



**UFOP**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

---



**Eliza Maria da Silva**

# **CONVERSÃO DE ÓLEO DE RÍCINO EM ÉSTERES ATRAVÉS DE PLASMA NÃO-TÉRMICO**

Ouro Preto

2025

Eliza Maria da Silva

Conversão de óleo de rícino em ésteres através de plasma não-térmico

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dra. Marina de Medeiros Machado – UFOP

Ouro Preto

2025



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Eliza Maria da Silva**

### **Conversão de óleo de rícino em ésteres através d plasma não-térmico**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Ambiental

Aprovada em 02 de setembro de 2025

#### Membros da banca

Dra. Marina de Medeiros Machado - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Maíra de Oliveira Palm - Universidade Federal de Santa Catarina  
Me. Glívia Braga Faria - Universidade Federal de Ouro Preto  
Me. Yan Rocha Coêlho - Universidade Federal de Ouro Preto

Marina de Medeiros Machado, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Marina de Medeiros Machado, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/09/2025, às 22:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0978474** e o código CRC **F581F511**.

*Dedico este trabalho às mulheres cientistas,  
que abriram caminhos para que eu pudesse trilhar o meu.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, que sempre lutaram para que eu tivesse acesso à educação e pudesse dar passos que eles não tiveram a oportunidade de dar.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público e de qualidade, e à Fundação Gorceix, que apoiou tantos projetos dos quais tive a oportunidade de participar. À Universidade Federal de Santa Catarina, por ter possibilitado a realização desta pesquisa e aberto novas portas. Aos amigos e professores do curso de Engenharia Ambiental da UFOP, que fizeram parte da minha caminhada acadêmica e pessoal.

Em especial, agradeço aos colegas do PET Engenharia Ambiental, da Renovar Jr. e do Laboratório de Plasma, pela parceria e pelas experiências que compartilhamos. À professora Marina, por me orientar no início da vida de pesquisadora, e à Glívia, pela companhia e paciência em ensinar. À Karoline Martins Teixeira e ao Pedro Melo, por estarem sempre presentes no laboratório, dispostos a ajudar e dividir o caminho comigo. E à Letícia Côrtes, por ter me acompanhado e incentivado.

## RESUMO

Este trabalho investigou a viabilidade da conversão do óleo de rícino em ésteres por meio da tecnologia de plasma não-térmico, como alternativa aos processos convencionais de transesterificação utilizados na produção de biodiesel, por ser um óleo que apresenta propriedades relevantes para a produção de biodiesel. Para isso, foram realizados ensaios em reator de plasma, empregando amostras com e sem catalisador em diferentes tempos de exposição. Após o tratamento, os produtos foram submetidos a etapas de purificação, seguidas de análises físico-químicas, além de cromatografia gasosa (GC-MS) conduzida em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina. Os resultados demonstraram redução visual da viscosidade em relação ao óleo de rícino cru, valores de densidade próximos ao intervalo estabelecido pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para comercialização do biodiesel e alterações significativas no pH, evidenciando a ação do plasma como modulador químico. As análises cromatográficas mostraram que, as amostras sem catalisador apresentaram baixos teores de ésteres ( $\leq 12,39\%$ ), enquanto a associação com KOH elevou os valores para até 90,13% em 21 minutos. O plasma não-térmico apresenta potencial para a produção de biodiesel a partir do óleo de rícino, sobretudo quando associado a catalisadores, embora ainda sejam necessárias otimizações para alcançar os padrões regulatórios e consolidar sua aplicação em escala industrial.

Palavras-chaves: transesterificação, biodiesel, plasma não-térmico, óleo de rícino.

## ABSTRACT

This study investigated the feasibility of converting castor oil into esters through non-thermal plasma technology as an alternative to conventional transesterification processes used in biodiesel production, since it is an oil with relevant properties for biodiesel production. For this purpose, experiments were carried out in a plasma reactor, employing samples with and without catalyst under different exposure times. After treatment, the products underwent purification steps, followed by physicochemical analyses and gas chromatography (GC-MS) performed in collaboration with the Federal University of Santa Catarina. The results showed a visual reduction in viscosity compared to crude castor oil, density values close to the range established by National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) for biodiesel commercialization, and significant changes in pH, highlighting the role of plasma as a chemical modulator. Chromatographic analyses revealed that the samples without catalyst presented low ester contents ( $\leq 12.39\%$ ), whereas the association with KOH increased the values up to 90.13% in 21 minutes. Non-thermal plasma thus demonstrates potential for biodiesel production from castor oil, especially when combined with catalysts, although further optimizations are required to meet regulatory standards and consolidate its application on an industrial scale.

Keywords: transesterification, biodiesel, non-thermal plasma. castor oil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostra sem catalisador aplicada no reator. ....	18
Figura 2 – Amostra com catalisador antes de ser aplicada ao plasma. ....	19
Figura 3 – Bancada experimental.....	20
Figura 4 – Amostra com catalisador após plasma.....	21
Figura 5 – Filtração de amostra sem catalisador.....	22
Figura 6 – Primeira decantação. ....	23
Figura 7 – Pós tratamento plasma, etapa de lavagem. ....	24
Figura 8 – Filtragem da amostra com catalisador. ....	25
Figura 9 – Fluxograma da metodologia das amostras sem catalisador. ....	27
Figura 10 - Fluxograma da metodologia das amostras com catalisador. ....	28
Figura 11 – Fórmula estrutural da triricinoleína. ....	30
Figura 12 – Amostra com catalisador durante a reação. ....	31
Figura 13 – Cromatograma 1: primeira amostra de 6 minutos, sem catalisador. ....	36
Figura 14 – Cromatograma 2: segunda amostra de 6 minutos, sem catalisador. ....	37
Figura 15 – Cromatograma 3: primeira amostra de 15 minutos, sem catalisador. ....	37
Figura 16 – Cromatograma 4: segunda amostra de 15 minutos, sem catalisador. ....	37
Figura 17 – Cromatograma 5: primeira amostra de 21 minutos, sem catalisador. ....	38
Figura 18 – Cromatograma 6: segunda amostra de 21 minutos, sem catalisador. ....	38
Figura 19 – Cromatograma 7: primeira amostra de 6 minutos, com catalisador. ....	41
Figura 20 – Cromatograma 8: segunda amostra de 6 minutos, com catalisador. ....	41
Figura 21 – Cromatograma 9: primeira amostra de 15 minutos, com catalisador. ....	42
Figura 22 – Cromatograma 10: segunda amostra de 15 minutos, com catalisador. ....	42
Figura 23 – Cromatograma 11: primeira amostra de 21 minutos, com catalisador. ....	42
Figura 24 – Cromatograma 12: segunda amostra de 21 minutos, com catalisador. ....	43

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição de Ácidos Graxos de Óleos de Rícino.....	29
Tabela 2 - Viscosidades .....	32
Tabela 3 – Densidade das amostras sem catalisador.....	33
Tabela 4 - Densidade das amostras com catalisador.....	33
Tabela 5 – Análise do pH de todas amostras.....	34
Tabela 6 – Teor de éster das amostras sem catalisador.....	36
Tabela 7 - Teor de éster das amostras sem catalisador. ....	40

**SUMÁRIO**

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	3
	2.1 Objetivo geral .....	3
	2.2 Objetivos específicos.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
	3.1 Biocombustíveis na matriz energética brasileira .....	4
	3.1.1 Rotas convencionais para síntese de ésteres.....	5
	3.2 Tecnologia de plasma e suas aplicações .....	6
	3.2.1 Plasma térmico e não-térmico .....	7
	3.2.2 Aplicações industriais do plasma na conversão de compostos químicos e suas vantagens .....	8
	3.3 Uso do plasma em conversões .....	10
	3.3.1 Interação do plasma e mecanismos de formação de ésteres .....	11
	3.3.2 Possíveis rotas para o uso do plasma .....	12
	3.3.3 Influência dos parâmetros do plasma na seletividade e rendimento 13	
	3.3.4 Eficiência e sustentabilidade da conversão via plasma .....	14
	3.4 Óleo de Rícino.....	16
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
	4.1 Materiais.....	17
	4.2 Aplicação do óleo de rícino na conversão de ésteres .....	17
	4.3 Aplicação da tecnologia de plasma para conversão em ésteres .....	18
	4.3.1 Parâmetros e condições operacionais .....	18
	4.3.2 Testes no reator de plasma .....	19
	4.3.3 Pós tratamento das amostras .....	21

4.4	Avaliação dos produtos para uso como biocombustível.....	25
4.4.1	Densidade e pH .....	25
4.4.2	Análise cromatográfica.....	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
5.1	Propriedades e desafios na conversão do óleo de rícino em ésteres	28
5.2	Aplicação do plasma não-térmico para conversão em ésteres .....	31
5.3	Produtos formados após a conversão por plasma não-térmico .....	32
5.3.1	Comparativos de densidade e pH.....	32
5.4	Cromatografia.....	35
6	CONCLUSÃO .....	44
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensa utilização de combustíveis derivados do petróleo tem gerado preocupações globais, tanto pelo agravamento dos impactos ambientais quanto pelos riscos à saúde humana associados às emissões provenientes de sua queima (Esmaeili, 2022). Paralelamente, o esgotamento progressivo das reservas fósseis e as oscilações no valor do petróleo bruto têm motivado a busca por alternativas renováveis capazes de suprir a crescente demanda energética mundial de forma sustentável (Rezania et al., 2019). Entre essas alternativas, destaca-se o biodiesel, um biocombustível obtido a partir de fontes naturais e renováveis, cuja composição é formada por ésteres de ácidos graxos de cadeia longa resultantes de processos de transesterificação ou esterificação, a partir de matérias graxas de origem vegetal ou animal, conforme estabelecido pela Resolução ANP Nº 920, de 4 de abril de 2023.

Diante desse contexto, alternativas tecnológicas, como o plasma não-térmico, vêm sendo estudadas. O plasma de barreira dielétrica (DBD) é um plasma frio que opera em baixa pressão, gerando espécies reativas e luz UV, sendo eficiente para reações químicas em diversas aplicações industriais e médicas, devido à sua capacidade de promover reações químicas específicas (Abdull-Majeed, AAI-Thani e Al-Sabahi, 2016). O uso de reatores baseados na geração de plasma permite realizar a conversão de compostos orgânicos por meio da atuação de espécies reativas em ambientes controlados, oferecendo vantagens relacionadas ao tempo de processamento e à qualidade do produto final (Istadi et al., 2009).

A transesterificação é o principal método utilizado na produção de biodiesel, envolvendo a reação entre triglicerídeos presentes nos óleos e álcoois, resultando na formação de ésteres alquílicos e glicerol como subproduto (Knothe, Gerpen e Krahl, 2005). Diante da necessidade de diversificação das matérias-primas, o óleo de rícino surge como uma alternativa promissora devido à sua composição diferenciada. Rico em ácido ricinoleico, que representa entre 80% e 90% de sua fração de ácidos graxos, esse óleo apresenta propriedades relevantes para a produção de biodiesel, como elevada viscosidade, baixo índice de iodo e reduzido ponto de congelamento, características que favorecem seu desempenho em processos de conversão (Osorio-González et al., 2020).

Considerando o cenário atual de instabilidade no fornecimento de matérias-primas e a necessidade de aprimoramento dos processos de produção de biocombustíveis, torna-se fundamental investigar novas tecnologias e fontes alternativas que possam contribuir para a sustentabilidade do setor. Diante dessa problemática, este trabalho propõe, portanto, a investigação da conversão do óleo de rícino em ésteres por meio da aplicação da tecnologia de plasma, avaliando as características físico-químicas e explorando seu potencial no contexto da produção de biocombustíveis.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade do plasma não-térmico como alternativa aos métodos convencionais de produção de biodiesel.

