



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

GABRIELA AZEVEDO RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DROP-IN A PARTIR
DE ÓLEOS VEGETAIS UTILIZANDO CATALISADOR DE
ÓXIDO DE NÍOBIO**

SEROPÉDICA

2026



GABRIELA AZEVEDO RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS *DROP-IN* A PARTIR DE ÓLEOS VEGETAIS
UTILIZANDO CATALISADOR DE ÓXIDO DE NÍÓBIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador(a): Dra. Marisa Fernandes Mendes

Coorientador(a): Dra. Eliane Pereira Cipolatti

Seropédica, RJ

Março, 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)

R696p Rodrigues, Gabriela Azevedo, 1998-
 Produção de combustíveis drop-in a partir de óleos
 vegetais utilizando catalisador de óxido de nióbio /
 Gabriela Azevedo Rodrigues. - Seropédica, 2026.
 133 f.: il.

 Orientadora: Marisa Fernandes Mendes.
 Coorientadora: Eliane Pereira Cipolatti.
 Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
 Rural do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em
 Engenharia Química, 2026.

 1. Diesel Verde. 2. SAF. 3. Óleo de mamona. 4.
 Óxido de nióbio. 5. Pirólise. I. Mendes, Marisa
 Fernandes, 1972-, orient. II. Cipolatti, Eliane
 Pereira, 1987-, coorient. III Universidade Federal
 Rural do Rio de Janeiro. Programa de pós-graduação em
 Engenharia Química. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta TFC/Dissertação/Tese, desde que seja
citada a fonte

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

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

GABRIELA AZEVEDO RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DROP-IN A PARTIR DE ÓLEOS VEGETAIS
UTILIZANDO CATALISADOR DE ÓXIDO DE NIÓBIO**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química.

Dissertação aprovada em 30 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **MARISA FERNANDES MENDES**
Data: 21/07/2026 16:11:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marisa Fernandes Mendes - Orientadora – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **ELIANE PEREIRA CIPOLATTI**
Data: 21/07/2026 17:56:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eliane Pereira Cipolatti - Membro interno – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **FABIOLA OLIVEIRA DA CUNHA**
Data: 23/07/2026 11:08:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fabiola Oliveira da Cunha - Membro interno – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 **JOSE CARLOS NETTO FERREIRA**
Data: 20/07/2026 11:19:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jose Carlos Netto Ferreira- Membro externo – UFRRJ

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela força, pela sabedoria concedidas ao longo desta trajetória e pelo seu amor, sem o mesmo nada seria possível.

À minha família, pelo amor, apoio, compreensão e incentivo constantes, essenciais para a concretização deste trabalho. Minha mãe Rosana Regina e meu pai Wilian Rodrigues por sempre investirem na minha educação como prioridade. Minha irmã Juliana e minhas sobrinhas Graziela e Giovanna por todo apoio em cada etapa, por nunca duvidarem. Ao meu irmão Wilian Junior, meu TI pessoal.

Ao Professor Lindoval Domiciano Fernandes, pelo apoio constante, pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e pelo suporte laboratorial fundamental ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Professor Ormino Domingues Gamallo, pela ajuda, disponibilidade e apoio, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

À Fernanda, técnica do laboratório, pela colaboração, pelo companheirismo e pelo suporte ao longo desta caminhada, além de toda ajuda e bom humor. À Maria Fernanda, aluna de iniciação científica do projeto, pela dedicação, pelo auxílio nas atividades desenvolvidas e pela contribuição ao longo desta pesquisa. Aos demais alunos do LTAB, pela convivência, pelas trocas acadêmicas e pela colaboração e risadas, levarei absolutamente todos com muito carinho.

À Central Analítica do Instituto de Química da UFRRJ, em especial à Professora Rosane e à técnica Cristiane, pelo suporte nas análises realizadas. Aos professores do Departamento de Engenharia Química da UFRRJ, pelos ensinamentos e pela contribuição à minha formação.

À Laura de Andrade Almeida, pela parceria e gentileza em todo o processo. Ao Augusto, pelo companheirismo e amizade, que tornaram meus dias na universidade mais alegres.

Ao Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF) da UFRRJ, em especial ao Diogo, pelo auxílio durante as disciplinas. À Thuylane, pelo apoio e companheirismo, por deixar essa trajetória mais leve; ao Allan, pelas análises de viscosidade; e aos técnicos Elias e Eduardo, pela ajuda prestada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, professora Marisa Fernandes Mendes, pela confiança, dedicação e valiosas contribuições acadêmicas e científicas ao desenvolvimento

desta pesquisa. Por não desistir nas fases críticas e pelo entusiasmo, entusiasmo inegável pela engenharia, pesquisa, docência e pessoas.

À professora Eliane Pereira Cipolatti, minha coorientadora, por todo suporte, contribuições científicas e leveza. Agradecer por te conhecer, todos deveriam ter pelo menos uma Cipolatti na vida, eu indico.

Ao Professor Hélio Fernandes Machado Júnior, in memoriam, pelas valiosas contribuições a este trabalho, por sua colaboração em momentos importantes de seu desenvolvimento e pela expectativa em cada etapa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, expresso minha sincera gratidão.

“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 Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”.

ACKNOWLEDGEMENTS

First and foremost, I thank God for life, strength, wisdom, and His unconditional love throughout this journey. Without Him, none of this would have been possible.

I am deeply grateful to my family for their love, support, understanding, and constant encouragement, all of which were essential to the completion of this work. To my mother, Rosana Regina, and my father, Wilian Rodrigues, thank you for always prioritizing and investing in my education. To my sister, Juliana, and my nieces, Graziela and Giovanna, thank you for your unwavering support throughout every stage of this journey and for always believing in me. To my brother, Wilian Junior, my personal IT specialist, thank you for your constant help and support.

I would like to express my sincere gratitude to Professor Lindoval Domiciano Fernandes for his continuous support, availability to answer questions, and the essential laboratory assistance provided throughout this work. I am also grateful to Professor Ormino Domingues Gamallo for his help, availability, and support, especially during the most challenging moments of this research.

My special thanks go to Fernanda, the laboratory technician, for her collaboration, companionship, support, and good humor throughout this journey. I also thank Maria Fernanda, undergraduate research assistant in this project, for her dedication, assistance in the developed activities, and valuable contributions to this research. To all the other students of LTAB, thank you for the shared experiences, academic exchanges, collaboration, and countless moments of laughter. I will always remember each of you with great affection.

I gratefully acknowledge the Analytical Center of the Institute of Chemistry at UFRRJ, especially Professor Rosane and technician Cristiane, for their support with the analyses carried out during this work. I also thank the professors of the Department of Chemical Engineering at UFRRJ for their teachings and contributions to my academic and professional development.

I am thankful to Laura de Andrade Almeida for her partnership and kindness throughout the entire process. To Augusto, thank you for your companionship and friendship, which made my days at the university much more enjoyable.

I also thank the Fluid Flow Laboratory (LEF) at UFRRJ, especially Diogo, for his assistance during the coursework. My gratitude extends to Thuyline for her support and companionship, which made this journey lighter; to Allan for conducting the viscosity analyses; and to technicians Elias and Eduardo for their assistance throughout the development of this work.

I would like to express my deepest gratitude to my advisor, Professor Marisa Fernandes Mendes, for her trust, dedication, and invaluable academic and scientific contributions to this research. Thank you for not giving up during the most critical stages of this work and for your remarkable enthusiasm for engineering, research, teaching, and people.

I am equally grateful to my co-advisor, Professor Eliane Pereira Cipolatti, for all her support, scientific contributions, and positive spirit. I am thankful for having had the opportunity to know you; everyone should have at least one Cipolatti in their life, and I highly recommend it.

I would also like to honor Professor Hélio Fernandes Machado Júnior, *in memoriam*, for his valuable contributions to this work, for his collaboration during important stages of its development, and for his enthusiasm and expectations throughout each phase of the project.

Finally, I extend my sincere gratitude to everyone who, in one way or another, contributed to the accomplishment of this research.

Resumo

RODRIGUES, Gabriela Azevedo. **Produção de combustíveis drop-in a partir de óleos vegetais utilizando catalisador de óxido de nióbio**. 2026. 129. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Tecnologia,, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

Os combustíveis renováveis do tipo *drop-in* têm despertado crescente interesse por apresentarem composição compatível com combustíveis fósseis e por contribuírem para a descarbonização do setor energético. Neste trabalho, investigou-se a desoxigenação catalítica do ácido oleico, do óleo de soja e do óleo de mamona, visando à produção de hidrocarbonetos na faixa de diesel verde e SAF, utilizando Nb_2O_5 como catalisador. As reações foram conduzidas em batelada, sob pressão autógena e na ausência de hidrogênio externo, com variação de temperatura entre 300 e 400 °C e carga catalítica entre 5 e 15%. O melhor desempenho foi observado para o ácido oleico, que atingiu 88,86% de hidrocarbonetos desoxigenados, evidenciando elevada seletividade para a formação de cadeias compatíveis com diesel verde. O óleo de soja apresentou desempenho intermediário, alcançando até 86,15% de desoxigenação a 350 °C; enquanto em temperaturas mais baixas, predominou a formação de ácidos carboxílicos. Em contraste, o óleo de mamona apresentou o pior desempenho, com valores mínimos de 16,61% de desoxigenação, mantendo elevada formação de ácidos, cetonas, álcoois e ésteres, mesmo com o aumento da carga catalítica. De modo geral, a temperatura de 350 °C mostrou-se mais favorável à conversão a hidrocarbonetos, enquanto temperaturas mais baixas limitaram a desoxigenação e temperaturas mais elevadas intensificaram rotas de fragmentação. Os resultados demonstraram que a eficiência do processo depende da estrutura química da matéria-prima, sendo o óleo de soja o mais promissor, enquanto o óleo de mamona demanda estratégias adicionais para maximizar a produção de combustíveis do tipo *drop-in*.

Palavras-chaves: Diesel verde; SAF; Pirólise; Óleo de mamona; Óxido de nióbio.

Abstract

RODRIGUES, Gabriela Azevedo. **Production of drop-in fuels from vegetable oils using niobium oxide catalyst**. 2026. 129 p. Dissertation (Master's in Chemical Engineering) – Institute of Technology, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

Drop-in renewable fuels have attracted increasing attention due to their compatibility with fossil fuels and their potential contribution to the decarbonization of the energy sector. In this study, the catalytic deoxygenation of oleic acid, soybean oil, and castor oil was investigated aiming the production of hydrocarbons within the green diesel and SAF range, using Nb_2O_5 as catalyst. The reactions were carried out in batch mode, under autogenous pressure and without external hydrogen, with temperatures ranging from 300 to 400 °C and catalyst loading from 5 to 15 wt%. The best performance was observed for oleic acid, which reached 88.86% of deoxygenated hydrocarbons, indicating high selectivity toward the formation of chains compatible with green diesel. Soybean oil showed intermediate performance, reaching up to 86.15% deoxygenation at 350 °C, while lower temperatures favored the formation of carboxylic acids. In contrast, castor oil had the worst performance, with minimum deoxygenation values of 16.61%, maintaining high proportions of acids, ketones, alcohols, and esters even with increased catalyst loading. Overall, 350 °C was the most favorable temperature for hydrocarbon conversion, whereas lower temperatures limited the deoxygenation, and higher temperatures intensified fragmentation pathways. The results demonstrated that process efficiency depends on the chemical structure of the feedstock, the soybean oil as the best one, while castor oil requires additional strategies to maximize drop-in fuel production.

Keywords: Green diesel; SAF; Castor oil; Pyrolysis; Soybean oil

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Prospecção da demanda energética para 2050	24
Figura 2 – Comparativo entre combustíveis do ciclo diesel	26
Figura 3 – Vantagens e desvantagens do Diesel Verde em relação ao biodiesel convencional	27
Figura 4 – Demanda de biocombustíveis até 2028	33
Figura 5 – Mapa de palavras para a pesquisa em desoxigenação para obtenção de hidrocarbonetos na produção de diesel verde	37
Figura 6 – Esquema ilustrativo da pirólise para obtenção de combustíveis <i>drop-in</i>	38
Figura 7 – Rotas de conversão dos triglicerídeos na pirólise	39
Figura 8 – DRX do óxido de nióbio antes da reação	57
Figura 9 – DRX do óxido de nióbio depois da reação	57
Figura 10 – Isoterma para o catalisador de óxido de nióbio	58
Figura 11 – FTIR do óleo de mamona	60
Figura 12 – FTIR do óleo de soja	62
Figura 13 – FTIR do óleo do ácido oleico	62
Figura 14 – Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel nas amostras de ácido oleico, mamona e soja a 350 °C de acordo com a porcentagem de catalisador aplicado	65
Figura 15 – Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel nas amostras de óleo de soja de acordo com a temperatura e porcentagem de catalisador aplicado	72
Figura 16 – Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel	78

nas amostras de óleo de mamona de acordo com a temperatura e porcentagem de catalisador aplicado de catalisador

Figura 17 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 300 °C com 5% de catalisador 128

Figura 18 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 300 °C com 15% de catalisador 128

Figura 19 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 5% de catalisador 129

Figura 20 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 10% de catalisador 129

Figura 21 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 15% de catalisador 130

Figura 22 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 400 °C com 5% de catalisador 130

Figura 23 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 400 °C com 15% de catalisador 131

Figura 24 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 300 °C com 5% de catalisador 131

Figura 25 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 300 °C com 15% de catalisador 132

Figura 26 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 5% de catalisador 132

Figura 27 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 10% de catalisador 133

Figura 28 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 15% de catalisador 133

Figura 29- Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 400 °C com 5% 134
de catalisador

Figura 30- Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 400 °C com 134
15% de catalisador

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Experimentos com ácido oleico, soja e mamona a 350 °C, variando a carga de catalisador em 5% e 15%.	51
Tabela 2 – Planejamento de Experimentos utilizando o óleo de mamona	52
Tabela 3 – Planejamento de Experimentos utilizando o óleo de soja	52
Tabela 4 – Composição em ácidos graxos do óleo de mamona	59
Tabela 5 – Composição em ácidos graxos do óleo de soja	61
Tabela 6 – Faixa de hidrocarbonetos obtidos a 350 °C e carga de catalisador de 5% e 15% a partir do ácido oleico, óleo de soja e mamona	63
Tabela 7 – Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 350 °C por 2 h (óleo de soja 5% e 15%; óleo de mamona 5% e 15%; ácido oleico 5% e 15%)	67
Tabela 8 – Faixa de hidrocarbonetos obtidos a 300 °C, 350 °C e 400 °C e carga de catalisador de 5%, 10% e 15% a partir do óleo de soja	69
Tabela 9 – Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 300 °C, 350 °C e 400 °C por 2 h (com cargas de catalisador de 5%, 10% e 15%)	74
Tabela 10 – Faixa de hidrocarbonetos obtidos a 300 °C, 350 °C e 400 °C e carga de catalisador de 5%, 7,5%, 10% e 15% a partir do óleo de mamona	76
Tabela 11– Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 300 °C, 350 °C e 400 °C por 2 h (com taxas de catalisador de 5%, 7,5%, 10% e 15%)	80
Tabela 12 - Densidade das frações de hidrocarbonetos produzidos a partir do óleo de mamona a 30,5 °C	83

Tabela 13 - Densidade das frações de hidrocarbonetos produzidos a partir do óleo de soja a 30,5 °C	84
Tabela 14 - Viscosidade das amostras com o óleo de soja e mamona a 30,5 °C	84
Tabela 15 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 300° C e 5% de catalisador	104
Tabela 16 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 300° C e 15% de catalisador	106
Tabela 17 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 5% de catalisador	108
Tabela 18 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 10% de catalisador	111
Tabela 19 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 15% de catalisador	113
Tabela 20 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 400° C e 5% de catalisador	115
Tabela 21 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 400° C e 15% de catalisador	117
Tabela 22 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 300° C e 5% de catalisador	119
Tabela 23 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 300° C e 15% de catalisador	120
Tabela 24 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 350° C e 5% de catalisador	122
Tabela 25 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 350° C e 15% de catalisador	122

Tabela 26 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa
do bio-óleo a partir do óleo de soja à 400° C e 5% de catalisador 124

Tabela 27 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa
do bio-óleo a partir do óleo de soja à 400° C e 15% de catalisador 126

LISTA DE ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
ATJ – *Alcohol to Jet*
BET – Brunauer–Emmett–Teller
BTU – *British Thermal Units*
CFP – *Catalytic Fast Pyrolysis*
CNPE – Conselho Nacional de Política Energética
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
DRX – Difração de Raios X
EIA – *Energy Information Administration*
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FTIR – *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
GC/MS – Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas
HEFA – *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*
HDO – *Hydrodeoxygenation*
HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil*
IATA – *International Air Transport Association*
IEA – *International Energy Agency*
Nb₂O₅ – Pentóxido de Nióbio
PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PtL – *Power to Liquid*
SAF – *Sustainable Aviation Fuel*
SIP – *Synthesized Iso-Paraffins*
TMS – Trimethylsilyl

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Biocombustíveis drop-in	24
3.1.1 Diesel Verde	25
3.1.2 Combustível Sustentável de Aviação (SAF) ou bioquerosene de aviação	29
3.2 Diesel verde e SAF: perspectivas e desafios	31
3.3 Produção de SAF e diesel verde por pirólise catalítica	36
3.4 Matérias-primas	40
3.5 Catalisadores	43
3.6 Estado da arte	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 Materiais	50
4.2 Metodologia experimental	50
4.2.1 Pré-tratamento térmico do catalisador	50
4.2.2 Pirólise dos óleos	50
4.3 Planejamento de experimentos	51
4.4 Caracterização dos catalisadores	53

4.4.1 Difração de raios X (DRX)	53
4.4.2 Análise de área superficial e porosidade	53
4.5 Caracterização dos produtos	54
4.5.1 Espectroscopia no infravermelho	54
4.5.2 Cromatografia gasosa	54
4.5.3 Densidade	55
4.5.4 Viscosidade	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 Caracterização do catalisador	56
5.1.1 Difração de raios X do catalisador	56
5.1.2 Análise de superfície e porosidade do catalisador	57
5.2 Caracterização da matéria-prima	59
5.2.1 Óleo de mamona	59
5.2.2 Óleo de soja	60
5.2.3 Ácido oleico	62
5.3 Resultados da pirólise: comparativo entre soja, mamona e ácido oleico	63
5.4 Composição dos produtos derivados da soja	69
5.5 Composição dos produtos derivados da mamona	76
5.6 Testes físico-químicos para os produtos da soja e da mamona	82
6 CONSIDERAÇÕES GERAIS	87
7 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	89

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A - TABELAS DE COMPOSTOS, ÁREA E TEMPO DE RETENÇÃO	104
ANEXO A - CROMATOGRAMAS DOS PRODUTOS OBTIDOS	128

1 INTRODUÇÃO

A crescente procura global por energia e o aumento das preocupações ambientais têm motivado o investimento em combustíveis sustentáveis (PDE, 2021; IEA, 2022; SANTOS *et al.*, 2024; VOGT; WECKHUYSEN, 2024). O diesel verde, derivado de fontes renováveis, como biomassa, óleos vegetais, óleos usados e gorduras animais, têm uma composição semelhante ao diesel de petróleo (ANP, 2021). É composto por hidrocarbonetos parafínicos e, por isso, pode ser usado em motores a diesel sem modificações, em proporções de até 100%, eliminando a necessidade da mistura com combustíveis fósseis (NEVES; HARDER, 2021; IEA, 2022; VOGT; WECKHUYSEN, 2024).

Devido às suas cadeias de carbono lineares, o diesel verde oferece vantagens em relação ao diesel convencional, como um índice de cetano mais alto, que pode ultrapassar 80%, em comparação com aproximadamente 55% para o diesel fóssil (BEZERGIANNI; DIMITRIADIS, 2013; NEVES; HARDER, 2021). Além disso, proporciona uma combustão mais limpa, sem emissões de enxofre ou cicloalcanos como subprodutos e dependendo da sua qualidade, pode apresentar maior fugacidade em relação ao diesel de petróleo (SANTOS *et al.*, 2024). Estas características tornam o diesel verde ecológico e de alto desempenho. Portanto, ele tem vantagens sobre o biodiesel, incluindo menor teor de oxigênio, o que evita problemas de oxidação nos motores, e a formação de resíduos (NEVES; HARDER, 2021).

Este combustível pode ser produzido a partir de diferentes sementes oleaginosas, o que é especialmente vantajoso em países como o Brasil, com a sua rica diversidade agrícola (ANP, 2024). A composição do óleo influencia o produto final, uma vez que diferentes comprimentos de cadeia de carbono e níveis de insaturação afetam o processo, tornando essencial o estudo de diversas matérias-primas (PATTANAIK; MISRA, 2017). A aplicação de óleos vegetais não comestíveis contribui para a popularidade do óleo de mamona, evitando a concorrência com os recursos alimentares. O óleo de mamona contém ricina, uma substância altamente tóxica, tornando-o inadequado para uso alimentar e cosméticos, mas ideal para a produção de combustível (OROZCO *et al.*, 2017; GANESAN *et al.*, 2021; SOARES, 2022; ZHANG *et al.*, 2024).

No entanto, as condições operacionais elevadas necessárias para a produção de diesel verde são os desafios econômicos e ambientais devido ao consumo significativo de energia associado às altas temperaturas (250 °C a 600 °C) e pressão (10 bar a 110 bar) (ROGERS, 2016; SOUSA, 2016; MONCADA, 2016; CAMPOS, 2020; GANESAN *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2024). Este obstáculo é comum em métodos como hidrotratamento, liquefação hidrotérmica e pirólise, que são as principais vias para a produção de diesel a partir de óleos vegetais. A literatura sugere o pré-tratamento dos óleos vegetais por meio da hidrólise para obter conversões mais elevadas de matérias-primas com alta viscosidade, teor de água e acidez, o que libera ácidos graxos dos triglicerídeos, aumentando as taxas de conversão de 3% a 30% em comparação com o material não hidrolisado (SOUSA, 2016; MONCADA, 2016; CAMPOS, 2020).

Estudos recentes têm explorado métodos de desoxigenação sem hidrogênio para óleos vegetais, utilizando pirólise catalítica (SOUSA, 2016; HOSSAIN *et al.*, 2017; Baharudin *et al.*, 2019; CHOO *et al.*, 2020; MELO, 2021; MEDEIROS, 2022; GUEDES, 2025). Este processo pode ser realizado sem solventes, utilizando apenas óleo e um catalisador, resultando em bio-óleo com alcanos adequados para biogasolina, biocombustível para aviões e diesel verde. A pirólise catalítica é realizada na presença de um gás inerte, geralmente nitrogênio, que substitui o hidrogênio.

Segundo a literatura, uma variedade de catalisadores pode ser usada para otimizar a conversão de triglicerídeos em bio-óleo, com o objetivo de obter maior seletividade na faixa de hidrocarbonetos desejada para o diesel verde (C12–C16). Os catalisadores a base de nióbio são especialmente promissores devido à sua abundância no Brasil e ao seu desempenho em reações de desoxigenação, com boa seletividade para hidrocarbonetos na faixa do diesel (SOUSA, 2016; SCALDAFERRI; PASA, 2019; MELO, 2021; SOUSA *et al.*, 2024).

Diante do que foi exposto, o presente trabalho tem como objetivo obter bio-óleo a partir dos óleos de soja e mamona utilizando catalisadores de nióbio por meio da desoxigenação catalítica para a produção de combustíveis *drop-in* na faixa de diesel verde e SAF (Sustainable Aviation Fuel – Combustível Sustentável de Aviação).

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos: revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Avaliar a eficiência da desoxigenação dos óleos de soja e mamona para a produção de combustíveis *drop-in* utilizando catalisador de óxido de nióbio.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar a atividade catalítica do óxido de nióbio como catalisador para desoxigenação de óleos vegetais;

- Comparar a influência de condições reacionais para os rendimentos e conversão das reações;
- Analisar composição química do bio-óleo e avaliar a proporção equivalente ao SAF e diesel verde nas amostras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

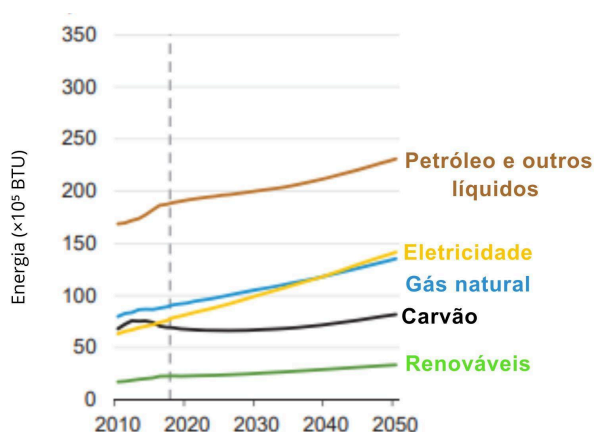
Esse capítulo apresenta o referencial teórico para a presente pesquisa. Nele, são abordados os combustíveis *drop-in* desde sua origem, classificação, importância para o mercado e processo de produção com enfoque na pirólise catalítica, suas principais matérias-primas e catalisadores, fechando com um estado da arte dos trabalhos que versam esses biocombustíveis.

3.1 Biocombustíveis *drop-in*

Com o aumento da globalização e o surgimento do conceito de desenvolvimento sustentável, os biocombustíveis surgiram como fonte de energia de menor impacto ambiental. Tendo em vista que o dióxido de carbono liberado durante sua combustão corresponde, em grande parte, ao CO₂ previamente absorvido pela biomassa durante o crescimento da matéria-prima. Com isso, caracteriza-se um ciclo de carbono de curto prazo e reduz-se o aumento líquido de gases de efeito estufa na atmosfera.

Contudo, atualmente as perspectivas demonstram que o aumento da demanda energética mundial crescerá em 47%, sendo 28% de combustíveis líquidos até o ano de 2050, como mostra a Figura 1 (IEA, 2019). Tendo isso em vista, a busca por novas fontes renováveis se tornaram essenciais para atender essa demanda.

Figura 1 – Demanda energética para 2050



Fonte: IEA, 2019.

Nesse contexto surgem os chamados combustíveis *drop-in*. Eles são definidos como hidrocarbonetos líquidos de fonte renovável, sendo equivalentes aos combustíveis derivados de petróleo e completamente compatíveis com os motores, sem precisar de adaptação. Esses combustíveis incluem versões renováveis de gasolina (biogolina), etanol (bioetanol), diesel (diesel verde) e querosene de aviação (querosene sustentável de aviação, conhecido como *Sustainable Aviation Fuel* ou SAF), que possuem características químicas e propriedades de desempenho muito próximas às de combustíveis fósseis. Estes possuem grande potencial para suprir parte dessa demanda energética (IEA, 2019).

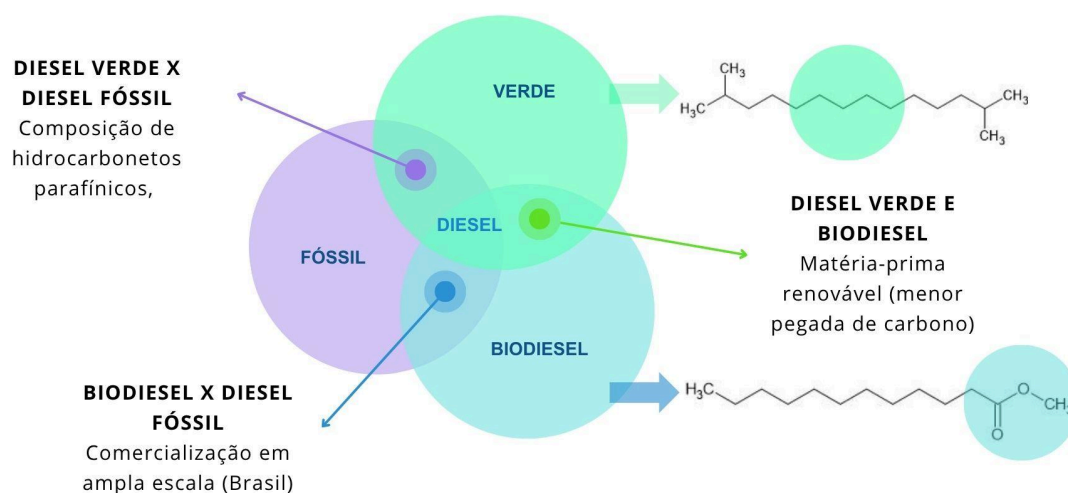
Para isso, serão descritas as principais características do SAF e do diesel verde, as matérias-primas, catalisadores e métodos de produção, assim como pesquisas encontradas na literatura.

3.1.1 Diesel Verde

Os biocombustíveis do ciclo diesel possuem grande impacto na emissão dos gases do efeito estufa. Dados referentes ao setor de transporte rodoviário de 2025 demonstram que a emissão do diesel B de fonte fóssil chega a 78,82 gCO₂eq/MJ enquanto o biodiesel emite cerca de 28,30 gCO₂eq/MJ, uma diferença de 64% a menos por ser de fonte renovável (MME, 2025). Entretanto, o uso do biodiesel é limitado a determinadas porcentagens na mistura com o diesel fóssil devido às restrições de natureza físico-química, operacional e normativa.

O diesel verde, também chamado de *renewable diesel* ou HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), é um biocombustível obtido a partir de fontes renováveis como óleos vegetais, gorduras animais, óleos de algas e outros lipídios residuais. Diferente do biodiesel convencional, cuja molécula contém oxigênio na forma de ésteres, o diesel verde é constituído majoritariamente por hidrocarbonetos parafínicos, estruturalmente equivalentes aos encontrados no diesel fóssil como demonstra a figura 2. Essa similaridade molecular é que o torna um combustível *drop-in*, ou seja, pode ser utilizado diretamente em motores diesel já existentes, sem qualquer modificação técnica e sem exigir mudanças na infraestrutura de transporte e armazenamento (NEVES; HANDER, 2021; IEA, 2022; VOGT; WECKHUYSEN, 2024).

