese dos biocombustíveis utiliza diversas matérias-primas que podem ser divididas em três categorias principais: óleos vegetais, gorduras animais e biomassa lignocelulósica (ANP, 2019). Cada uma dessas matérias-primas tem características distintas que influenciam a eficiência, os custos e a sustentabilidade do processo de produção. A produção de óleo varia com o local; no Brasil, a produção de óleo vegetal pode ser observada na Figura 3, com as principais matérias-primas utilizadas e sua proporção em relação as demais.

Figura 3. Produção de óleo vegetal.



Fonte: Adaptado de CONAB, 2025.

O óleo de soja é a principal matéria-prima utilizada para a produção de biodiesel no Brasil. Ele representa aproximadamente 70–75% das matérias-primas utilizadas na produção nacional de biodiesel, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) (ANP, 2024). Essa utilização se dá pelo fato de que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de soja, com produção superior a 160 milhões de toneladas de grãos por safra. Isso garante grande disponibilidade de óleo de soja como subproduto do processamento da soja e justifica a sua proporção de 89% em relação aos demais óleos (ABIOVE, 2024).

Na Tabela 3 o teor de óleo de diferentes espécies oleaginosas utilizadas pode indicar potenciais matérias-primas na produção de biocombustíveis. Observa-se que o copra (óleo de coco) e o babaçu destacam-se com os maiores teores de óleo, variando entre 60% e 68%, o que os torna altamente atrativos do ponto de vista energético. Em seguida, culturas como gergelim, mamona (óleo de rícino), palma (dendê), amendoim e colza apresentam teores intermediários, entre 40% e 55%, oferecendo bom equilíbrio entre produtividade e disponibilidade de biomassa.

Tabela 3. Teor de óleo em plantas oleaginosas

Fonte de Óleo	Teor de óleo (%)
Copra	66-68
Babaçu	60-65
Gergelim	50-55
Mamona	46-50
Polpa de palma (dendê)	45-50
Caroço de palma	45-50
Amendoim	45-50
Colza	40-45
Girassol	35-45
Açafrão	30-35
Oliva	25-30
Algodão	18-20
Soja	18-20

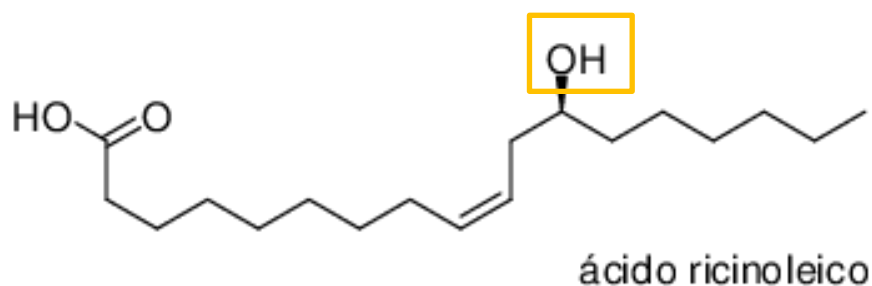
Fonte: Adaptado de CAMARGOS, 2005

O óleo de rícino (extraído da planta *Ricinus communis*), matéria-prima escolhida para o estudo, tem sido avaliada como promissora para biocombustíveis devido ao seu elevado teor de ácido ricinoleico ($\approx 80\text{--}90\%$), facilidade de cultivo em solos marginais e aplicabilidade em regiões tropicais. Essas características tornam o óleo de rícino atraente para a produção de biodiesel e, por via oleoquímica, para conversão em combustíveis avançados como bioquerosene (SAF) e combustíveis marítimos renováveis (*biobunker*) (OSORIO-GONZÁLEZ, 2020; CHAUKE, 2019). A influência da escolha do óleo de rícino para esse estudo também é motivada pela continuidade do estudo desenvolvido no Laboratório de Termodinâmica Aplicada a Biocombustíveis (LTAB).

O óleo de rícino se diferencia pela adição do grupo hidroxila no carbono 12 do ácido ricinoleico, o que resulta em alta viscosidade, maior polaridade e menor estabilidade oxidativa (Figura 4), o que não acontece em óleos comuns como os de soja

e palma. Essas propriedades exigem etapas de pré-tratamento e condições reativas específicas para alcançar biodiesel com propriedades físicas dentro dos limites normativos (viscosidade, ponto de fluidez, estabilidade à oxidação) (CHAUKE, 2019).

Figura 4. Estrutura química do ácido ricinoleico



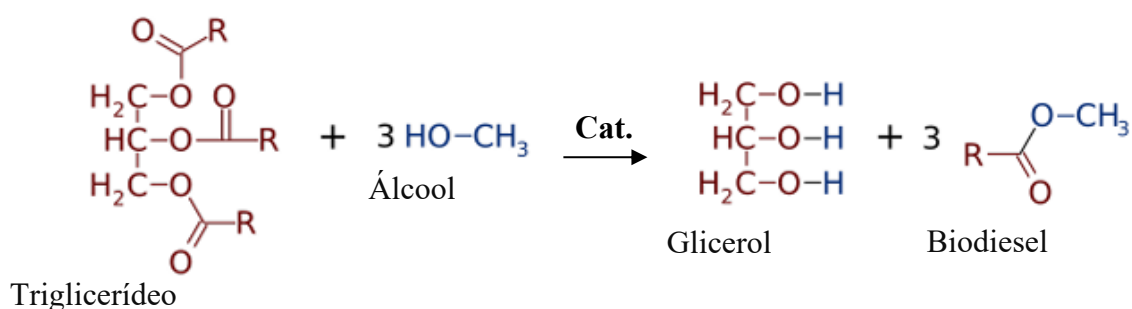
Fonte: Adaptado de MORAIS, 2013

3.2.1. PRODUÇÃO DE BIODIESEL, BIOQUEROSENE E *BIOBUNKER* A PARTIR DO ÓLEO DE RÍCINO

A produção de biodiesel a partir do óleo de rícino segue, em linhas gerais, as etapas de (i) caracterização e pré-tratamento (remoção de água e ácidos graxos livres), (ii) esterificação (quando há alto teor de ácidos graxos livres) e (iii) transesterificação para obtenção de ésteres metílicos/etílicos (FAME/FAEE) como representado na Figura 5.

A transesterificação é uma reação química amplamente empregada na produção de biodiesel, na qual triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou gorduras animais reagem com um álcool de cadeia curta, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador ácido, básico ou enzimático, formando ésteres monoalquílicos e glicerol como subproduto. Esse processo reduz significativamente a viscosidade do óleo original, tornando o combustível compatível com aplicações energéticas.

A transesterificação destaca-se por sua elevada eficiência, condições operacionais relativamente brandas e ampla aplicação industrial e aceita pela ANP, sendo uma das rotas mais consolidadas para a conversão de biomassa lipídica em biocombustíveis (ATADASHI et al., 2021). Em óleos com elevado teor de ácido graxo livre, é comum empregar uma etapa ácida (esterificação com ácido sulfúrico, por exemplo) antes da transesterificação alcalina para evitar saponificação (OSORIO-GONZÁLEZ, 2020).

Figura 5. Processo de Transesterificação

Fonte: Adaptado de IEA, 2017

É possível encontrar na literatura tanto sínteses homogêneas (NaOH, KOH, metóxidos) quanto heterogêneas (catalisadores sólidos básicos ou ácidos, zeólitas, catalisadores a base de CaO/carvão) para o óleo de rícino. Técnicas auxiliares como aquecimento moderado, agitação intensiva, ultrassom ou micro-ondas têm sido empregadas para reduzir tempo de reação e melhorar rendimento (RATHORE & TYAGI., 2022).

Ainda assim, existe uma ampla variedade de matérias-primas com potencial para produção de biodiesel e combustíveis renováveis. A Tabela 4 apresenta uma comparação entre algumas das principais fontes lipídicas estudadas, considerando o teor de óleo, produtividade estimada e possíveis aplicações energéticas.

Tabela 4. Matérias-primas para produção de biodiesel e combustíveis renováveis

Matéria-prima	Teor de óleo (%)	Produtividade de óleo (kg/ha·ano)	Aplicações potenciais	Referência
Soja	18–20	400–600	Biodiesel, diesel renovável	KNOTHE; VAN GERPEN; KRAHL, 2015
Palma / Dendê	45–55	4000–6000	Biodiesel, diesel verde, SAF	DEMIRBAS, 2009
Girassol	40–50	800–1000	Biodiesel	ATADASHI <i>et al.</i> , 2021
Canola / colza	40–45	1000–1500	Biodiesel, bioquerosene	RATHORE; TYAGI, 2022
Mamona / rícino	45–50	1200–2000	Biodiesel, misturas sintéticas	OSORIO-GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2020
Jatropha	30–40	1000–2000	Biodiesel	KHAN <i>et al.</i> , 2022

Algodão	15–20	300–500	Biodiesel	ATADASHI <i>et al.</i> , 2021
Microalgas	20–60	2000–8000	Biodiesel, SAF	PRAVEENA <i>et al.</i> , 2024

Fonte: Autoria própria, 2026.