### **2.2 Objetivos específicos**

- ✓ Investigar as propriedades e desafios da conversão do óleo de rícino em ésteres;
- ✓ Aplicar a tecnologia de plasma não-térmico para conversão em ésteres;
- ✓ Avaliar os produtos formados para viabilização de uso como biocombustível.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Biocombustíveis na matriz energética brasileira

A crescente preocupação com a dependência de fontes fósseis, especialmente diante do elevado consumo global de petróleo — que ultrapassa 336 milhões de litros por dia (Rocha et al., 2013), tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e menos poluentes. Nesse contexto, os ésteres na indústria química e de biocombustíveis surgem como uma solução promissora à substituição do diesel fóssil, especialmente por apresentarem elevado potencial de biodegradabilidade e baixa toxicidade relativa, o que contribui para a redução dos impactos ambientais (Meyer, 2011).

Em relação ao biodiesel, o comércio internacional continua concentrado entre países como Estados Unidos, Argentina e nações europeias (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). O Brasil também tem sua posição, em 2023, o país exportou 114 milhões de litros do produto, ao passo que importou cerca de 3 milhões de litros (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

No mercado interno, o consumo de biodiesel atingiu 7,5 bilhões de litros em 2023, representando um crescimento de 19% em relação ao ano anterior (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). A mistura obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil começou o ano em 10% e foi elevada para 12% em abril, mantendo-se nesse nível até o final do ano (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

Desde o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005, a produção nacional acumulada ultrapassou 67,5 bilhões de litros até dezembro de 2023 (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). Com esse desempenho, o Brasil figura consistentemente entre os três maiores produtores e consumidores mundiais de biodiesel. Em dezembro de 2023, o país contava com 61 usinas em operação, majoritariamente localizadas nas regiões Centro-Oeste e Sul (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

O biodiesel é obtido por meio do processo de transesterificação, no qual se formam compostos intermediários até a geração dos ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos (Gonçalves e Bortoleto, 2021). Esses ésteres conferem ao biodiesel propriedades semelhantes às do diesel fóssil, destacando-se, entretanto, por serem menos poluentes, biodegradáveis e renováveis. A fabricação de biodiesel tem

registrado um crescimento expressivo em função de suas propriedades vantajosas (Gonçalves e Bortoleto, 2021). No setor energético, sua relevância também é expressiva, com destaque para os ésteres alquílicos de ácidos graxos, que constituem a base do biodiesel.

De acordo com a Resolução ANP nº 920/2023, o biodiesel é definido como “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação ou esterificação de matérias graxas, de origem vegetal ou animal, e que atenda à especificação contida nesta Resolução”, reforçando tanto os aspectos químicos quanto a regulamentação desse biocombustível no Brasil.

### 3.1.1 Rotas convencionais para síntese de ésteres

A esterificação de Fischer é amplamente reconhecida como a principal via empregada tanto na indústria quanto em laboratório para a produção de ésteres, sendo caracterizada por uma reação reversível entre um ácido carboxílico e um álcool (Oliveira *et al.*, 2014). Além da esterificação de Fischer, há a pirólise, também conhecida como craqueamento, de óleos e gorduras ocorre em temperaturas superiores a 350 °C, podendo ser conduzida na presença ou ausência de catalisadores (Suarez *et al.*, 2007). Esse processo promove a decomposição das moléculas de triglicerídeos, originando uma ampla gama de produtos, entre os quais se destacam hidrocarbonetos e compostos oxigenados, de estrutura linear ou cíclica (Suarez *et al.*, 2007).

A transesterificação é um dos métodos mais consolidados e amplamente empregados na síntese de ésteres, especialmente no contexto da produção de biodiesel e outros derivados de interesse industrial (Vekateswarulu *et al.*, 2014) Trata-se de uma reação química entre um triglicerídeo (ou outro éster) e um álcool de cadeia curta — como metanol ou etanol — na presença de um catalisador, resultando na formação de ésteres alquílicos (biodiesel) e glicerol como subproduto (Knothe, 2009).

A principal rota industrial ainda é a transesterificação com metanol, devido à eficiência do processo (Farouk *et al.*, 2024). Diversos catalisadores homogêneos têm sido empregados no processo de transesterificação, destacando-se o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e metóxido de sódio (CH<sub>3</sub>ONa), devido ao seu baixo custo e fácil acesso (Khan *et al.*, 2019). Apesar dessas vantagens, tais catalisadores apresentam limitações operacionais, como a ocorrência de reações de

saponificação, que comprometem o rendimento da reação, além de dificultarem a separação das fases de biodiesel e glicerol (Khan *et al.*, 2019). Em contraste, catalisadores homogêneos de natureza ácida, como o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), embora não induzam à formação de sabões, apresentam taxas de reação consideravelmente mais lentas (Talebian-Kiakalaieh, Amin e Mazaheri, 2013).

Nas últimas décadas, a produção de biodiesel tem incorporado catalisadores heterogêneos derivados de biomassa e resíduos como alternativas sustentáveis aos sistemas convencionais, proporcionando maior estabilidade e resistência à água nos processos de transesterificação (Rajak *et al.*, 2025).

Além da rota convencional, outras abordagens têm sido exploradas com o objetivo de intensificar o processo de produção de biodiesel, promovendo maior rendimento em menor tempo de reação (Khan *et al.*, 2019). Dentre essas técnicas, destacam-se a aplicação de ultrassom (sonicação), a utilização de radiação solar e o uso de micro-ondas como forma de aquecimento assistido (Khan *et al.*, 2019). A sonicação, ao empregar ondas ultrassônicas, favorece a cavitação acústica, resultando em melhor dispersão dos reagentes e aceleração da reação (Khan *et al.*, 2019). Já a tecnologia assistida por micro-ondas proporciona aquecimento rápido e uniforme da mistura reacional, promovendo taxas de conversão elevadas em períodos significativamente reduzidos (Azcan e Danisman, 2008).

Paralelamente, métodos emergentes, como a transesterificação assistida por ultrassom ou micro-ondas, têm ganhado destaque por reduzir o tempo de reação e o consumo energético, além de aumentar a eficiência e a viabilidade econômica (Chandrasekaran e Aalam, 2024). Contudo, sua aplicação em larga escala demanda adaptações no projeto de reatores, otimização dos parâmetros operacionais e investimentos significativos (Chandrasekaran e Aalam, 2024)

Ademais, existe o desafio do controle de qualidade em produção contínua, que constitui uma barreira crítica, pois exige assegurar que o combustível atenda de forma consistente aos padrões regulatórios de composição e desempenho estabelecidos por agências normativas (Chandrasekaran e Aalam, 2024).

### **3.2 Tecnologia de plasma e suas aplicações**

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, compõem uma agenda global

voltada para orientar políticas públicas em direção a um futuro mais equilibrado até o ano de 2030 (Organização das Nações Unidas no Brasil). O ODS 12 tem como foco garantir padrões sustentáveis de produção e consumo. Entre suas metas, está a promoção da conscientização e do acesso à informação relevante sobre práticas sustentáveis, estimulando estilos de vida que estejam em sintonia com a preservação ambiental (Organização das Nações Unidas no Brasil). Além disso, o ODS 7, Energia Limpa e Acessível e 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, alinha-se às vantagens do uso de biocombustíveis em comparação ao diesel convencional. Entre esses benefícios, destaca-se a contribuição dos biocombustíveis para a diminuição dos gases de efeito estufa presentes no ambiente, e a emissão líquida zero de carbono (Kanwal *et al.*, 2022).

Dentro dessa perspectiva, o conceito de desenvolvimento sustentável — entendido como aquele que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias demandas (Brundtland, 1987) — impõe à indústria o desafio de adotar tecnologias que reduzam impactos ambientais sem perder eficiência. Nesse contexto, a tecnologia de plasma surge como uma alternativa promissora, oferecendo soluções inovadoras para mitigar efeitos ambientais e promover processos mais sustentáveis.

O plasma, presente em tal tecnologia, refere-se a um gás ionizado ou parcialmente ionizado, comumente produzido pela aplicação de tensão elétrica entre dois eletrodos (Mattox, 2003). Essa forma de matéria possibilita a ativação de processos químicos e físicos com elevado controle e eficiência energética. Além disso, o plasma apresenta uma variedade de aplicações industriais, devido a alta produtividade específica (produção por unidade de volume do reator) e alta seletividade quando utilizado (Fridman, 2008).

### **3.2.1 Plasma térmico e não-térmico**

O plasma é reconhecido como o quarto estado da matéria, trata-se de um meio resultante da interação de um fluxo gasoso com um campo elétrico, processo que promove a formação de diferentes espécies reativas, incluindo elétrons, íons de cargas opostas, radicais livres, moléculas excitadas e fótons (Pipliya *et al.*, 2023).

A temperatura em um plasma está relacionada à energia média das partículas que o compõem, sejam elas neutras ou carregadas, considerando os diferentes

modos de movimento e excitação, como translacional, rotacional, vibracional e eletrônico (Fridman, 2008). Por ser um sistema formado por diferentes tipos de partículas, o plasma pode exibir mais de uma temperatura ao mesmo tempo, dependendo do grau de liberdade analisado (Fridman, 2008).

O plasma térmico é identificado por uma única temperatura em cada ponto do espaço. Neles, os processos de ionização e as reações químicas dependem principalmente dessa temperatura — a qual resulta, de forma indireta, do campo elétrico (Fridman, 2008). Por outro lado, existem plasmas não-térmicos que se encontram longe desse equilíbrio e que apresentam várias temperaturas associadas a diferentes espécies e modos de excitação (Fridman, 2008). Nesses casos, a temperatura dos elétrons costuma ser muito superior à das partículas pesadas. Os fenômenos de ionização e as reações químicas nesse ambiente são conduzidos diretamente pela energia dos elétrons, sendo pouco influenciados pela temperatura do gás (Fridman, 2008).

A aplicação do plasma não-térmico na transesterificação apresenta vantagens relevantes, como maior seletividade reacional e eficiência no uso de energia. Nessa técnica, a interação das moléculas com o campo elétrico modifica os níveis de energia potencial do sistema, favorecendo as reações (Samani, Asghari e Ebrahimi, 2022). Os elétrons de alta energia atuam de maneira semelhante a um catalisador eletroquímico, promovendo a ativação das moléculas reagentes sem necessidade de aumento da temperatura (Samani, Asghari e Ebrahimi, 2022). Além disso, diferentemente dos catalisadores convencionais, esses elétrons podem interagir com diversos tipos de reagentes, não estando sujeitos às mesmas restrições dos catalisadores químicos (Samani, Asghari e Ebrahimi, 2022).

### **3.2.2** *Aplicações industriais do plasma na conversão de compostos químicos e suas vantagens*

A tecnologia de plasma permite conduzir reações químicas em condições brandas, como temperatura ambiente e pressão atmosférica, utilizando elétrons de alta energia para ativar moléculas sem aquecer significativamente o sistema (Fridman, 2008). Ambientes de plasma não-térmico viabilizam reações que, em condições convencionais, seriam muito lentas ou termodinamicamente inviáveis. Por operar com baixas temperaturas, o plasma é especialmente adequado ao processamento de

compostos sensíveis ao calor, ampliando as possibilidades de transformação química com menor consumo de energia (Fridman, 2008).

Na conversão de compostos orgânicos, o plasma não-térmico oferece condições singulares, como elevada densidade eletrônica e presença de espécies reativas em temperaturas relativamente baixas, o que possibilita reações seletivas com menor formação de subprodutos indesejáveis (Fridman, 2008). Os plasmas não-térmicos geram radicais e íons capazes de iniciar reações químicas complexas, o que pode permitir, em certos contextos, a substituição parcial de catalisadores convencionais por ativação direta das moléculas reagentes (Fridman, 2008).

Além disso, o plasma pode ser empregado de maneira contínua em reatores do tipo leito fixo, jato de plasma ou barreira dielétrica, favorecendo escalabilidade e eficiência energética (Fridman, 2008). Tais arranjos também permitem modular variáveis como tempo de residência, intensidade do campo elétrico e composição da atmosfera reacional, influenciando diretamente a taxa de conversão e a seletividade dos produtos formados (Fridman, 2008).