Figura 2 - Comparativo de combustíveis para o ciclo diesel



Fonte: Próprio autor, 2025.

O diesel verde difere de forma significativa de outros combustíveis do ciclo diesel como exemplifica a Figura 3. O biodiesel (FAME), produzido por transesterificação de óleos ou gorduras com álcoois, apresenta boa redução de emissões, mas tem limitações operacionais, como maior tendência à oxidação, absorção de água, formação de borras e instabilidade durante o armazenamento, o que estimula a mistura com o diesel fóssil (SANTOS *et al.*, 2024; BEZERGIANI; DIMITRIADIS, 2013; NEVES; HARDER, 2021). Já o diesel mineral, derivado do refino de petróleo, apresenta teores variáveis de enxofre, compostos aromáticos e impurezas que impactam negativamente o desempenho ambiental (NEVES; HARDER, 2021). O diesel verde contempla por ser de origem renovável, não apresentar enxofre e oxigênio, ter um alto número de cetano (geralmente acima de 70), excelente estabilidade e combustão limpa, diminuindo em 90% as emissões em comparação ao diesel de petróleo (BEZERGIANI; DIMITRIADIS, 2013; NEVES; HARDER, 2021).

Figura 3 - Vantagens e desvantagens do Diesel Verde em relação ao biodiesel



Fonte: Próprio autor (2025).

Do ponto de vista operacional, a obtenção do diesel verde envolve a conversão de triglicerídeos e ácidos graxos em hidrocarbonetos na faixa C13–C18, por diferentes rotas. As rotas para obtenção de diesel verde segundo a Resolução ANP nº 842/2021 são: o hidrotratamento de óleo vegetal; o gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch e a hidrotermólise catalítica de óleos e gorduras.

O Hidrotratamento de Óleo Vegetal, também conhecido como HVO, é uma das principais rotas de obtenção, sendo consolidada em países como Estados Unidos e na Europa. Ela faz uso de óleo vegetais, de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa como matéria-prima. Na rota de hidrotratamento, os óleos e gorduras são submetidos a condições severas de temperatura e pressão na presença de hidrogênio molecular e catalisadores tipicamente metálicos (NEVES; HARDER, 2021).

O Gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch, é uma rota termoquímica para produção de combustíveis a partir de biomassa. A gaseificação da biomassa constitui a etapa inicial crítica. A matéria-prima lignocelulósica é convertida em um gás de síntese rico em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂) sob altas temperaturas e controle de agentes gaseificantes (como vapor d'água ou oxigênio) e equivalentes de ar, produzindo ainda CH₄ e CO₂ como subprodutos. Este gás de síntese (*syngas*) é a matéria-prima fundamental para a síntese de Fischer-Tropsch (FTS), processo catalítico no qual as moléculas

de CO e H₂ são convertidas, na presença de catalisadores metálicos (tipicamente Fe ou Co suportados), em hidrocarbonetos lineares e produtos alifáticos que podem ser usados como combustíveis líquidos de alto valor (como diesel e querosene), sem enxofre e com baixo teor de aromáticos. A razão molar adequada de H₂/CO é essencial para a eficiência da FTS, sendo muitas vezes ajustada por meio de reações auxiliares, como a reforma água-gás, para maximizar a produção de hidrocarbonetos líquidos (SILVA, 2023).

A Hidrotermólise Catalítica utiliza água em altas temperaturas e pressões para promover a quebra de triglicerídeos e desoxigenação de óleos e gorduras. Como matérias-primas temos óleo vegetal (in natura ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos provenientes de biomassa. Esta rota, uma das mais promissoras no cenário futuro do diesel verde no país, dependerá de fatores como a disponibilidade de matérias-primas sustentáveis, o custo do hidrogênio verde, a implantação de biorrefinarias e a integração com políticas públicas de descarbonização. Considerando seu caráter *drop-in* e seu perfil ambiental favorável, esse combustível tem potencial para desempenhar papel estratégico na transição energética brasileira, complementando o diesel fóssil, sem que consumidores ou empresas precisam modificar motores, veículos ou sistemas logísticos (GANESAN *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2024).

Essas rotas garantem que o produto final seja renovável e atenda às especificações físico-químicas exigidas.

Na última década, um método que ganhou espaço foi o da pirólise. A pirólise está sendo estudada para possível regulamentação pela ANP, já que possui grande potencial na conversão em hidrocarbonetos. As condições operacionais variam conforme a rota, mas no caso do hidrotratamento, típico em refinarias e biorrefinarias, as temperaturas ficam na faixa de 300 - 600 °C, com pressões entre 30 e 80 bar e presença de catalisadores de níquel, cobalto, molibdênio ou metais nobres, suportados em óxidos como alumina ou sílica (LUCANTONIO *et al.*, 2023). O processo remove oxigênio principalmente por hidrodessoxigenação, liberando água, ou por descarboxilação e descarbonilação, liberando CO₂ e CO. A escolha do catalisador e das condições de operação influencia diretamente o rendimento e a distribuição de hidrocarbonetos no produto final, sendo necessário pesquisas que variem as taxas de catalisador em busca de entender os diferentes comportamentos (PATTANAIK; MISRA, 2017).

3.1.2 Combustível Sustentável de Aviação (SAF) ou bioquerosene de aviação

O *Sustainable Aviation Fuel* (SAF), ou combustível sustentável de aviação, é definido como um combustível líquido de origem renovável ou de baixo carbono, projetado para substituir parcial ou totalmente o querosene de aviação fóssil (Jet A ou Jet A-1), mantendo compatibilidade com aeronaves, motores e infraestrutura existentes. Diferentemente de outros biocombustíveis líquidos, o SAF é classificado como um combustível *drop-in*, ou seja, pode ser utilizado sem modificações nos sistemas atuais de abastecimento e operação aeronáutica, desde que atenda às especificações técnicas estabelecidas por normas internacionais, especialmente a ASTM D7566 (ASTM, 2023).

Do ponto de vista químico, o SAF é composto majoritariamente por hidrocarbonetos parafínicos, semelhantes aos presentes no querosene fóssil, porém produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como óleos vegetais, gorduras residuais, biomassa lignocelulósica, resíduos urbanos ou intermediários sintéticos derivados de CO₂ e hidrogênio de baixo carbono (IEA, 2019).

Atualmente, os SAFs certificados são utilizados em mistura com o querosene fóssil, normalmente em proporções que variam de 10 a 50%, dependendo da rota tecnológica e da certificação específica. A limitação de mistura não está associada à segurança operacional, mas sim a características físico-químicas, como teor de aromáticos, densidade, ponto de fulgor e congelamento, essenciais para garantir o desempenho adequado de sistemas de vedação e a estabilidade do combustível em condições extremas de operação (ICAO, 2022). O SAF, diferente dos demais *drop in*, possui diferenças técnicas e operacionais fundamentais, especialmente relacionadas às exigências do setor aeronáutico, como o baixo ponto de congelamento (tipicamente inferior a -47 °C), alta estabilidade térmica em longos períodos de voo e controle rigoroso da composição aromática (ASTM, 2022). Essas exigências tornam o desenvolvimento do SAF tecnicamente mais complexo do que o diesel verde, mesmo quando ambos são produzidos a partir de rotas semelhantes, como o hidrotratamento de óleos e gorduras ou a pirólise (RONY *et al.*, 2025).

Outro aspecto crítico é o equilíbrio entre densidade energética e propriedades de segurança. O combustível de aviação precisa fornecer elevada energia por unidade de massa e volume, ao mesmo tempo em que mantém comportamento previsível em condições extremas de pressão e temperatura. O SAF, por ser

predominantemente parafínico, tende a apresentar densidade ligeiramente inferior ao querosene fóssil, o que exige ajustes no processo para garantir desempenho equivalente (CHUCK; DONNELLY, 2014). Em virtude disso, há um controle rigoroso da distribuição de carbono (C8–C16), evitando frações leves ou pesadas fora da especificação, além da necessidade de remoção quase total de heteroátomos, que podem comprometer a estabilidade térmica e desempenho em voo (LUO *et al.*, 2024)

Diversas rotas tecnológicas vêm sendo desenvolvidas e certificadas para a produção de SAF, refletindo a diversidade de matérias-primas e abordagens de conversão possíveis. Essas rotas diferem quanto à maturidade tecnológica, custo, eficiência e potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa, sendo as principais: a rota HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*); a rota Fischer–Tropsch; a rota *Alcohol-to-Jet*; a rota SIP (*Synthesized Iso-Paraffins*) e a rota *Power-to-Liquid* (PtL).

A rota HEFA baseia-se no hidrotratamento de óleos vegetais, gorduras animais e resíduos lipídicos, nos quais triglicerídeos e ácidos graxos são convertidos em hidrocarbonetos parafínicos por meio de reações de hidrogenação, desoxigenação e isomerização (ASTM, 2022). Esse processo ocorre em condições elevadas de temperatura e pressão, utilizando catalisadores típicos de refino, resultando em combustíveis com elevada estabilidade e propriedades adequadas ao uso em aviação (IRENA, 2017). A rota HEFA é atualmente a mais madura tecnologicamente e a mais utilizada comercialmente para a produção de SAF (IRENA, 2017).

Na rota Fischer–Tropsch, a biomassa sólida ou resíduos carbonáceos são inicialmente convertidos em gás de síntese, composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio, por meio de gaseificação. Esse gás é posteriormente submetido à síntese catalítica Fischer-Tropsch, formando uma mistura de hidrocarbonetos de diferentes tamanhos de cadeia (KLEIN *et al.*, 2018). Após etapas de refino, como hidrocrackeamento e fracionamento, obtêm-se frações compatíveis com o querosene de aviação, caracterizando uma rota flexível quanto à matéria-prima, porém mais complexa do ponto de vista operacional (IRENA, 2017; KLEIN *et al.*, 2018).

A rota *Alcohol-to-Jet* (ATJ) consiste na conversão de álcoois de cadeia curta, como etanol e isobutanol, em hidrocarbonetos adequados ao uso em aviação

(ASTM, 2022). O processo inicia-se com a desidratação do álcool para formação de alcenos, seguida pela oligomerização dessas moléculas, originando cadeias hidrocarbônicas. Posteriormente, os produtos passam por hidrogenação e fracionamento, resultando em combustíveis parafínicos sintéticos. Essa rota permite a integração com processos fermentativos, ampliando o aproveitamento de biomassas renováveis (SOUSA *et al.*, 2024).

A Rota SIP (Synthesized Iso-Paraffins) baseia-se na fermentação de açúcares provenientes da biomassa para a produção de moléculas intermediárias específicas, como o farneseno, que posteriormente são hidrogenadas para formar iso-parafinas (ASTM D7566, 2022). Esses hidrocarbonetos apresentam elevada qualidade para uso em aviação, especialmente em termos de estabilidade e desempenho em baixas temperaturas. Apesar de seu potencial, a rota SIP ainda possui limitações quanto à escala de produção e diversidade de produtos obtidos (IRENA, 2017).

A rota Power-to-Liquid (PtL) utiliza dióxido de carbono capturado e hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis para a síntese de combustíveis líquidos (IEA, 2021). Inicialmente, o hidrogênio é combinado com CO₂ para formar gás de síntese, que pode ser convertido em hidrocarbonetos por processos como a síntese de Fischer-Tropsch. Essa rota apresenta elevado potencial de redução de emissões de carbono, porém depende da disponibilidade de eletricidade renovável em larga escala e de tecnologias de captura de CO₂ economicamente viáveis (COLELLI *et al.*, 2018).

3.2 Diesel Verde e SAF: perspectivas e desafios

O mercado global de diesel verde e do SAF apresentam crescimento consistente e acelerado, sustentado por políticas de descarbonização, metas climáticas e a vantagem operacional de serem combustíveis *drop-in*. Essa expansão é vital para substituir combustíveis fósseis e alinhar a economia global com trajetórias de descarbonização (IEA, 2023).

Nesse contexto, a IATA (2025) firmou o compromisso para que a aviação global alcance emissões líquidas de carbono zero até 2050, de acordo com os objetivos do Acordo de Paris. Esse compromisso foi aprovado por resolução dos

membros da IATA na 77ª Assembleia Geral Anual, e necessitará de cerca de 500 milhões de toneladas de SAF, representando aproximadamente 65% da meta.

Ainda, de acordo com análises da consultoria de Kaplan et al. (2024), a introdução de um mandato de mistura de 5% de diesel renovável no mercado poderia resultar em uma redução de aproximadamente 7,2 MtCO₂eq até 2030, considerando um cenário moderado. Esse resultado evidencia o potencial do combustível renovável para contribuir com as metas de descarbonização do setor de transportes.

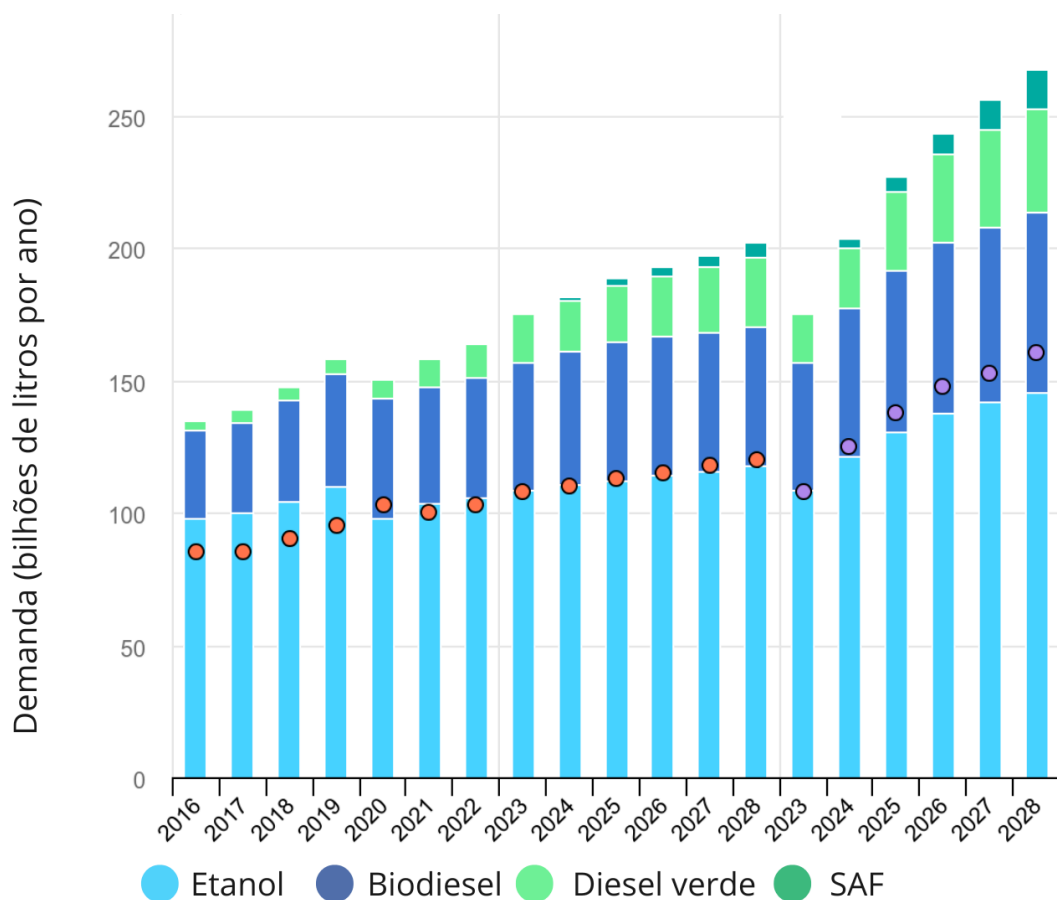
Já a implementação de um mandato de 10% de RD/HVO teria potencial para substituir cerca de 3,5% da demanda total de diesel no mesmo horizonte temporal. Dessa forma, o diesel renovável destaca-se como um instrumento relevante para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa no transporte rodoviário, ampliando os benefícios ambientais associados à substituição parcial dos combustíveis fósseis (KAPLAN et al., 2024).

Quanto ao cenário global, o aumento da demanda por biocombustíveis renováveis está projetado para expandir em cerca de 30% até 2028, o equivalente a 38 bilhões de litros, dos quais aproximadamente dois terços correspondem ao diesel renovável e ao SAF (IEA, 2023). Cerca de 70% desse crescimento deverá ocorrer em países emergentes, como Brasil, Índia e Indonésia, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 40% dessa expansão (IEA, 2023).

Esse cenário reforça a necessidade de investimentos em tecnologias que tornem a produção desses combustíveis mais eficiente e economicamente viável. Considerando que o diesel renovável e o SAF possuem potencial para substituir até 4 milhões de barris de petróleo por dia no setor de transportes, a combinação entre avanços tecnológicos e a ampla disponibilidade de matérias-primas renováveis em países emergentes torna esse investimento cada vez mais estratégico (IEA, 2023).

Nos Estados Unidos, os dados da EIA (2025) indicam que a capacidade de produção de diesel verde superou a do biodiesel em 2023, atingindo cerca de 3 bilhões de galões por ano, versus uma queda de 13% na capacidade de biodiesel, como demonstra a figura 4. A expectativa é que essa capacidade dobre até o final de 2025, alcançando até 5,9 bilhões de galões por ano, sustentada por projetos em andamento e políticas como o *Inflation Reduction Act* e incentivos estaduais como o *Low-Carbon Fuel Standard* na Califórnia (EIA, 2025).

Figura 4 - Demanda de biocombustíveis até 2028



Fonte: Adaptado de IEA (2022).

Um exemplo consolidado no mercado global de diesel verde é a Neste Corporation, empresa finlandesa reconhecida como pioneira na produção comercial em larga escala de HVO. A companhia iniciou a transição para combustíveis renováveis em sua refinaria de Porvoo (Finlândia) e, posteriormente, expandiu suas operações para unidades na Holanda, Singapura e Estados Unidos, consolidando-se como líder mundial nesse segmento. Em 2025, a refinaria de Roterdã possuía capacidade para produzir até 500 mil toneladas de SAF por ano, elevando a capacidade global da Nestlé para cerca de 1,5 milhão de toneladas anuais de SAF. Com os projetos de expansão em andamento, a empresa estima atingir uma capacidade total de 6,8 milhões de toneladas por ano de combustíveis renováveis até 2027, das quais aproximadamente 2,2 milhões de toneladas corresponderão ao SAF, evidenciando o grau de maturidade tecnológica e escala

industrial já alcançados em mercados internacionais, em contraste com o Brasil, onde essas rotas ainda se encontram em fase inicial de implantação (NESTLÉ, 2025).

Para o SAF, o Brasil se destaca como o maior mercado consumidor de combustíveis de aviação da América Latina e vem assumindo papel estratégico no desenvolvimento e na futura comercialização de combustíveis sustentáveis de aviação na América do Sul. Embora ainda não possua produção em escala comercial, projeções indicam que o país poderá alcançar, até 2029, uma capacidade produtiva da ordem de 900 mil toneladas anuais de SAF, correspondendo a aproximadamente 75% da capacidade regional, com potencial para atender tanto o mercado doméstico quanto o internacional (CNT, 2025).

Esse avanço é sustentado por um conjunto de políticas públicas e iniciativas empresariais, incluindo programas de financiamento lançados pelo governo federal por meio do BNDES e da Finep, com apoio da ANAC, que destinaram bilhões de reais ao fomento de projetos voltados à produção de combustíveis sustentáveis para aviação e navegação. Paralelamente, empresas como Petrobras, Acelen, Raízen, Geo Bio Gas & Carbon e Brasil BioFuels vêm desenvolvendo projetos baseados em diferentes rotas tecnológicas e matérias-primas — como óleos vegetais, gorduras animais, etanol certificado, biogás de resíduos agroindustriais e óleo de palma — envolvendo desde unidades piloto até biorrefinarias de grande porte, reforçando o posicionamento do Brasil como potencial *hub* regional de SAF e diesel renovável nos próximos anos (FREITAS, 2025).

Apesar das metas ambiciosas, segundo Detsios *et al.* (2023), os custos de produção dos SAF ainda são significativamente superiores aos do querosene de aviação de origem fóssil, variando amplamente conforme a rota tecnológica e a matéria-prima empregada. Os estudos compilados no artigo indicam que o preço mínimo de venda do SAF pode variar entre desde aproximadamente 0,81 €/L até valores superiores a 5,0 €/L, considerando rotas como HEFA, Fischer–Tropsch, Alcohol-to-Jet e e-fuels (DETSIOS *et al.*, 2023).

Ainda, segundo Santos (2024), no varejo europeu, o diesel verde pode custar cerca de 48% a 61% mais por litro do que o diesel convencional, com preços em torno de 2,50 a 2,90 €/L para diesel verde contra de 1,55 a 1,95 €/L para diesel tradicional.

Tendo isso em vista, o Brasil, apesar de sua sólida base agrícola e disponibilidade de matéria-prima, depende crucialmente de marcos regulatórios claros e incentivos econômicos dedicados, algo ainda incipiente em comparação com os EUA e União Europeia. A Resolução ANP nº 842/2021 define as rotas tecnológicas permitidas para o diesel verde, mas ainda não incorpora programas de mistura obrigatória ou subsídios que estimulem investimento em escala (ANP, 2021).

Segundo o PDE 2030 (2023), os desafios tecnológicos também são relevantes e incluem a busca por catalisadores mais eficientes e duráveis, que reduzam o consumo de hidrogênio e custos de processo, a necessidade de expansão de matérias-primas de segunda e terceira geração, evitando competição alimentícia e a logística de coleta e transporte das matérias-primas, que deve ser eficiente e sustentável para resíduos.

Do ponto de vista regulatório, o Brasil precisa alinhar sua normatização ao padrão internacional, estabelecer certificação de origem, créditos de carbono e políticas de mistura para incentivar investimentos privados em biorrefinarias. Sem isso, o país corre o risco de perder competitividade, mesmo tendo vantagens naturais e estratégicas para liderar a produção de diesel verde. A Lei nº 14.993/2024 (Lei do Combustível do Futuro) estabeleceu, em 2024, um marco jurídico abrangente para a promoção de biocombustíveis avançados, incluindo o diesel verde e o SAF, e prevê a definição anual, pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), dos volumes mínimos a serem misturados ao diesel fóssil, além de programas específicos para descarbonização do transporte, mostrando que a criação de regras claras e previsíveis é fundamental para ampliar a competitividade do Brasil no cenário global de combustíveis sustentáveis (BRASIL, 2024).

Por fim, a ANP (2024) ainda se encontra em processo de avaliação e regulamentação das tecnologias aptas à produção de combustíveis *drop-in*, incluindo o estudo da pirólise como rota potencial para obtenção de intermediários renováveis compatíveis com a infraestrutura existente. Em escala global, a relevância dessa tecnologia já é evidente. Em 2022, a pirólise destacou-se como a rota com maior contribuição de receita no mercado de diesel verde, devido à sua capacidade de converter biomassa e resíduos em bio-óleos, gases e biochar (KUMARI; PRASAD, 2024). Avanços no design de reatores, no uso de catalisadores e na otimização das condições operacionais têm ampliado a eficiência e a

flexibilidade do processo, permitindo o uso de uma ampla variedade de matérias-primas residuais e reforçando seu papel estratégico na expansão do mercado internacional de combustíveis renováveis (SOUSA, 2016; KUMARI; PRASAD, 2024).

3.3 Produção de SAF e diesel verde por pirólise catalítica

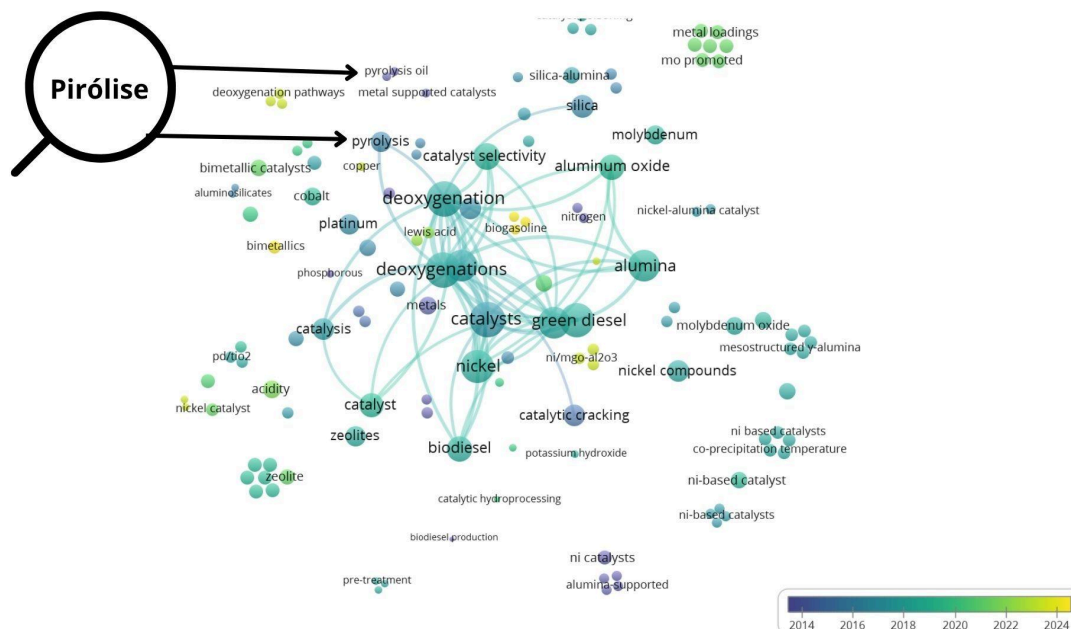
A pirólise consiste na decomposição térmica de biomassa ou óleos em altas temperaturas, na ausência ou em condições de baixa concentração de oxigênio, produzindo principalmente bio-óleo, gases combustíveis e biochar. Trata-se de um processo termoquímico amplamente estudado devido à sua capacidade de converter diferentes tipos de matérias-primas em produtos de interesse energético e químico (GUEDES, 2025).

Em razão de sua versatilidade, a pirólise pode empregar desde resíduos agrícolas e florestais até plásticos e óleos residuais como matéria-prima. Essa flexibilidade, aliada à possibilidade de obtenção de compostos intermediários para a produção de combustíveis renováveis, torna essa tecnologia uma alternativa promissora para a geração de bioenergia e de combustíveis *drop-in* (GUEDES, 2025).

Foi realizada uma pesquisa na base de dados Scopus com o objetivo de identificar as tendências relacionadas aos métodos *hydrogen-free* para obtenção de hidrocarbonetos destinados à produção de biocombustíveis *drop-in*. Para isso, foram utilizadas as palavras-chave “green OR renewable OR hydrocarbon AND diesel AND vegetable AND oil AND deoxygenation”, considerando publicações no período de 2015 a 2025. Os dados obtidos foram analisados por meio da plataforma VOSviewer, utilizada para a construção da nuvem de palavras apresentada na Figura 5.

A análise da nuvem de palavras evidencia a recorrência do método de pirólise entre os estudos publicados, indicando sua relevância para a produção de hidrocarbonetos renováveis. Além disso, observa-se a frequente associação desse processo ao emprego de catalisadores metálicos e bimetálicos, demonstrando o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de sistemas catalíticos capazes de aumentar a eficiência das reações de desoxigenação.

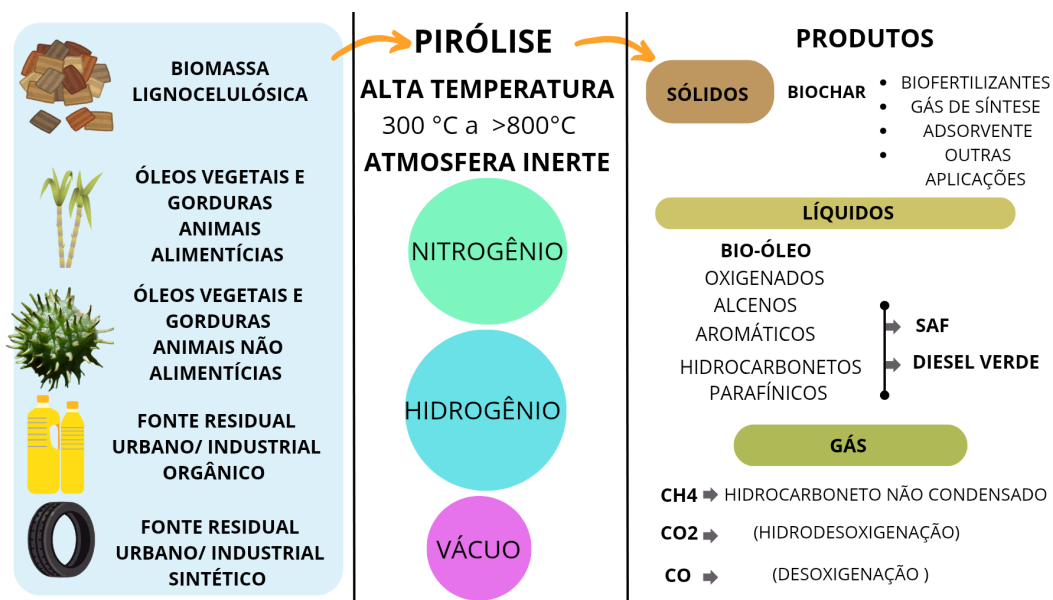
Figura 5 - Mapa de palavras para a pesquisa em desoxigenação para obtenção de hidrocarbonetos na produção de diesel verde



No processo de pirólise catalítica, a matéria-prima é inicialmente triturada e conduzida a um reator pirolítico, onde é submetida a temperaturas entre 300 e 800 °C. Nessas condições, ocorre a rápida quebra das moléculas da biomassa, permitindo sua conversão em bio-óleo em poucos segundos (SOUSA, 2016; HOSSAIN et al., 2017; BAHARUDIN et al., 2019; CHOO et al., 2020; MELO, 2021; MEDEIROS, 2022; GUEDES, 2025).