Quando comparado a outras matérias-primas apresentadas na literatura, o óleo de rícino apresenta vantagens relacionadas à sustentabilidade e à disponibilidade em determinadas regiões, embora sua produção global ainda seja significativamente inferior à de culturas amplamente estabelecidas, como soja e palma. Dessa forma, a escolha do óleo de rícino como matéria-prima em estudos experimentais está frequentemente associada ao seu potencial como fonte alternativa de biocombustíveis e à possibilidade de desenvolvimento de cadeias produtivas regionais baseadas em culturas não alimentares.

Como pode ser observado na tabela acima, o óleo de palma (dendê) apresenta uma das maiores produtividades de óleo por hectare entre as culturas oleaginosas, sendo amplamente utilizado em países do Sudeste Asiático para produção de biodiesel e diesel renovável. No entanto, seu cultivo está associado a limitações geográficas e a preocupações ambientais relacionadas à expansão de áreas agrícolas em regiões tropicais, o que incentiva a busca por alternativas sustentáveis (RATHORE & TYAGI, 2022).

Nesse contexto, o óleo de rícino surge como uma matéria-prima de grande interesse científico, especialmente em países de clima tropical e semiárido. A mamona apresenta elevado teor de óleo nas sementes, podendo atingir valores entre 45 e 50%, além de apresentar capacidade de cultivo em solos de baixa fertilidade e regiões com disponibilidade hídrica limitada. Essas características tornam essa cultura particularmente atrativa para programas de produção de biocombustíveis em regiões onde outras oleaginosas apresentam menor adaptação agrônômica (OSORIO-GONZÁLEZ *et al.*, 2020).

Em aplicações voltadas aos setores aeronáutico e marítimo, os *blends* são normalmente preparados em base volume/volume, refletindo a prática normativa e

operacional de comercialização de combustíveis líquidos, sendo posteriormente avaliados quanto às propriedades físico-químicas, como densidade, viscosidade cinemática, ponto de fulgor e estabilidade, conforme especificações técnicas aplicáveis (IEA BIOENERGY, 2017; ASTM, 2020).

4. CATALISADORES HETEROGÊNEOS NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

A escolha do catalisador exerce papel determinante na eficiência, seletividade e viabilidade operacional das reações envolvidas, especialmente nos processos de transesterificação e esterificação utilizados para a síntese de biodiesel.

Catalisadores homogêneos apresentam elevada atividade, porém demandam extensas etapas de purificação e geram grandes volumes de efluentes, tornando-se menos atrativos para aplicações sustentáveis. Os catalisadores homogêneos, como hidróxidos e alcóxidos alcalinos (NaOH, KOH e metóxido de sódio), são comumente utilizados em reações de transesterificação devido à sua elevada atividade catalítica e cinética rápida, embora apresentem limitações relacionadas à separação e reutilização (RATHORE & TYAGI, 2022). Por outro lado, catalisadores heterogêneos oferecem vantagens como fácil separação do meio reacional, reuso e redução da geração de resíduos, além de maior estabilidade térmica e química (CARDOSO *et al.*, 2020).

A catálise heterogênea é caracterizada pela presença de catalisador e reagentes em fases distintas, tipicamente sólido-líquido ou sólido-gás. Nesses sistemas, a reação ocorre na superfície do sólido, sendo influenciada pela acessibilidade dos sítios ativos, pela difusão dos reagentes e pela estabilidade estrutural do material (SANTOS *et al.*, 2020). Catalisadores heterogêneos sólidos são especialmente valorizados em escala industrial devido à robustez térmica, reaproveitamento e facilidade de separação, eliminando a necessidade de lavagens extensas e reduzindo o consumo de água e energia (SHANKS, 2007; ALBUQUERQUE *et al.*, 2008). Os catalisadores heterogêneos, como óxidos metálicos, zeólitas, sulfetos de NiMo ou CoMo suportados em Al_2O_3 e materiais à base de hidroxiapatita modificada, destacam-se pela facilidade de recuperação, maior estabilidade térmica e potencial de aplicação em processos contínuos, como

hidrotratamento e pirólise catalítica para a produção de bioquerosene e *biobunker* (BRIDGWATER, 2012; LIU *et al.*, 2020).

Dentre as principais vantagens encontradas incluem:

- a) fácil separação do catalisador;
- b) possibilidade de reuso em múltiplos ciclos;
- c) menor formação de emulsões e
- d) purificação simplificada do biocombustível e menor impacto ambiental e redução de custos operacionais (CARDOSO *et al.*, 2020)

A hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), material selecionado para este estudo, é um fosfato cristalino amplamente encontrado em sistemas biológicos, caracterizado pela presença simultânea de sítios ácidos e básicos em sua estrutura, o que confere elevada versatilidade catalítica. Sua estrutura cristalina permite modificações químicas capazes de ajustar a basicidade e a acidez superficial conforme a aplicação desejada, ampliando seu potencial em reações catalíticas heterogêneas (TSUCHIDA *et al.*, 2008). Além disso, a hidroxiapatita pode ser obtida a partir de resíduos de origem animal, como ossos bovinos e subprodutos da indústria alimentícia, tornando-se um catalisador de caráter sustentável e economicamente atrativo (RODRIGUES *et al.*, 2019).

Quando modificada, a hidroxiapatita (HAp) apresenta desempenho catalítico competitivo em relação a catalisadores consolidados, como CaO, MgO e zeólitas, destacando-se por sua maior estabilidade estrutural, menor lixiviação e facilidade de reutilização (LAM; LEE; MOHAMED, 2009; LIU *et al.*, 2020). Ademais, a dopagem com sais alcalinos, como NaNO_3 , possibilita o ajuste fino da basicidade do material, permitindo alcançar conversões superiores a 80% e mantendo a estabilidade catalítica mesmo após múltiplos ciclos reacionais (RODRIGUES *et al.*, 2019).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados todos os materiais e procedimentos experimentais para a produção de biodiesel, das misturas e suas caracterizações.

5.1. MATERIAIS

Para os experimentos foram realizados em balões de fundo redondo (100 e 250 mL), agitador magnético com controle de rotação, banho-maria de glicerina, condensador de refluxo, funil de separação, termômetro, estufa de secagem Deleo e balança analítica Bel Mark (com 0,01mg de incerteza). Para matéria-prima, o óleo de rícino foi fornecido pela empresa Greentech Science, o metanol P.A. (A.C.S.), com grau de pureza $\geq 99,8\%$, foi empregado como solvente nas reações transesterificação, sendo adquirido da Vetec Química Fina Ltda.

Os catalisadores homogêneos e heterogêneos, incluindo hidróxido de sódio (NaOH, P.A., $\geq 98\%$), hidróxido de potássio (KOH, P.A., $\geq 85\%$) e carbonato de sódio anidro (Na_2CO_3 , P.A., $\geq 99,5\%$), foram todos adquiridos da Vetec Química Fina Ltda e a hidroxiapatita (HAp) foi sintetizada em laboratório a partir de soluções aquosas de ácido fosfórico (H_3PO_4 , P.A. ACS ISO, $\geq 85\%$) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, P.A., $\geq 95\%$), também adquiridos da Vetec Química Fina Ltda, visando sua aplicação como catalisador heterogêneo sustentável.

Os combustíveis diesel S500 e querosene *Jet-A1* foram doados por uma empresa de combustível comercial. O diesel S500 é um combustível fóssil com teor máximo de $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de enxofre, amplamente utilizado em aplicações rodoviárias e industriais. Na formulação do *biobunker*, o diesel S500 atua como componente base para a mistura com biodiesel de rícino, contribuindo para ajuste de viscosidade, densidade e volatilidade do combustível final.

5.2. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O estudo foi conduzido segundo um delineamento experimental fatorial completo do tipo 3^3 , com três fatores em três níveis cada: razão molar álcool/óleo (7,5:1; 9:1; 12:1), concentração de catalisador (1,5%; 2,0%; 2,5%) com os catalisadores hidroxiapatita, KOH, NaOH e Na_2CO_3 , além da amostra padrão de H_2SO_4 e tempo reacional (1 h; 2 h; 3 h). A massa total do substrato (óleo de rícino + metanol) foi fixada em 200 g. Na Tabela 5 é possível ver todos os ensaios previstos para os experimentos realizados.

Tabela 5. Planejamento experimental fatorial completo

Ensaio	Razão	Catalisador
	Álcool/Óleo	(%)
1	7,5:1	1,5
2	7,5:1	2,0
3	7,5:1	2,5
4	9:1	1,5
5	9:1	2,0
6	9:1	2,5
7	12:1	1,5
8	12:1	2,0
9	12:1	2,5

Fonte: Autoria própria, 2026.

5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O catalisador principal utilizado foi a hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), sintetizada em laboratório. A hidroxiapatita foi sintetizada por precipitação química a partir da metodologia de Vilas Bôas *et al.* (2019). Inicialmente, preparou-se uma solução A contendo 3 g de ácido fosfórico (H_3PO_4) em 100 mL de água destilada (0,3 mol/L) e uma solução B com 3,77 g de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) em 100 mL de água destilada (0,5 mol/L). A solução A foi gotejada sobre a solução B sob agitação constante, mantendo-se o pH em torno de 10 a temperatura ambiente (25 °C). A suspensão obtida foi agitada por 16 h, lavada e filtrada até alcançar pH 7 e posteriormente seca em estufa a 105 °C por 24 h.