Além da aplicação em sistemas orgânicos, o plasma não-térmico tem se mostrado promissor na síntese e transformação de compostos inorgânicos e ambientais. Estudos recentes exploram, por exemplo, sua utilização na produção de amônia em condições brandas, sem a necessidade de altas pressões e temperaturas características do processo Haber–Bosch (Yan *et al.*, 2025), destaca-se também a conversão de dióxido de carbono em produtos de maior valor agregado, como monóxido de carbono, metanol e hidrocarbonetos leves (Marcantonio, Falco e Bocci, 2022), além de aplicações ambientais, como a degradação de compostos orgânicos voláteis em correntes gasosas, na qual reatores de plasma não-térmico têm demonstrado elevada eficiência e seletividade, sobretudo em associação a catalisadores (Mu e Williams, 2022).

A tecnologia de plasma tem diversas aplicabilidades e apresenta vantagens, como operação em condições ambientes, flexibilidade no design do reator, modularidade para produção local ou sob demanda, e a possibilidade de integração com fontes de energia renovável (Assche, Thomassen e Compernelle, 2022). Essas características contribuem na economia de energia e evita danos térmicos aos materiais ou catalisadores.

A tecnologia de plasma também apresenta vantagens na produção de biodiesel utilizando óleo de soja cru refinado e óleo residual de fritura. Neste caso, mostraram rendimentos de 92,80% para o óleo cru e 87,10% (Meng *et al.*, 2020). Isso demonstra o potencial do reaproveitamento de resíduos alimentares na produção de biocombustíveis.

Além disso, a descarga por barreira dielétrica (DBD) tem se mostrado apropriada para a descontaminação de alimentos já acondicionados, pois o processo gera espécies reativas diretamente no interior das embalagens seladas, promovendo a inativação de microrganismos indesejáveis sem necessidade de abrir o pacote (Misra *et al.*, 2014). Ainda na indústria alimentícia, a literatura relata de forma consistente a eficácia do plasma na inativação de uma ampla gama de agentes biológicos, incluindo bactérias, fungos e esporos, reforçando o potencial da tecnologia para aplicações em segurança de alimentos (Segat *et al.*, 2016).

### **3.3 Uso do plasma em conversões**

O uso do plasma em conversões envolve uma variedade de processos físico-químicos que decorrem da interação das espécies ativas do plasma com os reagentes (Fridman, 2008). Essa interação é responsável por promover transformações que, em condições convencionais, exigiriam altas temperaturas ou pressões elevadas (Fridman, 2008).

Um dos principais mecanismos é a excitação e dissociação molecular, em que o plasma fornece energia suficiente para excitar ou quebrar moléculas estáveis. Isso ocorre por meio de colisões com elétrons de alta energia, gerando radicais livres e íons altamente reativos (Fridman, 2008). Outro processo importante é a ionização e formação de espécies carregadas. Nesse mecanismo, os elétrons energéticos presentes no plasma ionizam os constituintes gasosos, originando íons positivos e negativos (Fridman, 2008). Essas espécies carregadas podem interagir com outras moléculas e participar de reações químicas subsequentes, aumentando a complexidade e a eficiência das transformações (Fridman, 2008).

Além disso, ocorre a recombinação e reações em superfície, nas quais as espécies ativadas colidem entre si ou com superfícies sólidas, como catalisadores ou as paredes do reator (Fridman, 2008). Esses encontros podem resultar na formação

de novos compostos por meio de processos de recombinação ou de adsorção catalítica, contribuindo para a seletividade do sistema (Fridman, 2008).

O plasma líquido é capaz de modificar de forma significativa a composição química das soluções (Padmanaban *et al.*, 2021). Em experimentos com plasma aplicado ao etanol, verificaram a ocorrência de acidólise do meio, acompanhada pela formação de peróxido de hidrogênio após o tratamento, evidenciando o impacto direto desse processo na química local (Padmanaban *et al.*, 2021). De maneira complementar, na interface entre o plasma e o líquido, há acúmulo de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila e elétrons solvados, concentrados em camadas nanométricas (Lee *et al.*, 2024). Essa condição sugere a criação de microambientes distintos, capazes de influenciar simultaneamente diferentes rotas reacionais.

### **3.3.1 Interação do plasma e mecanismos de formação de ésteres**

A produção de biodiesel por transesterificação convencional ainda é a rota predominante na indústria, mas apresenta limitações conhecidas, como a necessidade de temperaturas elevadas, longos tempos reacionais e múltiplas etapas de purificação, frequentemente associadas à formação de subprodutos como o glicerol (Veličković *et al.*, 2025). Como alternativa, diferentes tecnologias de intensificação de processo têm sido exploradas para contornar essas limitações, destacando-se, por exemplo, o uso de micro-ondas, ultrassom, técnicas hidrodinâmicas e métodos oscilatórios (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Esses métodos proporcionam benefícios como a redução do tempo de reação, menores proporções molares de reagentes, menor demanda energética e menor impacto ambiental (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Contudo, tais abordagens ainda dependem de catalisadores ácidos ou básicos e atuam principalmente promovendo maior transferência de massa entre os reagentes (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022).

Em contrapartida, o uso de plasma apresenta um mecanismo de atuação distinto na transesterificação. Nesse ambiente reativo, elétrons livres de alta energia e fótons interagem com as moléculas dos reagentes, transferindo energia suficiente para excitar ou romper ligações covalentes (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Essa ação leva à formação de radicais como  $\bullet\text{CH}_3$ ,  $\bullet\text{H}$  e  $\bullet\text{OH}$ , principalmente pela fragmentação do metanol. Inicialmente, as ligações O–H, por serem mais frágeis, são

as primeiras a se romper, gerando íons metóxido, que desempenham papel essencial na ativação do processo (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). À medida que a ionização progride, ligações carbono-carbono tornam-se instáveis e propensas à adsorção de átomos livres. Com isso, o grupo hidroxila dos ácidos graxos é substituído por um átomo de oxigênio e uma cadeia de hidrocarboneto do metanol, promovendo a formação do éster (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). O glicerol, por sua vez, é separado da estrutura do triglicerídeo e liberado como subproduto da reação (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022).

### **3.3.2 Possíveis rotas para o uso do plasma**

A produção de biodiesel pode ocorrer por diversas rotas físico-químicas, incluindo transesterificação, esterificação, pirólise e processos com fluidos supercríticos (Bashir *et al.*, 2022). Entre essas alternativas, a transesterificação destaca-se como a técnica mais amplamente empregada (Palm, 2022). Nessa reação, os triglicerídeos presentes em óleos ou gorduras reagem com álcoois de cadeia curta, como metanol ou etanol, originando ésteres alquílicos de ácidos e glicerol como subproduto (Palm, 2022).

Diversos estudos têm demonstrado diferentes formas de aplicação do plasma na intensificação da reação de transesterificação para produção de biodiesel. Uma das rotas exploradas consiste no uso do plasma como etapa de pré-tratamento, antes da reação convencional. Nesse caso, o plasma é utilizado para modificar as características do óleo, facilitando sua conversão em ésteres (Palm, 2022). Por exemplo, em um experimento conduzido com óleo de cozinha usado, o pré-tratamento com plasma resultou em maior rendimento de biodiesel, além de proporcionar redução no tempo de reação e facilitar a separação dos produtos (Abdull-Majeed, AAI-Thani e Al-Sabahi, 2016).

Outra estratégia investigada envolve a utilização do plasma como meio reacional principal, sem a presença de catalisadores. Isso foi possível com o uso de reatores do tipo descarga dielétrica (DBD), que permitiram a conversão de óleos diretamente em ésteres. Em um estudo que utilizou uma mistura de óleo de mamona e óleo de palma, foi alcançado um rendimento de aproximadamente 60% de ésteres (Zara *et al.*, 2019).

Além disso, tem-se observado que a combinação do plasma com catalisadores sólidos, como o carvão ativado, pode aumentar significativamente a eficiência do processo (Palm, 2022). Essa abordagem híbrida aproveita tanto a ação energética do plasma quanto a capacidade catalítica do material utilizado (Palm, 2022). Um estudo demonstrou que o uso apenas do catalisador modificado não gerou produção de biodiesel, mas, quando o plasma foi combinado ao carvão ativado, os rendimentos chegaram a 92%, revelando um efeito sinérgico expressivo no sistema (Buchori *et al.*, 2016); (Bashir *et al.*, 2022).

### **3.3.3** *Influência dos parâmetros do plasma na seletividade e rendimento*

A razão molar entre metanol e óleo, a potência aplicada e o tempo de tratamento no reator de plasma são fatores críticos que influenciam diretamente o rendimento e a seletividade na produção de ésteres (Adama e Anani, 2023); (Warne *et al.*, 2024). Destaca-se que o catalisador hidróxido de potássio (KOH) é amplamente utilizado devido à sua elevada eficiência catalítica, maior solubilidade em metanol e menor sensibilidade à presença de água (Adama e Anani, 2023). Além disso, a glicerina formada com o uso de KOH tende a permanecer em fase líquida, facilitando sua separação (Adama e Anani, 2023). No entanto, concentrações excessivas de catalisador ou proporções inadequadas entre os reagentes podem reduzir o rendimento do biodiesel e comprometer sua pureza, principalmente devido à formação indesejada de sabões e excesso de glicerol (Kazerooni *et al.*, 2022).

A proporção molar de 6:1 entre metanol e óleo é frequentemente citada como ideal para a transesterificação, garantindo conversão eficiente dos triglicerídeos em ésteres metílicos (Warne *et al.*, 2024). Relações molares inferiores a esse valor podem resultar em rendimento reduzido, uma vez que a quantidade de álcool disponível se torna insuficiente para converter todos os glicerídeos presentes (Zafar, Ahmad e Rozina, 2021).

No que diz respeito aos parâmetros do reator de plasma, tanto a potência quanto a tensão exercem papel fundamental no processo (Bashir *et al.*, 2022). O aumento da potência de entrada está relacionado ao crescimento da energia dos elétrons e íons gerados, o que favorece a formação de espécies reativas, como os radicais hidroxila, que atuam na promoção da reação química (Warne *et al.*, 2024).

A relação entre o tempo de tratamento e os rendimentos de esterificação é complexa, como evidenciado por diversos estudos. O impacto do tempo mais longo de tratamento nos rendimentos de esterificação apresenta influência significativa, com estudos em que o rendimento da reação aumenta progressivamente com o tempo, passando de 33% em 40 minutos para 72% em 100 minutos (Abdull-Majeed, AAI-Thani e Al-Sabahi, 2016). Paralelamente, demonstram que, mesmo em tempos reduzidos, como 5 minutos, é possível obter rendimentos na esterificação de ácidos graxos de cadeia curta, com conversões de até 0,12%, o que destaca o potencial para reações rápidas em condições específicas (Abdull-Majeed, AAI-Thani e Al-Sabahi, 2016).

Ainda como parâmetro, demonstra-se que a temperatura de reação exerce influência direta no rendimento da conversão de óleos vegetais em ésteres, especialmente no caso do óleo de rícino (Alagha *et al.*, 2024). Resultados experimentais otimizados indicam que a faixa de 65 °C proporciona condições favoráveis para a ocorrência da reação de esterificação, associada a elevadas taxas de conversão (Alagha *et al.*, 2024). Essa temperatura tem sido reportada como eficiente quando combinada com uma relação molar aumentada entre metanol e óleo e concentrações moderadas de catalisador, possibilitando rendimentos superiores a 93% (Alagha *et al.*, 2024).

#### **3.3.4 Eficiência e sustentabilidade da conversão via plasma**

A aplicação da tecnologia de plasma em processos de transesterificação tem sido estudada como uma alternativa eficiente e ambientalmente mais vantajosa, há estudos que indicam que essa tecnologia acelera significativamente a reação, alcançando taxas de conversão de biodiesel de até 99,5% em milissegundos (Wu *et al.*, 2018).