Após a condensação, o bio-óleo forma um líquido denso e composto por uma ampla variedade de espécies químicas. Devido à elevada presença de compostos oxigenados, esse produto pode requerer etapas posteriores de upgrade para a obtenção de combustíveis drop-in, como diesel verde e combustível sustentável de aviação (SAF), conforme ilustrado na Figura 6 (SOUSA, 2016; HOSSAIN et al., 2017; BAHARUDIN et al., 2019; CHOO et al., 2020; MELO, 2021; MEDEIROS, 2022; GUEDES, 2025).

Figura 6 - Esquema ilustrativo da pirólise para obtenção de combustíveis *drop-in*



Fonte: Próprio autor, 2025.

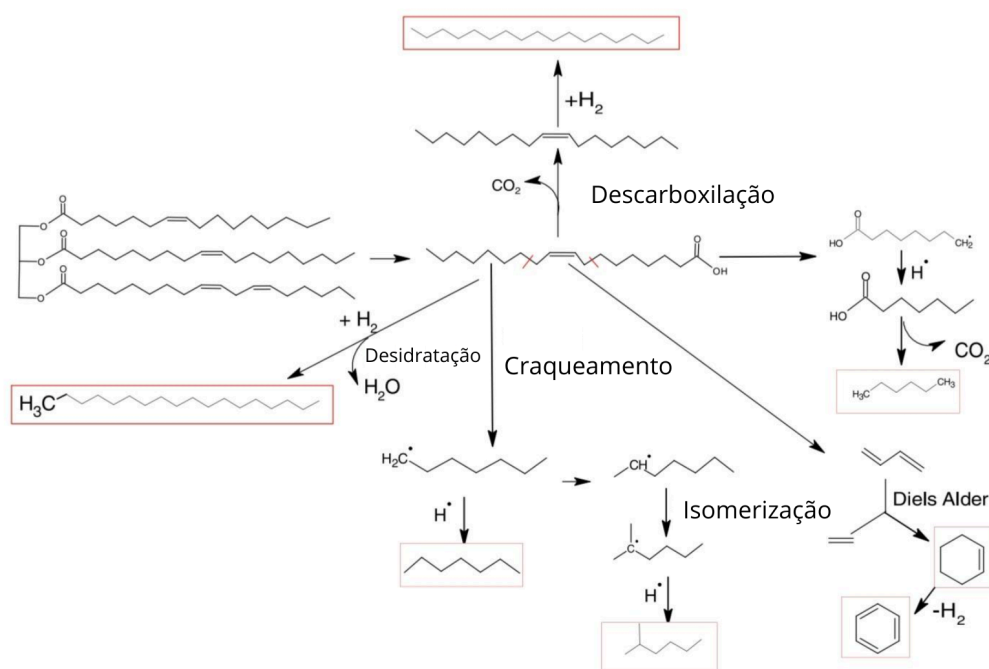
Ao submeter as matérias-primas às altas temperaturas, as longas cadeias de diferentes fontes de carbono se quebram em moléculas menores, gerando uma mistura de hidrocarbonetos. Essa mistura gasosa é então resfriada e condensada em óleo bruto de pirólise. Por meio de processos adicionais de fracionamento e refino (como destilação e melhoramento catalítico), esse óleo pode ser separado em frações semelhantes a diesel, querosene e outros combustíveis líquidos presentes no bio-óleo.

A grande vantagem dessa rota é que não depende do uso de hidrogênio, o que elimina a necessidade de sua produção ou transporte, reduzindo custos e complexidade operacional. Esses processos são conhecidos como métodos de desoxigenação, que embora reduzam o rendimento em comparação com o hidrotratamento (HDO), são opções viáveis quando o hidrogênio é escasso ou caro (GUEDES, 2025). A pirólise também é energeticamente autossustentável em muitos casos, pois os gases gerados, como metano, CO e outros podem ser reaproveitados para alimentar o próprio sistema, elevando sua atratividade do ponto de vista térmico e ambiental (SOUZA, 2016). Além disso, por ser uma alternativa ao gás hidrogênio, esse método oferece outras vantagens notáveis como, operação com nitrogênio (mais seguro que hidrogênio sob pressão), menor intensidade

energética, múltiplos produtos combustíveis em uma só etapa e potencial aplicação industrial rápida (SOUSA, 2016).

Contudo, apesar dessas vantagens, as rotas reconhecidas incluem: hidrotratamento (HVO) de óleos vegetais e gorduras, síntese Fischer-Tropsch a partir de biomassa, fermentação de carboidratos, oligomerização de álcoois e hidrotermólise catalítica. Isso se deve ao fato de que o bio-óleo resultante da pirólise requer "*upgrading*" adicional e não atende diretamente às especificações físico-químicas do diesel verde (hidrocarboneto parafínico e 100% renovável), além de ainda conter alto teor de oxigênio e instabilidades químicas (HOSSAIN *et al.*, 2017). A Figura 7 demonstra as possíveis rotas químicas que um óleo vegetal pode seguir, onde é possível visualizar possíveis rotas para conversão dos triglicerídeos e seus respectivos produtos e intermediários, como ácidos carboxílicos, insaturados e compostos cíclicos.

Figura 7 - Rotas de conversão dos triglicerídeos na pirólise



Fonte: Adaptado de Sousa (2024).

Nos últimos 10 anos, o volume de trabalhos científicos envolvendo pirólise catalítica de biomassa e óleos vegetais tem aumentado significativamente no Brasil e internacionalmente, demonstrando o potencial dessa rota termoquímica para a

produção de hidrocarbonetos de interesse como biocombustíveis avançados (SUN, 2025).

Em termos de desafio, a pirólise ainda precisa superar questões como instabilidade do bio-óleo bruto, necessidade de refino ou separação de frações, além de garantir estabilidade química e compatibilidade com motores e infraestrutura (SOUSA, 2016). Também há menos dados de aplicação em larga escala comparados ao hidrotreatamento, que possui respaldo regulatório e industrial consolidados (GUEDES, 2025).

No panorama brasileiro, apesar da ausência de inclusão oficial da pirólise como rota de diesel verde, a tecnologia demonstra grande potencial, especialmente em contextos onde o acesso ao hidrogênio é limitado ou caro (GUEDES, 2025). Como destaca uma observação comum entre pesquisadores e analistas: aproveitar o rejeito de biomassa ou lixo como fonte de combustíveis avançados fortalece a segurança energética, diversifica a matriz e reduz a dependência fóssil, ressonando com o debate atual sobre transição energética no Brasil (SOUSA, 2016).

Em conclusão, a pirólise, como método *hydrogen-free*, oferece uma alternativa interessante e sustentável na produção de combustíveis renováveis, com potencial significativo quando integrada à inovação catalítica e à infraestrutura nacional de biorefino. Para conquistar reconhecimento regulatório e ser considerada oficialmente como rota válida de diesel verde, será necessário consolidar os avanços de pesquisa e demonstrar conformidade com normas e especificações, mas o caminho ainda necessita de mais pesquisas em busca de catalisadores mais eficientes e condições operacionais otimizadas (SOUSA, 2016).

3.4 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na produção de SAF e diesel verde podem ser organizadas em categorias ou gerações, de acordo com sua origem, disponibilidade e grau de competição com a cadeia alimentar (SUN, 2025). As matérias-primas de primeira geração incluem óleos vegetais comestíveis e gorduras animais, como óleo de soja, palma, canola e sebo bovino, amplamente empregadas em rotas já consolidadas. As de segunda geração abrangem resíduos e subprodutos, como óleos residuais, resíduos agrícolas e florestais, biomassa lignocelulósica e resíduos sólidos urbanos, apresentando maior potencial de sustentabilidade por não competirem diretamente com alimentos (IEA, 2023). Já as matérias-primas de

terceira geração envolvem principalmente microalgas e outras biomassas não convencionais, ainda em estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico.

No Brasil, o contexto de matérias-primas para biocombustíveis também está associado às políticas públicas de inclusão social e desenvolvimento regional. Desde a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), o governo federal tem incentivado a diversificação de insumos destinados à produção de biodiesel e o fortalecimento da agricultura familiar, incluindo mecanismos como o Selo Biocombustível Social para estimular a compra de matéria-prima de pequenos produtores rurais, ampliando o uso de culturas como soja, mamona, dendê e outros óleos vegetais e gorduras animais. Essas diretrizes visam não apenas aumentar a oferta de matérias-primas sustentáveis, mas também promover emprego, renda e desenvolvimento territorial por meio de cadeias produtivas regionais do biodiesel (MME, 2025). Dentre várias matérias-primas, esse trabalho focou na soja e na mamona, cujas justificativas são descritas abaixo.

No Brasil, a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) desempenha um papel central como matéria-prima para biocombustíveis, especialmente na produção de biodiesel, devido à sua elevada disponibilidade, ao alto teor de óleo (em torno de 18 - 22 %) e à estrutura já consolidada do setor oleaginoso no país (MUHAMMAD *et al.*, 2025). Segundo a ANP (2025), o óleo de soja responde, de forma consistente, por cerca de 70% ou mais das matérias-primas utilizadas na fabricação de biodiesel, posição que se mantém dominante frente a outras fontes oleaginosas e gorduras animais. Essa predominância reflete tanto a grande escala da produção de soja no Brasil, um dos maiores produtores do mundo, quanto a competitividade do óleo dessa oleaginosa como insumo energético renovável para atender às exigências de mistura com o diesel fóssil.

Com base nos dados do Ministério da Agricultura e Pecuária (2024), observa-se que a produção brasileira de soja mantém uma trajetória consistente de crescimento no horizonte projetado até a safra 2033/34, quando deverá alcançar 199,5 milhões de toneladas, representando um aumento de 35,3% em relação à produção de 2023/24. As projeções também apontam aumento gradual do consumo interno, passando de 52,5 milhões de toneladas em 2023/24 para 62,6 milhões de toneladas em 2033/34, enquanto as exportações seguem em forte expansão, atingindo 130,8 milhões de toneladas ao final do período, reforçando a relevância da soja como *commodity*.

A mamona (*Ricinus communis*) vem ganhando atenção como matéria-prima potencial para a produção de diesel verde, sobretudo por três grandes razões: sua alta produtividade de óleo, adaptação a regiões semiáridas e impacto para agricultura familiar (MARTÍNEZ-GONZÁLEZ et al., 2024).

A mamona possui teor lipídico significativamente superior, geralmente situado entre 45 e 55%, podendo alcançar altos rendimentos de óleo por área em condições agronômicas favoráveis (MARTÍNEZ-GONZÁLEZ et al., 2024). A cultura apresenta boa adaptação a solos de baixa fertilidade e a climas secos, característicos do semiárido nordestino, o que possibilita sua inserção em áreas marginalizadas, com menor competição com culturas alimentares tradicionais (EMBRAPA, 2022; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ et al., 2024). Dessa forma, seu cultivo tem sido associado à geração de renda para pequenos agricultores e ao fortalecimento da agricultura familiar, especialmente no contexto de políticas públicas voltadas à produção de biocombustíveis no Brasil (EMBRAPA, 2022).

Além disso, programas federais como o Selo Combustível Social, instituído no âmbito do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), estimularam o cultivo da mamona por agricultores familiares no Nordeste, por meio de incentivos fiscais e garantia de acesso ao mercado de biodiesel (BRASIL, 2005). Entretanto, apesar dessa política, o óleo de mamona apresentou menor participação no uso industrial para biodiesel, sendo frequentemente direcionado à indústria química em função de sua maior rentabilidade econômica, enquanto a soja, devido à sua estrutura logística consolidada e maior escala produtiva, manteve-se como principal matéria-prima do biodiesel no Brasil (ANP, 2023).

Contudo, o óleo de mamona distingue-se da maioria dos óleos vegetais por conter uma elevada proporção de triglicerídeos formados pelo ácido ricinoleico, geralmente superiores a 85% da composição total de ácidos graxos, o que lhe confere propriedades físico-químicas essenciais para a produção de combustíveis renováveis como diesel verde e combustíveis de aviação sustentável (MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, 2024). O ácido ricinoleico é um ácido graxo de 18 carbonos com um grupo hidroxila na posição 12 e uma dupla ligação na posição 9, que altera significativamente o comportamento térmico e reacional do óleo (MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, 2024). Porém, a alta viscosidade inerente ao óleo de mamona ainda representa um desafio técnico para sua utilização direta em processos de transesterificação e em motores convencionais, exigindo o

desenvolvimento de tecnologias avançadas de processamento, catalisadores e estratégias de modificação para viabilizar seu uso como fonte complementar de insumo para combustíveis avançados (MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, 2024).

3.5 Catalisadores

A produção de diesel verde e SAF envolve processos de hidrogenação e desoxigenação de óleos vegetais e gorduras animais, como já citados, e requerem catalisadores eficientes que promovam reações seletivas, reduzam a formação de subprodutos indesejáveis e operem sob condições industriais viáveis (EPE, 2024).

Em processos de hidrotratamento, nos quais a remoção de oxigênio ocorre por hidrodesoxigenação, há majoritariamente a presença de catalisadores metálicos suportados (NOLFI *et al.*, 2021). Segundo TAN *et al.* (2019), os catalisadores mais empregados industrialmente são os sulfetos de Ni-Mo e Co-Mo suportados em alumina, devido à sua elevada atividade, robustez e compatibilidade com unidades de refino existentes. Paralelamente, catalisadores metálicos nobres, como platina (Pt) e paládio (Pd) suportados em Al_2O_3 , SiO_2 ou materiais zeolíticos, têm sido extensivamente investigados por apresentarem alta seletividade para hidrocarbonetos parafínicos, menor formação de coque e possibilidade de operação sob condições menos severas (NOLFI *et al.*, 2021). Entretanto, seu elevado custo e sensibilidade à contaminação limitam o uso em larga escala, motivando o desenvolvimento de catalisadores metálicos não nobres modificados, bem como o ajuste de suportes e promotores (TAN *et al.*, 2019; NOLFI *et al.*, 2021).

Uma das espécies de catalisadores que merecem destaque são os a base de nióbio, um metal de transição do grupo 5 da tabela periódica, que tem atraído atenção como componente catalítico devido às suas propriedades únicas, como alta acidez e capacidade redox (TELES *et al.*, 2025). Estudos recentes indicam que catalisadores contendo óxido de (Nb_2O_5) podem melhorar a eficiência de reações de hidrogenação e desoxigenação (TELES *et al.*, 2025). Por exemplo, TIDJANI *et al.* (2023) avaliaram catalisadores $\text{Ni}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{CeO}_2$ na reação de hidrodesoxigenação de fenol, observando que a adição de nióbio aumentou a atividade catalítica e a seletividade para produtos desejados.

O nióbio, embora menos explorado que outros metais como platina e paládio, possui características que o tornam promissor como componente catalítico em processos de produção de diesel verde (SOUSA, 2016). O Nb_2O_5 apresenta centros

ácidos e redox ativos, facilitando reações como desoxigenação (CHEN *et al.*, 2025). Além disso, possui boa estabilidade térmica, permitindo operações em temperaturas elevadas sem perda significativa de atividade, como na pirólise (FRAGA *et al.*, 2022)

Além disso, o nióbio é um recurso abundante no Brasil, detendo mais de 90% de suas reservas, o que pode reduzir custos e aumentar a sustentabilidade na produção de catalisadores locais. A exploração do nióbio como componente catalítico não apenas valoriza um recurso nacional, mas também contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis na produção de diesel verde (SILVA *et al.*, 2022).

3.6 Estado da arte

Neste tópico serão abordados os trabalhos encontrados na literatura que dissertam a respeito dos produtos de pirólise para obtenção de SAF e diesel verde nos últimos dez anos, com destaque para o tipo de matéria-prima, catalisadores e condições reacionais.

No estudo de Sousa *et al.* (2024), foi utilizado o óleo de palma, extraído tanto da polpa quanto da semente para fins comparativos. As matérias-primas, foram submetidas a pirólise catalítica utilizando fosfato de nióbio (NbOPO_4) como catalisador, sob atmosfera de N_2 (10 bar) a 350 °C, atingindo até 95% de conversão dos compostos. As reações incluíram desoxigenação, craqueamento e isomerização parcial, resultando em frações dentro da faixa de destilação de biogasolina, combustível de aviação sustentável (SAF) e diesel verde, com rendimentos máximos de aproximadamente 21% biogasolina, 83% SAF e 80% diesel verde. Os produtos foram analisados por espectroscopia por infravermelho e cromatografia gasosa com espectrometria de massas.

Já Chen *et al.* (2024) utilizaram biomassa lignocelulósica de base pinus como matéria-prima, convertida via pirolisador catalítico rápido (CFP) utilizando dois tipos de catalisadores ZSM-5 (zeólita ácida) e um bifuncional Pt/TiO_2 , para gerar óleos intermediários. Esses óleos foram então submetidos a um processo de hidrotratamento não isotérmico (até 385 °C, 125 bar) usando como catalisador NiMo sulfetado suportado em Al_2O_3 , resultando em frações de combustível de aviação sustentável (SAF) com 89 a 92% de ciclanos. O processo atingiu 91 a 92% de eficiência na conversão de carbono biogênico e produziu SAF com oxigênio abaixo do limite de detecção ($< 0,01\%$), atendendo às especificações ASTM D7566 e

D4054 quanto à densidade, valor de aquecimento, volatilidade, ponto de fulgor e ponto de congelamento.

Griffin *et al.* (2024) utilizaram biomassa lenhosa real como matéria-prima, submetendo-a à pirólise catalítica rápida (CFP) com diferentes porcentagens de catalisador, gerando um produto com aproximadamente 17 a 20% de oxigênio. Esses óleos foram então hidrotratados e destilados, resultando na maior parte de seu produto referente a faixa de destilação do SAF. Quanto à composição, era majoritariamente formada por compostos cíclicos, seguido de aromáticos, com uma porcentagem de 6 a 10% de hidrocarbonetos lineares. Foram coletados dados detalhados de rendimento e composição em cada etapa, além de propriedades do SAF, permitindo análises técnico-econômicas e de ciclo de vida.

Em Kemp *et al.* (2024), foi investigado a co-pirólise catalítica de poliestireno e madeira de pinho para obtenção de hidrocarbonetos na faixa de combustíveis de aviação (C7–C17), analisados por GC/MS. Os produtos identificados incluíram aromáticos não oxigenados resultantes de reações de Diels-Alder e desidratação, formados com auxílio da transferência de hidrogênio do poliestireno para os voláteis do pinho. Destacou-se a significativa redução de policíclicos (PAHs), chegando a 85% a menos quando usado o catalisador ZSM-5, em comparação à pirólise de poliestireno puro, o que melhorou a qualidade ambiental do combustível. Além disso, a co-pirólise aumentou os rendimentos de hidrocarbonetos C7–C17 em até 22,5%, alcançando 266 mg/g de matéria-prima, tornando o óleo produzido mais próximo das especificações de querosene de aviação. Assim, os compostos encontrados, principalmente aromáticos leves e hidrocarbonetos na faixa C7–C17, com menor teor de PAHs, evidenciaram o potencial dessa rota para geração de frações compatíveis com SAF.

Em Freire de Melo *et al.* (2025), os produtos formados na pirólise do óleo de palma foram analisados sob condições catalíticas e não catalíticas, com destaque para a influência da temperatura do leito catalítico e da massa do catalisador (HZSM-5). Na pirólise não catalítica, observou-se predominância de alcanos e alcenos longos, além da presença de compostos oxigenados (9,24 %), enquanto a adição de catalisador promoveu a redução do comprimento das cadeias carbônicas, a conversão de alcenos em alcanos e a formação de compostos aromáticos, especialmente BTEX (benzeno, tolueno, xileno, etilbenzeno). A análise por cromatografia evidenciou que temperaturas mais elevadas (400 a 500 °C)

favoreceram a aromatização, com tolueno, p-xileno, o-xileno e benzeno como os principais produtos, enquanto temperaturas mais baixas (300 °C) favoreceram a formação de alcanos. A análise de componentes principais (PCA) indicou que o componente principal (PC1) está positivamente correlacionado com alcenos e cicloalcanos e negativamente com aromáticos, explicando 53,77% da variação, enquanto o segundo componente (PC2) correlaciona-se positivamente com alcanos e cicloalcanos, respondendo por 34,65% da variação, permitindo discriminar as condições favoráveis à formação de cada tipo de hidrocarboneto. A distribuição por classes de combustíveis mostrou que condições de baixa temperatura favorecem uma melhor distribuição entre diesel, gasolina, querosene e óleo lubrificante, com destaque para altos rendimentos de diesel (84,41 a 91,16 %) e querosene (56,76 %), enquanto altas temperaturas e maiores proporções de catalisador promovem a produção de aromáticos, que podem ser utilizados como aditivos de octano ou intermediários petroquímicos. Comparações com a literatura evidenciam que a combinação de catalisador ácido, baixa temperatura e baixa razão biomassa/catalisador foi eficiente para maximizar a produção de diesel e querosene, enquanto óleos ricos em ácidos graxos saturados, como o óleo de palma, favoreceram significativamente a formação desses produtos em comparação a óleos com maior teor de ácido oleico. O mecanismo de aromatização envolve inicialmente a formação de alcenos a partir de alcanos, seguidos de ciclizações e reações de desidrogenação, com contribuições adicionais de reações tipo Diels-Alder, sendo o catalisador HZSM-5 essencial para promover desoxigenação, *cracking* e aromatização, confirmando seu papel central na produção de biocombustíveis “*drop-in*” a partir do óleo de palma.

No trabalho de Muniyappan *et al.* (2023), a composição química dos óleos obtidos por co-pirólise de resíduo de biomassa e resíduo plástico é influenciada pela proporção da mistura, temperatura de operação e presença de catalisador sustentável feito a partir de toner reciclados. A pirólise de resíduo de biomassa isolada apresenta maior quantidade de compostos oxigenados. A adição do catalisador de óxido de ferro favoreceu a formação de hidrocarbonetos aromáticos e C6–C12 de interesse petrolífero, aumentando a conversão de gases de cadeia curta em moléculas aromáticas via aromatização, isomerização e reações de alquilação, além de reduzir a presença de compostos nitrogenados, por meio de reações de esterificação e secundárias. Esses resultados indicaram que a proporção ideal de

50:50 combinada com o catalisador otimizou a produção de hidrocarbonetos desejáveis, enquanto temperaturas mais baixas favoreceram a decomposição da biomassa e maiores frações de óleo, evidenciando a importância do controle de parâmetros operacionais e da ação catalítica na determinação do perfil químico dos produtos de co-pirólise.

No estudo de Guedes *et al.* (2025), a pirólise térmica e termocatalítica do óleo de *Jatropha curcas* L. demonstraram diferenças significativas na formação de compostos dependendo do uso de catalisadores e da faixa de temperatura. A pirólise térmica gerou predominantemente compostos de baixo peso molecular, majoritariamente cíclicos, com baixa produção de hidrocarbonetos (6,95 %) e alta fração de compostos oxigenados (93,03 %), concentrados principalmente na faixa de C3-C9 (90 %) típica de gases e gasolina. Por outro lado, a utilização do catalisador KIT-6 favoreceu a formação de hidrocarbonetos de cadeia aberta, aumentando a fração de hidrocarbonetos para 49,97% e distribuindo-os principalmente na faixa C10-C18 (67 %), correspondente a biocombustíveis como bioquerosene e diesel verde, com menor presença de oxigenados (49,42 %) e resíduos (0,61 %). A presença do catalisador Co/KIT-6 também promoveu a produção de hidrocarbonetos (43,63 %), especialmente nas faixas C10-C18 (71 %) e >C19 (22 %), além de reduzir os compostos oxigenados (56,19 %), evidenciando a ação desoxigenante do catalisador. Os mecanismos envolvidos incluíram a clivagem de ligações duplas de ácidos graxos (como oleico C18:1 e linoleico C18:2), radicais livres e reações de desoxigenação, que levaram à formação de hidrocarbonetos saturados e insaturados de menor cadeia, como C5 a C9, além de compostos como nonano (C9H₂₀). A presença de sítios ácidos e metálicos no Co/KIT-6 estabiliza intermediários e facilita a conversão em hidrocarbonetos na faixa de biocombustíveis, incluindo compostos aromáticos e insaturados que aumentam o poder calorífico do óleo pirolisado. A análise termogravimétrica do catalisador revelou que a perda de massa ocorreu em três estágios, com KIT-6 apresentando resíduos de 62% e Co/KIT-6 de 77 %, indicando maior retenção de carbono e eficiência catalítica. Esses dados confirmaram que a escolha do catalisador e sua interação com o óleo de *Jatropha* são determinantes para a composição química do bio-óleo, favorecendo a produção de hidrocarbonetos de cadeia média à longa com propriedades adequadas para aplicações como bioquerosene e diesel verde.

Em Melchor e Fortes (2018), a pirólise dos óleos de polpa de macaúba e de seus sabões metálicos gerou bio-óleos compostos por uma complexa mistura de hidrocarbonetos e compostos oxigenados. Nos bio-óleos provenientes de sais metálicos, os hidrocarbonetos representaram de 69 a 78% do total, destacando-se os alcanos e 1-alcenos como principais representantes, enquanto os compostos oxigenados incluíram cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos e ésteres, sendo a 2-heptadecanona (metil hexadecanona) o principal produto cetônico formado a partir da decomposição do palmitato metálico. A composição dos bio-óleos variou conforme o metal presente: os sais de magnésio favoreceram a desoxigenação, aumentando a fração de alcanos e reduzindo 1-alcenos; os sais de sódio promoveram maior fragmentação da cadeia carbônica, resultando em maior conteúdo de 1-alcenos e uma fração de gasolina mais elevada; já os sais de bário apresentaram perfil semelhante ao magnésio em termos de alcanos e 1-alcenos, mas maior quantidade de ésteres. O uso de K como contra-íon nos sais de magnésio também favoreceu as reações de desoxigenação. Em termos de aplicação, os bio-óleos apresentaram propriedades físicas e químicas compatíveis com a faixa de diesel, conforme especificações da ANP, com baixo teor de enxofre nos produtos de sódio e magnésio (<10 mg/kg) e maior nos produtos de bário (22 - 23 mg/kg). Além disso, os resíduos sólidos ricos em carbonatos de sódio e bário e óxido de magnésio podem ser recuperados e reutilizados, agregando valor ao processo de pirólise.

Em Ramdhani *et al.* (2025), o óleo de cozinha usado processado com catalisadores Fe-alumino silicatados resultou em bio-óleos predominantemente compostos por hidrocarbonetos lineares e insaturados. A análise por GC-MS evidenciou a formação de alcanos lineares, incluindo octano, nonano, decano, undecano, dodecano, pentadecano e heptadecano, bem como alcenos com diferentes posições de dupla ligação, como 1-noneno, 1-deceno, 2-deceno, 1-undeceno, 2-undeceno, 4-undeceno, 1-dodeceno, 1-pentadeceno, 7-hexadeceno, heptadec-8-eno e 5-heptadeceno. Além disso, foram detectados compostos cíclicos, como ciclopentano e ciclohexano, indicando que processos de cicloadição também ocorreram durante a desoxigenação. A proporção de parafinas foi superior à de olefinas, sugerindo que a via predominante envolveu descarboxilação, enquanto reações de hidrodessoxigenação (HDO) contribuíram para a formação de alcanos pela remoção de oxigênio como água. A distribuição de hidrocarbonetos mostrou

predominância de cadeias C11–C18, com maior destaque para C15 e C17, correspondendo às frações de diesel, e menores quantidades de hidrocarbonetos leves (C8–C10). A presença de catalisadores modificados, como RM-CTA.50, promoveu a seletividade para a produção de bio-óleos ricos em hidrocarbonetos de cadeia longa, minimizando a formação de compostos oxigenados e maximizando a faixa de diesel.

Portanto, os trabalhos evidenciaram que a pirólise de diferentes matérias-primas, incluindo óleos vegetais (palma, pinhão, macaúba), biomassa lenhosa (pinus, madeira) e resíduos plásticos, é uma rota promissora para a produção de combustíveis sustentáveis, como diesel verde e SAF. A escolha do tipo de matéria-prima, do catalisador e das condições reacionais (temperatura, pressão, razão biomassa/catalisador) influencia significativamente o rendimento e a composição dos produtos, determinando o teor de hidrocarbonetos, oxigenados, aromáticos e cicloalcanos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados e as metodologias adotadas no desenvolvimento do trabalho. O planejamento experimental empregado, os procedimentos de preparação e utilização dos catalisadores, assim como as técnicas analíticas aplicadas para a caracterização dos catalisadores e a análise dos produtos obtidos ao longo dos experimentos.

4.1 Materiais

Os materiais empregados neste estudo consistiram em óleo de mamona, gentilmente cedido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), e óleo de soja adquirido comercialmente no mercado nacional. Como catalisador, utilizou-se óxido de nióbio (Nb_2O_5), doado pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração). Os materiais foram utilizados conforme recebidos, sem a realização de etapas adicionais de purificação, salvo quando explicitamente indicado nos procedimentos experimentais.

4.2 Metodologia experimental

4.2.1 Pré-tratamento térmico do catalisador

O catalisador de óxido de nióbio (Nb_2O_5) foi submetido a um pré-tratamento térmico com o objetivo de promover a ativação antes da aplicação nas reações. O procedimento foi realizado em mufla, empregando-se uma rampa de aquecimento, onde a temperatura foi elevada até 200 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C.min⁻¹, permanecendo nessa condição por um período de 2 h. Após, o catalisador foi resfriado naturalmente até a temperatura ambiente e, posteriormente, armazenado em recipiente apropriado até sua utilização.

4.2.2 Pirólise dos óleos

As reações de pirólise dos óleos vegetais foram conduzidas em um reator Parr, modelo 4848. Inicialmente, foi adicionada ao reator uma carga de catalisador, variando entre 5 e 15% (m/m) em relação à massa da matéria-prima. Em seguida, foram adicionados 20 g da matéria graxa correspondente ao óleo de mamona ou ao óleo de soja. O sistema reacional foi aquecido até a temperatura de reação, que variou entre 300 e 400 °C, operando sob pressão autógena, atmosfera de nitrogênio

e agitação constante de 200 rpm. As reações foram mantidas nessas condições por um período de 2 h.