Para cada ensaio, a massa de óleo e metanol foi calculada com base na razão molar estabelecida, considerando as massas molares do óleo de rícino (885 g/mol) e do metanol (32,04 g/mol). A proporção foi ajustada para manter um total de 200 g de substrato.

O óleo de rícino foi pesado e transferido para um balão de 250 mL, posicionado em banho-maria a 60 °C. Os catalisadores foram previamente dissolvidos no metanol (maceração) e a solução adicionada ao óleo no balão. A mistura foi agitada por 1 a 3 h, conforme o planejamento experimental, mantendo a temperatura constante a 60 °C com monitoramento por termômetro.

Ao término da reação, a mistura foi transferida ainda quente para um funil de separação. Após repouso de 15 a 30 min, a fase inferior (glicerol, metanol residual e catalisador) foi drenada. A fase superior (biodiesel) foi submetida a lavagens com solução salina saturada (360 g de NaCl por litro de água), em volumes equivalentes a 30–50% do volume da fase superior. A agitação foi suave, com repouso entre as lavagens (10–15 min), sendo repetidas de 1 a 2 vezes até a fase aquosa tornar-se límpida. Uma última lavagem com água destilada pura foi realizada, quando necessário, para remoção de sais residuais. O biodiesel purificado foi seco por aquecimento leve (50–60 °C) e secagem na estufa a 60 °C e 30 min.

Devida à elevada polaridade do biodiesel formado, o processo de derivatização foi realizado com as amostras de biodiesel. A amostra foi transferida para um tubo de ensaio seco e limpo. Em seguida, adicionou-se uma quantidade conhecida de solução metanólica ácida (H_2SO_4 em metanol). A mistura foi submetida a aquecimento em banho termostatzado a temperatura controlada (entre 60 e 70 °C) por um período de 10 a 30 min, com agitação ocasional, a fim de promover a conversão dos ácidos graxos livres e dos acilgliceróis em seus respectivos ésteres metílicos. Após o término da reação, a mistura foi resfriada à temperatura ambiente e cuidadosamente separada. Por fim, a solução foi filtrada e uma parte transferida para *vials* apropriados, sendo posteriormente analisada por cromatografia gasosa.

A obtenção dos *blends* de biodiesel + diesel S500 foi realizada por mistura física direta na proporção de 20% (v/v) para as seis amostras obtidas, bem como de querosene de aviação (*Jet-A1*) + biodiesel, nas proporções de 10, 15 e 20% (v/v) nas quatro amostras remanescentes, método amplamente adotado em estudos laboratoriais, em escala piloto. A blendagem é conduzida por meio da adição volumétrica controlada dos componentes, seguida de agitação mecânica contínua ou recirculação em sistema fechado, à temperatura ambiente ou levemente elevada (25–40 °C), a fim de reduzir a

viscosidade e assegurar a completa homogeneização da mistura. A definição das proporções utilizadas nos *blends* foi baseada em resultados reportados em estudos anteriores da literatura. Diversos trabalhos indicam que misturas contendo aproximadamente 20% de biodiesel em diesel mineral apresentam propriedades físico-químicas satisfatórias, mantendo características próximas às do combustível fóssil, como viscosidade, densidade e estabilidade oxidativa, além de contribuírem para a redução de emissões de poluentes.

De forma semelhante, para o bioquerosene, estudos também apontam que teores de até 20% em mistura com o combustível fóssil são capazes de manter propriedades compatíveis com as especificações técnicas exigidas, ao mesmo tempo em que possibilitam a incorporação de uma fração renovável ao combustível. Assim, considerando os resultados reportados na literatura, bem como a disponibilidade de volume das amostras produzidas neste trabalho, optou-se pela adoção de proporções de até 20% para a preparação dos *blends* avaliados. Essa escolha permite estabelecer uma comparação direta com dados previamente publicados, além de possibilitar a análise do comportamento das misturas obtidas neste estudo.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E PRODUTOS

5.4.1. PH E ACIDEZ

A acidez da amostra de óleo de rícino foi determinada pela titulação antes da reação de transesterificação, conforme a metodologia de Vilas Bôas *et al.* (2019). Para isso, pesou-se 1 g da amostra em erlenmeyer de 250 mL, dissolvendo-a em 25 mL de uma mistura de éter etílico e álcool etílico (2:1 v/v). Adicionaram-se 3 gotas de fenolftaleína como indicador, e a amostra foi titulada com solução padronizada de NaOH 0,01 N até o aparecimento de coloração rosa persistente por 30 segundos.

O pH das amostras lavadas foi monitorado até atingir valores próximos da neutralidade, garantindo a remoção de resíduos de catalisador e ácidos. O índice de acidez foi determinado antes e após as etapas de esterificação e transesterificação, sendo utilizado como parâmetro de eficiência do processo.

A determinação do pH das amostras de misturas sintéticas de biodiesel+diesel S500 e biodiesel+*Jet-A1* foi realizada utilizando pHmetro digital Bel Equipamentos,

modelo PHS3BW, devidamente calibrado com soluções tampão padrão (pH 4 ; 7 e 10) à temperatura ambiente. Considerando que combustíveis são sistemas não aquosos, os valores obtidos correspondem a pH aparente, empregado como parâmetro indicativo da presença de espécies ácidas ou básicas residuais provenientes do processo de produção do biodiesel. Para a medição, uma alíquota da amostra foi colocada em recipiente limpo e seco, garantindo contato adequado do eletrodo com o meio. As leituras foram realizadas em triplicata, com registro da temperatura no momento da análise, visando maior confiabilidade dos resultados. Entre as medições, o eletrodo foi lavado com água destilada e seco com papel absorvente.

5.4.2. CROMATOGRAFIA GASOSA

A composição do biodiesel produzido a partir de óleo de rícino foi avaliada na Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), técnica empregada para identificação qualitativa e análise semiquantitativa de ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME). A metodologia permite separar os compostos presentes na amostra com base na volatilidade e interação com a fase estacionária da coluna, enquanto o detector de massas realiza a identificação molecular por fragmentação característica.

A amostra foi devidamente preparada e injetada no sistema cromatográfico sob condições controladas de temperatura, utilizando coluna capilar apropriada para análise de FAME. A programação de temperatura do forno foi ajustada para permitir adequada separação dos compostos de cadeia média e longa, típicos do biodiesel. Durante a análise, os compostos volatilizados foram arrastados pelo gás de arraste através da coluna, sendo separados conforme seu tempo de retenção, parâmetro diretamente relacionado à massa molecular, polaridade e ponto de ebulição.

A identificação dos picos cromatográficos foi realizada por comparação dos espectros de massas obtidos experimentalmente com biblioteca espectral (ex.: NIST), considerando o índice de similaridade como critério de confiabilidade. A análise da área relativa dos FAME permitiu avaliação semiquantitativa da conversão, uma vez que é feita a soma das áreas correspondentes aos ésteres metílicos do cromatograma.

5.5. ANÁLISE DE CARACTERIZAÇÃO DA MISTURAS SINTÉTICAS (BIODIESEL + DIESEL S500 E BIODIESEL + *JET-A1*)

5.5.1. PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor foi realizado em parceria com o laboratório da Michelin, determinado pelo método de vaso fechado, utilizando aparelho do tipo Pensky-Martens, conforme a norma ASTM D93 como parâmetro de segurança e qualidade do biodiesel, sendo comparado aos valores estabelecidos em normas técnicas para combustíveis líquidos.

5.5.2. DENSIDADE E VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A densidade e a viscosidade cinemática foram medidas sob temperatura controlada. A densidade das amostras de biodiesel, biodiesel + diesel S500 e biodiesel + *Jet-A1* foram determinadas por meio de densímetro digital, conforme a norma ASTM D4052. As medições foram realizadas à temperatura controlada de $24 \pm 0,5$ °C, previamente estabilizada em banho termostaticado. Antes da análise, o equipamento foi calibrado com água destilada. A amostra foi introduzida no tubo oscilante do densímetro, sendo o valor de densidade obtido diretamente em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Cada ensaio foi realizado em duplicata, e o valor final considerado correspondeu à média das determinações.

A viscosidade dinâmica foi determinada utilizando um viscosímetro rotacional, conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D445. As análises foram conduzidas a 40 °C, com controle rigoroso da temperatura por meio de banho termostaticado. A amostra foi acondicionada no recipiente do viscosímetro, e a leitura da viscosidade dinâmica (μ) foi registrada em $\text{mPa}\cdot\text{s}$ após a estabilização do regime de cisalhamento. As medições foram realizadas em duplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados. A partir disso, a viscosidade cinemática (ν) foi calculada a partir da razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade da amostra, conforme a Equação (1):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

Em que:

ν = viscosidade cinemática ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

μ = viscosidade dinâmica ($\text{mPa} \cdot \text{s}$);

ρ = densidade do fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Os valores obtidos de viscosidade cinemática foram comparados com os limites estabelecidos em normas técnicas aplicáveis a biocombustíveis líquidos, visando avaliar a adequação das amostras para uso energético.