A tecnologia de plasma não-térmico se destaca como promessa para a produção sustentável de biocombustíveis e químicos (Gokhale e Mhetras, 2025). Essa abordagem opera em baixa temperatura e, dependendo do arranjo do reator, pode dispensar o uso de catalisadores ou aceitar impurezas no *feedstock*, reduzindo etapas de pré-tratamento e simplificando a separação dos produtos (Gokhale e Mhetras, 2025) Com o uso de catalisador, observa-se que a ativação promovida pelo plasma favorece a quebra das ligações triglicéridicas e acelera a formação de ésteres, resultando em rendimentos próximos de 98% (Palm, 2022).

Em experimentos realizados com óleo vegetal residual, observou-se um rendimento de 88,58% na produção de ésteres metílicos, com custo de produção estimado em 0,075 USD/L e formação reduzida de subprodutos, como a glicerina (Machado, 2018). Além disso, o processo baseado em plasma apresentou impacto ambiental positivo 96% superior ao da rota convencional, que considera conjuntamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos envolvidos no ciclo produtivo (Machado, 2018).

Na mesma linha, há estudos que investigam rotas catalíticas assistidas por plasma com o objetivo de intensificar a reação de transesterificação e avaliar sua sustentabilidade (Palm, 2022). Observa-se que a combinação entre o plasma e catalisadores como o metilato de sódio ( $\text{NaOCH}_3$ ) e o ácido fosfomolibdico ( $\text{H}_3\text{PMo}$ ) promove alta taxa de conversão e aumento na velocidade das reações, mesmo sob condições amenas de temperatura e pressão (Palm, 2022). As reações ocorrem de forma completa em até 30 minutos, à temperatura ambiente, o que reduz significativamente o consumo energético e elimina a necessidade de etapas convencionais de aquecimento (Palm, 2022).

Olhares voltados para setores mais amplos, como de combustível de aviação, já apontam para aplicações inovadoras e atendimento às exigências de especificações (Nguyen *et al.*, 2024). Apresenta-se métodos de atualização de óleo de pirólise em combustíveis para aviação, utilizando plasma catalítico não-térmico em condições próximas à temperatura ambiente, com rendimento de quase 87 % (Nguyen *et al.*, 2024). Contudo, sua maturidade tecnológica ainda requer investimento em engenharia de reatores, compreensão sobre a eficiência energética em escala industrial e redução de custos operacionais, antes de alcançar adoção generalizada novamente (Chandrasekaran e Aalam, 2024).

No que diz respeito à sustentabilidade do processo, há trabalhos que avaliam a rota via plasma com base em indicadores específicos, como Produtividade em Massa (PM), Teor de Resíduos (TR), Teor de Glicerol (TG), Fator de Energia (FE), Razão de Energia (RE) e Custos de Matéria-Prima (CMP) (Palm, 2022). Entre as condições analisadas, destaca-se aquela com 3,1 kV de tensão, 30 minutos de reação e 0,5% de  $\text{NaOCH}_3$  como a mais eficiente, demonstrando que rotas energeticamente econômicas também podem ser ambientalmente mais vantajosas (Palm, 2022).

### 3.4 Óleo de Rícino

O óleo de rícino, extraído das sementes da planta *Ricinus communis*, destaca-se como uma matéria-prima versátil com amplo potencial industrial. Sua extração pode ocorrer por prensagem — a frio ou a quente — ou ainda por meio da utilização de solventes (Schneider, 2002). O processo envolve etapas como pré-limpeza das sementes, aquecimento em vários estágios, prensagem e degomagem. A clarificação do produto final é realizada com o auxílio de adsorventes, resultando em um óleo de alta pureza (Schneider, 2002).

O óleo obtido possui características que o tornam especialmente atraente para substituição de compostos derivados do petróleo (Schneider, 2002). Sua toxicidade elevada limita a utilização direta para fins alimentícios, tanto humanos quanto animais (Veličković *et al.*, 2025). Um dos seus principais diferenciais está na elevada viscosidade, que se mantém estável mesmo com variações de temperatura, garantindo desempenho superior em diversas aplicações técnicas (Schneider, 2002). Além disso, os subprodutos obtidos durante o cultivo e o processamento da mamona, como caules, folhas e a torta das sementes, podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis, como etanol e biogás (Veličković *et al.*, 2025).

A composição do óleo de rícino pode variar em função de diversos fatores, incluindo o método de extração, a região de cultivo, as condições climáticas, as características do solo, a variedade da planta e o período da colheita (Veličković *et al.*, 2025). O principal constituinte da composição química do óleo de rícino é um triacilglicerol formado predominantemente pelo ácido ricinoleico, um ácido graxo que apresenta 18 carbonos, uma insaturação do tipo cis e uma hidroxila em sua cadeia (Schneider, 2002). Essa estrutura confere ao óleo propriedades químicas particulares, como elevada polaridade e reatividade, facilitando sua modificação por processos químicos, como a esterificação (Schneider, 2002).

Além do ácido ricinoleico, o óleo de rícino contém outros ácidos graxos em menores proporções, como o esteárico, oléico, linoléico, linolênico e palmítico (Schneider, 2002). Essa diversidade contribui para seu comportamento físico-químico e suas possíveis reações de transformação, como a conversão em ésteres. Os ésteres derivados do óleo de rícino são valorizados por suas propriedades lubrificantes, estabilidade térmica e potencial biodegradável (Schneider, 2002).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

- Ácido Clorídrico 37% CAS 7647-01-0 NEON;
- Agitador Magnético com Aquecimento SolidSteel SSAGA10L220V;
- Álcool Metílico (Metanol) LABSYNTH Sinergia Científica;
- Balança Gehaka BK3000;
- Decantador;
- Filtro de papel;
- Fonte de alta tensão 17 kV, 60 Hz, 30 mA, corrente alternada – Neon Em;
- Frasco Âmbar;
- Funil de vidro;
- Hidróxido de Potássio CAS 1310-58-3 Êxodo Científica 56,11g/mol;
- pHmetro Digimed DM-22;
- Picnômetro;
- Reator (solenóide);
- Variac TDGC2-5 220–240 V; 60 Hz; 6,3 A; 1–1,5 kVA.

### 4.2 Aplicação do óleo de rícino na conversão de ésteres

As pesquisas bibliográficas foram conduzidas em bases de dados científicas reconhecidas, incluindo Google Acadêmico, SciELO e ScienceDirect. Para a busca, utilizaram-se como palavras-chave: transesterificação, biodiesel, plasma não-térmico, óleo de rícino, densidade, pH, ácidos graxos e ricinoleico. A partir desse levantamento, foram identificadas as principais propriedades do óleo de rícino relacionadas à sua conversão em ésteres, bem como os desafios técnicos associados à sua utilização no processo de transesterificação. Também foram analisadas as potenciais aplicações desse óleo como matéria-prima para biocombustíveis. Com base nesses dados, tornou-se possível estabelecer comparações entre os parâmetros obtidos antes e após a aplicação do plasma não-térmico.

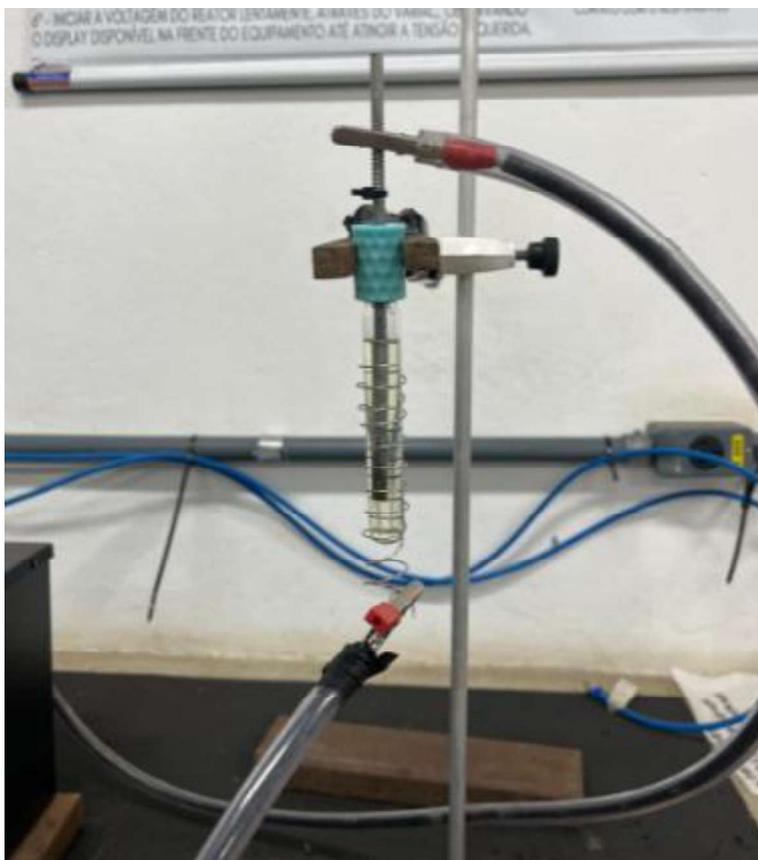
### 4.3 Aplicação da tecnologia de plasma para conversão em ésteres

#### 4.3.1 Parâmetros e condições operacionais

Inicialmente, foram definidos os parâmetros operacionais considerados determinantes para a transesterificação. A razão molar óleo/álcool foi fixada em 1:6 (Warne *et al.*, 2024), enquanto o tempo de reação foi avaliado em três intervalos distintos: 6, 15 e 21 minutos. Antes da adição do metanol, o óleo de rícino foi aquecido até a temperatura de 65°C, favorecendo a miscibilidade entre os reagentes. Todos os experimentos - com e sem catalisador, foram realizados em duplicata, a fim de assegurar maior confiabilidade e reprodutibilidade nos resultados obtidos.

Para as análises sem catalisador, o volume total processado no reator de plasma foi de 7 ml, composto por 5 ml de óleo de rícino e 2 ml de álcool metílico, mantendo-se a proporção estabelecida de 1:6 (óleo/álcool). A figura 1 representa a amostra sem catalisador.

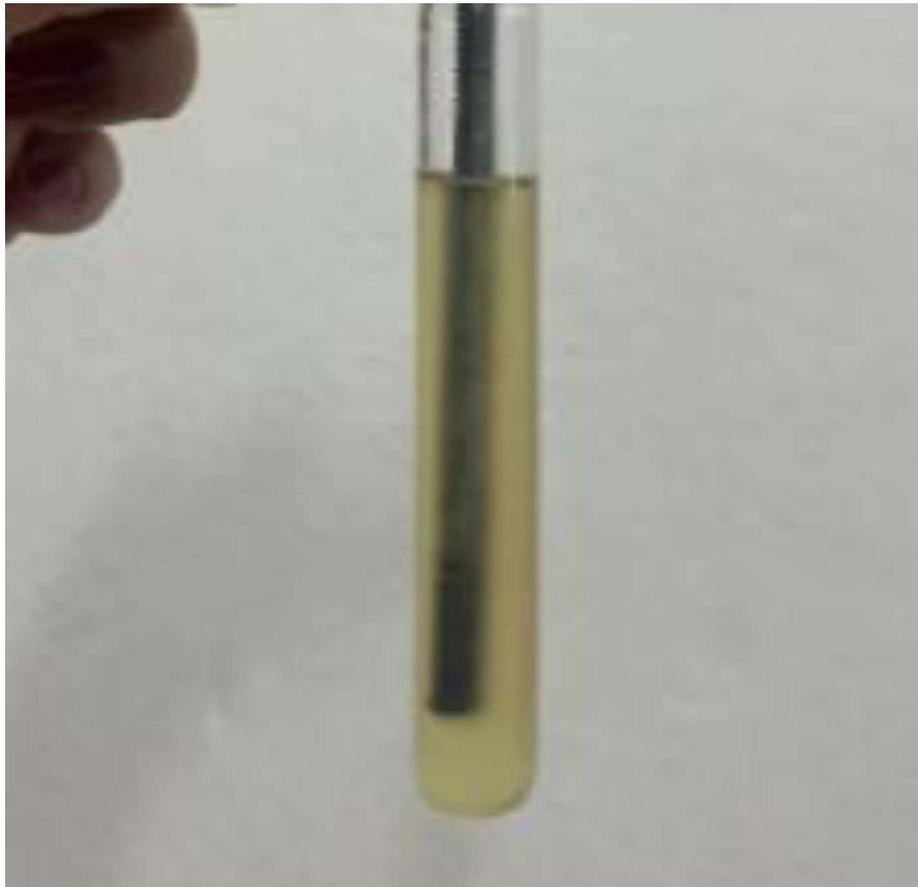
**Figura 1** – Amostra sem catalisador aplicada no reator.