4.3 Planejamento de experimentos

O planejamento experimental adotado neste estudo foi do tipo exploratório, baseado na variação combinada de parâmetros operacionais, com o objetivo de avaliar a influência da temperatura de reação, da proporção de catalisador e do tipo de matéria-prima sobre o processo de pirólise catalítica. A escolha desse tipo de planejamento deve-se à necessidade de compreender o comportamento do sistema reacional em diferentes condições operacionais, assim como realizar comparações entre matérias-primas de naturezas distintas.

Inicialmente, foram realizados experimentos comparativos utilizando óleo de soja, óleo de mamona e ácido oleico, com o objetivo de avaliar o comportamento dessas matérias-primas sob as mesmas condições reacionais. Esses ensaios foram conduzidos a 350 °C, empregando-se proporções de catalisador de 5 e 15% (m/m), permitindo a análise comparativa do desempenho catalítico em função da composição da matéria-prima. A Tabela 1 apresenta os experimentos realizados para mapeamento do desempenho da unidade, todos conduzidos por períodos de 2 h a 350 °C.

Tabela 1 - Experimentos com ácido oleico, soja e mamona a 350 °C, variando a carga de catalisador em 5% e 15%.

Código da amostra	Temperatura (°C)	Catalisador (%)
M350-5	Mamona	5
S350-5	Soja	5
S350-15	Soja	15
O350-5	Ácido oleico	5
M350-15	Mamona	15
O350-15	Ácido oleico	15

Fonte: Próprio autor (2025).

As condições experimentais adotadas para os ensaios de pirólise catalítica do óleo de mamona e do óleo de soja são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Planejamento de Experimentos utilizando o óleo de mamona

Código da amostra	Temperatura (°C)	Catalisador (%)
M300-5	300	5
M300-15	300	15
M350-5	350	5
M350-15	350	15
M400-5	400	5
M400-15	400	15
M350-10	350	10
M350-10(2)	350	10
M350-10(3)	350	10
M350-7,5	350	7,5

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 3 - Planejamento de Experimentos utilizando o óleo de soja

Código da amostra	Temperatura (°C)	Catalisador (%)
S300-5	300	5
S300-15	300	15
S350-5	350	5
S350-15	350	15
S400-5	400	5
S400-15	400	15
S350-10	350	10

Fonte: Próprio autor (2025).

Os experimentos foram realizados em ordem aleatória, com o objetivo de minimizar possíveis efeitos sistemáticos associados à sequência de execução dos ensaios. Entretanto, a codificação das amostras seguiu uma ordem distinta daquela adotada para a realização dos experimentos, visando facilitar a identificação, a organização e a análise dos resultados obtidos.

4.4 Caracterização dos catalisadores

Nesta seção são apresentadas as técnicas empregadas para a caracterização do catalisador utilizado neste estudo, com o objetivo de avaliar suas propriedades antes e após a aplicação nos experimentos de pirólise catalítica. São descritos os métodos analíticos adotados, bem como os parâmetros avaliados, de modo a fornecer subsídios para a compreensão do desempenho catalítico observado nos ensaios experimentais.

4.4.1 Difração de Raios X (DRX)

A Difração de Raios X (DRX) foi utilizada com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes nos catalisadores, bem como avaliar a presença de possíveis impurezas e alterações estruturais associadas ao pré-tratamento térmico e à aplicação nos experimentos de pirólise catalítica. Essa técnica permite correlacionar a estrutura cristalina do material com o seu desempenho catalítico.

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Catálise, localizado no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), utilizando-se um difratômetro MiniFlex II, da marca Rigaku, operando com radiação de cobre (Cu K α). As medidas foram conduzidas em uma faixa de varredura de 2θ entre 5 e 80°, com passo de 0,02° e tempo de contagem de 0,5 s por passo.

4.4.2 Análise de área de superfície e porosidade

A análise de área superficial específica foi empregada para a caracterização textural dos catalisadores, com o objetivo de determinar a área superficial, a distribuição de poros e o volume total de poros, por meio da obtenção das isotermas de adsorção e dessorção. Esses parâmetros são relevantes para a avaliação da acessibilidade aos sítios catalíticos e para a interpretação do desempenho catalítico observado nos experimentos.

As análises foram realizadas no Laboratório de Catálise do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), utilizando-se um analisador de área superficial ASAP 2020. Previamente às medições, as amostras foram submetidas a tratamento térmico a 300 °C, visando

à remoção de espécies fisicamente adsorvidas. As isotermas obtidas foram utilizadas para a determinação da área superficial específica e do volume de poros, de acordo com os procedimentos analíticos aplicáveis a materiais catalíticos.

4.5 Caracterização dos produtos

Nesta seção são apresentadas as técnicas analíticas empregadas para a caracterização dos produtos obtidos nos experimentos de pirólise catalítica. São descritos os métodos utilizados para a identificação e quantificação dos compostos formados, bem como para a avaliação das propriedades dos produtos líquidos gerados, de modo a subsidiar a análise dos efeitos das condições operacionais e do desempenho catalítico sobre a composição final dos produtos.

4.5.1 Espectroscopia de infravermelho

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi empregada com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes nos produtos obtidos, e comparar seus espectros com aqueles das matérias-primas correspondentes, a fim de verificar alterações químicas decorrentes do processo de pirólise catalítica. Essa técnica permite avaliar mudanças estruturais nos óleos, auxiliando na interpretação das transformações ocorridas durante as reações.

As análises de FTIR foram realizadas na Central Analítica Multiusuário do Instituto de Química (IQ) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), utilizando um espectrômetro da marca Bruker, modelo Vertex 70, operado com o software OPUS, versão 6.5. Os espectros foram obtidos empregando-se o modo de refletância total atenuada (ATR), na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} .

4.5.2 Cromatografia gasosa

A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) foi empregada como a principal técnica para a caracterização dos produtos líquidos obtidos, sendo amplamente utilizada para a identificação dos compostos formados e para a verificação da ocorrência das reações de pirólise catalítica. Essa técnica possibilita avaliar a composição química dos produtos, permitindo confirmar a formação ou não de novas espécies em relação às matérias-primas originais.

As análises foram realizadas na Central Analítica Multiusuário do Instituto de Química (IQ) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ),

utilizando-se um cromatógrafo a gás GC-2010 acoplado a um espectrômetro de massas GCMS-QP2010 Plus. As condições operacionais do cromatógrafo incluíram temperatura do injetor de 280 °C, modo de injeção do tipo *split* e vazão da coluna de 1,00 mL.min⁻¹. A temperatura do forno da coluna foi inicialmente mantida a 100 °C, seguida de aquecimento com taxa de 2,5 °C.min⁻¹ até 185 °C, sem tempo de isoterma, e posteriormente aquecida a uma taxa de 5,0 °C.min⁻¹, conforme programa estabelecido para a separação dos compostos.

O espectrômetro de massas operou com temperatura da fonte de íons de 280 °C e temperatura da interface de 300 °C, sendo adotado um tempo de corte do solvente de 3,0 min. As condições empregadas permitiram a identificação dos compostos presentes nos produtos analisados, fornecendo subsídios para a avaliação das transformações químicas ocorridas durante o processo.

4.5.3 Densidade

A determinação da densidade dos produtos líquidos obtidos foi realizada com o objetivo de avaliar alterações nas propriedades físico-químicas em relação às matérias-primas originais, fornecendo informações complementares sobre o efeito do processo de pirólise catalítica. As medições foram feitas utilizando um densímetro digital modelo DSL 920, da marca Gehaka, conduzidas no Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Biocombustíveis (LTAB) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

4.5.4 Viscosidade

A determinação da viscosidade das amostras foi realizada no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), com o auxílio de um reômetro. As análises foram conduzidas com o objetivo de avaliar o comportamento reológico das matérias-primas e dos produtos obtidos, fornecendo informações importantes sobre propriedades de escoamento e seu potencial de aplicação como combustíveis.

Para a realização dos ensaios, as amostras foram submetidas à medição a 30,5 °C, de modo a obter os valores de viscosidade correspondentes. A partir desses resultados, foi possível comparar o comportamento viscoso entre as diferentes amostras analisadas, contribuindo para a caracterização físico-química.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, são apresentados a caracterização do catalisador empregado, utilizando-se as técnicas de difração de raios X (DRX) e análise textural por adsorção de N_2 (ASAP). Essas análises permitiram avaliar a estrutura cristalina, a fase presente e as propriedades texturais do material catalítico, fornecendo subsídios para a compreensão de seu desempenho nos processos reacionais. Em seguida, são discutidos os resultados referentes aos produtos obtidos, com base nas análises por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia gasosa (CG), que possibilitaram a identificação dos principais grupos funcionais e a composição dos compostos formados. Adicionalmente, são apresentados os rendimentos em frações combustíveis, bem como as análises físico-químicas dos produtos, visando correlacionar as características do catalisador às propriedades e à qualidade dos combustíveis obtidos.

5.1 Caracterização do catalisador

A caracterização do catalisador é uma etapa fundamental para a compreensão de seu desempenho catalítico, uma vez que suas propriedades estruturais, texturais e superficiais influenciam diretamente a conversão dos reagentes e a formação dos produtos. Parâmetros como fase cristalina, área superficial, volume e distribuição de poros estão intimamente relacionados à disponibilidade de sítios ativos e aos fenômenos de adsorção e difusão, afetando a eficiência das reações. Dessa forma, a avaliação detalhada do catalisador permite estabelecer correlações entre suas características físico-químicas e os resultados obtidos nos processos de conversão, contribuindo para a interpretação dos dados experimentais e para a otimização das condições reacionais.

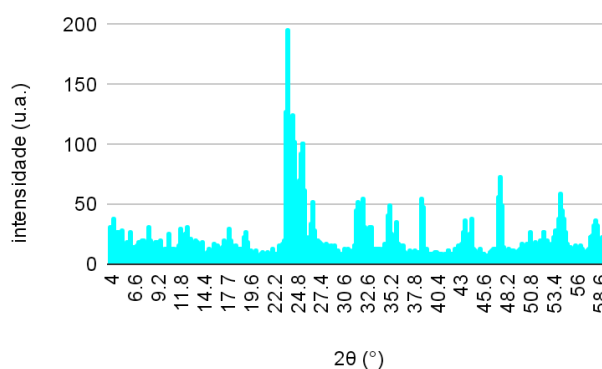
5.1.1 Difração de raios x do catalisador

A estrutura cristalina do catalisador Nb_2O_5 antes e após o uso foi avaliada por difração de raios X (DRX). Os difratogramas obtidos são apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Antes da reação, observaram-se picos característicos nas regiões de 2θ entre 22 e 25°, bem como entre 28 e 36°, atribuídos às fases cristalinas do Nb_2O_5 , principalmente na forma ortorrômbica, conforme relatado na

literatura (ZHANG *et al.*, 2021). O padrão difratométrico do catalisador pós-uso apresentou picos nas mesmas posições, indicando a preservação da estrutura cristalina após o processo reacional.

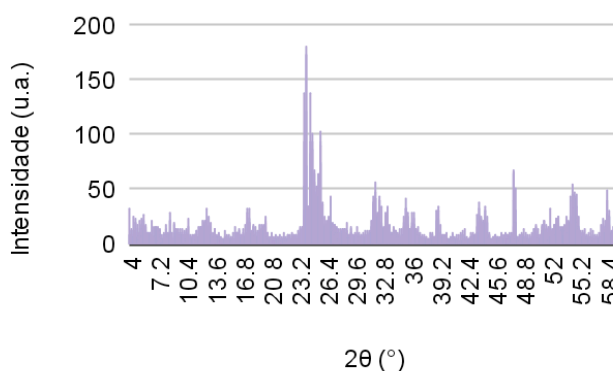
A manutenção das fases cristalinas do Nb_2O_5 após o uso evidencia a elevada estabilidade estrutural do catalisador sob as condições operacionais empregadas (KUMARINI, 2020). A presença de um fundo difuso em ambos os difratogramas indica a coexistência de frações amorfas, possivelmente associadas à deposição de espécies carbonáceas, em concordância com os resultados de adsorção de N_2 .

figura 8 - DRX do óxido de nióbio antes da reação



Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 9 - DRX do óxido de nióbio depois reação



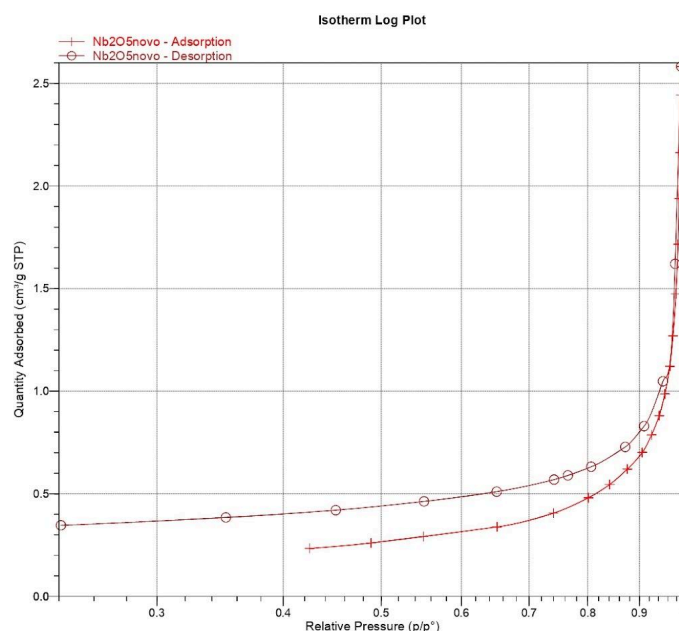
Fonte: Próprio autor (2025).

5.1.2 Análise de superfície e porosidade do catalisador

A caracterização textural do catalisador Nb_2O_5 , antes e após a reação, foi realizada por meio de adsorção e dessorção física de nitrogênio (N_2) a 77 K, utilizando um analisador de área superficial do tipo ASAP. Antes das análises, as amostras foram submetidas a pré-tratamento sob vácuo, com aquecimento controlado, visando à remoção de espécies fisicamente adsorvidas e umidade superficial. A área superficial específica foi determinada pelo método de Brunauer–Emmett–Teller (BET), enquanto o volume e a distribuição do tamanho de poros foram obtidos a partir dos métodos BJH e DFT (THOMMES *et al.*, 2015).

As isotermas de adsorção/dessorção de N_2 obtidas para o catalisador antes e pós-reação. O catalisador antes da reação apresentou área superficial específica de aproximadamente $0,58 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume total de poros em torno de $0,003 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$, indicando material não poroso como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Isotherma para o catalisador de óxido de nióbio



Fonte: Próprio autor (2025).

Após o uso catalítico, o material apresentou área superficial de aproximadamente $0,66 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume de poros de cerca de $0,002 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$, a mesma antes da reação.

O Nb_2O_5 pode apresentar diferentes estruturas, variando entre fases amorfas e cristalinas, com distintas organizações dos octaedros NbO_6 , o que influencia suas propriedades físico-químicas. Essa diversidade estrutural pode impactar

características como área superficial e porosidade do material, dependendo do método de preparação e das condições de tratamento (SKRODCZKY *et al.*, 2019)

Os resultados indicaram que o Nb_2O_5 apresenta baixa área superficial desde sua forma inicial, característica que é preservada após o processo reacional. A manutenção da área superficial sugere boa estabilidade estrutural do material sob as condições reacionais empregadas (SCALDAFERRI; PASA, 2019).

5.2 Caracterização da matéria-prima

5.2.1 Óleo de mamona

O perfil de ácidos graxos do óleo de mamona, bem como a distribuição entre cadeias saturadas e insaturadas e o valor de massa molar média, encontra-se apresentado na Tabela 4. Essas informações são fundamentais para interpretar o comportamento do óleo durante o processamento térmico e catalítico, especialmente devido à elevada concentração de ácido ricinoleico, característica que confere propriedades distintas ao material de origem. A massa molar média do óleo foi estimada a partir da composição majoritária de ácidos graxos, sendo o cálculo realizado por meio de média ponderada das massas molares.

Tabela 4 - Composição em ácidos graxos do óleo de mamona

Composição	%
Ácido 9-octadecanoico, 12-hidroxy (%)	96
Ácido (9Z)-octadec-9-enoico (%)	4
Ácidos graxos insaturados (%)	100
Ácidos graxos saturados (%)	0
Massa molar média (g.mol^{-1})	297,82

Fonte: Próprio autor (2025).

O óleo de mamona apresenta um comportamento particularmente desafiador para processos de desoxigenação catalítica destinados à produção de combustíveis *drop-in*. Isso se deve ao fato de que cerca de 96% da sua composição é formada pelo ácido ricinoleico, quimicamente denominado ácido 12-hidroxi-9-octadecenoico, um ácido graxo de 18 carbonos que possui simultaneamente uma insaturação e um grupo hidroxila em sua cadeia. A presença desses grupos funcionais confere ao

óleo elevada viscosidade, alto teor de oxigênio estrutural e maior polaridade, características associadas à maior complexidade nas etapas de craqueamento, desoxigenação e estabilização de intermediários reativos (ZHAO *et al.*, 2024).

Além da análise de Cromatografia Gasosa, também foi feito o FTIR da matéria-prima como demonstra a Figura 11. Por meio dele, é possível identificar os grupos funcionais e compará-los posteriormente com os produtos obtidos.

Figura 11 - FTIR do óleo de mamona



Fonte: Próprio autor (2025).

O espectro de FTIR do óleo de mamona *in natura* evidencia de forma clara a natureza altamente oxigenada dessa matéria-prima, característica diretamente associada à elevada concentração de ácido ricinoleico em sua composição. Observa-se a presença de bandas intensas na região de 2850 - 2950 cm⁻¹, atribuídas aos estiramentos C-H das cadeias alifáticas dos triglicerídeos. Uma absorção discreta na região próxima a 3000 cm⁻¹ pode estar associada às insaturações presentes na estrutura do ácido ricinoleico (SILVERSTEIN *et al.*, 2014). Essa banda é um traço distintivo do óleo de mamona quando comparado a outros óleos vegetais, que não apresentam grupos hidroxilados em seus principais ácidos graxos.

Na região de aproximadamente 1740 cm⁻¹, observa-se uma banda forte e bem definida correspondente ao estiramento da ligação C=O de ésteres, característica dos triglicerídeos presentes no óleo vegetal (SILVERSTEIN *et al.*, 2014; WEN *et al.*, 2022).

5.2.2 Óleo de soja

Após a avaliação do óleo de mamona, foi selecionado o óleo de soja como outra matéria-prima de interesse para o estudo, por apresentar perfil graxo distinto e maior predominância de cadeias insaturadas. Dessa forma, a Tabela 5 apresenta a composição do óleo de soja, destacando a distribuição dos principais ácidos graxos presentes na amostra.

Tabela 5 - Composição em ácidos graxos do óleo de soja

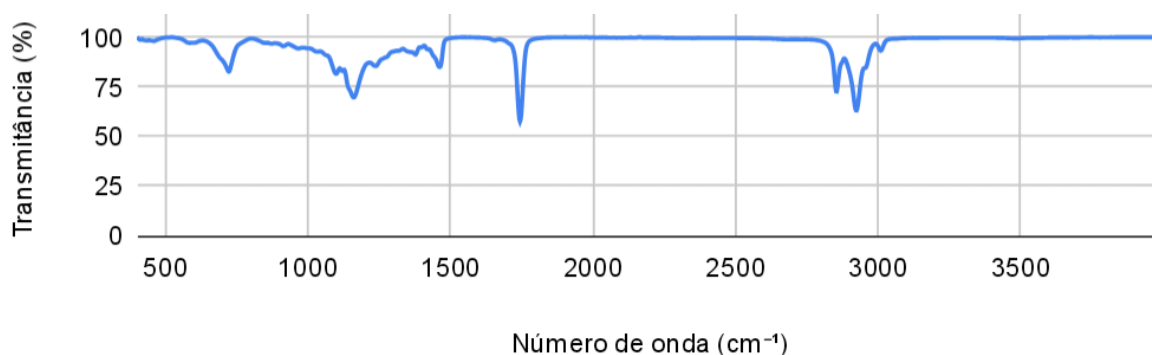
Composição	%
Ácido linoleico (%)	50,1
Ácido oleico (%)	27,9
Ácido palmítico (%)	12
Ácido linolênico (%)	6,7
Ácido esteárico (%)	3,3
Ácidos graxos insaturados (%)	84,7
Ácidos graxos saturados (%)	15,3
Massa molar média (g/mol)	297,82

Fonte: Embrapa, 2018.

A partir da composição observada, torna-se importante avaliar também as características estruturais do óleo de soja por espectroscopia no infravermelho, uma vez que essa técnica permite identificar os principais grupos funcionais presentes na matéria-prima. A análise por FTIR fornece informações sobre as ligações químicas características dos constituintes do óleo, auxiliando na confirmação de sua composição molecular.

Nesse contexto, a Figura 12 apresenta o espectro de FTIR do óleo de soja, possibilitando correlacionar as bandas de absorção observadas com os grupos funcionais característicos dos triglicerídeos e das insaturações presentes na amostra. Essa caracterização é fundamental para compreender a estrutura química do óleo, bem como sua influência no comportamento durante os processos termoquímicos e catalíticos empregados na produção de combustíveis renováveis.

Figura 12 - FTIR do óleo de soja



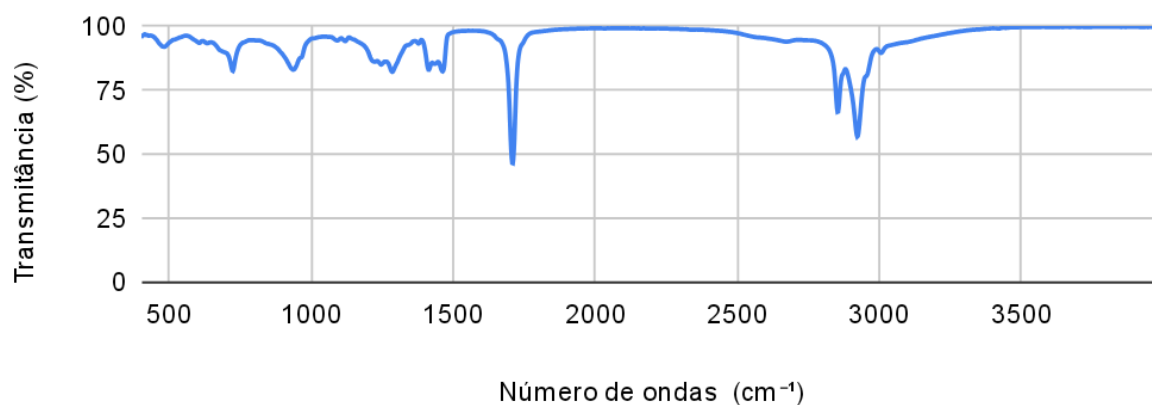
Fonte: Próprio autor (2025).

No FTIR, observaram-se bandas em 3007 cm^{-1} , associadas às insaturações, em $2922 - 2853\text{ cm}^{-1}$, referentes aos estiramentos C–H, em 1744 cm^{-1} , característica de C=O de éster, e entre $1100 - 1230\text{ cm}^{-1}$, atribuídas a C–O de éster (KOLAR *et al.*, 2023).

5.2.3 Ácido oleico

O ácido oleico apresentou composição de 100% de ácido oleico, com 100% de ácidos graxos insaturados e ausência de saturados. Sua massa molar média foi de $282,5\text{ g/mol}$, o que foi confirmado pelo seu FTIR característico na Figura 13.

Figura 13 - FTIR do ácido oleico



Fonte: Próprio autor (2025).

No FTIR, foram identificadas bandas em 3007 cm^{-1} , relacionadas às insaturações, em $2922 - 2853\text{ cm}^{-1}$, atribuídas aos estiramentos C–H, e em 1710 cm^{-1} , característica de C=O de ácido carboxílico (ENGLER *et al.*, 2019).

5.3 Resultados da pirólise: comparativo entre soja, mamona e ácido oleico como matérias-primas

Foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de avaliar o desempenho inicial da unidade experimental no processamento de diferentes matérias-primas lipídicas e comparar no óleo de soja, no ácido oleico e no óleo de mamona, em temperatura de $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ e tempo de residência de 2 h. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a porcentagem de desoxigenação alcançada em cada ensaio, permitindo uma análise comparativa do comportamento das diferentes matérias-primas sob as mesmas condições operacionais.

Tabela 6 - Faixa de hidrocarbonetos obtidos a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ e carga de catalisador de 5% e 15% a partir do ácido oleico, óleo de soja e mamona

Matéria-prima	Catalisador (% m/m)	Hidrocarbonetos desoxigenados (%)	Faixa de carbono saturados (%)
Ácido oleico	5	75,42	16,00
Ácido oleico	15	88,86	22,08
Óleo de soja	5	86,15	100,00
Óleo de soja	15	73,25	86,89
Óleo de mamona	5	33,71	85,82
Óleo de mamona	15	39,23	28,60

Fonte: Próprio autor (2025).

De modo geral, observa-se que o aumento da concentração de catalisador de 5% para 15% (m/m) favoreceu a formação de hidrocarbonetos desoxigenados para o ácido oleico, enquanto o óleo de mamona e soja apresentou comportamento distinto.

Para o ácido oleico, verificou-se um aumento da fração de hidrocarbonetos desoxigenados de 75,56% para 88,86% com o incremento da carga catalítica. Esse comportamento está em consonância com estudos que utilizam catalisadores à base de nióbio para a conversão de ácidos graxos e triglicerídeos em combustíveis do tipo *drop-in*, nos quais a maior disponibilidade de sítios ativos favorece reações de desoxigenação (SOUSA, 2016). Além disso, a predominância de hidrocarbonetos insaturados, superior a 60% em ambas as cargas catalíticas, sugere que, nas condições avaliadas, a saturação completa das cadeias não foi favorecida, possivelmente em função da ausência de hidrogênio pressurizado ou de etapas adicionais de hidrotratamento para upgrade.

No caso do óleo de soja, os resultados indicam um efeito contrário da carga catalítica. Com 5% de catalisador, a fração de hidrocarbonetos desoxigenados foi de 86,15%, diminuindo para 73,25% quando utilizada a carga de 15 %. Na maior carga catalítica, os produtos foram compostos exclusivamente por hidrocarbonetos saturados, resultado compatível com a literatura que reporta que nem sempre a maior carga está correlacionada a maior eficiência de catalisadores, a base de nióbio, na produção de alcanos lineares e ramificados a partir do óleo de soja (SOUSA, 2016). Estudos como o de Scaldaferri e Pasa (2019) relatam a formação predominante de hidrocarbonetos na faixa C9–C17, associados às frações de bioquerosene e diesel verde, corroborando a tendência observada neste trabalho, ainda que sob condições experimentais distintas.

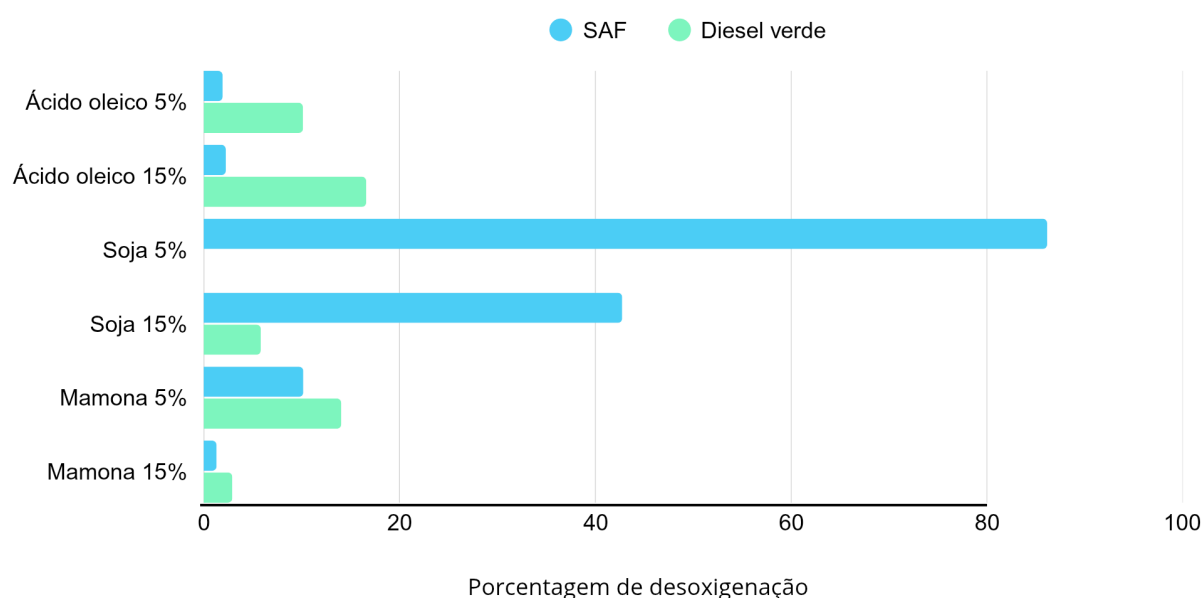
Em contraste, o óleo de mamona apresentou desempenho significativamente inferior em termos de desoxigenação, mesmo com o aumento da carga catalítica. Com 5% de catalisador, apenas 33,71% dos produtos correspondem a hidrocarbonetos desoxigenados, valor que aumenta para 39,23% com 15% de catalisador. Além disso, observa-se uma distribuição equilibrada entre hidrocarbonetos saturados e insaturados na menor carga catalítica, enquanto na maior carga há predominância de insaturados. Esse comportamento pode estar associado à química do óleo de mamona, rico em ácido ricinoleico, que possui grupo hidroxila em sua cadeia carbônica, dificultando as etapas de desoxigenação e favorecendo a formação de compostos oxigenados residuais (SOUSA *et al.*, 2024)

De modo geral, os resultados reforçam que matérias-primas com estruturas químicas menos oxigenadas, como o ácido oleico e o óleo de soja, apresentam maior afinidade com rotas de desoxigenação catalítica, enquanto o óleo de

mamona, demanda mais estudos para alcançar níveis comparáveis de conversão em hidrocarbonetos do tipo diesel verde.