Para a conversão dos dados de viscosidade dinâmica (μ) em viscosidade cinemática (ν) das amostras de biodiesel + diesel S500 e biodiesel + *Jet-A1* a 40 °C e foi considerada a densidade medida pelo densímetro a 24,4 e 33,3°C respectivamente. Assim, aplicou-se a correção por expansão térmica como mostrado na Equação (2), assumindo um coeficiente volumétrico típico de combustíveis do tipo diesel/bunker ($\beta \approx 8,3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), conforme literatura técnica, para estimar a densidade a 40 °C e permitir o cálculo de ν pela relação $\nu = \mu/\rho$ (CHEVRON, 2006).

$$\rho_{40} = \frac{\rho_{24,4}}{1 + \beta \Delta T} \quad 2)$$

Fator: $1 + \beta \Delta T = 1,012948$

Em que:

β = coeficiente volumétrico ($^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔT = variação de temperatura ($^\circ\text{C}$);

ρ = densidade do fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Além disso, as densidades das amostras de biodiesel + diesel S500 também foram corrigidas com a mesma aplicação para a temperatura de referência de 15 °C, conforme a metodologia da ASTM D1250/API MPMS 11.1, utilizando coeficiente de expansão volumétrica típico para destilados médios.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A determinação da acidez do óleo de rícino revelou valor de 5,79%, indicando presença significativa de ácidos graxos livres (AGL) na matéria-prima. Esse nível de acidez é considerado relativamente elevado para processos de transesterificação alcalina direta, uma vez que teores elevados de AGL favorecem reações de saponificação quando catalisadores básicos são empregados, reduzindo o rendimento em ésteres e dificultando a separação das fases, justificando a adição da reação de esterificação como etapa do processo (KNOTHE *et al.*, 2015).

Dentre os experimentos realizados, observou-se que algumas amostras apresentaram formação significativa de sabões durante a etapa de transesterificação, caracterizando a ocorrência de reações de saponificação, mesmo após a etapa prévia de esterificação ácida. Esse comportamento pode estar associado à presença residual de ácidos graxos livres (AGL) ou condições reacionais que favoreceram a reação entre os AGL remanescentes e o catalisador, resultando na formação de sabões e consequente dificuldade na separação de fases. A formação de sabões compromete a eficiência da transesterificação, reduz o rendimento em ésteres metílicos (FAME) e dificulta a purificação do biodiesel devido à emulsificação do sistema. Assim, as amostras que apresentaram esse comportamento foram desconsideradas para as etapas subsequentes do estudo.

Por outro lado, as amostras AP (amostra padrão), A1, A2, A6, A7 e A8, cujas condições reacionais estão apresentadas na Tabela 6, apresentaram desempenho satisfatório na reação de transesterificação e na etapa de derivatização, resultando em uma separação clara e bem definida entre a fase superior (rica em ésteres metílicos – biodiesel) e a fase inferior (glicerol, catalisador residual e impurezas), sendo essas amostras selecionadas para a produção de blend com o diesel S500 e querosene *Jet-A1*, conforme as porcentagens definidas.

Tabela 6. Amostras selecionadas de biodiesel

Amostra	Catalisador	Proporção (%)
AP	H ₂ SO ₄	1,50
A1	KOH	1,50
A2	HAp	2,50
A6	NaOH	1,50
A7	Na ₂ CO ₃	1,50
A8	HAp	2,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

As densidades do biodiesel de rícino corrigidas para 15 °C situaram-se na faixa de 0,887 a 0,911 g·cm⁻³, valores compatíveis com aqueles reportados na literatura para biodiesel derivado dessa matéria-prima como visto na Tabela 7. Estudos indicam que o biodiesel de rícino apresenta densidade tipicamente entre 0,88 e 0,92 g·cm⁻³ a 15 °C, sendo superior à de biodieseis provenientes de óleos como soja e canola, cujos valores geralmente variam entre 0,86 e 0,88 g·cm⁻³ (KNOTHE; VAN GERPEN; KRAHL, 2010; RAMOS *et al.*, 2009).

Tabela 7. Densidade do biodiesel de rícino corrigida para 15 °C

Amostra	ρ medida (g·cm⁻³)	ρ corrigida a 15 °C (g·cm⁻³) ± 0,0568
AP	0,8964	0,9105
A1	0,8735	0,8872
A2	0,8858	0,8997
A6	0,8867	0,9006
A7	0,8744	0,8833
A8	0,8831	0,8970

Fonte: Autoria própria, 2026, com correção baseada em

ASTM D1250

A maior densidade observada é atribuída à elevada concentração de ácido ricinoleico no óleo de rícino. Esse ácido graxo possui grupo hidroxila (-OH) em sua estrutura molecular, o que aumenta a polaridade e contribui para maior massa específica

do éster metílico correspondente, conforme discutido por Knothe, Van Gerpen e Krahl (2010). A predominância desse composto foi confirmada na análise cromatográfica, reforçando a coerência entre composição química e propriedades físico-químicas obtidas.

Comparando com a norma europeia EN 14214, que estabelece faixa de densidade de 0,86–0,90 g·cm⁻³ a 15 °C para biodiesel (CEN, 2019), observa-se que parte das amostras se encontra dentro ou ligeiramente acima do limite superior. Tal comportamento é relatado em estudos específicos sobre biodiesel de rícino, que frequentemente apresentam valores próximos ou superiores a 0,90 g·cm⁻³ devido à sua composição estrutural particular (CONCEIÇÃO *et al.*, 2007). Entretanto, ressalta-se que a incerteza instrumental associada às medições é elevada quando comparada aos padrões metrológicos recomendados para combustíveis, podendo influenciar a amplitude do intervalo obtido. De modo geral, os resultados confirmaram que o biodiesel produzido apresenta densidade compatível com o perfil típico do biodiesel de rícino descrito na literatura, validando a consistência do processo de transesterificação empregado.

A conversão dos triglicerídeos do óleo de rícino em ésteres metílicos foi avaliada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), técnica amplamente empregada para verificação da eficiência de transesterificação. As amostras (Tabela 8) enviadas para o laboratório da Fiocruz foram diluídas em solvente orgânico adequado antes da análise por cromatografia gasosa. O solvente utilizado teve apenas a função de facilitar a injeção e volatilização da amostra no sistema cromatográfico, não sendo utilizado como padrão interno.

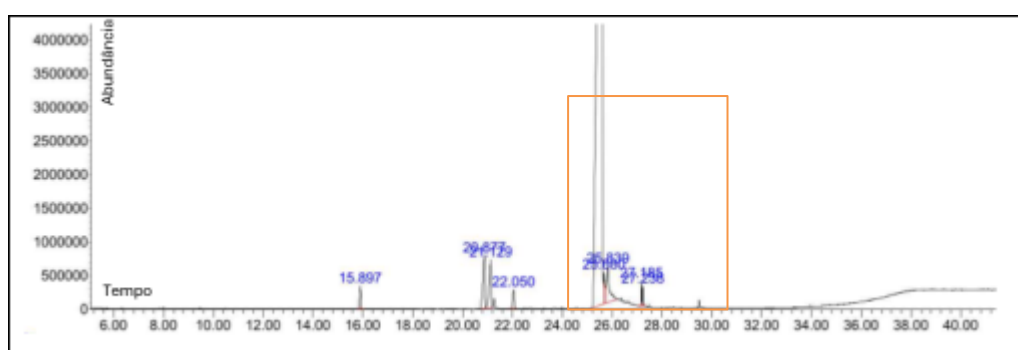
Dessa forma, a análise foi realizada de forma qualitativa e semiquantitativa, permitindo a identificação dos ésteres metílicos presentes por comparação com bibliotecas espectrais. As três amostras (AP, A1 e A2) foram selecionadas com o objetivo de avaliar o catalisador utilizado, bem como sua proporção na formulação. As demais amostras (A6, A7 e A8) não apresentavam volume suficiente; assim, o volume remanescente foi destinado à caracterização das misturas sintéticas.