Fonte: Autora, 2025.

Nas amostras com catalisador, utilizou-se o mesmo volume e proporção óleo/álcool. Porém, foram acrescentados de 0,06 g de hidróxido de potássio (KOH), referente a 1% da massa da mistura (6g), previamente dissolvido no metanol antes de sua incorporação ao óleo aquecido. Em todos esses casos, as amostras foram submetidas a etapas de pós-tratamento para a separação e purificação dos ésteres obtidos. A figura 2 representa a amostra com catalisador.

**Figura 2** – Amostra com catalisador antes de ser aplicada ao plasma.



Fonte: Autora, 2025.

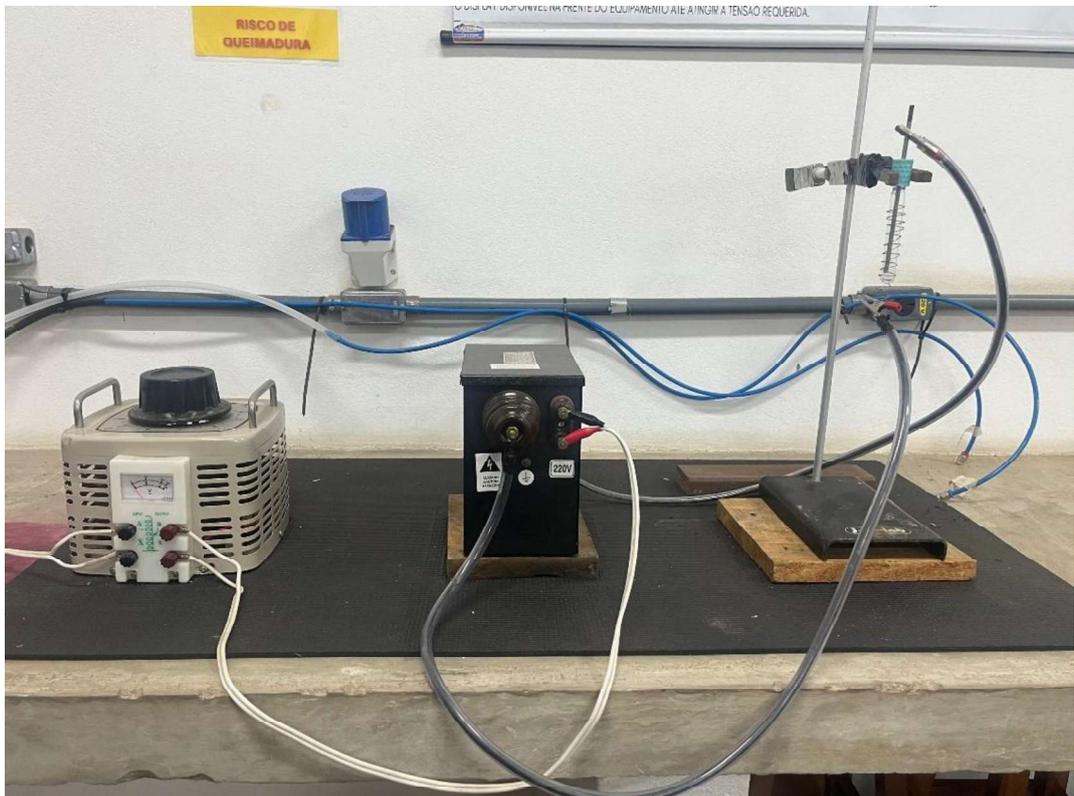
#### **4.3.2** *Testes no reator de plasma*

No processo de conversão de óleo vegetal em ésteres por meio da tecnologia de plasma, a reação de transesterificação ocorreu no interior do reator de plasma após a mistura da matéria-prima (óleo de rícino) com o álcool de cadeia curta (metanol). Sendo assim, foi proporcionado ao reator de plasma não-térmico a reação por meio de uma atmosfera altamente energética, capaz de substituir a catálise química tradicional.

O experimento foi realizado em sistema batelada, onde as amostras foram submetidas à ação do plasma gerado por uma fonte de alta tensão. Para garantir condições controladas durante a transesterificação, a intensidade do plasma foi ajustada por meio da regulação da tensão elétrica aplicada ao reator (160V). Além disso, volumes padronizados de reagentes foram utilizados ao longo dos testes, assegurando a reprodutibilidade dos experimentos e a confiabilidade dos resultados obtidos. Todos os tratamentos por plasma foram realizados em duplicata. As duplicatas corresponderam aos tempos de reação de 6, 15 e 21 minutos, conduzidos tanto na ausência quanto na presença de catalisador, totalizando 12 amostras processadas.

A bancada experimental foi montada de forma semelhante à apresentada na Figura 3, composta por um tubo de vidro acoplado a um eletrodo central e circundado por um solenoide, conectado a uma fonte de alta tensão (17 kV, 60 Hz, 30 mA, corrente alternada – Neon En) e alimentado por um variador de tensão (Variac TDGC2-5 220–240 V; 60 Hz; 6,3 A; 1–1,5 kVA) conectado em uma tomada. Esse arranjo permitiu a geração e manutenção da descarga elétrica no interior do reator.

**Figura 3 – Bancada experimental.**



O efeito das descargas elétricas sobre as moléculas do óleo foi monitorado ao longo do processo, avaliando-se parâmetros como tempo de exposição e variação da tensão elétrica. Após a conversão, as amostras foram submetidas a análises para quantificar a formação de ésteres e avaliar a qualidade do produto final. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles da caracterização inicial do óleo de rícino, permitindo identificar modificações estruturais e a taxa de conversão atingida.

#### **4.3.3 Pós tratamento das amostras**

Na reação de transesterificação, os triglicerídeos reagem com um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador. Nessa reação, ocorre a troca do radical alcoólico da ligação éster: os ácidos graxos ligados ao glicerol passam a se ligar ao álcool, formando ésteres de ácidos graxos (biodiesel). A estrutura central de glicerol ( $C_3H_8O_3$ ), antes ligada aos ácidos graxos, se separa e é liberada como subproduto (Marchetti, 2011). A figura 4 permite a visualização clara do glicerol.

**Figura 4** – Amostra com catalisador após plasma.



Fonte: Autora, 2025.

Desta forma foi implementado etapas de pós-tratamento, que foram constituídas por: decantação, lavagem e filtração, a fim de limpar o material e ajudar no metanol em excesso.

Para as amostras sem catalisador, realizou-se apenas a filtração, conforme apresentado na Figura 5.

**Figura 5** – Filtração de amostra sem catalisador.



Fonte: Autora, 2025.

A primeira etapa de pós-tratamento consistiu na decantação em funil separador por gravidade durante 1 hora, permitindo a separação das fases devido à imiscibilidade entre glicerol e biodiesel, conforme figura 6.

**Figura 6 – Primeira decantação.**

Fonte: Autora, 2025.

Ao final, a fase inferior, rica em glicerol, foi removida, enquanto a fase superior, contendo o biodiesel, foi coletada para a etapa seguinte.

Na segunda etapa, foram realizadas duas lavagens sucessivas, nas amostras com catalisador, com solução aquosa acidificada, preparada com água em temperatura ambiente e ácido clorídrico (HCl) a 37%, na proporção de 0,11 ml de HCl para 10 ml de água destilada. Após homogeneização da mistura biodiesel/solução ácida, procedeu-se à decantação por mais 1 hora em cada lavagem, visando remover

resíduos de catalisador, metanol e glicerol remanescente. A operação de lavagem pode ser vista através da figura 7.

**Figura 7** – Pós tratamento plasma, etapa de lavagem.



Fonte: Autora, 2025.

Por fim, realizou-se a filtração do biodiesel para a remoção de partículas sólidas e impurezas em suspensão, assegurando maior clareza e qualidade do produto final, conforme figura 8. Todas amostras foram armazenadas em um frasco de vidro âmbar.

**Figura 8** – Filtragem da amostra com catalisador.



Fonte: Autora, 2025.

#### **4.4 Avaliação dos produtos para uso como biocombustível**

##### **4.4.1 Densidade e pH**

Para medir a densidade, calibrou-se o picnômetro de 2 ml, determinando a massa do frasco limpo e seco (massa do vazio). Em seguida, o picnômetro foi preenchido com água destilada na mesma temperatura das medições, seco externamente e novamente pesado. A massa de água corresponde à diferença entre as duas pesagens; conhecendo-se a densidade da água nessa temperatura, obteve-se o volume efetivo do picnômetro.

Com o volume efetivo do picnômetro determinado, cada amostra foi analisada pelo mesmo procedimento: o picnômetro foi preenchido com a amostra, seco

externamente e pesado; a massa da amostra foi calculada por diferença em relação ao vazio e a densidade foi dada pela divisão da massa da amostra pelo volume efetivo do picnômetro. As leituras de densidade foram referidas a 20 °C por meio de correção de temperatura, adotando as tabelas de conversão de densidade e de volume previstas na Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022.

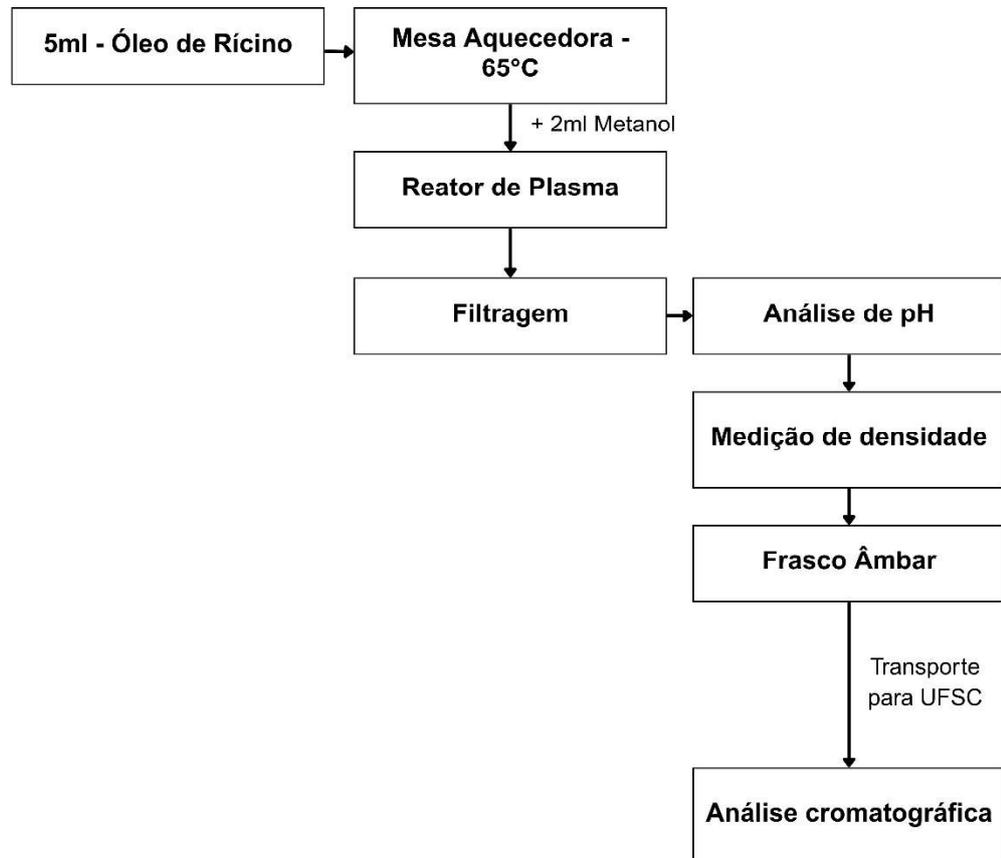
Ao final do processo, após o tratamento pós-plasma, o pH foi determinado com pHmetro, previamente calibrado e acompanhado por medição de temperatura com termômetro. Considerando que pH não é um parâmetro aplicável ao biodiesel puro, mediu-se para análise do papel do plasma.