Além da conversão em hidrocarbonetos, a temperatura e porcentagem de catalisador influenciam no craqueamento das cadeias carbônicas, tendo isso em vista, a Figura 14 mostra, para cada matéria-prima, as faixas de hidrocarbonetos associados ao SAF e diesel verde.

Figura 14 - Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel nas amostras de ácido oleico, mamona e soja a 350 °C de acordo com a porcentagem de catalisador aplicado



Fonte: próprio autor, 2025.

O ácido oleico apresenta, tanto para as porcentagens de 5% quanto 15% de catalisador, uma predominância por compostos na faixa do diesel verde com 84% e 88%, respectivamente. Esse comportamento demonstra menor craqueamento em cadeias carbônicas desoxigenadas.

No caso do óleo de soja, verifica-se um comportamento distinto em função da carga catalítica. Com 5% de catalisador, a distribuição é concentrada na faixa C4–C10 do SAF, alcançando praticamente a totalidade dos hidrocarbonetos

formados, o que indica predominância de produtos leves. Entretanto, ao se aumentar a carga catalítica para 15%, mesmo com a predominância da fração C4–C10, há uma contribuição mensurável de C11–C18 de 12%, sugerindo que o aumento da quantidade de catalisador favorece reações adicionais de desoxigenação e rearranjo das cadeias carbônicas. Esse resultado está de acordo com a literatura que reporta elevada sensibilidade do óleo de soja à carga catalítica em processos de desoxigenação, especialmente quando se utilizam catalisadores à base de nióbio (SOUSA, 2016).

Para o óleo de mamona, o comportamento observado difere daquele verificado para o ácido oleico e o óleo de soja. Com 5% de catalisador, a fração C11–C18 predominou com 68%, indicando que os produtos formados tendem a apresentar cadeias mais longas. Com 15% o padrão mantido é o mesmo, com porcentagem maior de fração referente a diesel verde com cerca de 58 %. De forma geral, para o óleo de mamona houve uma relação a diesel verde/SAF, menos extrema, mantendo um equilíbrio entre os dois rendimentos.

De forma geral, os resultados evidenciam que a matéria-prima exerce influência significativa, junto a carga catalítica e temperatura na distribuição da faixa de carbonos dos hidrocarbonetos formados, embora o aumento do teor de catalisador intensifique ou modifique essa distribuição dependendo da composição química do óleo utilizado (SCALDAFERRI; PASA, 2019). Enquanto o ácido oleico favorece consistentemente a formação de hidrocarbonetos na faixa C11–C18, o óleo de mamona apresenta maior flexibilidade de distribuição entre classes de compostos, além de ser pouco documentado na literatura para aplicações voltadas à produção de diesel verde, não sendo encontrado trabalhos com a mamona para essa rota de conversão até o momento.

A Tabela 7 mostra a eficiência global de desoxigenação, e ajuda na interpretação do desempenho do processo quanto às classes de compostos que estão sendo formadas. A classificação dos produtos em hidrocarbonetos (saturados, insaturados e cíclicos desoxigenados) e oxigenados (ácidos carboxílicos, cetonas, álcoois, ésteres e oxigenados cíclicos) permite verificar se o sistema favoreceu rotas desejáveis para combustíveis do tipo *drop-in* ou se persistiram famílias oxigenadas, compatíveis com conversão incompleta. Nesse contexto, a Tabela 7 sintetiza, para as seis condições experimentais, a distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados.

Tabela 7 - Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 350 °C por 2 h (óleo de soja 5% e 15 %; óleo de mamona 5% e 15 %; ácido oleico 5% e 15%)

MP	Cat. (% m/m)	AC (%)	CE (%)	AL (%)	ES (%)	OC (%)	AD (%)	SA (%)	IN (%)	DC (%)
Ácido oleico	5	4,83	1,02	6,86	0,55	1,1	8,16	12,07	63,22	0
Ácido oleico	15	0	0	0,63	3,28	4,89	0	18,86	71,58	0,76
Óleo de soja	5	0	0	0	13,85	0	0	86,15	0	0
Óleo de soja	15	23,77	0	0	1,86	1,12	0	48,57	12,77	8,66
Óleo de mamona	5	52,87	8,65	0	2,37	0	1,74	24,22	1,33	6,54
Óleo de mamona	15	37,84	1,18	6,58	6,97	1,96	5,16	4,23	13,5	13,64

Legenda: MP (matéria-prima); Cat (catalisador); AC (ácido carboxílico); CE (cetona); AL (álcool); ES (éster); OC (compostos oxigenados cíclicos); AD (aldeído); SA (saturados); IN (insaturados); DC (compostos desoxigenados cíclicos).

Fonte: Próprio autor, 2026.

Os resultados demonstram que o produto obtido a partir da soja a 5% apresenta predominância de hidrocarbonetos saturados, com contribuição reduzida das classes oxigenadas. Esse comportamento é coerente com os compostos reportados para uma das amostras de soja, em que se destacam hidrocarbonetos leves/ramificados como 2,2-dimetilbutano (50,15 %) e nonano, 3,7-dimetil (36 %), além da observação registrada de “100% de hidrocarbonetos ramificados” na faixa C4–C10. Em conjunto, esses dados apontam para uma rota com craqueamento acentuado, favorecendo produtos mais leves dentro do conjunto de hidrocarbonetos identificados.

Para o óleo de soja a 15 %, há uma maior participação relativa de classes distintas em comparação à condição a 5 %, com presença mais evidente de hidrocarbonetos insaturados e frações não exclusivamente concentradas em saturados. Na listagem de compostos da outra condição de soja, aparecem hidrocarbonetos na faixa média/longa (por exemplo, hexadecano, 24,57 %; 7-tetradeceno (Z), 8,58 %) e hidrocarbonetos ramificados (por exemplo, nonano, 3,7-dimetil, 11,79 %), juntamente com compostos oxigenados listados como ácidos carboxílicos (por exemplo, ácido octanoico, 12,59 %; ácido nonanoico, 6,16 %; ácido decanoico, 5,02 %).

Em contraste, as amostras de óleo de mamona se destacam a predominância de classes oxigenadas, sobretudo ácidos carboxílicos e cetonas, o que é consistente com o baixo desempenho de desoxigenação apresentado na Tabela 5. Na condição em que foram reportados essencialmente dois constituintes majoritários, observa-se domínio de 2-hexanona (79,63 %) e anidrido propiônico (20,37 %), caracterizando um produto majoritariamente oxigenado. Na outra condição de mamona, embora haja diversificação do perfil, permanece elevada a contribuição de oxigenados, com destaque para benzaldeído, 2,4-dimetil (64,66 %), além de ácidos (por exemplo, ácido nonanoico, 9,4 %; ácido pentanoico, 8,03 %) e cetona (3-hexanona, 4,66 %). Esses resultados em conjunto, indicam que, para a mamona e nas condições avaliadas, o processo favoreceu a formação de compostos oxigenados relevantes, em vez da conversão predominante para hidrocarbonetos.

Ácido oleico obteve predominância de hidrocarbonetos insaturados (com menor participação relativa das classes oxigenadas), o que converge com o alto percentual de hidrocarbonetos desoxigenados observado na Tabela 5. Na lista de

compostos do ácido oleico enviada, o perfil é dominado por hidrocarbonetos insaturados de cadeia longa, com 9-octadeceno (E) aparecendo como principal componente (47,21%) e também em outro pico (19%), além de hidrocarboneto saturado relevante como heptadecano (12,42%). Paralelamente, espécies oxigenadas aparecem com áreas baixas e dispersas (por exemplo, alguns ésteres/oxalatos e compostos carbonílicos com áreas inferiores a 1% em picos individuais), reforçando o caráter majoritariamente de hidrocarboneto no produto obtido a partir dessa matéria-prima.

5.4 Composição dos produtos derivados da soja

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos quanto à porcentagem de hidrocarbonetos desoxigenados, bem como a distribuição entre frações saturadas e insaturadas nos experimentos com óleo de soja.

Tabela 8 - Faixa de hidrocarbonetos obtidos a 300 °C, 350 °C e 400 °C e carga de catalisador de 5%, 10% e 15% a partir do óleo de soja

Código da amostra	Catalisador(% m/m)	Temperatura (°C)	Hidrocarbonetos desoxigenados (%)	Faixa de carbono saturados (%)
S300-5	5	300	17,29	34,66
S300-15	15	300	13,54	60,92
S350-5	5	350	86,15	100,00
S350-15	15	350	73,25	86,89
S400-5	5	400	34,75	79,65
S400-15	15	400	70,48	65,61
S350-10	10	350	60,09	89,98

Fonte: Próprio autor (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 8 evidenciam forte influência da temperatura sobre o grau de desoxigenação do óleo de soja. A 300 °C, os valores de hidrocarbonetos desoxigenados foram reduzidos, correspondendo a 17,29% para 5% de catalisador (S300-5) e 13,54% para 15% (S300-15). Esses resultados indicam que, nessa temperatura, a conversão para hidrocarbonetos foi limitada, mesmo com o aumento da carga catalítica. A baixa conversão em temperaturas menores que 300 °C reforça estudos como o de Melo (2021) que utilizou o mesmo óleo, porém a 250 °C e 15% de catalisador, obtendo 10,05% de conversão em hidrocarbonetos.

Quando a temperatura foi elevada para 350 °C, observou-se aumento expressivo na formação de hidrocarbonetos desoxigenados. A amostra S350-5 (5% de catalisador) apresentou 86,15%, enquanto S350-15 (15 %) atingiu 73,25%. Esse comportamento demonstra que a elevação da temperatura favoreceu significativamente as reações de desoxigenação, sendo este o parâmetro de maior impacto nas condições avaliadas. Nota-se ainda que, nessa temperatura, a menor carga catalítica resultou em maior percentual de hidrocarbonetos, indicando que o aumento da concentração de catalisador não promoveu incremento adicional na conversão sob essas condições. Esses resultados são condizentes com Melo (2021), que obteve 79,46% de conversão em hidrocarbonetos utilizando o óleo de soja a 350 °C com 15% de catalisador. Quando o mesmo estudo aumentou a carga para 15%, a conversão diminuiu para 79,39% indicando que nem sempre a proporção de hidrocarbonetos cresce proporcionalmente com a carga de catalisador.

A 400 °C, os resultados evidenciam comportamento distinto em função da carga catalítica, uma vez que a amostra com 5% de catalisador (S400-5) apresentou 34,75% de hidrocarbonetos desoxigenados, enquanto o aumento para 15% (S400-15) elevou esse valor para 70,48%. Esse resultado indica que, nessa condição, o aumento da carga catalítica favoreceu as reações de desoxigenação, comportamento também observado na literatura, em que a presença de catalisadores promove a redução de compostos oxigenados e o aumento da fração de hidrocarbonetos, como reportado por Guedes *et al.* (2025) e Ramdhani *et al.* (2025). Diferentemente do observado a 350 °C, a temperatura mais elevada associada à maior quantidade de catalisador intensifica reações secundárias, como

craqueamento e desoxigenação, contribuindo para o aumento do grau de conversão em hidrocarbonetos.

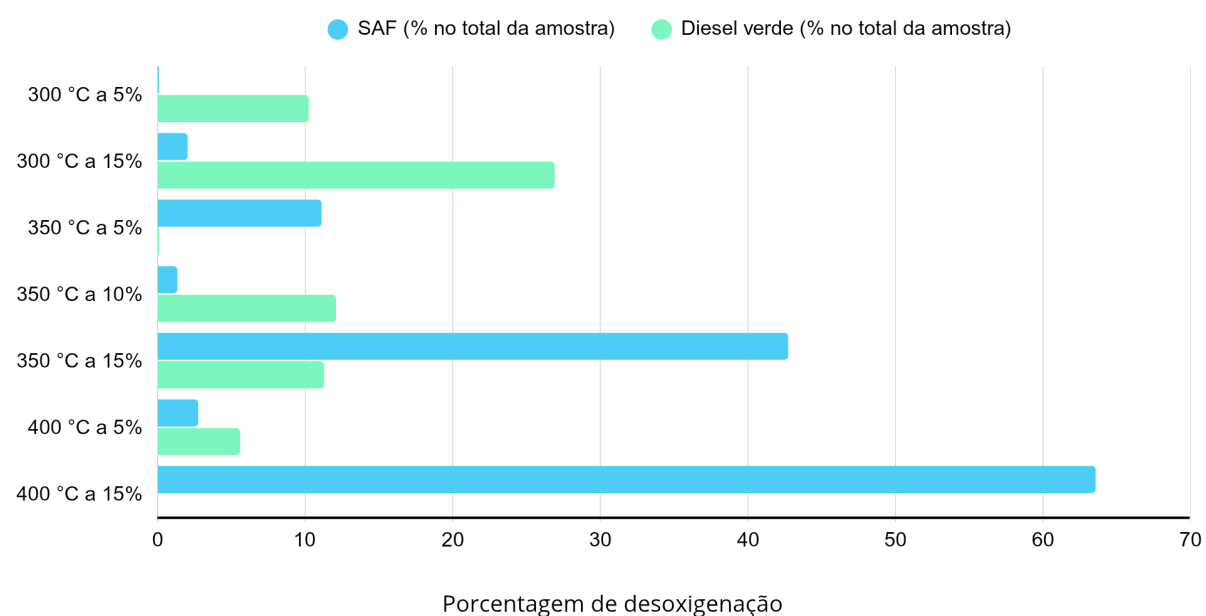
Em relação à distribuição da faixa de carbono saturados, observa-se predominância de compostos saturados nas amostras com maiores teores de hidrocarbonetos desoxigenados, com destaque para S350-5, que apresentou 100% de fração saturada, e para S400-15 e S350-10, com 92,41% e 92,84%, respectivamente. Esse comportamento sugere que, além da desoxigenação, ocorreram reações de saturação das cadeias carbônicas, como a conversão de compostos insaturados em alcanos, fenômeno também observado na literatura, onde a formação de hidrocarbonetos saturados está associada a reações de hidrogenação e desoxigenação catalítica, conforme descrito por Ramdhani *et al.* (2025). Além disso, a atuação do catalisador em condições mais severas pode favorecer a formação de cadeias saturadas por meio de reações de craqueamento e estabilização de intermediários, em concordância com os resultados reportados por Freire de Melo *et al.* (2025), nos quais a combinação de temperatura e catalisador influencia diretamente o tipo de hidrocarboneto formado.

A amostra S350-10, conduzida a 350 °C com 10% de catalisador, apresentou 60,09% de hidrocarbonetos desoxigenados e 92,84% de fração saturada, posicionando-se de forma intermediária entre os ensaios com 5% e 15% na mesma temperatura. De forma geral, os dados indicam que a temperatura exerceu influência mais pronunciada sobre a formação de hidrocarbonetos desoxigenados do que a variação isolada da carga catalítica. A condição de 350 °C com 5% de catalisador (S350-5) apresentou o maior percentual de desoxigenação dentre os ensaios avaliados. A distribuição percentual das frações associadas a SAF e diesel verde obtidas nos ensaios realizados com óleo de soja, variando-se a temperatura (300 - 400 °C) e a carga catalítica (5 - 15 %).

Na condição de 350 °C com 5% de catalisador, observa-se o maior percentual na faixa de SAF dentre todas as condições avaliadas, acompanhado de redução na fração de diesel verde. Esse comportamento coincide com o maior grau de desoxigenação observado para essa condição (S350-5), sugerindo que, nessa faixa de temperatura, as reações de craqueamento favoreceram a formação de cadeias na faixa de C8–C16. Esse resultado está em concordância com a literatura, na qual temperaturas intermediárias estão associadas à formação de frações na faixa de querosene e diesel leve, conforme observado por Freire de Melo *et al.*

(2025), que reportaram melhor distribuição entre querosene e diesel em condições de menor severidade térmica, e por Guedes *et al.* (2025), que observaram a formação de hidrocarbonetos na faixa C10–C18 sob condições catalíticas como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel nas amostras de óleo de soja de acordo com a temperatura e porcentagem de catalisador aplicado



Fonte: Próprio autor (2025).

Para 350 °C com 10% e 15% de catalisador, verifica-se redução da fração SAF em relação à condição com 5%, com predominância da fração de diesel verde. Esse comportamento indica que o aumento da carga catalítica, nessa temperatura, não favoreceu a seletividade para a faixa de SAF, podendo estar associado à intensificação de reações que direcionam a formação de cadeias mais longas. Esse efeito também é consistente com a literatura, na qual a presença de catalisadores e o aumento de sua quantidade influenciam a distribuição de produtos, favorecendo a formação de hidrocarbonetos de cadeia média a longa (C10–C18), como observado por Guedes *et al.* (2025) e Ramdhani *et al.* (2025), em que a atuação catalítica promove a desoxigenação e direciona a produção para frações compatíveis com diesel.

A 400 °C, observou-se aumento da fração SAF em relação às condições de 300 °C, especialmente para 5% de catalisador. Entretanto, a fração diesel verde ainda permanece majoritária. Para 15%, há aumento simultâneo da desoxigenação e manutenção de elevada proporção de Diesel Verde.

Quanto à composição dos produtos obtidos a partir do óleo de soja, observou-se que a distribuição entre compostos oxigenados e desoxigenados varia significativamente em função da temperatura e da carga catalítica empregadas, como demonstra a Tabela 9.

Quanto à composição dos produtos obtidos a partir do óleo de soja, observa-se que a distribuição entre compostos oxigenados e desoxigenados variou significativamente em função da temperatura e da carga catalítica empregadas, refletindo-se diretamente nos compostos predominantes identificados por CG-EM.

Em 300 °C a 5%, há predominância de ácidos carboxílicos de cadeia média e longa, com destaque para ácido oleico (32,40%), ácido hexadecanoico (22,01%) e ácido esteárico (5,32%), além de ácidos C6–C10 como hexanoico (1,65%), heptanoico (6,41%), octanoico (3,75%), nonanoico (1,81%) e decanoico (4,98%). A presença de hidrocarbonetos como tetradecano (4,26%), heptadecano (1,73%) e 1-nonadeceno (aproximadamente 6,8% somado) é limitada, indicando que, nessa condição, a reação favoreceu a permanência de compostos oxigenados e ácidos graxos não convertidos.

Quando a carga catalítica é elevada para 300 °C a 15 %, mantém-se a predominância de ácidos carboxílicos, com destaque para ácido oleico (19,28%), ácido undecilênico (14,61%), ácido heptanoico (8,55%), ácido octanoico (8,21%), ácido nonanoico (6,67%) e ácido undecanoico (6,70%). Observa-se também presença de cetonas, como 2-octanona (6,60%), enquanto os hidrocarbonetos saturados, como undecano (2,15%) e tridecano (cerca de 2%), aparecem em menores proporções, evidenciando que o aumento da carga catalítica nessa temperatura ainda não foi suficiente para promover desoxigenação predominante.

A 350 °C a 5%, ocorre mudança significativa no perfil cromatográfico, com predominância de hidrocarbonetos leves e ramificados, destacando-se 2,2-dimetilbutano (50,15%) e 3,7-dimetilnonano (36%), totalizando mais de 80% da área cromatográfica associada a hidrocarbonetos saturados e ramificados. A fração oxigenada concentra-se principalmente em metil 2-hidroxidecanoato (13,85%).

Tabela 9 - Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 300 °C, 350 °C e 400 °C por 2 h (com cargas de catalisador de 5%, 10% e 15%)

T (°C)	Cat. (% m/m)	AC (%)	CE (%)	AL (%)	ES (%)	OC (%)	SA (%)	IN (%)	DC (%)
300	5	78,33	0	4,38	0	0	5,99	11,3	0
300	15	77,23	6,6	0,82	1,84	0	6,67	5,29	0,83
350	5	0	0	0	13,85	0	86,15	0	0
350	10	28,63	3,22	0	0	0	54,59	5,59	6,89
350	15	23,77	0	0	1,86	1,12	48,57	12,77	8,66
400	5	42,85	14,82	0	2,10	0	24,75	1,46	8,54
400	15	15,59	5,62	0	0	2,18	0	13,04	0

Legenda: T (Temperatura); Cat (Catalisador); AC (ácido carboxílico); CE (cetona); AL (álcool); ES (éster); OC (compostos oxigenados cíclicos); SA (saturados); IN (insaturados); DC (compostos desoxigenados cíclicos).

Fonte: Próprio autor, 2026.

Na condição de 350 °C a 10 %, observa-se perfil mais distribuído, com contribuição relevante de tetradecano (21,67%), pentadecano (9,67%), tridecano (aproximadamente 8,7%), além de ácidos como heptanoico (9,17%), octanoico (5,69%) e decanoico (5,54%). Essa condição demonstra coexistência de hidrocarbonetos de cadeia média e compostos oxigenados, sugerindo equilíbrio entre desoxigenação e formação de intermediários.

Em 350 °C a 15 %, consolida-se a formação de hidrocarbonetos de cadeia mais longa, com destaque para hexadecano (24,57%), nonano, 3,7-dimetil (11,79 %) e 7-tetradeceno (8,58%), enquanto os ácidos carboxílicos como ácido octanoico (12,59%), ácido nonanoico (6,16%) e ácido decanoico (5,02%) ainda permanecem presentes. O perfil indica maior seletividade para hidrocarbonetos compatíveis com a faixa de diesel verde.

A 400 °C a 5 %, observa-se aumento relativo de ácidos carboxílicos, como ácido heptanoico (12,01 %), ácido octanoico (12,30 %), ácido undecanoico (9,75 %) e ácido nonanoico (8,81 %), além da presença de cetonas como 2-octanona (7,41 %). A formação de hidrocarbonetos saturados, como decano (6,21 %), tetradecano (aproximadamente 5,7 %) e pentadecano (4,11 %), permanece moderada, indicando que a elevação da temperatura favorece também rotas secundárias de fragmentação e formação de compostos carbonílicos.

Por fim, em 400 °C a 15%, observa-se aumento expressivo da participação de hidrocarbonetos saturados de cadeia média, como tetradecano (16,33%), pentadecano (8,48%) e tridecano (aproximadamente 22% somado), enquanto os ácidos carboxílicos aparecem em menores proporções, como heptanoico (7,10%) e octanoico (2,23%). Esse comportamento indica que, nessa condição, a maior carga catalítica favoreceu a conversão para hidrocarbonetos, com redução relativa das espécies oxigenadas.

De forma geral, observa-se que temperaturas intermediárias, especialmente 350 °C, associadas a cargas catalíticas moderadas a elevadas, favoreceram maior formação de hidrocarbonetos desoxigenados, enquanto temperaturas mais baixas mantiveram predominância de ácidos carboxílicos e temperaturas mais elevadas intensificaram tanto a fragmentação quanto a formação de compostos secundários.

5.5 Composição dos produtos derivados da mamona

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a porcentagem de hidrocarbonetos desoxigenados, bem como a distribuição entre frações saturadas e insaturadas nos ensaios realizados com óleo de mamona.

Tabela 10 - Faixa de hidrocarbonetos obtidos a 300 °C, 350 °C e 400 °C e carga de catalisador de 5 %, 7,5%, 10% e 15% a partir do óleo de mamona

Código da amostra	Catalisador (% m/m)	Temperatura (°C)	Hidrocarbonetos desoxigenados (%)	Faixa de carbono saturados (%)
M300-5	5	300	24,42	0
M300-15	15	300	18,11	42,02
M350-5	5	350	33,71	85,82
M350-15	15	350	39,23	28,6
M400-5	5	400	26,68	52,51
M400-15	15	400	24,32	50,25
M350-10	10	350	16,61	50,21
M350-10 (2)	10	350	19,52	18,39
M350-10 (3)	10	350	16,59	23,21
M300-50	7,5	350	20,71	5,41

Fonte: Próprio autor (2025).

Entre todas as condições avaliadas, o maior teor de hidrocarbonetos desoxigenados foi obtido a 350 °C com 15% de catalisador (M350-15 = 39,23 %), entretanto, a maior proporção de saturação ocorreu em 5% a 350 °C (85,82 %), indicando que a maior desoxigenação não implica necessariamente em maior grau de saturação.

A 300 °C, o aumento da carga catalítica de 5% (M300-5 = 24,42 %) para 15% (M300-15 = 18,11 %) não resultou em aumento da desoxigenação. Já em 400 °C, os valores obtidos com 5% (M400-5 = 26,68 %) e 15% (M400-15 = 24,32 %) foram próximos, não indicando variação expressiva com a atividade do catalisador.

Para a condição de 10% de catalisador a 350 °C, foram realizados ensaios em triplicata (M350-10, M350-10 (2) e M350-10 (3)), obtendo-se valores de desoxigenação de 16,61 %, 19,52% e 16,59%. A média calculada foi de 17,57%, com desvio padrão de $\pm 1,69\%$ e coeficiente de variação de aproximadamente 9,6%, indicando variabilidade moderada e compatível com ensaios preliminares. A proximidade entre dois dos valores (16,61% e 16,59%) reforça a boa repetibilidade experimental da condição.

Comparando-se a média obtida para 10% (17,57 %) com a condição de 15% de catalisador (39,23%), observa-se diferença de aproximadamente 21,7 pontos percentuais, valor significativamente superior ao desvio padrão da triplicata. Esse resultado indica que o aumento da carga catalítica para 15% promoveu incremento efetivo da desoxigenação a 350 °C, evidenciando influência direta da quantidade de catalisador na conversão.

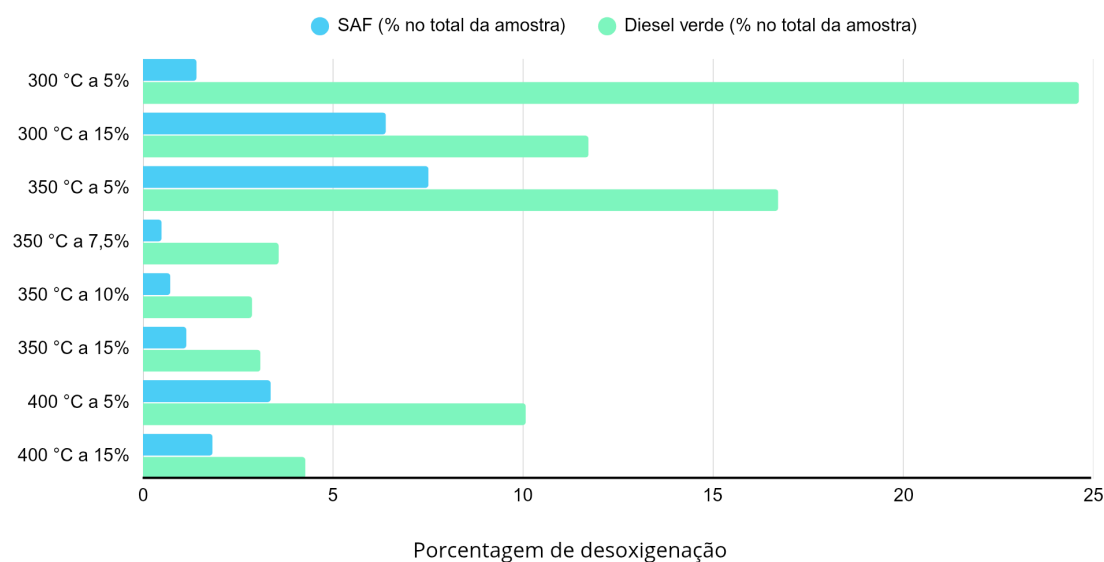
De forma geral, os dados mostram que a desoxigenação não aumenta de maneira estritamente linear com a carga catalítica, mas responde de maneira sensível às variações operacionais. Os resultados indicam que múltiplos caminhos simultâneos, e que pequenas alterações na quantidade de catalisador podem modificar o equilíbrio entre eles, afetando tanto a conversão quanto a distribuição dos produtos formados.

Quanto à distribuição das frações, observa-se que maiores níveis de desoxigenação não implicaram necessariamente na maior formação de hidrocarbonetos saturados. Em 350 °C com 5% de catalisador (M350-5), predominou a fração saturada (85,82%), enquanto em 350 °C com 15% (M350-15) houve predominância de compostos insaturados (71,4%). De modo semelhante, na condição com menor carga catalítica (M300-50), também se verificou predominância de insaturados (91,21 %). Esses resultados indicam que variações na carga catalítica influenciam diretamente a seletividade das reações, não apenas em termos de desoxigenação, mas também na conversão de insaturações. Esse comportamento é consistente com a literatura, na qual a atuação do catalisador pode direcionar tanto a formação de hidrocarbonetos saturados quanto a

manutenção de compostos insaturados, dependendo das condições operacionais, como observado por Ramdhani *et al.* (2025), que identificaram a presença simultânea de alcanos e alcenos em produtos de pirólise catalítica. Além disso, Freire de Melo *et al.* (2025) destacam que a distribuição entre diferentes classes de hidrocarbonetos é fortemente influenciada pela combinação entre temperatura e quantidade de catalisador, evidenciando que pequenas variações nesses parâmetros podem alterar significativamente o perfil químico dos produtos.

A Figura 16 apresenta a distribuição percentual das frações associadas a SAF e diesel verde obtidas nos ensaios realizados com óleo de mamona, variando-se a temperatura (300 - 400 °C) e a carga catalítica (5 - 15 %). Observa-se que, em todas as condições avaliadas, a fração correspondente ao diesel verde é predominante em relação ao SAF, indicando maior formação de hidrocarbonetos de cadeias longas (C11–C18).

Figura 16 - Faixa associada aos hidrocarbonetos presentes ao SAF e diesel nas amostras de óleo de mamona de acordo com a temperatura e porcentagem de catalisador aplicado de catalisador



Fonte: Próprio autor (2025).

Nos ensaios conduzidos a 300 °C, independentemente da carga catalítica (5% ou 15%), a totalidade dos hidrocarbonetos formados encontra-se na faixa atribuída ao diesel verde, não sendo observada formação mensurável de frações associadas ao SAF. Esse comportamento sugere que, em temperaturas mais

brandas, as reações de craqueamento são pouco favorecidas, resultando majoritariamente em produtos de maior número de carbonos.