Tabela 8. Amostras selecionadas para Cromatografia Gasosa (GC-MS)

Amostra	Catalisador utilizado	Proporção do catalisador (% m/m)	Conversão estimada por CG (% área de éster)
AP	H ₂ SO ₄	1,50	90
A1	KOH	1,50	94
A2	HAp	2,50	87

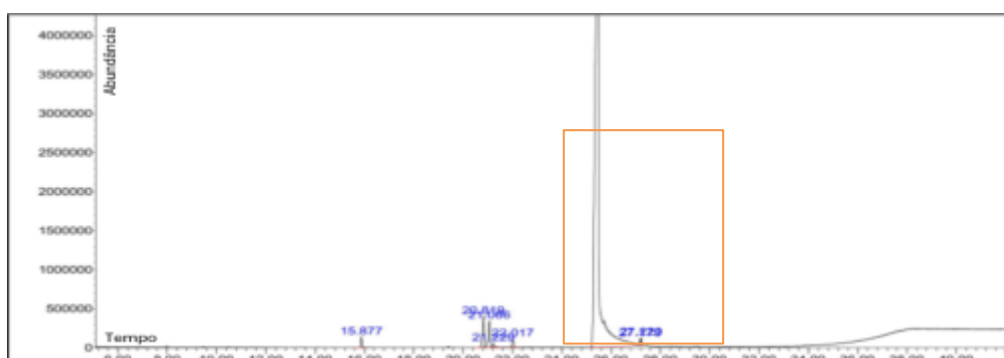
Fonte: Autoria própria, 2026

Na amostra AP, observou-se a predominância do metil ricinoleato, com área relativa próxima de 90%, como visto na Figura 6, evidenciando que a maior parte dos triglicerídeos foi convertida em ésteres metílicos. A presença de FAME minoritários, como metil palmitato, metil oleato, metil linoleato e metil estearato, confirma o perfil típico do óleo de ricino transesterificado. A detecção de pequenos traços de ácido ricinoleico livre sugere conversão quase completa, mas com possível resíduo de ácidos graxos não esterificados. A amostra A1 (Figura 7), apresentou o maior grau de conversão entre as avaliadas, com teor de metil ricinoleato superior a 94% de área. Esse resultado indica elevada eficiência da reação de transesterificação, com formação predominante de FAME e mínima presença de compostos residuais. A distribuição dos ésteres minoritários manteve-se coerente com a composição esperada do óleo de rícino. Na amostra A2 (Figura 8), embora o metil ricinoleato permaneça como composto majoritário ($\approx 87\%$), observa-se maior participação relativa de ésteres insaturados secundários. Essa variação pode estar associada a pequenas diferenças nas condições reacionais ou na etapa de purificação.

Figura 6. Cromatograma TIC da amostra AP obtido por GC-MS

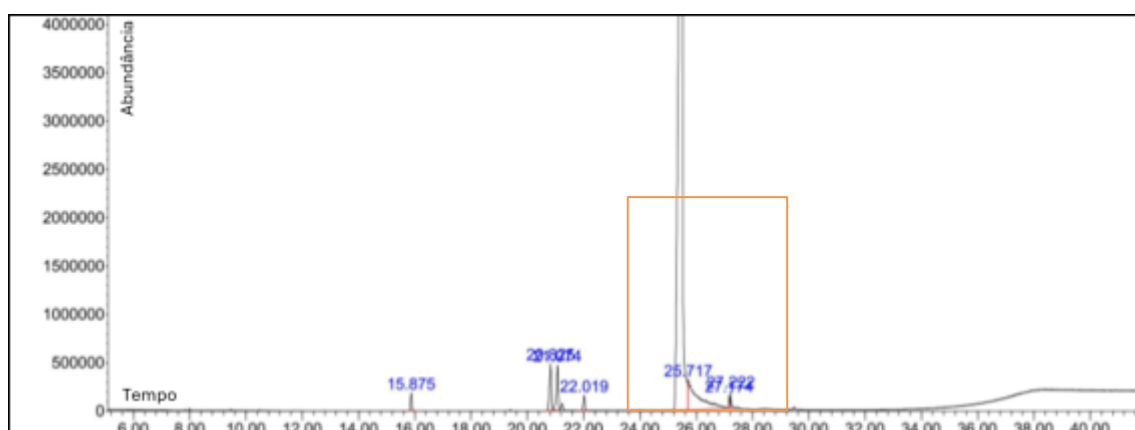
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 7. Cromatograma TIC da amostra A1 obtido por GC-MS



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 8. Cromatograma TIC da amostra A2 obtido por GC-MS



Fonte: Autoria própria, 2026.

De modo geral, os cromatogramas das três amostras evidenciam conversão eficiente dos triglicerídeos em ésteres metílicos, uma vez que não foram observados picos significativos associados a mono-, di- ou triglicerídeos residuais. A predominância de metil ricinoleato em todas as amostras confirma a identidade do biodiesel de rícino e está associada às propriedades específicas desse combustível, como maior viscosidade, maior densidade e elevado ponto de fulgor.

Mesmo quando a conversão total em ésteres não atinge o valor mínimo de 96,5% estabelecido pela norma para biodiesel puro (B100), o produto ainda pode apresentar

potencial de aplicação quando utilizado em misturas com combustíveis fósseis, como diesel S500 ou querosene de aviação. Isso ocorre porque, em formulações de mistura, a presença de biodiesel em proporções reduzidas pode contribuir para melhorar propriedades como lubricidade, reduzir emissões de material particulado e aumentar o conteúdo renovável do combustível (ANP, 2014). Dessa forma, mesmo quando os valores de conversão não atingem completamente os requisitos normativos estabelecidos para biodiesel comercial, o material produzido pode apresentar relevância tecnológica em estudos de formulação de combustíveis alternativos, especialmente no desenvolvimento de misturas destinadas a aplicações marítimas ou aeronáuticas. Nesses casos, a avaliação da viabilidade do combustível deve considerar não apenas o teor de éster, mas também propriedades físico-químicas globais do sistema combustível resultante.

6.1. MISTURA SINTÉTICA: BIODIESEL + DIESEL S500

A partir da conversão do biodiesel e posterior mistura ao diesel S500 para a síntese do blend biodiesel + diesel S500 a 20% (v/v), a medição da densidade foi inicialmente validada utilizando água destilada como amostra padrão, procedimento igualmente adotado para o biodiesel de rícino. A densidade medida para a água a 24,4 °C (1,05293 g·cm⁻³) foi comparada ao valor teórico a aproximadamente 25 °C (0,9970 g·cm⁻³), resultando em erro absoluto de 0,05593 g·cm⁻³.

As densidades das misturas biodiesel + diesel S500, corrigidas para 15 °C conforme ASTM D1250/API MPMS 11.1, variaram entre 0,89796 e 0,91747 g·cm⁻³ (Tabela 9). Esses valores situam-se acima da faixa típica do diesel mineral S500, cuja densidade a 15 °C geralmente varia entre 0,82 e 0,88 g·cm⁻³ (ANP, 2023), refletindo a influência do biodiesel de rícino na mistura. Biodieseis convencionais apresentam densidade entre 0,86 e 0,90 g·cm⁻³, conforme especificação da norma EN 14214 (CEN, 2019), enquanto o biodiesel de rícino, devido à elevada concentração de metil ricinoleato, pode alcançar valores entre 0,88 e 0,92 g·cm⁻³ (KNOTHE; VAN GERPEN; KRAHL, 2010; RAMOS *et al.*, 2009). Dessa forma, os valores obtidos para as misturas mostram coerência com o comportamento esperado para *blends* contendo biodiesel de rícino, apresentando densidade intermediária entre o diesel fóssil e o biodiesel puro,

porém mais próxima deste último devido à sua maior massa específica. Trabalhos acadêmicos sobre misturas B50 relatam densidades típicas entre 0,88 e 0,91 g·cm⁻³, corroborando os resultados experimentais obtidos neste estudo (RAMOS *et al.*, 2009). Portanto, sob a perspectiva comparativa com literatura e normas técnicas, as densidades observadas são consistentes com o perfil composicional das misturas formuladas.

O pH das amostras de biodiesel + diesel S500 observado na Tabela 10, a 27 °C, deve ser interpretado como pH aparente, uma vez que o conceito de pH é formalmente aplicável a sistemas aquosos. Ainda assim, essa medida fornece indicação indireta de acidez residual, presença de catalisador remanescente ou traços de ácidos graxos livres provenientes da síntese do biodiesel. Nas misturas sintéticas de biodiesel + diesel S500 observou-se ampla variação de pH aparente (4,89–8,21), indicando diferenças significativas na neutralização pós-reação entre as amostras.

Tabela 9. Densidade das amostras de biodiesel + diesel S500 corrigida para 15 °C

Amostra	Densidade medida (g·cm ⁻³)	Densidade corrigida a 15 °C (g·cm ⁻³) ± 0,0563
AP	0,9099	0,9154
A1	0,8999	0,9053
A2	0,8925	0,8980
A6	0,9119	0,9175
A7	0,9018	0,9073
A8	0,9028	0,9083

Fonte: Autoria própria, 2026

Tabela 10. Resultados de pH das misturas sintética de biodiesel + diesel S500

Amostra	pH observado
AP	4,89
A1	5,76
A2	6,76
A6	6,33
A7	8,21
A8	7,29

Fonte: Autoria própria, 2026

Valores de pH ácido como o verificado na amostra AP (4,89), sugere a presença de espécies ácidas residuais, possivelmente associadas ao catalisador ácidos do biodiesel. Por outro lado, amostras com pH próximo à neutralidade ou levemente básico como as demais, indicam melhor remoção de resíduos catalíticos. Entretanto, é importante ressaltar que o pH aparente não constitui parâmetro normativo para combustíveis aeronáuticos. Avaliações mais robustas da acidez devem ser conduzidas por meio do número de acidez total (TAN), conforme métodos padronizados, permitindo correlação mais direta com requisitos técnicos e normativos.