#### **4.4.2 *Análise cromatográfica***

O objetivo desta análise é identificar e quantificar os ésteres metílicos formados na reação, confirmando a eficiência do processo de transesterificação. A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) foi escolhida por permitir a separação, detecção e análise precisa de compostos orgânicos voláteis presentes nas amostras.

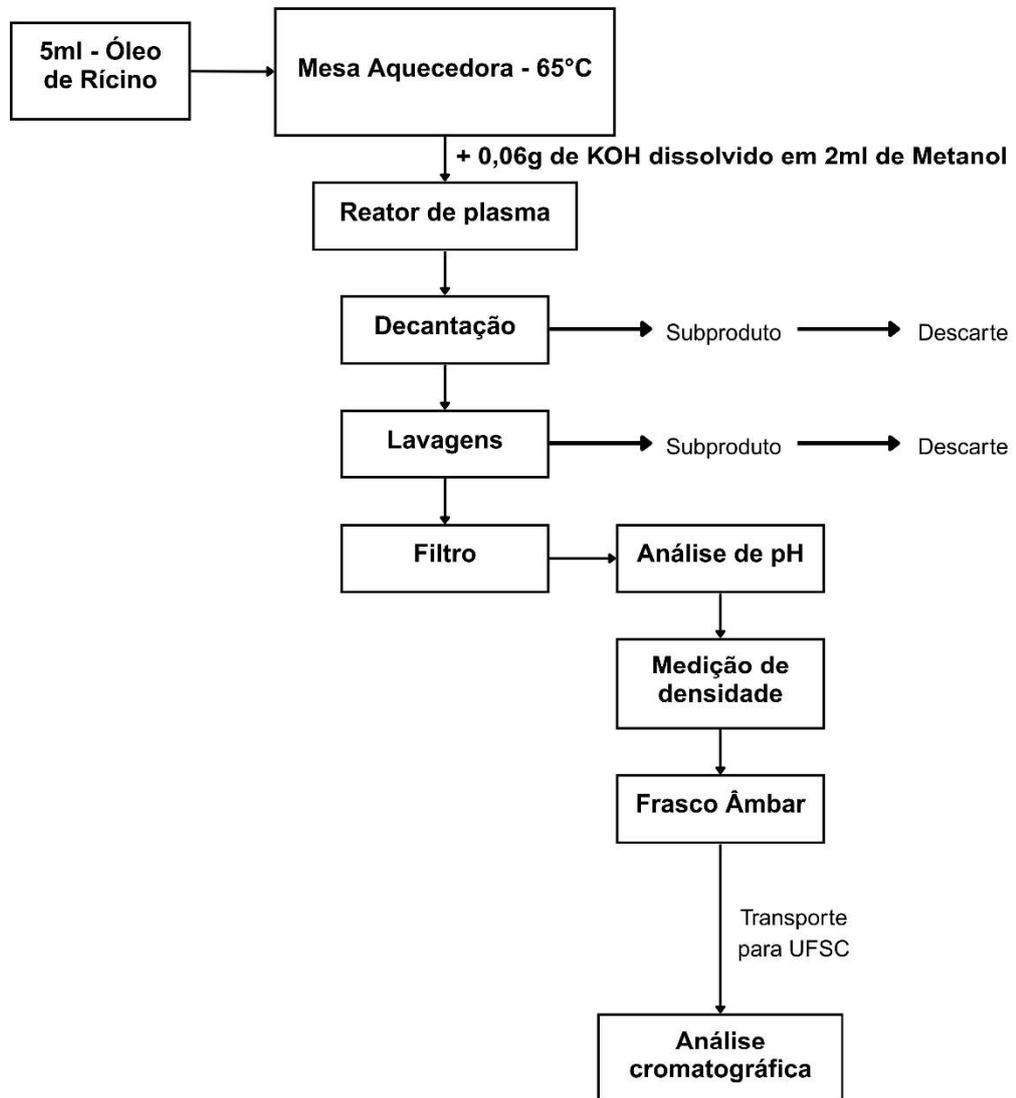
As amostras foram previamente diluídas e filtradas para remover possíveis impurezas e, em seguida, injetadas no cromatógrafo a gás (CG) acoplado a um espectrômetro de massas. O equipamento estava configurado com uma coluna capilar específica para separação dos ésteres metílicos, garantindo melhor resolução cromatográfica.

O detector utilizado foi o de ionização por chama (FID), sensível às espécies orgânicas contendo carbono, permitindo a quantificação dos compostos por meio da área dos picos cromatográficos. Os parâmetros operacionais seguiram os protocolos estabelecidos pelo laboratório parceiro da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), responsável pela execução das análises. Ou seja, a análise cromatográfica foi o último da metodologia, conforme a figura 9 (sem catalisador) e figura 10 (com catalisador).

**Figura 9** – Fluxograma da metodologia das amostras sem catalisador.

Fonte: Autora, 2025.

**Figura 10** - Fluxograma da metodologia das amostras com catalisador.



Fonte: Autora, 2025.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Propriedades e desafios na conversão do óleo de ricino em ésteres

Na transesterificação do óleo de ricino, aumentar a razão molar entre o álcool e o óleo é uma prática comum para maximizar o rendimento da reação (Veličković *et al.*, 2025). No entanto, o uso excessivo de metanol pode dissolver o glicerol formado, dificultando a separação das fases. Isso compromete a eficiência do processo e reduz a pureza final do biodiesel (Veličković *et al.*, 2025).

Quantidades elevadas de metanol também provocam diluição do catalisador, interferindo negativamente na cinética da reação (Veličković *et al.*, 2025). Além disso, o acúmulo de álcool pode gerar uma mistura altamente viscosa, que dificulta o contato entre os reagentes (Veličković *et al.*, 2025). A presença excessiva de moléculas de álcool nos sítios ativos prejudica o desempenho catalítico (Veličković *et al.*, 2025).

Essa ocupação indevida dos sítios do catalisador sólido limita sua reutilização em reações subsequentes. Isso não só diminui a eficiência do sistema como também eleva os custos operacionais, principalmente com a recuperação e purificação do metanol residual (Veličković *et al.*, 2025). O impacto econômico dessa etapa é significativo, especialmente em escala industrial (Veličković *et al.*, 2025).

O óleo de rícino, também conhecido como óleo de mamona, é um triglicerídeo composto majoritariamente por ácidos graxos com elevada presença de ácido ricinoleico (Schneider, 2002). Esse ácido representa cerca de 90% da composição total dos ácidos graxos presentes no óleo, sendo o principal responsável por suas propriedades físico-químicas características (Schneider, 2002). A Tabela 1 apresenta a composição de ácidos graxos do óleo de rícino, evidenciando o predomínio do ácido ricinoleico (Binder *et al.*, 1962).

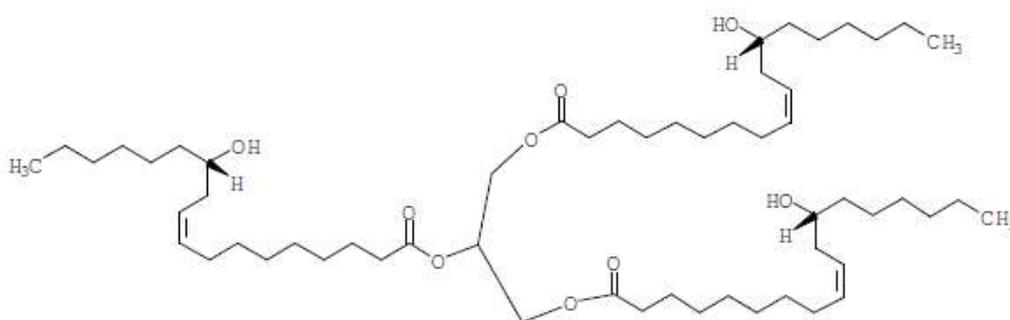
**Tabela 1** - Composição de Ácidos Graxos de Óleos de Rícino.

ÁCIDO GRAXO	COMPOSIÇÃO (%)	SATURAÇÃO
RICINOLÉICO	87,7 ~ 90,4	C18:1
LINOLÉICO	4,1 ~ 4,7	C18:2
OLÉICO	2,0 ~ 3,3	C18:1
PALMÍTICO	0,8 ~ 1,1	C16:0
ESTEÁRICO	0,7 ~ 1,0	C18:0
DIIDROXIESTEÁRICO	0,6 ~ 1,1	C18:0
LINOLÊNICO	0,5 ~ 0,7	-

Fonte: (Binder *et al.*, 1962) e (Schneider, 2002).

A estrutura do ácido ricinoleico, chamado triricinoleína (Figura 11), possui 18 átomos de carbono, com uma insaturação na posição 9 e um grupo hidroxila na posição 12 (Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia, 2004). Essa configuração estrutural confere ao óleo de rícino características únicas entre os óleos vegetais, como elevada viscosidade (Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia, 2004). Essas propriedades tornam o óleo particularmente interessante para aplicações industriais, como na produção de lubrificantes, plastificantes e biodiesel (Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia, 2004).

**Figura 11** – Fórmula estrutural da triricinoleína.



Fonte: (Schneider, 2002).

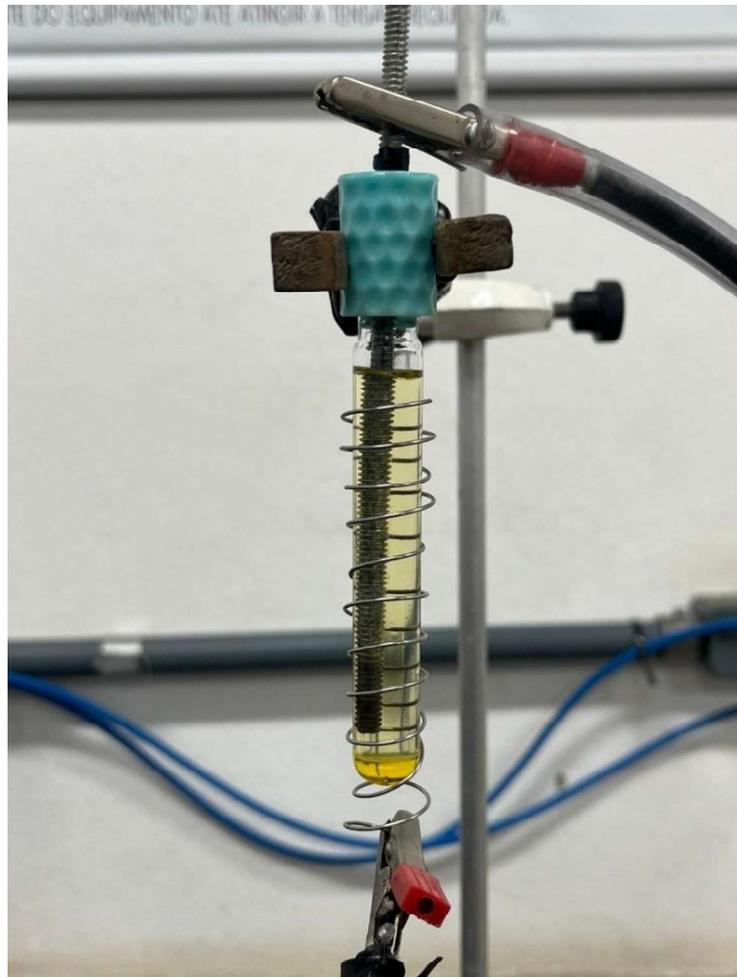
Além disso, a presença do grupo hidroxila permite reações químicas específicas, como esterificação e transesterificação, facilitando sua conversão em ésteres por diferentes rotas catalíticas ou tecnologias emergentes, como o uso de plasma (Schneider, 2002). O óleo apresenta ainda boa estabilidade oxidativa e baixa volatilidade, reforçando seu potencial como matéria-prima renovável em diversos processos (Schneider, 2002).