Com o aumento da temperatura para 350 °C, observa-se o surgimento de frações associadas ao SAF, especialmente nas cargas catalíticas de 5% e 15%, nas quais a contribuição de SAF situa-se na faixa de aproximadamente 25 - 30%. Esse resultado indica que, nessa temperatura, passam a ocorrer reações de quebra parcial das cadeias carbônicas, favorecendo a formação de hidrocarbonetos mais leves, sem, contudo, suprimir a predominância do diesel verde. Em cargas catalíticas intermediárias, como 7,5% e 10%, a fração de SAF torna-se menos expressiva, sugerindo que pequenas variações na quantidade de catalisador alteram significativamente a seletividade do processo.

Nos ensaios realizados a 400 °C, observa-se manutenção da predominância do diesel verde, com participação do SAF variando em torno de 20 - 30 %, dependendo da carga catalítica. Embora o aumento da temperatura favoreça o craqueamento térmico, os resultados indicam que essa condição não promove conversão dominante para frações do tipo SAF, possivelmente em razão de reações competitivas, como formação de gases ou produtos oxigenados leves não contemplados na fração líquida analisada.

De forma geral, os resultados indicam que a temperatura exerce papel mais relevante do que a carga catalítica na formação de frações do tipo SAF, sendo necessária a elevação da temperatura para promover a quebra das cadeias carbônicas. Entretanto, mesmo nas condições mais severas avaliadas, a formação de diesel verde permanece predominante, evidenciando a tendência do óleo de mamona à produção de hidrocarbonetos de maior comprimento de cadeia.

Quanto à composição dos produtos obtidos a partir do óleo de mamona, observa-se que, diferentemente do óleo de soja e do ácido oleico previamente discutidos, a formação de compostos oxigenados permanece predominante em praticamente todas as condições avaliadas. A análise cromatográfica evidenciou que a estrutura química da mamona, antes rica em ácido ricinoleico, sofreu conversão em novos compostos, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Distribuição percentual por classes químicas dos compostos identificados nas amostras obtidas a 300 °C, 350 °C e 400 °C por 2 h (com taxas de catalisador de 5%, 7,5%, 10% e 15%)

T (°C)	Cat. (% m/m)	AC (%)	CE (%)	AL (%)	ES (%)	OC (%)	AD (%)	ET (%)	SA (%)	IN (%)	DC (%)
300	5	13,02	0,72	0,62	54,78	4,82			0	26,03	0
300	15	13,29	5,22	26,75	23,26	4,05	8,71	0,63	0	33,19	66,81
350	5	52,87	8,65	0	2,37	0	1,74	0	24,22	1,33	6,64
350	7,5	17,66	9,27	9,37	28,97	1,96	0	0	0	19,17	1,82
350	10	52,27	13,45	3,27	1,44	1,81	5,1	0	4,06	9,4	4,28
350	10	61,2	11,11	4,97	3,19	0	0	0	3,59	15,06	0,87
350	10	63,64	11,51	1,71	5,34	0	0	1,22	3,85	11,54	1,2
350	15	37,84	1,18	6,58	6,97	1,96	5,16	0	4,23	13,5	13,64
400	5	58,13	9,12	3,13	1,39	0	0,95	0,61	13,43	2,77	2,05
400	15	58,59	11,9	2,31	0	1,73	0	0	6,1	12,22	6,12

Legenda: T (temperatura); cat (catalisador); AC (ácido carboxílico); CE (cetona); AL (álcool); AD (aldeído); ES (éster); OC (compostos oxigenados cíclicos); ET (éter); SA (saturados); IN (insaturados); DC (compostos desoxigenados cíclicos).

Fonte: Próprio autor, 2026.

Em 300 °C a 5 %, a fração é majoritariamente composta por ésteres (54,78 %), com destaque para trans,trans-9,12-octadecadienoico, propil éster (24,30%), além de 9,12-octadecadienoico, etil éster (4,80 %) e glicidil palmitoleato (1,55%). Observa-se também presença de ácidos carboxílicos (13,02%), como ácido ricinoleico (6,26%) e ácido undecilênico (6,76%), enquanto os hidrocarbonetos insaturados representam 26,03%, sem formação relevante de saturados. Esse perfil confirma que, nessa condição, houve predominância de reações de esterificação e rearranjos, com desoxigenação limitada.

Quando a carga catalítica é elevada para 300 °C a 15 %, mantém-se elevado teor de compostos oxigenados, com aumento expressivo da fração de álcoois (26,75%), destacando-se 14-metil-8-hexadecin-1-ol (16,40%), além de 1-heptanol (1,90%). A presença de linoleil acetato (11,63%), undecilênico (8,96%) e ésteres diversos (23,26%) indica que a elevação da carga favoreceu rotas paralelas envolvendo desidratação e formação de derivados acetilados, porém ainda com baixa geração de hidrocarbonetos saturados.

A 350 °C a 5% apresenta mudança no perfil, com aumento da fração de ácidos carboxílicos (52,87%), especialmente ácido heptanoico (13,70%), ácido octanoico (11,97%), ácido nonanoico (8,26%) e ácido hexanoico (9,97%). Há formação de hidrocarbonetos saturados (24,22 %), como undecano (7,20% + 4,58 %) e tridecano (~5,5%), além de cetonas como 2-octanona (7,67%), evidenciando maior fragmentação das cadeias e início mais evidente de desoxigenação.

Na condição de 350 °C a 7,5 %, observa-se equilíbrio entre classes, com ésteres (28,97 %), como trans,trans-9,12-octadecadienoico, propil éster (15,40 %), além de undecilênico (15,33 %) e cetonas como 2-octanona (8,98 %). A fração de insaturados atinge 19,17 %, indicando coexistência de múltiplas rotas reacionais.

Na condição de 350 °C a 10 %, foram analisadas três amostras independentes. Observa-se alta repetibilidade entre elas, com predominância consistente de ácidos carboxílicos (52,27 %; 61,20 %; 63,64 %) e cetonas próximas de 13,45 %; 11,11 %; 11,51 %, respectivamente. Compostos como ácido undecilênico (13 - 16 %), ácido heptanoico (~7 - 9 %), ácido octanoico (~5 - 8 %) e 2-octanona (~10 - 13 %) aparecem de forma recorrente nas três análises. O desvio entre as triplicatas é reduzido, com variação relativa inferior a 10% para as principais classes, indicando boa reprodutibilidade experimental. A fração de

hidrocarbonetos saturados permanece baixa (3 - 4 %), reforçando a estabilidade do perfil oxigenado nessa condição.

Em 350 °C a 15 %, observa-se redução relativa dos ácidos carboxílicos (37,84 %) e aumento da fração de compostos cíclicos (13,64 %) e insaturados (13,50 %). Ácidos como nonanoico (11,96 %), octanoico (9,23 %) e decanoico (7,56 %) continuam predominantes, indicando que o aumento da carga catalítica promove redistribuição das classes, mas não elimina a predominância de oxigenados.

A 400 °C a 5% apresenta novamente forte predominância de ácidos carboxílicos (58,13%), com destaque para ácido heptanoico (15,13%), ácido octanoico (12,84%) e ácido nonanoico (9,20%), além de cetonas como 2-octanona (8,40%). A fração de saturados aumenta para 13,43%, porém permanece inferior à fração oxigenada.

Por fim, em 400 °C a 15%, mantém-se elevada presença de ácidos carboxílicos (58,59 %), com compostos como ácido heptanoico (10,20 %), ácido octanoico (9,13 %) e ácido undecilênico (12,35% + 5,19%), além de cetonas representadas por 2-octanona (11,90%). A formação de hidrocarbonetos saturados (6,10 %) e insaturados (12,22%) continua secundária em relação às classes oxigenadas.

Esse comportamento demonstra que, nas condições avaliadas, a pirólise catalítica do óleo de mamona promove predominantemente fragmentação e conversão parcial dos triglicerídeos, resultando na formação de ácidos carboxílicos, ésteres, álcoois e cetonas, em vez da conversão direta para hidrocarbonetos saturados.

Dessa forma, os resultados evidenciam a necessidade de um *upgrading* pós-pirólise, a fim de promover etapas adicionais de hidrogenação e desoxigenação, convertendo os compostos oxigenados em hidrocarbonetos saturados mais adequados para aplicação como combustíveis do tipo *drop-in* (SOUSA, 2024).

5.6 Testes físico-químicos para os produtos da soja e da mamona

Além das análises supracitadas, foram feitos ensaios físico-químicos de densidade nas amostras, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Densidade das frações de hidrocarbonetos produzidos a partir do óleo de mamona a 30,5 °C, com incerteza de $\pm 1 \times 10^{-5}$ [g.cm⁻³](#)

Código da amostra	Densidade Corrigida*0,9430 ± 0,0062 g.cm ⁻³ ,(g.cm ⁻³)
M300-5	0,92794
M300-15	0,92431
M350-5	0,91967
M350-15	0,92124
M400-5	0,85852
M400-15	0,85050
M350-10	0,94681
M350-10 (2)	0,93587
M350-10 (3)	0,94633
M300-50	0,93844
Mamona	0,96423

Fonte: Próprio autor (2025).

O valor de densidade obtido para o óleo de mamona *in natura* foi de 0,96423 g.cm⁻³. Considerando a faixa reportada por Duarte *et al.* (2006) de 0,930 - 0,978 g.cm⁻³), foi calculada a média do intervalo (0,954 g.cm⁻³), a partir da qual se determinou um desvio relativo de aproximadamente 1,07 %. Esse baixo desvio, aliado ao fato de o valor experimental estar contido na faixa da literatura, indica boa concordância com dados reportados, evidenciando a confiabilidade dos resultados obtidos. O mesmo comportamento de queda da densidade foi observado para óleo de soja, como apresentados na Tabela 13.

A densidade para o diesel verde instituída pela ANP é de 0,761 a 0,806 g.cm⁻³ e para o SAF é de $\approx 0,80$ g.cm⁻³, portanto os produtos não atenderam as mesmas. Entretanto, o mesmo não foi destilado, o que acarreta a influência de outros compostos obtidos na pirólise na densidade.

Tabela 13 - Densidade das frações de hidrocarbonetos produzidos a partir do óleo de soja a 30,5 °C, com incerteza de $\pm 1 \times 10^{-5}$ g/cm³

Código da amostra	Densidade Corrigida*0,93892 ± 0,00001 g/cm³ (g/cm³)
S300-5	0,93892
S300-15	0,93852
S350-5	0,86443
S350-15	0,90546
S400-5	0,93241
S400-15	0,85503
S350-10	0,92698
Soja	0,99570

Fonte: Próprio autor (2025).

Ainda, com o objetivo de complementar a caracterização das amostras e avaliar o efeito do processo de pirólise catalítica sobre as propriedades de escoamento, foi determinada a viscosidade das matérias-primas e dos produtos obtidos nas condições de melhor resultado para os óleos de mamona e soja. Assim, a Tabela 14 apresenta os valores de viscosidade das amostras selecionadas, permitindo a comparação entre os bio-óleos obtidos e seus respectivos óleos *in natura*.

Tabela 14 - Viscosidade das amostras com o óleo de soja e mamona

Amostra	Viscosidade (mPa.s)	Densidade (ρ)[g/cm³]	Viscosidade cinemática ($\nu = \eta/\rho$) [mm²/s]
Óleo de mamona	702,25	0,96423	728,3013

Produto da mamona (350 °C e 10 %)	390,68	0,94681	412,6276
Produto da mamona (400 °C e 5 %)	37,62	0,85852	43,8195
Óleo de soja	53,87	0,99570	54,1026
Produto da soja (350 °C e 10 %)	199,29	0,92698	214,9884
Produto da soja (400 °C e 5 %)	58,19	0,93241	62,40816

Fonte: Próprio autor (2025).

Os resultados evidenciaram comportamento distinto entre as matérias-primas avaliadas. A viscosidade cinemática do óleo de mamona *in natura* obtida experimentalmente foi de 728,30 mm².s⁻¹ a 30,5 °C, valor superior ao estimado com base na literatura, 281,8 mm².s⁻¹ a 40 °C, o que está relacionado a temperatura, como também pode ter influência da composição do óleo (OBANLA *et al.*, 2021). Para o seu respectivo produto, observou-se redução expressiva da viscosidade, passando de 728,30 mm².s⁻¹ para 412,62 mm².s⁻¹ na amostra processada a 350 °C com 10% de catalisador, e chegando a 43,81 mm².s⁻¹ na amostra obtida a 400 °C com 5% de catalisador, indicando a formação de produtos com menor resistência ao escoamento.

Valores reportados na literatura para óleos de soja *in natura* situam-se na faixa de aproximadamente 43,5 a 48,9 mm².s⁻¹, indicando que o valor obtido se encontra superior, assim como o da densidade (LEITE, 2009). Comparando esses resultados com os padrões de viscosidade estipulados por agências regulamentadoras para combustíveis de baixa emissão, observa-se que ambos os valores estão significativamente acima dos limites recomendados: diesel verde (HVO) apresenta faixa típica de 2,0 - 4,5 mm².s⁻¹ e SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) de 1,6 - 8,0 mm².s⁻¹ a 40 °C (EPE, 2025). Dessa forma, apesar da redução da

viscosidade observada nas amostras de mamona e do comportamento relativamente estável nas amostras de soja, os produtos ainda se encontram com viscosidades muito superiores aos padrões estabelecidos, indicando a necessidade de maior grau de craqueamento e desoxigenação para obtenção de combustíveis comparáveis a diesel verde e SAF.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os resultados evidenciam que a natureza da matéria-prima, a temperatura e a carga catalítica influenciam diretamente a eficiência da desoxigenação e a distribuição dos produtos formados. Para os ensaios conduzidos a 350 °C, o aumento da carga catalítica de 5% para 15% promoveu comportamentos distintos entre as matérias-primas: o ácido oleico apresentou aumento na fração de hidrocarbonetos desoxigenados de 79,42% para 88,86 %, com predominância de hidrocarbonetos insaturados (63,22% e 71,58%) e redução significativa das classes oxigenadas, além de distribuição majoritária na faixa de diesel verde (84% e 88%), indicando baixo grau de craqueamento; para o óleo de soja, observou-se redução da fração de hidrocarbonetos desoxigenados de 86,15% para 73,25%, sendo que a condição com 5% apresentou 100% de hidrocarbonetos saturados, enquanto a de 15% resultou em distribuição entre saturados (48,57%) e insaturados (12,77%), com presença de ácidos carboxílicos (23,77%), além de mudança na faixa de carbono, com predominância de compostos leves (C4–C10) a 5% e contribuição adicional de 12% na faixa C11–C18 a 15%; já o óleo de mamona apresentou os menores níveis de desoxigenação, com aumento de 16,61% para 39,23%, mantendo elevada fração de compostos oxigenados, especialmente ácidos carboxílicos (52,87% e 37,84%), além de redução dos hidrocarbonetos saturados (24,22% para 4,23%) e aumento dos insaturados (1,33% para 13,5%), com predominância da faixa de diesel verde (68% e 58%), indicando menor tendência ao craqueamento. A análise das classes químicas confirma que o ácido oleico apresentou maior eficiência na formação de hidrocarbonetos desoxigenados, o óleo de soja apresentou elevada conversão em condições específicas, e o óleo de mamona manteve predominância de compostos oxigenados. Para o óleo de soja em diferentes temperaturas, verificou-se que a temperatura foi o parâmetro de maior influência, com baixos valores de hidrocarbonetos desoxigenados a 300 °C (17,29% e 13,54 %), aumento expressivo a 350 °C (86,15% e 73,25%) e comportamento dependente da carga catalítica a 400 °C (34,75% e 70,48%), além de elevada fração de compostos saturados em condições específicas, como 100% (S350-5), 92,84% (S350-10) e 92,41% (S400-15). Dessa forma, conclui-se que a eficiência do processo está diretamente relacionada à composição da matéria-prima e à combinação entre temperatura e

carga catalítica, sendo o ácido oleico a matéria-prima com maior eficiência global, o óleo de soja com desempenho elevado a 350 °C e 5% de catalisador, e o óleo de mamona com menor eficiência nas condições avaliadas, permitindo, contudo, direcionar a distribuição entre frações de SAF e diesel verde a partir do ajuste das variáveis operacionais.

7 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a ampliação dos estudos envolvendo diferentes formas estruturais de catalisadores à base de nióbio, como Nb_2O_5 com distintas fases cristalinas, suportes variados ou sistemas modificados com metais promotores, a fim de avaliar possíveis ganhos em atividade e seletividade para hidrocarbonetos saturados. A comparação entre diferentes propriedades ácido-base e áreas superficiais pode contribuir para compreender a influência dos sítios ativos na rota de desoxigenação.

Para o óleo de mamona, sugere-se a investigação de tratamentos prévios da matéria-prima, como desidratação parcial, esterificação prévia ou remoção seletiva de grupos hidroxila, com o objetivo de reduzir a formação de compostos oxigenados e favorecer a conversão direta para hidrocarbonetos. Estudos complementares envolvendo co-processamento com outras matérias-primas ou atmosfera reacional modificada também podem ser considerados.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de etapas de destilação fracionada dos produtos obtidos, a fim de separar as frações nas faixas de interesse (SAF e diesel verde) e avaliar suas propriedades físico-químicas, como densidade, viscosidade, ponto de fulgor e composição de hidrocarbonetos, permitindo verificar a adequação às especificações técnicas exigidas para combustíveis do tipo drop-in.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Análise de conjuntura: boletim trimestral do mercado de combustíveis**. Brasília, DF: ANP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/btpvc-1/2025/boletim-trimestral-4.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Nota técnica sobre diesel coprocessado e definição de biocombustível**. Brasília, DF: ANP, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/2022/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2022/cp-11-2022/sei_anp-1723072-nota-tecnica-1.pdf. Acesso em: 11 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Resolução ANP nº 842, de 14 de maio de 2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializam em território nacional. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 maio 2021.*

AGROADVANCE. **Biocombustíveis: conheça as 4 gerações que vão do etanol a biocombustíveis sintéticos**. São Paulo, 18 jan. 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-biocombustiveis-conheca-as-4-geracoes/>. Acesso em: 11 jan. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7566: standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons**. West Conshohocken, 2022. Disponível em: <https://regional.astm.org/pt/standards>. Acesso em: 13 jan. 2026.

BELTRÃO, N. E. de M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Efeitos do Clima no Metabolismo Vegetal: Mamona**. Embrapa Algodão, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/278101/1/DOC210>. Acesso em: 22 jan. 2026.

BEZERGIANNI, S.; DIMITRIADIS, A. **Comparison between different types of renewable diesel**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 21, p. 110–116, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.042.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. **Institui a Lei do Combustível do Futuro, cria programas para a promoção de biocombustíveis e combustíveis**

de baixo carbono no país e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 8 out. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro>. Acesso em: 13 jan. 2026.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel** (PNPB). Brasília, 2005.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. **Adsorption of gases in multimolecular layers.** Journal of the American Chemical Society, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>. Acesso em: 11 jan. 2026.

CAMPOS, T. S. **Pirólise catalítica do óleo de crambe para produção de biocombustíveis drop-in.** Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CHEN, X.; LI, S.; ZHOU, S.; ZHANG, H.; WANG, Y.; XU, Y. **Cycloalkane-rich sustainable aviation fuel production via hydrotreating lignocellulosic biomass-derived catalytic fast pyrolysis oils.** Sustainable Energy & Fuels, v. 8, n. 5, p. 1335–1345, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4SE01151A>. Acesso em: 11 jan. 2026.

CHEN, Q.; XU, H.; LI, H. **An interesting carrier: the excellent performance of Nb₂O₅ in biomass hydrogenation deoxygenation.** Sustainable Energy & Fuels, v. 9, p. 4526–4553, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D5SE00544B>. Acesso: 19 jan. 2026.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **O papel do Brasil na produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).** Brasília: CNT, 2025. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/o-papel-do-brasil-na-producao-de-combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-saf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

COLELLI, L.; AVERSANO, S. D.; BASSANO, C.; VANGA, G.; GALLUCCI, K.; VILARDI, G. **Liquid e-fuels for a sustainable future: A comprehensive review of production, regulation, and technological innovation.** Energy Conversion and management, v. 347, 120529, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120529>. Acesso em: 29 jan. 2026.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA (CNPE). **Relatório do Grupo de Trabalho de Inserção de Biocombustíveis no Ciclo Diesel**. Brasília, 2021. Resolução CNPE nº 13/2020.

DETSIOS, N.; THEODORAKI, S.; MARAGOUDAKI, L.; ATSONIOS, K.; GRAMMELIS, P.; ORFANOUDAKIS, N. G. **Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: a critical review**. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 1904, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16041904>. Acesso em: 18 jan 2026.

DUARTE, M. E. M; COSTA, *et al.* **Densidade do óleo de duas cultivares de mamona em ampla faixa de temperatura**. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. 35., 2006, João Pessoa - PB. Anais [...]. João Pessoa - PB: Universidade Federal da Paraíba, 2006. Simpósio Temático: Ciência e Tecnologia Pós-Colheita (Colheita, Pós-Colheita e Comercialização). Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/40820>. Acesso em: 18 jan. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Características da mamoneira (*Ricinus communis* L.)**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 23 fev. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/pre-pr-oducacao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-planta>. Acesso em: 2 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Rio de Janeiro, 23 fev. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 10 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Combustíveis sustentáveis de aviação no Brasil: rotas tecnológicas, potencial de produção e desafios**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_Combust%C3%ADveis_Sustent%C3%A1veis_Avia%C3%A7%C3%A3o_Brasil.pdf. Acesso em: 22 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE).. **Caderno de SAF e diesel verde: características físico-químicas e parâmetros de qualidade**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes>

[Arquivos/publicacao-924/CA-EPE-DPG-SDB-2025-17_Caderno%20de%20SAF%20e%20diesel%20verde_2025.pdf](#). Acesso em: 23 mar. 2026.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **U.S. renewable diesel fuel and other biofuels plant production capacity as of January 1, 2025**. Washington, D.C.: EIA, 26 set. 2025. Disponível em: <https://www.eia.gov/biofuels/renewable/capacity/>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ENGLER, L. G.; SCHMIDT, F.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, M. R.; COSTA, J. F. **Obtenção de micro/nanofibras de poli(álcool vinílico) por FSS: efeito da adição de ácidos graxos**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 15., 2019, Bento Gonçalves. Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Polímeros, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/237254>. Acesso em: 18 maio 2026.

FRAGA, M. M. C.; CAMPOS, B. L. O.; HENDRAWIDJAJA, H.; SCHMITT, C. C.; RAFFELT, K.; DAHMEN, N. **Fast pyrolysis oil upgrading via HDO with Fe-promoted Nb₂O₅-supported Pd-based catalysts**. *Energies*, v. 15, n. 13, p. 4762, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4762>. Acesso em: 18 maio 2026.

FREITAS, Y. M. **Produção de combustível sustentável de aviação: uma revisão crítica**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

GANESAN, R.; SUBRAMANIAM, S.; PARAMASIVAM, R.; SABIR, J. S. M.; JOSEPHIN, J. S. F.; BRINDHADEVI, K.; PULGAZHENDHI, A. **A study on biofuel produced by catalytic cracking of mustard and castor oil using porous H β and AIMCM-41 catalysts**. *Science of the Total Environment*, v. 757, p. 143781, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143781>. Acesso em: 18 jan. 2026.

GRIFFIN, M. B.; LISA, K.; DUTTA, A.; CHEN, X.; Wrasman, C. J.; MUKARAKATE, C.; YUNG, M. M.; Nimlos, M. R.; TUXWORTH, L.; BAUCHEREL, X.; ROWLAND, S. M.; HABAS, S. E. **Opening pathways for the conversion of woody biomass into sustainable aviation fuel via catalytic fast pyrolysis and hydrotreating**. *Green Chemistry*, v. 26, n. 18, p. 9768–9781, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4GC03333G>. Acesso em: 10 jan. 2026.

GUEDES, J. M.; GARCIA, K. G. V.; ARAÚJO, A. M. de M.; GONDIM, A. A. D.; FERNANDES, F. R. D.; SANTOS, A. P. B. dos; CALDEIRA, V. P. da S.; SANTOS, H. S. dos; SANTOS, A. G. D. **Renewable hydrocarbons obtained by catalytic**

pyrolysis of *Jatropha curcas* L. oil. Química Nova, v. 48, n. 4, p. 1–7, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250111>. Acesso em 18 jan. 2026.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. **Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 712–725, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>. Acesso em: 18 jan. 2026.

HONGGLOI, N.; PRAPAINAINAR, P.; PRAPAINAINAR, C. **Review of green diesel production from fatty acid deoxygenation over Ni-based catalysts.** Molecular Catalysis, v. 523, p. 111696, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111696>. Acesso em: 18 jan. 2026

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **IATA study confirms that SAF technology rollout is main bottleneck to net zero, not feedstock availability.** Genebra: IATA, 23 set. 2025. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/29ce6b3ca81a469dac900c5fffe43d4/2025-09-23-01-pt.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Biofuels for aviation: technology brief.** Paris: IRENA, 2017. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf. Acesso em: 18 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector.** Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em 18 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019.** Paris: OECD/IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Acesso em: 18 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2022.** Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 15 nov. 2024.

JAIRO, M. J.; FORTES, I. C. P. **Bio-oil production by pyrolysis of metal soaps derived from macauba pulp oil.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 135, p. 196–204, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.09.013>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KAPLAN, D.; DHEILLY, H.; DONATTI, M. **Underutilized feedstocks are key to renewable fuels growth.** [S.l.]: Oliver Wyman, 2024. Disponível em:

<https://www.oliverwyman.com/our-expertise/journals/energy-and-natural-resources-journal/2024/underutilized-feedstocks-are-key-to-renewable-fuels-growth.html>. Acesso em: 23 mar. 2026.

KEMP, A.; RAHMAN, T.; JAHROMI, H.; ADHIKARI, S. **Production of aviation fuel-range hydrocarbons through catalytic co-pyrolysis of polystyrene and southern pine**. *Catalysts*, v. 14, n. 11, p. 806, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal14110806>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; REZENDE, M. C. A. F. **Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries**. *Applied Energy*, v. 209, p. 290–305, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>. Acesso em: 19 jan. 2026.

KNOTHE, G. **Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels**. *Inform*, v. 12, p. 1103–1107, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191731499X?via%3Dihub>. Acesso em: 19 jan. 2026.

KOLÁR, M.; MACHOTOVÁ, J.; HÁJEK, M.; HONZIČEK, J.; HÁJEK, T.; PODZIMEK, Š. **Application of vegetable oil-based monomers in the synthesis of acrylic latexes via emulsion polymerization**. *Coatings*, v. 13, n. 2, p. 262, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings13020262>. Acesso em: 19 jan. 2026.

KUMARI, N.; GAURAV, K.; SAMDARSHI, S. K.; BATTACHARYYA, A. S.; PAUL, S.; RAJBONGSHI, B.; MAHANT, K. **Dependence of photoactivity of niobium pentoxide (Nb₂O₅) on crystalline phase and electrokinetic potential of the hydrocolloid**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 208, 2020, 110408. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110408>. Acesso em: 18 jan. 2026.

KUMARI, A.; PRASAD, E. **Green diesel market 2022–2032**. Portland: Allied Market Research, jan. 2024. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/green-diesel-market-A09599>. Acesso em: 11 jan. 2026.

LEITE, K. P. S.; CARVALHO, M. W. N. C. **Caracterização de óleos vegetais para transformadores elétricos**. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFCG (CIC-UFCG). Campina Grande: UFCG, 2009. Disponível em: [https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/31193/1/CARACTERIZAÇÃO%20DE%](https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/31193/1/CARACTERIZAÇÃO%20DE%20ÓLEOS%20VEGETAIS%20PARA%20TRANSFORMADORES%20ELÉTRICOS.pdf)

[20ÓLEOS%20VEGETAIS%20PARA%20TRANSFORMADORES%20ELÉTRICOS%20-%20ANAIS%20CIC-UFCGF%202009..pdf](#). Acesso em: 04 mar. 2026.

LOWER, L. ROWLAND, S. M.; REGULA, M.; LISA, K.; COMBS, Z. A.; PARK, S.; VRIES, T.; NIMLOS, M. R.; SANGUES, W. J. **Sustainable graphite and jet fuel from biorefinery residue**. ChemSusChem, v. 18, n. 10, p. e202402509, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cssc.202402509>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LUCANTONIO, S.; GIULIANO A.; ROSSI, L.; GALLUCCI, K. **Green diesel production via deoxygenation process: a review**. Energies, v. 16, n. 2, p. 844, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/844>. Acesso em: 9 jan. 2026.

LUO, Z.; ZHU, W.; MIAO, F.; ZHOU, J. **Catalytic hydrodeoxygenation of pyrolysis bio-oil to jet fuel: a review**. Frontiers in Energy, v. 18, n. 5, p. 550–582, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11708-024-0943-7>. Acesso: 28 jan. 2026.

MARTÍNEZ, M.; RAMOS, M. A.; VILLAGÓMEZ, A. L.; RODRÍGUEZ, J. A.; CAMPOS, J.; MARISCAL, K. E.; AMARO, A.; VALENCIA, J. A.; SAENZ, D.; ZAVALA, C. E. **Ricinus communis as a sustainable alternative for biodiesel production: a review**. Climate, v. 6, n. 4, p. 90, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-3994/6/4/90>. Acesso em: 15 jan. 2026.

MELO, E. F.; MELO, D. M. A.; OLIVEIRA, K. F. S.; DEUS JÚNIOR, J. O.; ALVES, J. L. F.; BRAGA, R. M. **Pachira aquatica oil for drop-in biofuel production through catalytic pyrolysis: Evaluating reaction parameters using response surface analysis and principal component analysis**. Biomass and Bioenergy, Article 108046. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108046>. Acesso em 20 jan. 2026.