Os resultados de viscosidade cinemática das misturas biodiesel + diesel S500 a 40 °C variaram entre 3,73 e 5,66 mm²·s⁻¹, conforme apresentado na Tabela 11. Esses valores situam-se acima da faixa típica do diesel S500, cuja viscosidade cinemática a 40 °C geralmente varia entre 2,0 e 4,5 mm²·s⁻¹ segundo especificações da ANP (2023), e abaixo ou próxima à viscosidade típica do biodiesel puro, que varia entre 4,0 e 6,0 mm²·s⁻¹, conforme estabelecido pela norma EN 14214 (CEN, 2019). Para biodiesel de rícino especificamente, valores relatados variam entre 5,5 e 7,5 mm²·s⁻¹ a 40 °C (SANTOS *et al.*, 2013; KNOTHE; STEIDLEY, 2005). A variação observada entre as amostras pode ser associada ao grau de conversão em área da transesterificação e à possível presença residual de compostos intermediários, como mono- ou diglicerídeos, que tendem a elevar significativamente a viscosidade do produto final. A amostra A2, que apresentou o maior valor (5,6560 mm²·s⁻¹), pode indicar maior teor de frações mais pesadas ou leve presença de compostos parcialmente convertidos. Em contraste, a amostra A6 apresentou o menor valor (3,7268 mm²·s⁻¹), sugerindo conversão mais eficiente ou maior influência da fração de diesel na mistura.

Tabela 11. Viscosidade cinemática (40 °C) das amostras de biodiesel + diesel S500

Amostra	μ (mPa·s) a 40 °C	ρ (g·cm ⁻³)	$\nu = \mu/\rho$ (cSt)
AP	3,9931	0,9099	4,3887
A1	3,6440	0,8999	4,0497
A2	5,0475	0,8925	5,6560
A6	3,3986	0,9119	3,7268
A7	3,9114	0,9018	4,3375
A8	4,3346	0,9028	4,8012

Fonte: Autoria própria, 2026

Os valores de viscosidade cinemática das misturas biodiesel + diesel S500 (3,73–5,66 mm²·s⁻¹ a 40 °C) estão em consonância com resultados reportados na literatura para *blends* contendo biodiesel de rícino. Segundo Encinar *et al.* (2011), o biodiesel de rícino apresenta viscosidade superior à de biodieseis convencionais devido à presença do grupo hidroxila na estrutura do ácido ricinoleico, que aumenta as interações intermoleculares. Estudos conduzidos por Silva *et al.* (2010) e Pinho *et al.* (2009) demonstraram que misturas até B50 geralmente apresentam viscosidade intermediária entre o diesel e o biodiesel puro, situando-se na faixa de 3,5–5,5 mm²·s⁻¹, dependendo da matéria-prima e do grau de pureza do biocombustível.

Para o ponto de fulgor, conforme apresentado na Tabela 12, todas as amostras do biodiesel + diesel S500 apresentaram valor médio de 90,9 °C, valor significativamente acima do limite inferior de 60 °C exigido para combustíveis marítimos, segundo os requisitos de segurança estabelecidos pelas normas internacionais aplicáveis (como a ISO 8217 e a Convenção SOLAS). Esse comportamento é coerente com a presença do biodiesel, especialmente o derivado do óleo de rícino, que possui naturalmente maior ponto de fulgor e menor volatilidade quando comparado ao diesel fóssil. A uniformidade dos resultados entre as amostras (AP, A1, A2, A6, A7 e A8) indica boa homogeneidade da mistura e estabilidade da formulação. Do ponto de vista operacional e de segurança, o elevado ponto de fulgor reduz riscos de inflamabilidade durante o armazenamento, transporte e operação de *bunkering*, reforçando a viabilidade do biodiesel + diesel S500 proposto como alternativa renovável compatível com as exigências normativas do setor marítimo.

Tabela 12. Ponto de fulgor das amostras de biodiesel + diesel S500

Amostra	Ponto de fulgor (°C)
AP	90,9
A1	90,9
A2	90,9
A6	90,9
A7	90,9
A8	90,9

Fonte: Autoria própria, 2026

6.2. MISTURA SINTÉTICA: BIODIESEL + *JET-A1*

Para o estudo das misturas de biodiesel de rícino + *Jet A-1* (10–20% v/v) apresentadas na Tabela 13, as densidades corrigidas para 15 °C situaram-se na faixa de 0,862 a 0,888 g·cm⁻³ como visto na Tabela 14, conforme correção via ASTM D1250/API MPMS 11.1. Segundo a norma ASTM D1655, o Jet A-1 deve apresentar densidade entre 0,775 e 0,840 g·cm⁻³ a 15 °C, enquanto a norma ASTM D7566, aplicável ao SAF, mantém a mesma faixa de referência para combustíveis drop-in (ASTM, 2022).

Tabela 13. Amostras selecionadas para a mistura de biodiesel + *Jet-A1*

Amostra	Catalisador	Proporção (%)
AP	H ₂ SO ₄	10
A1	KOH	15
A2	HAp	10
A7	Na ₂ CO ₃	20

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 14. Correção da densidade para 15 °C (ASTM D1250/API MPMS 11.1) para as quatro misturas sintéticas de biodiesel + *Jet-A1*

Amostra	ρ medida ρ (g·cm ⁻³)	Faixa corrigida (g·cm ⁻³)
AP	0,8745	0,8315 – 0,9451
A1	0,8489	0,8055 – 0,9191
A2	0,8538	0,8104 – 0,9240
A7	0,8483	0,8048 – 0,9184

Fonte: Autoria própria, 2026

Assim, a incorporação de 10–20% desse biodiesel ao *Jet A-1* tende a elevar a densidade da mistura de forma proporcional à fração volumétrica adicionada. Estudos experimentais sobre *blends* FAME/querosene indicam comportamento aproximadamente linear da densidade em função da composição, com aumentos médios de 0,01 a 0,02 g·cm⁻³ para cada 10% de biodiesel adicionado (LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009; RAMOS *et al.*, 2009). Os valores obtidos neste trabalho, especialmente aqueles próximos ou superiores a 0,88 g·cm⁻³, encontram-se acima da faixa típica do

querosene de aviação convencional, indicando que as misturas apresentam comportamento mais próximo de destilados médios do que de frações de querosene puras. Esse resultado é coerente com a elevada densidade intrínseca do metil ricinoleato, principal constituinte do biodiesel de rícino, cuja presença foi confirmada por análise cromatográfica.

De forma geral, os resultados indicam que, embora a adição de 10–20% de biodiesel de rícino não inviabiliza mistura sob critérios preliminares de caracterização físico-química. Porém os valores de densidade obtidos ultrapassam a faixa típica do *Jet A-1* convencional, o que pode limitar sua adequação como combustível aeronáutico certificado, reforçando a necessidade de avaliação integrada com outras propriedades críticas.

Os ensaios de ponto de fulgor das misturas sintéticas de biodiesel + *Jet-A1* foram conduzidos pelo método de vaso fechado Pensky-Martens (ASTM D93), técnica apropriada para combustíveis destilados médios. As amostras contendo 10–20% de biodiesel de rícino em querosene *Jet A-1* apresentou formação de chama em temperaturas inferiores a 90 °C, com medição indireta na faixa de 40 – 50 °C, evidenciando que a volatilidade das misturas ainda é predominantemente controlada pelo querosene de aviação.

Esse comportamento é coerente com a natureza menos volátil do biodiesel, cujo ponto de fulgor elevado tende a aumentar a temperatura de ignição da mistura, porém de forma proporcional à sua concentração. Sob a perspectiva normativa, as especificações ASTM D1655 (*Jet A-1*) e ASTM D7566 (SAF) estabelecem ponto de fulgor mínimo de 38 °C. Com os resultados obtidos, é possível inferir que os valores obtidos estejam acima desse limite, atendendo ao requisito de segurança relacionado à inflamabilidade. Portanto, os resultados obtidos indicam que a adição de biodiesel de rícino nas proporções avaliadas não inviabiliza o combustível sob o critério de inflamabilidade.

Para as mesmas misturas a 27 °C, apresentadas na Tabela 15, os valores de pH aparente, concentraram-se majoritariamente na faixa levemente básica (6,69–8,82). Esse comportamento sugere que a diluição do biodiesel em *Jet A-1* reduz a influência

de compostos ácidos remanescentes, além de indicar menor impacto potencial sobre estabilidade química e corrosividade. De modo geral, valores de pH aparente próximos à neutralidade são desejáveis, pois reduzem riscos de degradação oxidativa e compatibilidade com materiais.

Tabela 15. Resultados de pH das misturas sintética de biodiesel + *Jet-A1*

Amostra	pH observado
AP	8,51
A1	8,82
A2	6,69
A7	8,27

Fonte: Autoria própria, 2026

7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da produção de biodiesel de óleo de rícino por diferentes rotas catalíticas, utilizando catalisadores homogêneos ácidos e básicos, bem como o catalisador heterogêneo hidroxiapatita (HAp). A análise por GC-MS confirmou elevada conversão dos triglicerídeos em ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME), com predominância de metil ricinoleato, característica marcante do óleo de rícino, evidenciando eficiência satisfatória do processo de transesterificação nas amostras selecionadas. Os catalisadores homogêneos básicos (KOH e NaOH) apresentaram elevada eficiência de conversão e o catalisador ácido (H_2SO_4) mostrou-se eficaz, porém com maior tendência à presença de acidez residual, refletida nos valores de pH aparente.