Outro parâmetro relevante é a temperatura da reação. Quando aumentada, ela reduz a viscosidade do óleo e acelera a conversão dos triglicerídeos (Veličković *et al.*, 2025). Entretanto, temperaturas acima do ponto de ebulição do metanol favorecem sua evaporação. Como consequência, há perda de reagente e diminuição do rendimento global do biodiesel (Veličković *et al.*, 2025). Além disso, altas temperaturas podem intensificar reações secundárias indesejadas, como a saponificação. Isso ocorre principalmente pela maior taxa de degradação de intermediários e reagentes sob calor excessivo (Veličković *et al.*, 2025).

## 5.2 Aplicação do plasma não-térmico para conversão em ésteres

A transesterificação do óleo de rícino pode enfrentar dificuldade na separação das fases (biodiesel/glicerol), pois o glicerol se mostra mais solúvel em álcoois, dificultando a decantação (Oliveira *et al.*, 2011). Entretanto, neste trabalho, desde os primeiros minutos na aplicação do plasma não-térmico era possível observar a formação do glicerol, decantando-se naturalmente para o fundo, conforme figura 12, permitindo a separação gravitacional entre biodiesel (fase superior) e glicerol (fase inferior), isso se dá pela densidade superior do glicerol (Knothe, Gerpen e Krahl, 2005).

**Figura 12** – Amostra com catalisador durante a reação.



Fonte: Autora, 2025.

A viscosidade também constitui uma das principais propriedades físico-químicas dos biodieseis, pois interfere diretamente no funcionamento do sistema de

injeção (Mejía, Salgado e Orrego, 2013). Em temperaturas reduzidas, esse efeito se intensifica, já que o aumento da viscosidade prejudica a fluidez do combustível (Mejía, Salgado e Orrego, 2013). A tabela 2 mostra a viscosidade estabelecida para o biodiesel comercializado no Brasil, o biodiesel de origem do óleo de rícino e do próprio óleo de rícino.

**Tabela 2 - Viscosidades**

<b>Tipo</b>	<b>Viscosidade (mm<sup>2</sup>/s) a 40°C</b>	<b>Referência</b>
Biodiesel	3,00 a 5,00	(ANP, 2023)
Biodiesel derivado do óleo de Rícino	14,14	(Al-Sbani <i>et al.</i> , 2025)
Óleo de Rícino	208,25	(Encinar <i>et al.</i> , 2020)

Embora a viscosidade não tenha sido quantificada neste ensaio, foi possível observar visualmente que o produto obtido após o tratamento em plasma apresentou menor viscosidade em comparação ao óleo de rícino in natura.

### **5.3 Produtos formados após a conversão por plasma não-térmico**

#### **5.3.1 Comparativos de densidade e pH**

A massa específica, também denominada densidade, é uma propriedade física que expressa a relação entre a massa de um material e o volume que ele ocupa. No caso dos combustíveis utilizados em motores, esse parâmetro indica o grau de compactação da matéria. Assim, quanto mais compacta estiver a estrutura molecular de uma substância, maior será o valor de sua densidade (Damian *et al.*, 2011). A densidade do óleo de rícino in natura é 960 kg/m<sup>3</sup> (Casa dos Químicos, 2025).

As amostras sem catalisador obtidas foram caracterizadas quanto a sua densidade. Os resultados dessa caracterização são apresentados na tabela 3.

**Tabela 3 – Densidade das amostras sem catalisador.**

<b>Sem catalisador (20°C) - Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Tempo (min.)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Médias</b>
6	858,3	885,4	871,85
15	883,4	863,3	873,35
21	897,4	919,4	908,4

Fonte: Autora, 2025.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 3, verifica-se que a maioria das amostras analisadas apresentou valores de densidade dentro da faixa estabelecida pela ANP, que exige, para fins de comercialização do biodiesel, densidade entre 850 kg/m<sup>3</sup> e 900 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C. Apenas a Amostra 2, no tempo de 21 minutos, apresentou valor superior a esse intervalo.

As amostras com catalisador obtidas foram caracterizadas quanto a sua densidade. Os resultados dessa caracterização são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4 - Densidade das amostras com catalisador.**

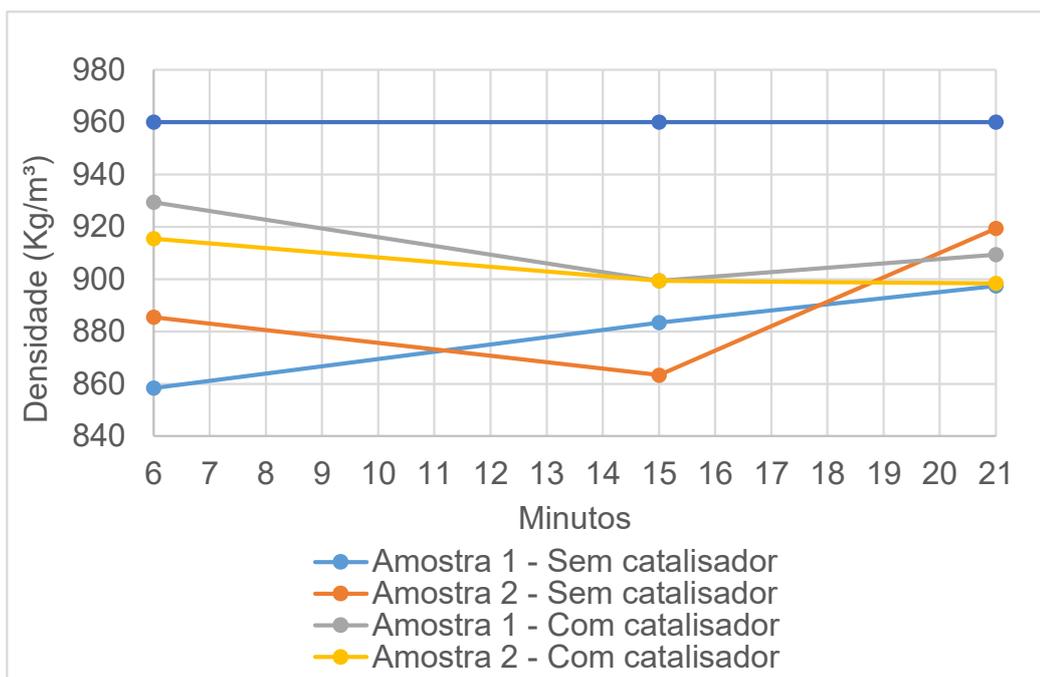
<b>Com catalisador (20°C) - Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Tempo (min.)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Médias</b>
6	929,4	915,4	922,4
15	899,4	899,4	899,4
21	909,4	898,4	903,9

Fonte: Autora, 2025.

Já nas amostras com catalisador, os resultados ficam divididos, pois 3 amostras ficaram com valor superior ao esperado (amostra 1 de 6 minutos, amostra 2 de 6

minutos e amostra 1 de 21 minutos). Entende-se que isso pode acontecer por falha nos processos de lavagem e purificação, pois o produto final pode-se ainda encontrar-se com resíduos de óleo, glicerol, metanol e água. Em geral, todas as amostras tiveram resultados diferentes da densidade do óleo de rícino in natura de  $960 \text{ kg/m}^3$  (Produtos Sodacasa, 2022), conforme o gráfico 1.

**Gráfico 1** – Comparativo das densidades.



Fonte: Autora, 2025.

Todas as amostras também passaram pela avaliação de pH, a fim de entender o efeito do plasma sobre ele. Os resultados podem ser encontrados na tabela 5.

**Tabela 5** – Análise do pH de todas amostras.

Sem catalisador - pH				Com catalisador - pH			
Amostras	1	2	Média	Amostras	1	2	Média
6 minutos (16,7 °C)	5,2	5,3	5,3 ± 0,1	6 minutos (20,2 °C)	7,3	8,1	7,7 ± 0,6
15 minutos (18,5 °C)	6,3	5,4	5,9 ± 0,6	15 minutos (21,2 °C)	6,2	8,2	7,2 ± 1,4
21 minutos (19,9 °C)	5,3	5,6	5,5 ± 0,2	21 minutos (20,3 °C)	7,5	7,5	7,5 ± 0

Fonte: Autora, 2025.

A análise dos resultados evidencia que as amostras sem catalisador apresentaram valores de pH mais baixos, caracterizando um meio relativamente mais ácido, assim como o pH do próprio óleo de rícino, que varia de 6,5 a 7,0 (Produtos Sodacasa, 2022). Por outro lado, nas amostras com catalisador, os valores de pH se aproximaram da faixa neutra a levemente básica, indicando que o catalisador exerceu maior influência no sistema. Nesse caso, a ação do plasma foi menos determinante para a acidez, uma vez que a presença do catalisador já direcionou o meio para condições mais básicas.

Na presença de ar atmosférico, o tratamento por plasma não-térmico resulta na formação de espécies reativas, entre as quais se destacam  $H_2O_2$  e  $O_3$ , que reduzem o pH da solução e elevam o potencial de oxidação-redução (ORP), conferindo ao meio caráter oxidante e acidificado (Wong, Chew e Tan, 2023). Além disso, também são formados radicais de curta duração, como o  $\bullet OH$ , que contribuem para a alta reatividade do sistema (Wong, Chew e Tan, 2023). Em processos envolvendo plasma não-térmico, pesquisas já identificaram formações de radicais derivados do álcool — como  $CH_2OH\bullet$  e  $CH_3O\bullet$  — gerados a partir da fragmentação do metanol (Ulejczyk *et al.*, 2021), evidenciando que esses compostos podem atuar como intermediários reativos ou catalisadores em meio líquido e potencialmente afetar a química local, inclusive o pH.

#### 5.4 Cromatografia

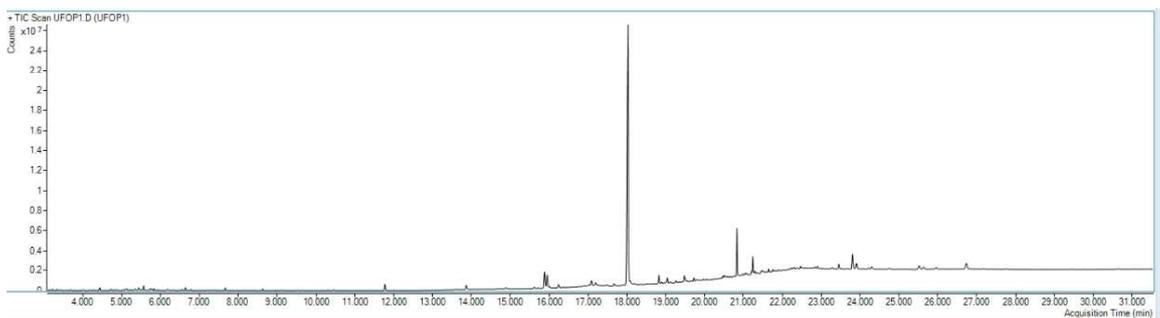
A verificação do teor de ésteres metílicos de ácidos graxos é uma das formas mais utilizadas para avaliar a qualidade do biodiesel (Farouk *et al.*, 2024). Esse controle costuma ser feito por técnicas cromatográficas, como a cromatografia gasosa (CG) ou a líquida de alta eficiência (CLAE), capazes de identificar e quantificar cada componente presente (Farouk *et al.*, 2024). A Resolução ANP nº 920/2023 estabelece que o biodiesel deve apresentar pelo menos 96,5% em massa de teor de éster, parâmetro que expressa não apenas a eficiência da conversão da matéria-prima em biodiesel, mas também a garantia de que o produto final tenha a qualidade necessária para a mistura com o óleo diesel (Araujo, 2024). A análise de teor de éster das amostras sem catalisador foi feita pela equipe da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e pode observada na tabela 6.