MELO, Y. A. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via desoxigenação de óleos de soja e macaúba utilizando catalisador de nióbio sob pressão atmosférica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/36469>. Acesso em: 19 jan. 2026.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). **Projeções do agronegócio: Brasil 2023/24 a 2033/34 – projeções de longo prazo**. Brasília: Secretaria de Política Agrícola, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-p>

olitica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf. Acesso em: 11 jan. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Biometano emite até 2,5 vezes menos CO₂ do que eletricidade para veículos, aponta relatório**. Brasília, 2 jul. 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biometano-emite-ate-2-5-vezes-menos-co2-do-que-eletricidade-para-veiculos-aponta-relatorio>. Acesso em: 10 jan. 2026.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Selo Biocombustível Social: mais apoio à agricultura familiar**. Brasília, 12 nov. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/brasil-lider-mundial-na-transicao-energetica/inclusao-social/selo-biocombustivel-social-mais-apoio-a-agricultura-familiar>. Acesso em: 10 dez. 2025.

MONCADA, J. J. M. **Pirólise dos sabões derivados dos óleos da polpa da macaúba e de crambe para a obtenção de bio-óleo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/SFSA-A7EF8T>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MUHAMMAD, F.; DAJI, L.; AWAN, M. I.; MAHMOOD, A.; SADAF, S.; MUKHTAR, A.; KHAN, M. D.; AAMER, M.; HASSAN, M. U.; SELEIMAN, M. F.; ALOTAIBI, M.; IQBAL, M. M. **Combined application of nitrogen and sulfur improves growth, oil, and biodiesel production from soybean**. Polish Journal of Environmental Studies, v. 34, 2025. Disponível em: <https://www.pjoes.com/Combined-Application-of-Nitrogen-and-Sulfur-Improves-Growth-Oil-and-Bio-Diesel%2C192566%2C0%2C2.html>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MUNIYAPPAN, D.; AMARO, P. J.; ANGKAYARKAN V. M.; RAMANATHAN, A. **Synergistic recovery of renewable hydrocarbon resources via microwave co-pyrolysis of biomass residue and plastic waste over spent toner catalyst**. Energy, v. 278, p. 127652, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127652>. Acesso em: 20 jan. 2026.

NESTE. **Neste's renewable diesel journey: from visionary beginnings towards a more sustainable future**. Helsinki: Neste, 25 ago. 2025. Disponível em: <https://www.neste.com/news-and-insights/renewable-solutions/Nestes-HVO100-journey>. Acesso em: 11 jan. 2026.

NESTE CORPORATION. **Neste started producing sustainable aviation fuel (SAF) at its renewables refinery in Rotterdam, the Netherlands.** Espoo, 2025.

Disponível

em:

<https://www.neste.com/news/neste-started-producing-sustainable-aviation-fuel-saf-at-its-renewables-refinery-in-rotterdam-the-netherlands>. Acesso em: 11 jan. 2026.

NEVES, T. J.; HARDER, M. N. C. **Diesel verde: a nova era dos biocombustíveis em uma revisão.** Bioenergia em Revista: Diálogos, ano 11, n. 2, p. 91–112, jul./dez.

2021.

Disponível

em:

<http://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/443>.

Acesso em: 12 jan. 2026.

NOLFI, G. D. V., GALLUCCI, k.; ROSSI, L. **Green diesel production by catalytic hydrodeoxygenation of vegetable oils: a review.** International Journal of

Environmental Research and Public Health, v. 18, n. 24, p. 13041, 2021. Disponível

em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8700882/>. Acesso em: 12 jan.

2026.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. **Biocombustíveis podem reduzir consumo de 30 bilhões de litros de diesel até 2030.** 2023. Disponível em:

<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/sucroenergetico/359621-biocombustiveis-podem-reduzir-consumo-de-30-bilhoes-de-litros-de-diesel-ate-2030.html>. Acesso

em: 10 jan. 2026.

OBANLA, O. R.; MOHAMMED, F. U.; ALEBIOSU, O. S.; OJEWUMI, M. E.; OLADIMEJI, T. E.; BABATUNDE, D. E. **Study on the lubricating properties of castor (*Ricinus communis*) and hydroxylated rubber (*Hevea brasiliensis*) seed oil.** ACS Omega, v. 6, n. 43, p. 28471–28476, 2021. Disponível em:

10.1021/acsomega.0c05810. Acesso em: 19 jan. 2026.

OROZCO, L. M.; ECHEVERRI, D. A.; SÁNCHEZ, L.; RIOS, L. A.

Second-generation green diesel from castor oil: development of a new and efficient continuous-production process. Chemical Engineering Journal, v. 322,

p. 149–156, 2017. Disponível em: 10.1016/j.cej.2017.04.027. Acesso em: 16 jan.

2026.

PATTANAİK, B. P.; MISRA, R. D. **Effect of reaction pathway and operating parameters on the deoxygenation of vegetable oils to produce diesel range hydrocarbon fuels: a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 73,

p. 545–557, 2017. Disponível em: 10.1016/j.rser.2017.01.018. Acesso em: 17 jan. 2026.

PETROBRAS. **Biocombustíveis**. Revista Bolsista de Valor, v. 2, n. 1, p. 77–87, 2012. Disponível em:

<https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/6734/4436>.

Acesso em: 11 jan. 2026.

PINHO, D. M. M.; SUAREZ, P. A. Z. **Do óleo de amendoim ao biodiesel: histórico e política brasileira para o uso energético de óleos e gorduras**. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 1, p. 39–51, 2017. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/SuarezNoPrelo.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal expansão de energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 15 nov. 2024.

RAMDHANI, E. P.; SANTOSO, E.; HOLILAH, H.; NUGRAHA, R. E.; BAHRUJI, H.; SUPRAPTO, S.; ABDUL JALIL, A.; ASIKIN-MIJAN, N.; AKHLUS, S.; PRASSETYOKO, D. **Direct synthesis of Fe-aluminosilicates from red mud for catalytic deoxygenation of waste cooking oil**. RSC Advances, v. 13, n. 45, p. 31989–31999, 2023. Disponível em: 10.1039/D3RA05910C. Acesso em 20 jan. 2026.

REZAEI, H.; YAZDANPANA, F.; LIM, J. C.; LAU, A. **Woody feedstock pretreatments to enhance pyrolysis bio-oil quality and produce transportation fuel**. In: **BIOMASS FOR BIOENERGY: recent trends and future challenges**. London: IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.81818. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330939668_Woody_Feedstock_Pretreatments_to_Enhance_Pyrolysis_Bio-oil_Quality_and_Produce_Transportation_Fuel. Acesso em: 12 jan. 2026.

ROGERS, K. A.; ZHENG, Y. **Selective deoxygenation of biomass-derived bio-oils within hydrogen-modest environments: a review and new insights**. ChemSusChem, v. 9, n. 14, p. 1750–1772, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cssc.201600144>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ROHMAN, A.; CHE MAN, Y. B. **Application of FTIR Spectroscopy for Monitoring the Stabilities of Selected Vegetable Oils During Thermal Oxidation**.

International journal of food properties, V. 16, p. 7. 20, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.603874>. Acesso em: 13 jan. 2026.

RONY, M. M. A.; RANGON, M. T.; UDDIN, M. N. **A review on the production of sustainable aviation fuels from biomass and wastes using pyrolysis technologies: Part I: processes and products**. Johnson Matthey Technology Review, v. 69, n. 4, p. 536–545, 2025. DOI: 10.1595/205651325X17411019785188. Disponível em: <https://technology.matthey.com/content/journals/10.1595/205651325X17411019785188>. Acesso em: 19 jan. 2026.

SALVADOR, G. V.; SALIM, V.; TONIOLO, F. S. **Hidrotratamento de óleos vegetais: a influência das rotas catalíticas na economicidade de uma biorrefinaria em pequena escala**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATÁLISE, 21., 2021. Anais [...]. 2021. Disponível em: <https://proceedings.science/cbcat-2021/trabalhos/hidrotratamento-de-oleos-vegetais-a-influencia-das-rotas-cataliticas-na-economic?lang=pt-br>. Acesso em: 12 jan. 2026.

SANTOS, L. S.; GASPARETTO, H.; SALAU, N. P. G. **Technological maturity and future perspectives for green diesel production in Brazil**. Cleaner Chemical Engineering, v. 10, p. 100127, 2024. Disponível em: 10.1016/j.clce.2024.100127. Acesso em: 23 jan. 2026.

SCALDAFERRO, C. A.; PASA, V. M. D. **Hydrogen-free process to convert lipids into bio-jet fuel and green diesel over niobium phosphate catalyst in one-step**. Chemical Engineering Journal, v. 370, p. 98–109, 2019. Disponível em: 10.1016/j.cej.2019.03.063. Acesso em: 20 jan. 2026.

SKRODCZKY, Konstantin; ANKE, S.; HEYDE, M. **Niobium pentoxide nanomaterials with distorted structures as efficient acid catalysts**. Nature Communications, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s42004-019-0231-3>. Acesso em: 25 jan. 2026.

SILVA, H. F.; FEITOSA, A. K. S.; PEREIRA, H. L.; GUEDES, D. G.; COSTA, A. C. F. M.; SILVA, A. L. **Catalisadores de óxido de nióbio (Nb₂O₅): uma revisão**. Revista GESEC, 2025. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4614>. Acesso em: 13 jan. 2026.

SILVA, R. K. C. **Estudo tecnológico da síntese de Fischer-Tropsch**. 2023. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de

Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/25577/1/RKCSilva.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J.; BRYCE, D. L. **Spectrometric identification of organic compounds**. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

SOARES, V. V. **Pirólise catalítica do óleo de mamona para obtenção de biocombustível marítimo (bunker renovável)**. 2022. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química do Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

SOUSA, F. P. **Produção de biodiesel, diesel verde e bioquerosene de aviação via catálise heterogênea**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências – Química) – Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SOUSA, F. P.; REIS, G. P.; PASA, V. M. D. **Catalytic pyrolysis of vegetable oils over NbO_xP₄ for SAF and green diesel production**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 188, p. 105589, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106314>. Acesso em: 19 jan. 2026.

SOUSA, J. N. B. de; SOUZA, M. V. F. de; BRITO, L. G. C.; ARAÚJO, A. M. de M.; GONDIM, A. D. **BIOQAV método álcool to jet para produção de biocombustível de aviação**. *Editora Científica Digital*, 2024. cap. 40, p. 135-137. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/231014589>. Acesso em: 20 jan. 2026

SUN, W.; YAN, Y.; WEI, Y.; MA, J.; NIU, Z.; HU, G. **Catalytic pyrolysis of biomass: a review of zeolite, carbonaceous, and metal oxide catalysts**. *Nanomaterials*, v. 15, n. 7, art. 493, 2025. DOI: 10.3390/nano15070493. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/15/7/493>. Acesso em: 1 nov. 2025.

TAN, K. T.; LEE, K. T.; MOHAMED, A. R. **Role of energy policy in renewable energy accomplishment: the case of second-generation biofuels**. *Energy Policy*, v. 134, p. 110918, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519305930>. Acesso em: 13 jan. 2026.

TELIS, N.; FRAGA, M. C.; ZEVACO, T.; RAFFELT, K.; SOARES, R. **NiFe catalysts supported on Nb₂O₅ for enhanced hydrodeoxygenation: a study on performance and selectivity**. *Topics in Catalysis*, 2025. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11244-025-02177-x>. Acesso em: 13 jan. 2026.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIER, J. P.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. **Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution**. Pure and Applied Chemistry, v. 87, n. 9–10, p. 1051–1069, 2015. Disponível em:

<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/pac-2014-1117/html?srsId=AffmBOooKSS4CRjzti4Qrr-nPMdRF2Ix440oUyg0rE6p15o-tgJJWFg2>. Acesso em: 16 jan. 2026.

TIDJANI, A. A. A.; RABELO NETO, R. C.; HENRIQUES, C. A.; NORONHA, F. B. **Estudo do desempenho de catalisadores Ni/Nb₂O₅/CeO₂ contendo diferentes teores de nióbio na reação de hidrodessoxigenação de fenol**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATÁLISE, 22., 2023. Anais [...]. 2023. Disponível em: <https://submissao.22cbcat.sbcacat.org/index.php/2023-cbcat/article/view/237>. Acesso em: 13 jan. 2026.

VOGT, E. T. C.; WECKHUYSEN, B. M. **The refinery of the future**. Nature, v. 629, p. 295–306, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07322-2>. Acesso em: 18 jan. 2026.

WEN, H., Wang, Y., Zhu, H., Jin, L., & Zhang, F. (2022). **A Fluorescent Tracer Based on Castor Oil for Monitoring the Mass Transfer of Fatliquoring Agent in Leather**. Materials, 15(3), 1167. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15031167>. Acesso em: 15 jan. 2026.

ZHANG, Q.; HAN, Q.; BAI, H.; LI, Y.; ZHU, C.; XIE, W. **Monolithic HZSM-5/SS-fiber catalysts with high coke-resistance and selectivity for catalytic cracking of castor oil to produce biofuel**. Renewable Energy, v. 229, p. 120755, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120755>. Acesso em: 25 jan. 2026.

ZHANG, W.; SHEN, P.; QIAN, L.; MAO, P.; AHMAD, M.; CHU, H.; ZHENG, R.; WANG, Z.; BAI, L.; SUN, H.; YU, Y.; LIU, Y. **Tuning the phase composition in polymorphic Nb₂O₅ nanoplates for rapid and stable lithium ion storage**. Electrochimica Acta, v. 399, art. 139368, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468621016583>. Acesso em: 19 jan. 2026

ZHAO, B.; DU, B.; HU, J.; HUANG, Z.; XU, S.; CHEN, Z.; CHENG, D.; XU, C. (C.). **Recent advances in novel catalytic hydrodeoxygenation strategies for biomass valorization without exogenous hydrogen donors**. Catalysts, v. 14, n. 10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal14100673>. Acesso em: 19 jan. 2026.

APÊNDICE A – TABELAS DE COMPOSTOS, ÁREA E TEMPO DE RETENÇÃO

Tabela 15 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 300° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	1-Heptanol	0.62	2.853
#2	2-Heptanone	0.72	3.096
#3	Undecylenic acid	6.76	16.722
#4	Hexyl 10-undecenoate	5.84	37.578
#5	13-Hexyloxacyclotr idec-10-en-2-one	1.83	40.387
#6	Hexadecanoic acid, heptyl ester	1.53	49.176
#7	trans,trans-9,12-O ctadecadienoic acid, propyl ester	3.5	51.944
#8	trans,trans-9,12-O ctadecadienoic acid, propyl ester	12.03	52.044
#9	1- Dodecene	1.41	52.117
#10	9-Octadecyne	1.23	52.166
#11	Octadecanoic acid, heptyl ester	1.45	52.373

#12	E,Z-1,3,12-Nonadecatriene	3.81	52.577
#13	trans,trans-9,12-Octadecadienoic acid, propyl ester	8.77	52.641
#14	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	4.8	52.706
#15	1,3,12-Nonadecatriene	1.5	52.786
#16	1,3,12-Nonadecatriene	2.79	53.106
#17	1,3,12-Nonadecatriene	9.66	53.342
#18	Ricinoleic acid	6.6	54.848
#19	9-Eicosene, (E)	0.87	54.925
#20	Oxalic acid, hexadecyl isohexyl ester	0.44	55.092
#21	Undec-10-ynoic acid, undecyl ester	0.97	55.760
#22	Glycidyl palmitoleate	1.55	56.145
#23	Glycidyl (Z)-9-Heptadecenoate	3.45	56.415
#24	Stigmasta-5,22-diene	0.67	57.554

	n-3-ol, acetate		
	Cholest-5-en-3-ol (3.beta.)-, carbonochloridate	2.32	58.312
#25			
	9,12-Octadecadien oic acid (Z,Z)-, 2-hydroxy-1-(hydro xymethyl)ethyl ester	7.00	66.734
#26			
	9,12-Octadecadien oic acid (Z,Z)-, 2,3-dihydroxyprop yl ester	1.99	67.626
#27			
	E,Z-1,3,12-Nonad ecatriene	3.15	67.848
#28			
	1,3,12-Nonadecatr iene	1.61	68.785
#29			
	Vinyl 10-undecenoate	2.16	70.351
#30			

Tabela 16 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 300° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	1-Heptanol	1.9	2.857
#2	2-Octanone	5.22	3.100
#3	Butanoic acid	0.62	4.052

#4	Undecylenic acid	8.96	16.619
#5	4,5,9-Trihydroxy-dodeca-1,11-diene	2.64	21.172
#6	1-Decene, 8-methyl	1.21	37.574
#7	n-Propyl heptyl ether	0.63	49.176
#8	1-Pentadecyne	1.79	51.941
#9	14-Methyl-8-hexadecyn-1-ol	8.27	52.044
#10	Hydroxycitronellal, trimethylsilyl ether	4.59	52.109
#11	Nonanal	4.12	52.366
#12	Dodecahydro-as-indacene	4.56	52.575
#13	7,10-Octadecadienoic acid, methyl ester	7.65	52.640
#14	13-Heptadecyn-1-ol	5.81	52.705
#15	Cyclobuta[1,2:3,4]dicyclooctene, hexadecahydro	2.74	52.783
#16	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)	1.96	52.867
#17	Glutaranilic acid	1.75	52.958

#18	4-tert-Butylcyclohexyl acetate	1.23	53.017
#19	3-Tetradecyne	2.39	53.106
#20	Linoleyl acetate	11.63	53.350
#21	Pearlate	1.36	53.630
#22	1-Cyclohexylnone	1.75	56.144
#23	2-Heptene, 5-ethyl-2,4-dimethyl	0.62	56.250
#24	Vinyl 10-undecenoate	3.98	56.419
#25	Pinanone, cis	0.72	56.517
#26	Geranyl linalool,Z,Z	0.74	58.313
#27	Cyclohexane	0.55	64.775
#28	14-Methyl-8-hexadecyn-1-ol	8.13	66.721
#29	Propane, 1,3-dicyclohexyl	1.74	68.774
#30	Propane, 1,3-dicyclohexyl	0.76	69.356

Tabela 17 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Propane	0.52	2.533
#2	Cyclohexane, (2-methylpropyl)	1.65	2.627
#3	Hexanoic acid	9.97	2.795
#4	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	1.29	2.891
#5	2-Octanone	7.67	3.089
#6	Undecane	7.20	3.170
#7	1-Heptene, 3-methyl	1.33	3.237
#8	Cyclohexane, (1-methylethyl)-	1.29	3.705
#9	Heptanoic acid	13.70	4.065
#10	Pentanal, 2,4-dimethyl	1.74	4.550
#11	Undecane	4.58	4.669
#12	Dodecanoic acid, 2-iodo	0.62	5.942
#13	Octanoic acid	11.97	6.148
#14	2-Octanon	0.98	6.863
#15	Tridecane	2.83	7.025
#16	Toluene	0.54	8.976
#17	Nonanoic acid	8.26	9.104

#18	Oxalic acid, butyl propyl ester	0.75	9.877
#19	Tridecane	2.74	10.238
#20	n-Decanoic acid	3.69	12.726
#21	Dodecane, 1-iodo	1.62	14.084
#22	Undecanoic acid	4.66	16.822
#23	Nonane, 3,7-dimethy	2.58	18.266
#24	Decane, 6-ethyl-2-methyl-	01.05	22.536
#25	Nonane, 3,7-dimethyl	2.72	26.764
#26	Cyclohexane, decyl	0.90	29.128
#27	Di-tert-butyl peroxide	0.68	65.759
#28	Oxalic acid, diallyl ester	0.92	69.142
#29	Cyclohexane, 1,5-diethyl-2,3-dimethyl	0.87	69.329
#30	Oxalic acid, diallyl ester	0.70	71.845

Tabela 18 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 10% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Hexanoic acid	4.13	2.793
#2	1-Heptanol	2.23	2.849
#3	2-Octanon	13.45	3.091
#4	Undecane	1.93	3.171
#5	1-Heptene, 6-methyl	1.12	3.237
#6	1,3-Nonadien-6-ol, 8-methyl	0.43	3.945
#7	Heptanoic acid	9.61	4.068
#8	1-Octene, 3,7-dimethyl- 2,6-Dimethyl-7-oct ene	01.06	4.538
#9	Undecane	1.13	4.670
#10	Cyclohexanepropa nol	0.61	5.954
#11	Octanoic acid	8.48	6.149
#12	cis-3-Hexenylpyru vate	0.44	6.241
#13	Nonanoic acid	06.09	9.108
#14	Cyclopentane	1.16	9.745

#15	7-Tetradecene, (E)	5.60	9.854
#16	Decane, 6-ethyl-2-methyl-	1.00	10.240
#17	n-Decanoic acid	2.00	12.723
#18	1-Hexene, 3-methyl-	0.49	13.583
#19	Undecylenic acid	4.50	16.598
#20	Cyclopentane, (2-methylpropyl)	1.40	16.683
#21	n-Decanoic acid	2.47	16.865
#22	Undecylenic acid	13.57	17.137
#23	Undecylenic acid	5.92	17.569
#24	Phenol, 4-dodecyl-	1.81	42.387
#25	Tridecanoic acid, heptyl ester	1.44	49.161
#26	(1,2-Dimethylpropyl)-1-methyl-2-nonyl cyclopro	0.96	51.978
#27	2-Tridecenal, (E)	4.33	52.069
#28	2-Undecene, 2,5-dimethyl	1.13	52.354
#29	alpha.-Campholen al	0.77	57.510
#30	Cyclohexane	0.76	64.752

Tabela 19 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 350° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Acetaldehyde	2.87	2.533
#2	Pentanoic acid	2.47	2.802
#3	Propane, 2-nitro-	0.73	3.092
#4	Butanoic acid	6.62	4.050
#5	Octanoic acid	9.23	6.125
#6	Nonanoic acid	11.96	9.087
#7	Decanoic acid	7.56	12.733
#8	1-Pentene, 2,3,3-trimethyl	1.31	16.526
#9	2,5-Dimethyl-3,4-hexanediol	6.58	16.820
#10	4-Nonene, 3-methyl	4.23	17.021
#11	2-Propenoic acid, ethenyl ester	01.08	17.462
#12	Butane, 2,2-dimethyl	4.23	18.283
#13	Oxalic acid, allyl pentyl ester	1.42	25.809
#14	1-Decene,	7.21	26.072

	8-methyl		
#15	Decane, 1-iodo	7.86	26.784
#16	Oxalic acid, allyl pentyl ester	2.26	45.904
#17	Cyclopentene, 3-propyl-	1.91	48.217
#18	1-Hexene, 4,4-diethyl	0.75	51.128
#19	Methacrylic anhydride	0.37	51.908
#20	1,4-Phenylene bis(2-furoate)	1.14	51.967
#21	2-Cyclopenten-1-o ne	1.18	52.042
#22	Cyclohexane, pentacosyl	3.91	52.083
#23	2-Propenoic acid, 2-methyl-, octyl ester	0.41	52.641
#24	Octanal, 7-methoxy-3,7-dim ethyl-	0.93	52.858
#25	1,3-Dioxolane, 2-heptyl	1.96	53.015
#26	3-Furaldehyd	1.36	56.415
#27	5-Methyl-4-hexene	0.66	56.475

	-1-yl acetate		
	Cis-3-ethyl-endo-tricyclo[5.2.1.0(2.6)]		
#28	decane	2.28	57.521
#29	Cyclopentene, 3-ethyl	2.46	59.733
#30	Cyclohexane	3.08	64.772

Tabela 20 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 400° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	3-Hexene, 2,4-dimethyl	0.95	2.632
#2	Hexanoic acid	8.81	2.800
#3	1-Heptanol	1.33	2.850
#4	2-Octanone	8.40	3.094
#5	Undecane	6.34	3.175
#6	1-Heptene, 6-methyl	1.33	3.242
#7	Cyclohexane, 2-propenyl-	0.92	3.707
#8	1-n-Hexadecylinda n \$\$	0.55	3.842

	3-dihydroindene)		
#9	Heptanoic acid	15.13	4.074
#10	Pentanal, 2-methyl	0.95	4.550
#11	Undecane	3.31	4.675
#12	Octanoic acid	12.84	6.157
#13	Ethene, methoxy	0.61	6.873
#14	Tridecane	1.90	7.034
#15	Nonanoic acid	9.20	9.115
#16	Dodecane, 1-iodo	1.80	10.248
#17	n-Decanoic acid	3.93	12.738
#18	Butane, 2,2-dimethyl	01.02	14.096
#19	Undecanoic acid	8.22	16.861
#20	1-Penten-3-one, 4-methyl	0.72	17.021
#21	Dodecane, 1-iodo-	2.47	18.276
#22	1-Tridecyn-4-ol	1.80	21.152
#23	Butane, 2,2-dimethyl	0.86	22.549
#24	Dodecane, 1-iodo	2.58	26.781
#25	Cyclohexane, octyl	0.58	29.142
#26	4-Iodo-1H-pyrazol- 5-amin	0.74	61.285

#27	Heptane, 1-iodo	0.84	65.772
#28	Ethyl trans-cafeate, bis(trimethylacetat e)	0.67	65.950
#29	2,4,4,6,6-Pentame thyl-2-heptene	0.49	69.333
#30	Ethyladamantane- 1-carboxylate	0.72	74.504

Tabela 21 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de mamona à 400° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Hexanoic ácido	4.48	2.796
#2	1-Heptanol	1.49	2.847
#3	2-Octanone	11.90	3.091
#4	Decane, 6-ethyl-2-methyl	2.42	3.172
#5	1-Heptene, 6-methyl	1.18	3.237
#6	Heptanoic acid	10.20	4.072
#7	1-Octene, 3,7-dimethyl	1.22	4.542
#8	Tridecane	01.02	4.673

#9	1-Heptene, 6-methyl	0.54	4.778
#10	Octanoic acid	9.13	6.156
#11	Decane, 6-ethyl-2-methyl	0.53	7.029
#12	Nonanoic acid	6.36	9.116
#13	1-Octene, 6-methyl	1.46	9.749
#14	6-Tridecene	6.81	9.859
#15	Tridecane	1.38	10.243
#16	n-Decanoic acid	2.35	12.730
#17	Undecylenic acid	2.60	16.597
#18	Cyclopentane, (2-methylpropyl)-	1.24	16.683
#19	Undecanoic acid	5.93	16.900
#20	Undecylenic acid	12.35	17.140
#21	Undecylenic acid	5.19	17.569
#22	Decane, 1-iodo	01.06	18.268
#23	Butane, 2,2-dimethyl-	0.75	26.770
#24	Cyclohexane, decyl	0.76	29.133
#25	Phenol, 4-dodecyl	0.64	42.390
#26	Octane,	01.09	49.162

	1,1'-oxybis		
	cyclopropane,		
	1-(1,2-		
	dimethylpropyl)-1-		
#27	methyl-2-nonyl	0.73	51.980
	Cyclopropane,		
	1-(2-methylbutyl)-1		
#28	-(1-methylpropyl)-	3.39	52.066
#29	Ginsenosol	0.82	52.175
	2-Undecene,		
#30	2,5-dimethyl	1.01	52.358

Tabela 22 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 300° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Hexanoic acid	1.65	2.783
#2	Heptanoic acid	6.41	4.063
#3	Octanoic acid	3.75	6.123
#4	Nonanoic acid	1.81	9.055
#5	Decanoic acid	4.98	12.775
#6	Tetradecane	4.26	18.187
#7	9-Octadecene	1.34	25.706
#8	9-Octadecene	1.81	25.972
#9	heptadecane	1.73	26.680

#10	n-Hexadecanoic acid	22.01	37.379
#11	9-Octadecene	1.34	40.921
#12	Oleic Acid	9.51	42.517
#13	Oleic Acid	22.89	42.665
#14	Stearic acid	5.32	43.074
#15	1-Nonadecene	1.86	47.249
#16	1-Nonadecene	2.42	47.384
#17	9-Octadecen-1-ol, (Z)	2.49	50.413
#18	9-Octadecen-1-ol, (Z)	1.89	50.507
#19	1-Nonadecene	1.26	50.679
#20	1-Nonadecene	1.27	50.784

Tabela 23 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 300° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Hexanoic acid	4.16	2.790
#2	2-Octanone	6.60	3.071
#3	Undecane	2.15	3.151
#4	3-Decene	0.98	3.217

#5	Heptanoic acid	8.55	4.078
#6	1-Pentanol, 3,4-dimethyl	0.82	4.513
#7	Tridecane	1.35	4.637
#8	Octanoic acid	8.21	6.167
#9	Tridecane	0.75	6.979
#10	Nonanoic acid	6.67	9.133
#11	7-Tetradecene, (Z)	0.82	9.684
#12	7-Tetradecene, (Z)	3.49	9.796
#13	Hexadecane	1.26	10.177
#14	n-Decanoic acid	3.34	12.726
#15	Undecanoic acid	6.70	16.946
#16	Undecylenic acid	8.58	17.164
#17	Undecylenic acid	06.03	17.578
#18	Hexadecane	0.94	18.190
#19	Pentadecane	0.97	26.682
#20	Cyclohexane, undecyl	0.83	29.037
#21	n-Hexadecanoic acid	3.43	37.220
#22	Phenol, 4-dodecyl	1.19	42.321

#23	Oleic Acid	19.28	42.637
#24	Octadecanoic acid	2.28	43.049
#25	Hexahydro-3-butyl phthalide	0.65	45.710

Tabela 24 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 350° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Decane, 6-ethyl-2-methyl	50.15	16
#2	Methyl 2-hydroxydecanoate	13.85	23.683
#3	Nonane, 3,7-dimethyl	36	24.367

Tabela 25 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 350° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1.	3-Octene, 2,6-dimethyl	1.93	3.064
#2	Cyclohexane,	1.11	3.378