A hidroxiapatita (HAp), por sua vez, demonstrou desempenho compatível com a obtenção de biodiesel de qualidade, embora sua atividade catalítica não tenha superado claramente os catalisadores homogêneos básicos. Na aplicação do biodiesel na formulação de *biobunker*, as misturas obtidas apresentaram densidade, viscosidade e ponto de fulgor compatíveis com requisitos de segurança do setor marítimo. O ponto de

fulgor médio de 90,9 °C evidencia elevada segurança de armazenamento e manuseio, reforçando a viabilidade do *biobunker* proposto.

Para o bioquerosene sintético, os resultados indicaram que a adição de 10–20% de biodiesel de rícino não compromete o critério de inflamabilidade segundo normas aeronáuticas. Contudo, as densidades observadas acima da faixa típica de querosene de aviação e a incerteza instrumental associada limitam conclusões definitivas sobre a adequação aeronáutica.

De modo geral, os resultados confirmam o potencial do biodiesel de rícino como componente de misturas combustíveis, com maior aplicabilidade imediata no contexto marítimo. Nesse contexto, investigações futuras envolvendo reuso catalítico da hidroxiapatita, determinação do número de acidez total (TAN), análises de estabilidade oxidativa e ensaios de desempenho em escala piloto podem contribuir para consolidar a aplicabilidade técnica e ambiental dessas rotas de produção.

Como perspectivas para a continuidade desta pesquisa, recomenda-se a realização de estudos comparativos envolvendo diferentes catalisadores heterogêneos aplicados à produção de biodiesel a partir de óleo de rícino. Em particular, destaca-se o potencial de investigação do desempenho catalítico da hidroxiapatita sintetizada em laboratório em comparação com hidroxiapatita comercial. A hidroxiapatita sintetizada pode apresentar propriedades estruturais diferenciadas, como maior área superficial específica, maior quantidade de sítios ativos e possibilidade de modificação controlada da razão Ca/P, fatores que podem influenciar diretamente a atividade catalítica na reação de transesterificação. Por outro lado, catalisadores comerciais apresentam maior padronização, estabilidade estrutural e disponibilidade industrial, o que facilita sua aplicação em processos em escala maior (FROST, 2012). Assim, um estudo comparativo entre essas duas formas de hidroxiapatita permitiria avaliar parâmetros como rendimento de conversão em biodiesel, seletividade para formação de ésteres, reutilização do catalisador, estabilidade ao longo de ciclos reacionais e viabilidade econômica do processo.

Além disso, a investigação da relação entre propriedades físico-químicas do catalisador como área superficial e desempenho na produção de biodiesel pode

contribuir para o desenvolvimento de catalisadores mais eficientes e sustentáveis para aplicações em biocombustíveis avançados. Com os resultados obtidos, torna-se possível explorar de forma mais aprofundada a utilização do biodiesel produzido como componente de misturas sintéticas destinadas a combustíveis alternativos, como *biobunker* marítimo e bioquerosene de aviação em uma análise mais robusta da viabilidade dessas formulações, avaliando demais propriedades críticas desses biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

- ABIOVE. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. **Estatísticas do complexo soja**. São Paulo, 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7467-20: Standard specification for diesel fuel oil, biodiesel blend (B6 to B20)**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Estabelece as especificações do biodiesel e de suas misturas ao diesel**. Diário Oficial da União, Brasília, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, (ANP). **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Abril de 2018. <http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp>. 15 mai. 2019.
- ALBUQUERQUE, M. C. et al. **Catalytic properties of zeolite NaX and KOH-impregnated zeolite NaX for biodiesel production**. *Fuel*, v. 87, p. 1003–1008, 2008.
- ALMEIDA, P.R. Monteiro Lobato e a Emergência da Política do Petróleo no Brasil. **Potência Brasil: Gás natural, energia limpa para um futuro sustentável**. 144p, p.12-33, 2008.
- ANAC. **Agência Nacional de Aviação Civil**. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br>. Acesso em: 09/10/2023.
- ANP. 2021. **Resolução Anp Nº 856, De 22 De Outubro De 2021**. Estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021>
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim mensal do biodiesel**. Rio de Janeiro, 2024.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014**. Estabelece a especificação do biodiesel (B100) a ser comercializado no território nacional e as obrigações quanto ao controle da qualidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- APROBIO. **Biocombustíveis: o que são e quais as suas vantagens**. Disponível em: <https://aprobio.com.br/noticia/biocombustiveis-o-que-sao-e-quais-as-suas-vantagens>. Acesso em: 09/10/2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3241: Standard test method for thermal oxidation stability of aviation turbine fuels (JFTOT procedure)**. West Conshohocken, PA, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7566: Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons**. West Conshohocken, PA, 2023.

ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. A.

Biodiesel production via transesterification: A review of recent developments.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 137, 2021.

BIODIESELBR. **Brasil: História**, 2014. Disponível em:

<<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/oleos-vegetais-biodiesel> > Acesso em 27 de outubro de 2025.

BRASIL. Governo do Brasil. **Governo do Brasil aprova novo Plano Clima e fixa caminho para cumprir meta do Acordo de Paris**. Brasília, 15 dez. 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2025/12/governo-do-brasil-aprova-novo-plano-clima-e-fixa-caminho-para-cumprir-meta-do-acordo-de-paris>. Acesso em: 12 mar. 2026

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014. **Estabelece a definição de biocombustíveis e dispõe sobre a autorização para o exercício da atividade de produção de biocombustíveis**. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 26 ago. 2014.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Resolução ANP nº 856, de 6 de dezembro de 2021. **Estabelece as especificações do querosene de aviação, do querosene de aviação alternativo e do querosene de aviação C**. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 7 dez. 2021.

BRASIL. Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. Acesso em: 22/11/2024.

BRITANNICA, **The Editors of Encyclopaedia**. "kerosene". Encyclopedia Britannica, 16 Oct. 2023, <https://www.britannica.com/science/kerosene>. Acesso em: 16/10/2024.

BRIDGWATER, A. V. **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass**. *ChemInform*, v. 43, n. 38, p. 6159–6178, 2012.

CARVALHO, F.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; JUNGINGER, M.; SZKLO, A. **Biofuels for maritime transportation: techno-economic and logistic analysis**. *Energies*, v. 14, n. 16, p. 1–25, 2021.

CARDOSO, A. L.; SOARES, V. C.; BARROS, H. M. **Heterogeneous catalysts applied to biodiesel synthesis: a review.** *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 2, p. 112–137, 2020.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14214: Automotive fuels – Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – Requirements and test methods.** Brussels, 2019.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento.

Perspectivas para a Agropecuária 2025/2026. Brasília: CONAB, 2025.

CONCEIÇÃO, M. M. et al. **Thermal and oxidative degradation of castor oil biodiesel.** *Energy & Fuels*, v. 21, n. 3, p. 1522–1527, 2007.

CHAUKE, N. P. et al. **Chemical modifications of castor oil: a review.** *Processes*, v. 7, n. 10, p. –, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10424528/>. Acesso em: 17 out. 2025. PMC

CHEVRON. **Diesel Fuels Technical Review.** San Ramon: Chevron, 2007. p. (seção “Thermal Expansion”). Disponível em: (link no PDF). Acesso em: 21 jan. 2026

DAGAUT, P. & CATHONNET M. (2006). **The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling.**, 32(1), 48–92. doi:10.1016/j.pecs.2005.10.003

DEMIRBAS, A. **Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals: a review.** *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 12, p. 1930–1942, 2009.

ECYCLE. **Quais os impactos ambientais das viagens de avião?** <https://www.ecycle.com.br/impactos-ambientais-viagem-de-aviao/>. 2023. Acesso em: 18/10/2024.

ENERGY EDUCATION - **Kerosene** [Online]. Available: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Kerosene>. Acesso em: 18/10/2024.

ENCINAR, J. M. et al. **Transesterification of castor oil under ultrasonic irradiation.** *Fuel Processing Technology*, v. 92, p. 147–154, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil: perspectivas futuras – sumário executivo.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao39/Sum%C3%A1rio%20Executivo%20%20Combust%C3%ADveis_Sustent%C3%A1veis_Avia%C3%A7%C3%A3o_Brasil_2024.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **RenovaBio: Biocombustíveis 2030. Nota Técnica: Sustentabilidade.** Rio de Janeiro, fev. 2017.

FAPESP. **Querosene de aviação pode ser produzido a partir de CO₂**. 2020. Disponível em: < <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/jet-fuel-can-be-produced-from-co2/>>. Acesso em: 21/10/2025.

FAPESP. **Voo Verde**. 2013. Disponível em:<

FROST, R. L .;XI,Y. **Synthesis and characterization of hydroxyapatite and its catalytic applications**. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012.