	(1-methylethyl		
	Octanoic acid \$\$		
#3	n-Caprylic acid	12.59	3.480
#4	Benzene, penty	4.54	3.616
	3-Octene,		
#5	2,6-dimethy	2.26	3.866
	Cyclobutane,		
#6	methoxy-	1.12	3.918
	Nonane,		
	3,7-dimethyl-		
#7	Decane, 3-methyl	3.44	3.970
#8	Nonanoic acid	6.16	4.861
	Decane,		
#9	6-ethyl-2-methyl	4.21	5.594
#10	n-Decanoic acid	05.02	6.934
	Decane,		
#11	6-ethyl-2-methyl	3.21	7.949
#12	Hexadecane	24.57	11.072
#13	Orcinyl di-angelate	0.95	13.011
	Acetyl valeryl		
	Decane,		
#14	6-ethyl-2-methy	1.35	14.855
	Cyclopentane,		
	1,1,3-trimethyl		
#15	1-Decene,	03.01	18.111

	8-methyl-		
#16	7-Tetradecene, (Z)	8.58	18.375
#17	Nonane, 3,7-dimethyl	11.79	19.099
#18	Oxalic acid, butyl propyl ester	0.91	44.062

Tabela 26 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 400° C e 5% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Cyclohexane, (2-methylpropyl	1.43	2.612
#2	Hexanoic acid	8.66	2.801
#3	Benzene, (1-methylethyl)-	1.27	2.875
#4	2-Octanone	7.41	3.069
#5	Decane	6.21	3.150
#6	2-Decene, (Z)	1.46	3.216
#7	Cyclohexane, butyl	1.18	3.677
#8	Heptanoic acid	12.01	4.107
#9	2-Tridecanone	0.90	4.515
#10	Tridecane	3.21	4.634
#11	Malonic acid,	1.20	5.908

	3-methylpentyl undecyl ester		
#12	Benzene, pentyl-	1.57	6.022
#13	Octanoic acid	12.30	6.215
#14	Nopyl angelate	0.90	6.271
#15	Tridecane	2.32	6.975
#16	Nonanoic acid	8.81	9.183
#17	Decane, 2,3,5-trimethyl	3.16	10.175
#18	Benzene, heptyl	1.74	12.608
#19	n-Decanoic acid	3.33	12.773
#20	Tetradecane	1.33	14.012
#21	Undecanoic acid	9.75	16.909
#22	Tetradecane	3.31	18.187
#23	Tetradecane	1.10	22.681
#24	Pentadecane	4.11	26.681
#25	Cyclohexane, undecyl	1.35	29.040

Tabela 27 - Compostos químicos identificados na cromatografia gasosa do bio-óleo a partir do óleo de soja à 400° C e 15% de catalisador

Pico	Composto	Área	Tempo de retenção
#1	Cyclopentane, 1-ethyl-3-methyl-, cis	02.08	2.612
#2	Hexanoic acid	3.67	2.787
#3	Benzene, (1-methylethyl)	1.95	2.873
#4	Cyclohexane, (1,2,2-trimethylbut yl	4.16	3.072
#5	Decane	08.09	3.151
#6	1-Decanone, 1-phenyl-	1.38	3.222
#7	Cyclopentane, 1-ethyl-1-methyl	1.45	3.687
#8	Indane	0.77	3.815
#9	Heptanoic acid	7.10	4.033
#10	2-Nonanone	2.28	4.519
#11	Tridecane	7.94	4.636
#12	Benzene, pentyl	1.69	6.028
#13	Octanoic acid	2.23	6.088
#14	Hexane,	0.94	6.285

	2-phenyl-3-propyl		
	2-Naphthalenol, 1,2-dihydro-, acetate		
#15		2.18	6.850
#16	Tridecane	6.66	6.979
#17	Nonanoic acid	1.22	9.018
#18	Tridecane	7.38	10.179
#19	n-Decanoic acid	1.37	12.644
#20	Tetradecane	5.87	14.015
#21	Tetradecane	16.33	18.194
#22	Tetradecane	2.83	22.461
#23	Pentadecane	8.48	26.686
#24	2-Hexadecanone	1.15	34.827
#25	2-Hexadecanone	0.81	41.514

Figura 19 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 5% de catalisador

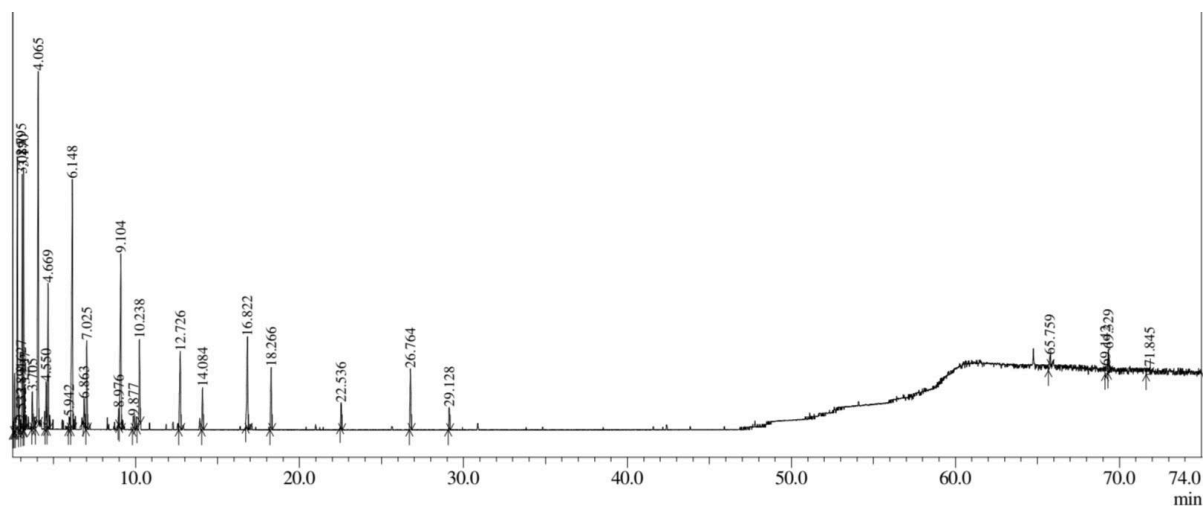


Figura 20 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 10% de catalisador

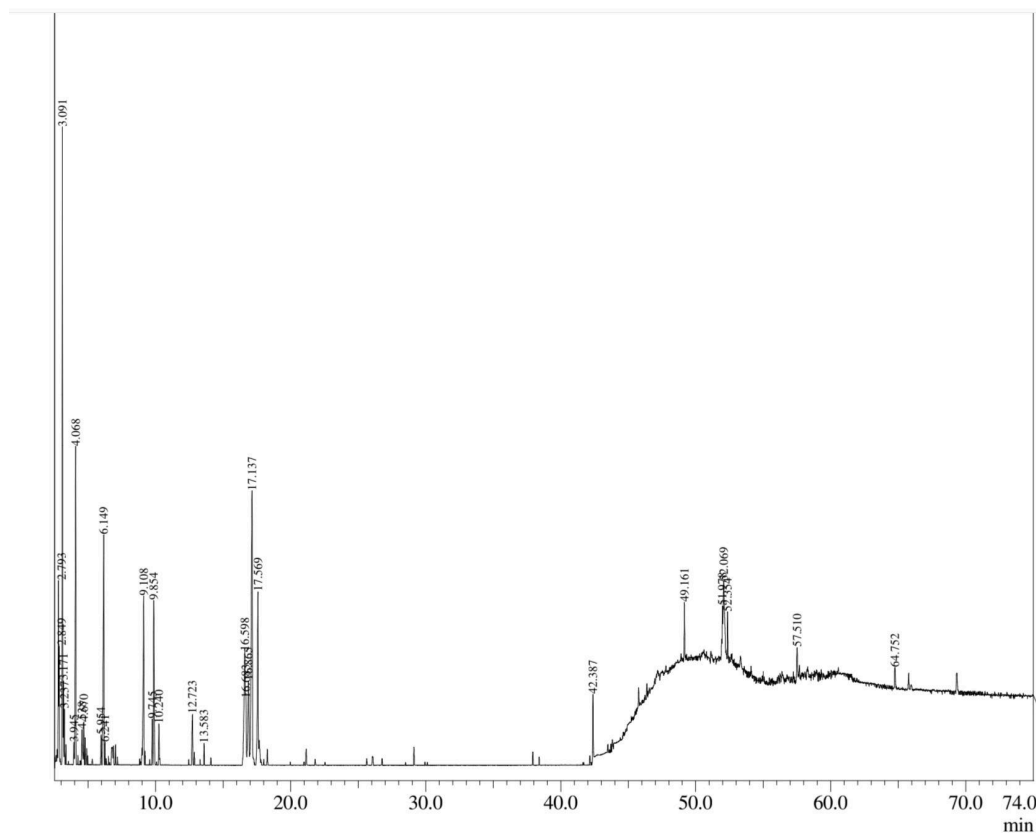


Figura 21 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 350 °C com 15% de catalisador

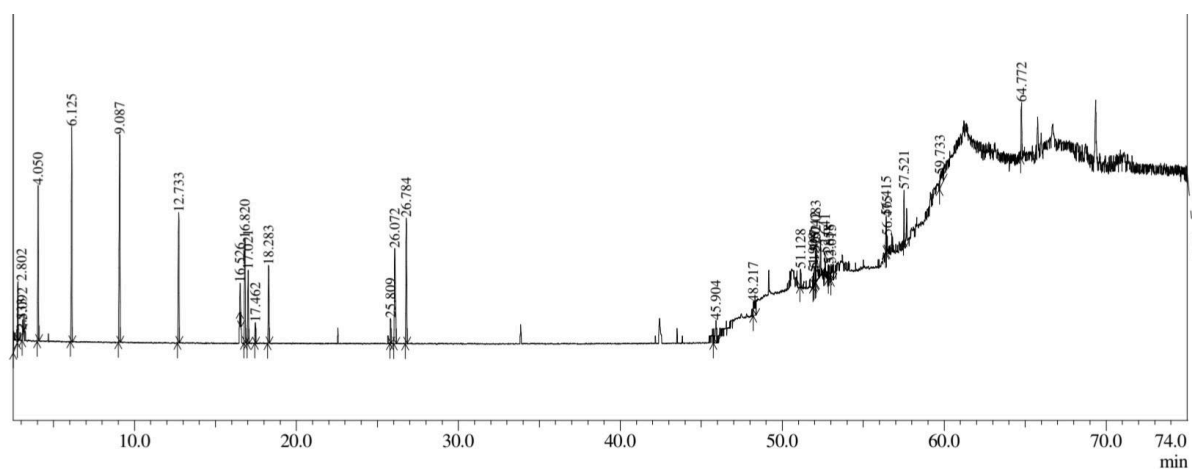


Figura 22 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 400 °C com 5% de catalisador

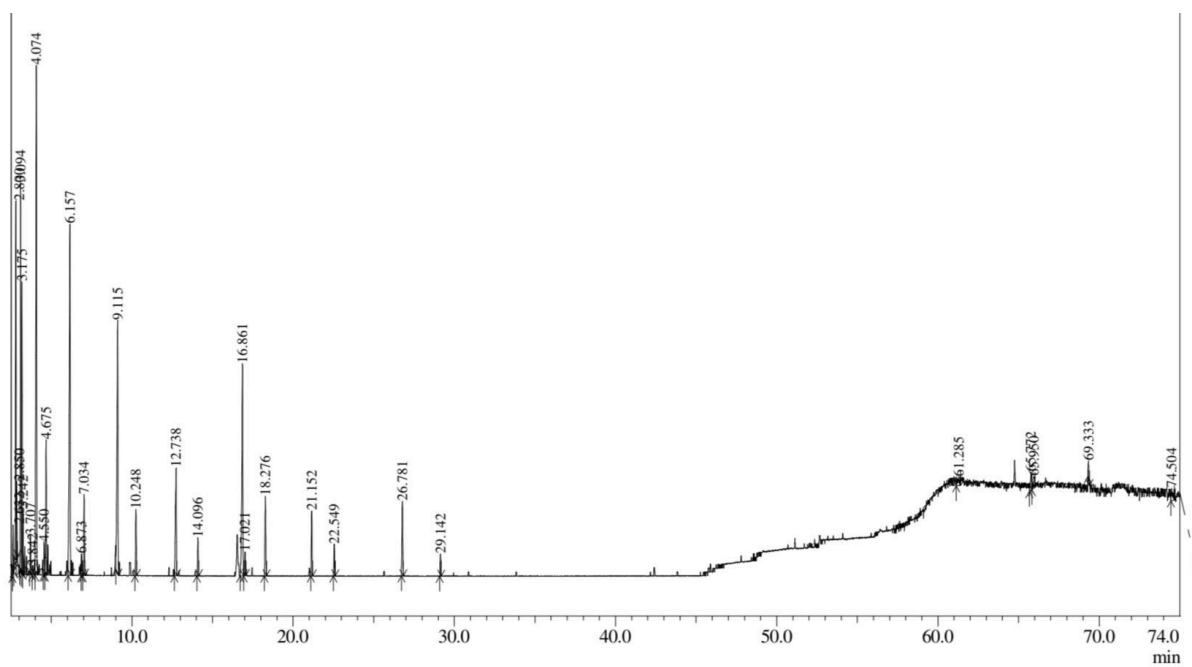


Figura 23 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de mamona a 400 °C com 15% de catalisador

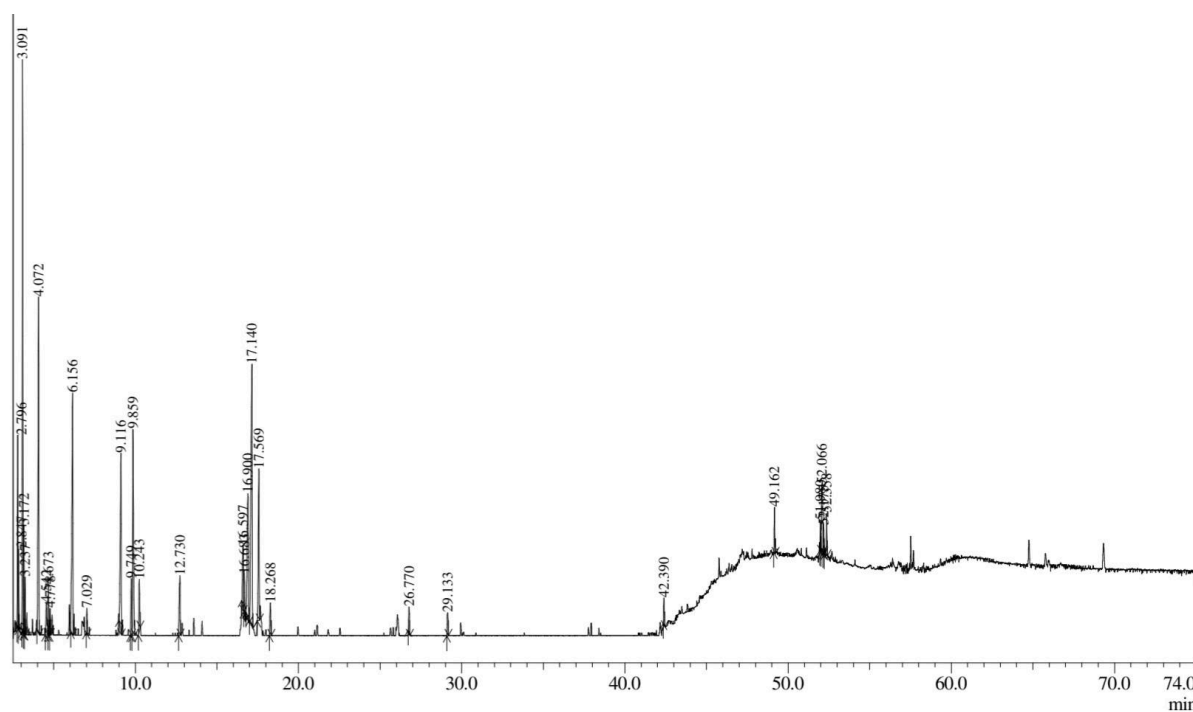


Figura 24 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 300 °C com 5% de catalisador

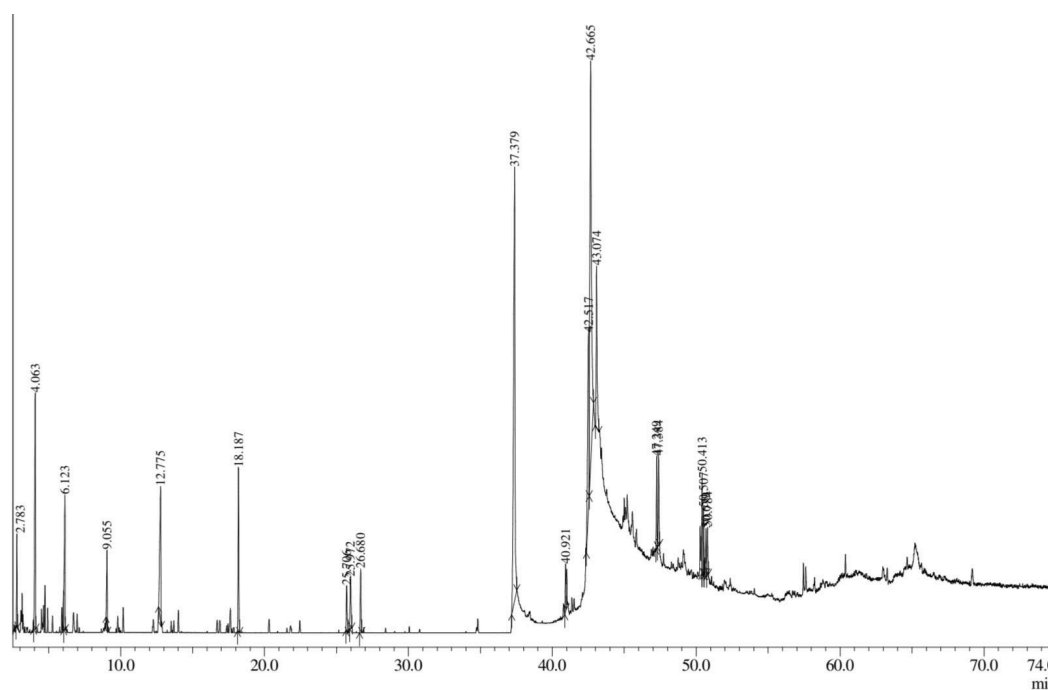


Figura 25 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 300 °C com 15% de catalisador

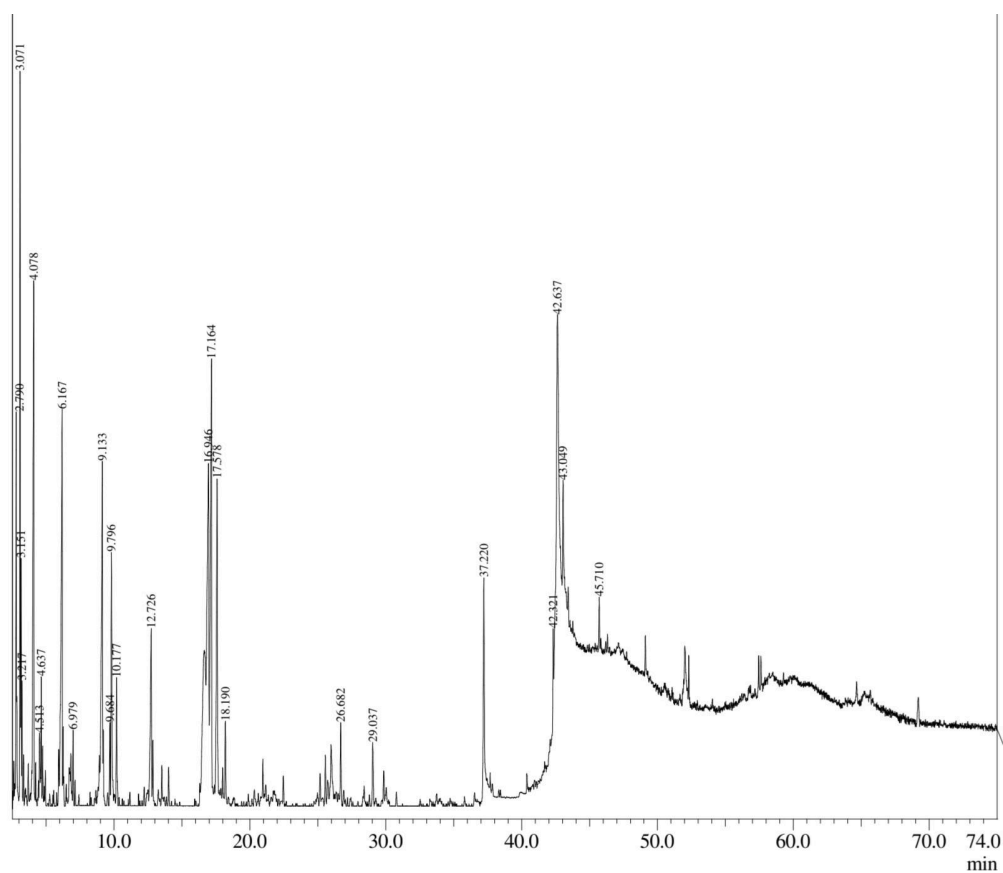


Figura 26 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 5% de catalisador

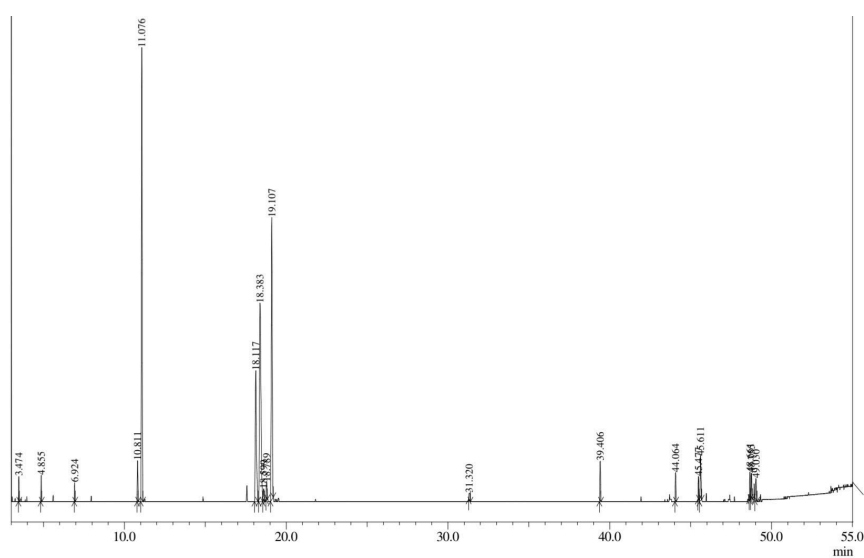


Figura 27 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 10% de catalisador

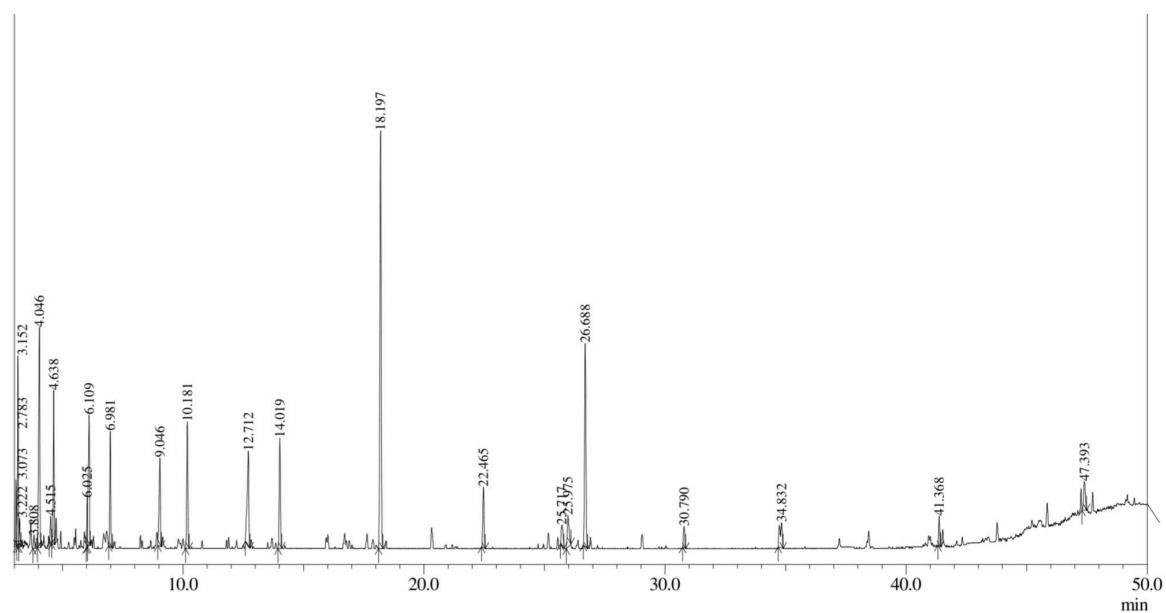


Figura 28 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 350 °C com 15% de catalisador

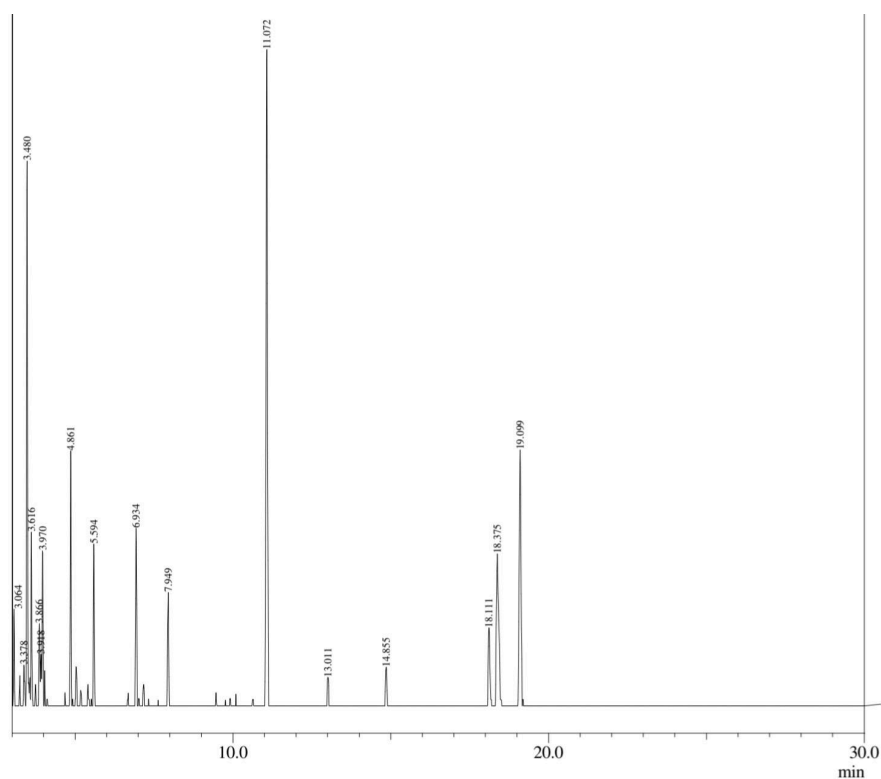


Figura 29 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 400 °C com 5% de catalisador

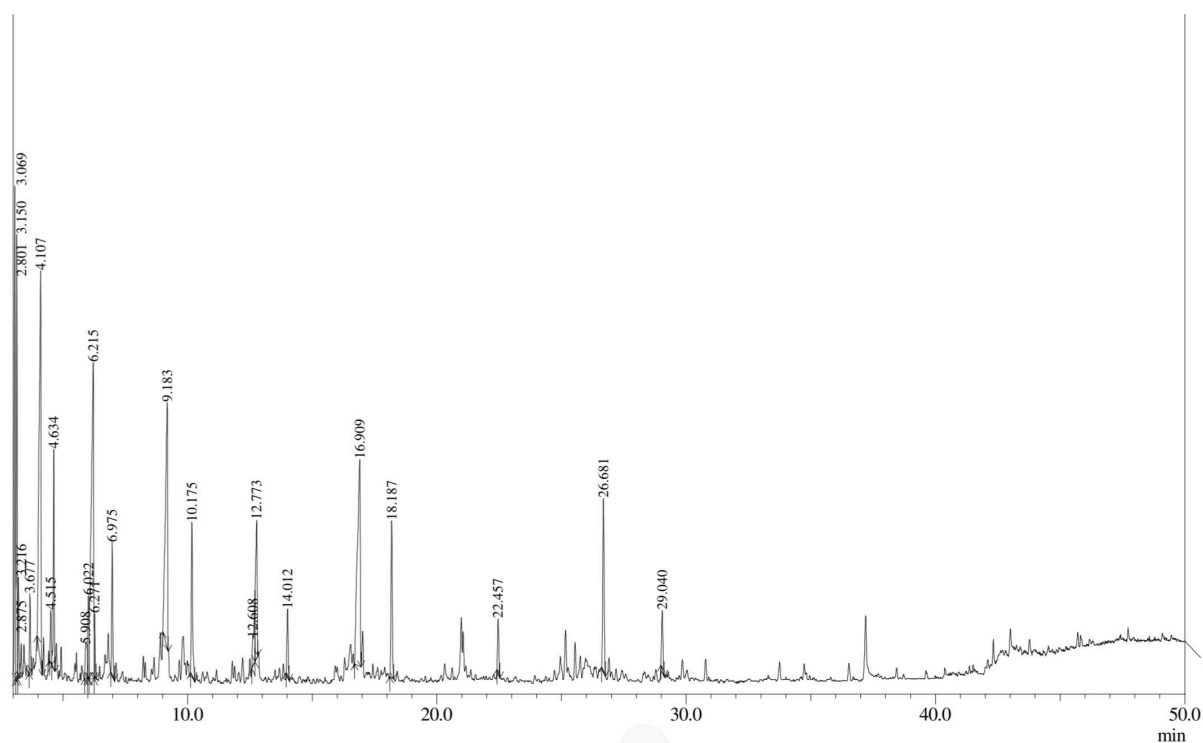


Figura 30 - Cromatograma do bio-óleo utilizando óleo de soja a 400 °C com 15% de catalisador