GORMLEY R.J., LINK D.E., BALTEUS J.P., LANDHUIS P.H., **Interactions of jet fuels with nitrile O-rings: petroleum-derived versus synthetic fuels**, *Energy Fuel*. 23 (2009)857–861, <https://doi.org/10.1021/ef8008037>

GUTERRES, G. **Embrapa apresenta pesquisas com matérias-primas para a produção de bioquerosene no Brasil**. 04 jun. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/busca-de-noticias/> /noticia/43857499/embrapa-apresenta-pesquisas-com-materias-primas-para-a-producao-de-bioquerosene-no-brasil.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. **Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering**. *Chemical Reviews*, Washington, v. 106, n. 9, p. 4044–4098, 2006.

IEA BIOENERGY. **Progress in the commercialization of biojet / Sustainable Aviation Fuels (SAF) — HEFA route and status**. Task 39, 2021. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/06/IEA-Bioenergy-Task-39-Progress-in-the-commercialisation-of-biojet-fuels-May-2021-1.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025. Ieab Bioenergy

IEA BIOENERGY. **Biofuels for the marine shipping sector (relatório)**. 2017. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025. Ieab Bioenergy

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO 2020 – Sulphur regulation and impact on shipping fuels**. London: IMO, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8217:2023 — Petroleum products — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels**. Geneva: ISO, 2023.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Sustainable aviation fuel roadmap**. Montreal: IATA, 2022.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Sustainable aviation fuel: policy and production outlook**. Montreal: IATA, 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Net zero carbon roadmap**. Montreal: IATA, 2023.

IRENA. **Biofuels for Aviation: Technology Brief**. 2017. Disponível em: https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf Acesso em: 21/10/2024.

KNOTHE, G.; VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. **The biodiesel handbook**. 2. ed. Champaign: AOCS Press, 2010.

KNOTHE, G. **Designer biodiesel: optimizing fatty ester composition to improve fuel properties**. *Energy & Fuels*, Washington, v. 22, n. 2, p. 1358–1364, 2008.

KOH, A. C. W.; TAN, S. X.; LEE, K. T. Recent advances in biodiesel and biobunker fuel production for maritime applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 132, p. 110053, 2020.

LAM, M. K.; LEE, K. T.; MOHAMED, A. R. **Sulfated tin oxide as solid superacid catalyst for transesterification of waste cooking oil: an optimization study**. *Applied Catalysis B: Environmental*, Amsterdam, v. 93, n. 1–2, p. 134–139, 2009.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V.. **O biocombustível no Brasil**. Novos estudos. - CEBRAP, São Paulo, n. 78, p. 15-21, July 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>.

LIMA, F R.; OLIVEIRA, C. A.; BARROS, T. S. **Evaluation of biobunker compositions for marine applications**. *Renewable Energy Journal*, v. 215, p. 112–124, 2024.

LIU, Y.; LOTERO, E.; GOODWIN JR., J. G. **PROEffect of catalysts on the hydrodeoxygenation of vegetable oils for green diesel and aviation fuel production**. *Catalysis Today*, Amsterdam, v. 343, p. 14–26, 2020.

LLAMAS A., M.J. GARCÍA-MARTÍNEZ, A.-M. AL-LAL, L. CANOIRA, M. LAPUERTA, **Biokerosene from coconut and palm kernel oils: production and properties of their blends with fossil kerosene**, *Fuel* 102. 2012 (a) 483-490, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.108>.

LLAMAS, ALBERTO; AL-LAL, ANA-MARÍA; HERNANDEZ, MIGUEL; LIANG, X.; WANG, Y.; CHEN, H. **Co-processing of waste cooking oil with petroleum residues for sustainable marine fuels**. **Energy Conversion and Management**, v. 199, p. 111991, 2019.

MANSIR, N.; SANI, Y. M.; ALIYU, M. **Biodiesel–bunker fuel blends: stability, physicochemical characterization and emission analysis**. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132829, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2016. **Combustíveis Sustentáveis de Aviação: Uma realidade em curto prazo**. Disponível em: <

https://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=eefdd5de-7882-daea-22b3-f45f17dbbc61&groupId=36224>.

MORAIS, S. & S., MONIQUE & S., E. & MELO, A. & PACHECO, L. & MENEGHETTI, MARIO. (2013). **Synthesis and Stabilization of Gold Nanoparticles in Castor Oil**. Revista Virtual de Química. 5. 10.5935/1984-6835.20130009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

OLIVEIRA, Grasielle. **Mineração sustentável: agregados da construção civil no estado de São Paulo**. Companhia ambiental do estado de São Paulo. Escola Superior da CETESB. São Paulo, 2023.

OSORIO-GONZÁLEZ, C. S. et al. **Production of Biodiesel from Castor Oil: A Review**. *Energies*, v. 13, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2467>. Acesso em: 17 out. 2025. MDPI

PINHO, D. M. M. et al. Physical and chemical properties of blends of castor oil biodiesel and petroleum diesel. *Fuel*, v. 88, p. 738–743, 2009.

RATHORE, V.; TYAGI, S. **Biodiesel production from vegetable oils: a review of technologies and catalysts**. *Renewable Energy*, 2022.

REALPE, C. K.T. **Prospecção tecnológica de combustível renovável para aviação: estudo de caso do diesel verde**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RODRIGUES, A. L.; SILVA, P. F.; ALMEIDA, L. R. **Propriedades físico-químicas e desempenho do diesel marítimo frente à ISO 8217**. *Revista Brasileira de Engenharia Naval*, v. 18, n. 2, p. 75–92, 2023.

RODRIGUES, L. A.; SILVA, M. L. C. P.; MARTINS, R. F.; OLIVEIRA, M. E. **Hydroxyapatite obtained from bovine bone waste for catalytic applications**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Amsterdam, v. 7, n. 3, p. 103–112, 2019.

ROITMAN, T. **Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil**. 2018. 158 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, F. F. P. et al. Comparative analysis of castor oil biodiesel properties. *Fuel*, v. 107, p. 353–360, 2013.

SANTOS, J. P. et al. **Análise comparativa entre o diesel fóssil e o diesel verde: desafios e oportunidades**. *Energy & Fuels*, v. 36, n. 5, p. 2741–2753, 2022.

SANTOS, P. A.; OLIVEIRA, M. F.; FERRARI, L. J. **Chemical and structural analysis of heterogeneous catalysts for transesterification**. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 4, p. 150–168, 2020.

SHANKS, B. H. **Catalytic conversion of oils and fats for biodiesel production**. *Fuel Processing Technology*, v. 88, p. 3–9, 2007

SILVA C.; VISIOLI L. J.; MELLO B.. **Produção de Ésteres a partir do destilado da desodorização do óleo de soja e etanol pressurizado**. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2016, . Anais eletrônicos..., Campinas, Galoá, 2016. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/producao-de-esteres-a-partir-do-destilado-da-desodorizacao-do-oleo-de-soja-e-eta?lang=pt-br>>.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, F. C.; SOUZA, L. B. **Evaluation of biodiesel–bunker blends for marine fuel: physicochemical properties and environmental benefits**. **Fuel**, v. 293, p. 120459, 2021.

SILVA, T. A. et al. **Evaluation of viscosity and density of biodiesel blends**. *Renewable Energy*, v. 35, p. 1991–1996, 2010.

SILVA, T. B. DA, BAPTISTA P., SILVA C.A. S & SANTOS L.. **Assessment of decarbonization alternatives for passenger transportation in Rio de Janeiro, Brazil**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 103, p. 103161, 2022.

TSUCHIDA, T.; KUBOTA, Y.; KUMAR, R.; YOKOI, T.; TATSUMI, T. **Acidity and basicity of hydroxyapatite catalysts**. *Journal of Catalysis, Amsterdam*, v. 259, n. 2, p. 183–189, 2008.

VILAS BÔAS R. N., LIMA R., CARLOS P. O., DE FERREIRA H. C. **CONTINUOUS ENZYMATIC LUBRICANT PRODUCTION FROM FUSEL OIL IN A TWO-STAGE PACKED BED REACTOR INCORPORATING A WATER EXTRACTION COLUMN**. In: XXII NATIONAL BIOPROCESSES SYMPOSIUM (SINAFERM) XIII ENZYMATIC HYDROLYSIS OF BIOMASS SYMPOSIUM (SHEB), 2019, Uberlândia. Anais eletrônicos..., Galoá, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sinaferm/sinaferm-sheb-2019/trabalhos/continuous-enzymatic-lubricant-production-from-fusel-oil-in-a-two-stage-packed-b?lang=en>>. Acesso em: 22 Dez. 2025.

VINCI. **Bioquerosene: do ouro negro ao ouro verde?**. 2021. Disponível em: <https://www.vinci-concessions.com/en/emag/trending/biokerosene-from-black-gold-to-green-gold>.

VILAS BÔAS, R. N., DA SILVA, L. L. C., FERNANDES, L. D., AUGUSTO, B. L., MENDES, M. F. - *Catalysis Letters*. p. 3642 (2020).

WADUD, Z. **Decomposing the drivers of aviation fuel demand using simultaneous equation models**. *Energy*, v. 83, n. 1, 551-559, 2015.