**Tabela 6** – Teor de éster das amostras sem catalisador.

Amostras sem catalisador	Tempo (min.)	Teor de éster (%)	Cromatografia
1	6	12,39	Figura 13
2	6	1,095	Figura 14
1	15	1,512	Figura 15
2	15	1,199	Figura 16
1	21	0,169	Figura 17
2	21	0,146	Figura 18

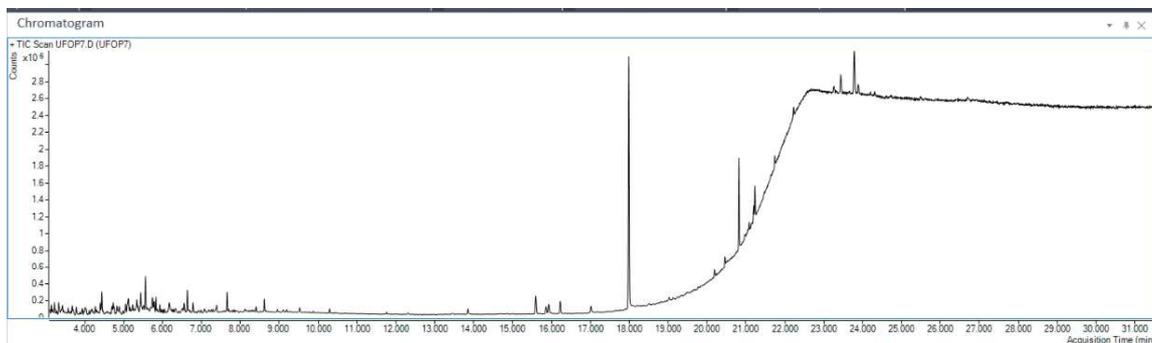
Fonte: UFSC, adaptado pela autora (2025).

A seguir, são apresentados os cromatogramas obtidos por meio das análises de CG-MS das amostras sem catalisador, realizados com o objetivo de verificar o teor de ésteres nas amostras.

**Figura 13** – Cromatograma 1: primeira amostra de 6 minutos, sem catalisador.

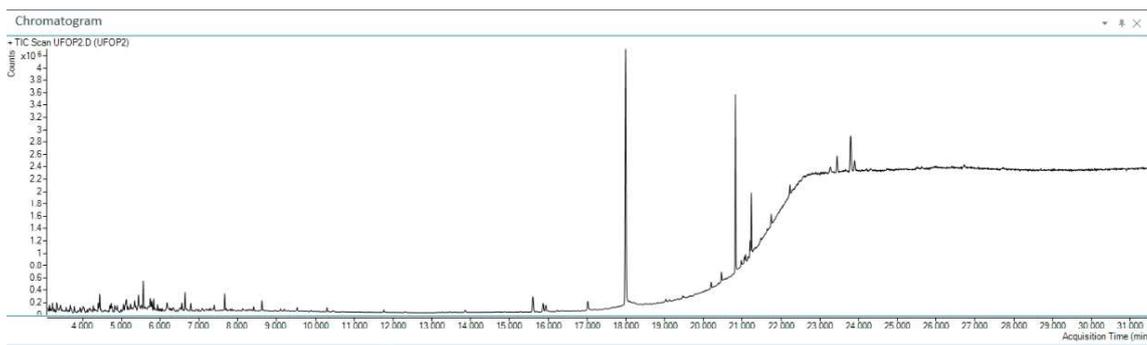
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 14** – Cromatograma 2: segunda amostra de 6 minutos, sem catalisador.



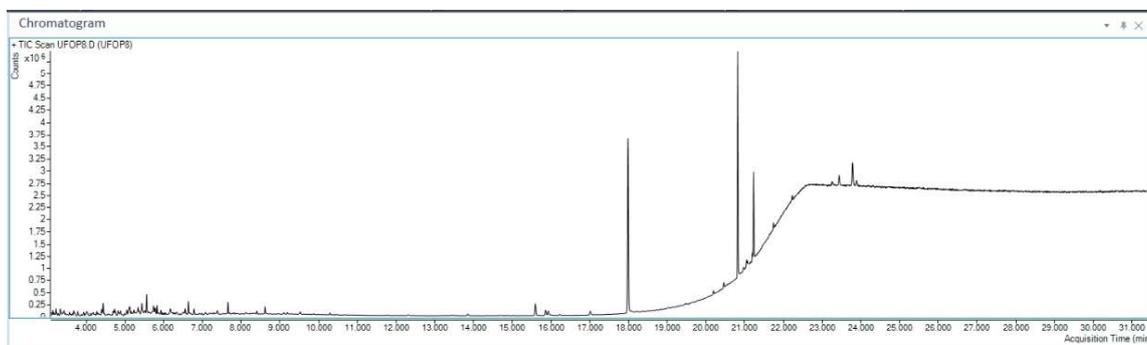
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 15** – Cromatograma 3: primeira amostra de 15 minutos, sem catalisador.



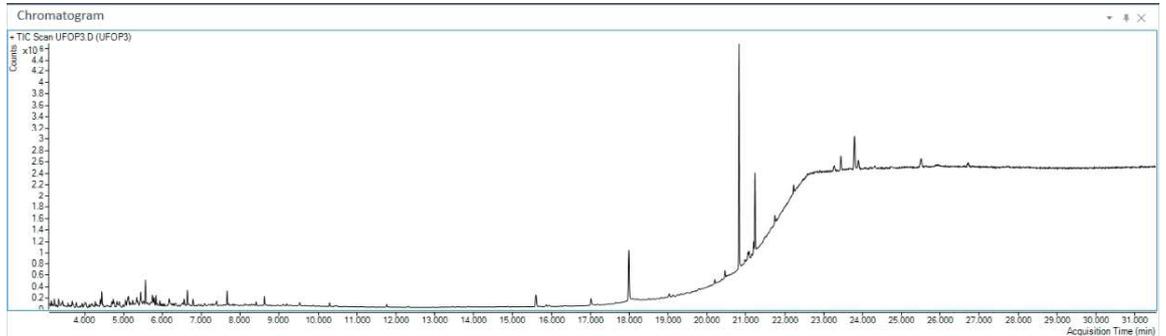
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 16** – Cromatograma 4: segunda amostra de 15 minutos, sem catalisador.



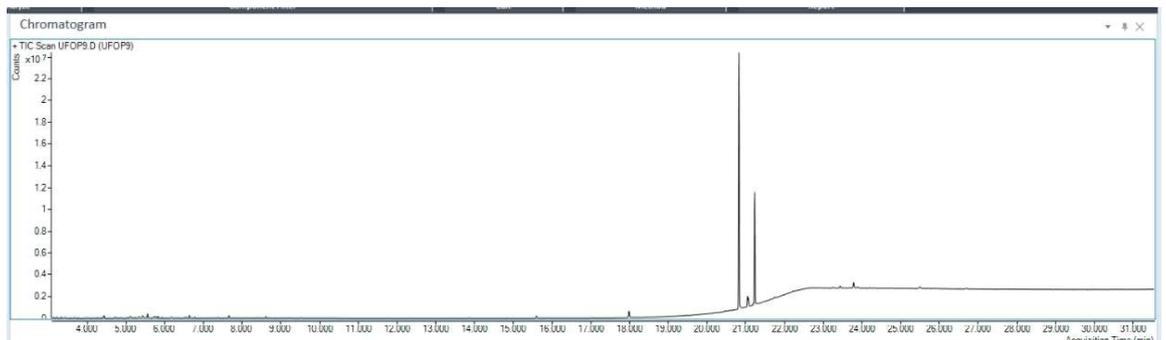
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 17** – Cromatograma 5: primeira amostra de 21 minutos, sem catalisador.



Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 18** – Cromatograma 6: segunda amostra de 21 minutos, sem catalisador.



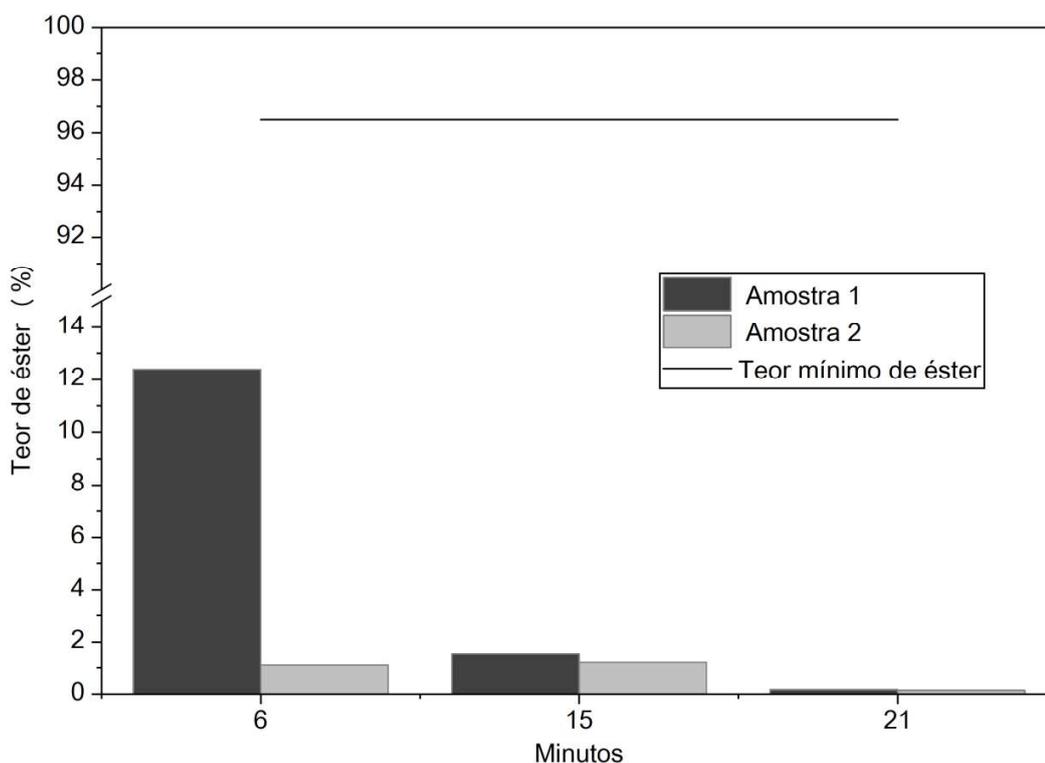
Fonte: UFSC, 2025.

A análise dos dados de GC-MS, apresentados nas figuras, evidenciou picos correspondentes a compostos com grupos hidroxila ( $-OH$ ). A presença desses grupos pode estar associada à geração de espécies reativas de oxigênio, em especial radicais hidroxila ( $\bullet OH$ ), durante o tratamento por plasma (Fridman, 2008).

Nos cromatogramas das amostras tratadas apenas com plasma, sem a presença de catalisador, observa-se a ocorrência de picos do C18 que mostra a formação de ésteres e do C16 que é característica da composição do óleo de rícino. Em geral, os cromatogramas mostram que não são amostras com boas formações de ésteres, altos picos de impurezas.

Nos reatores, a tensão aplicada apresenta um ponto de operação ideal, o qual varia conforme características do reagente, indica-se que a elevação inicial da tensão tende a favorecer o rendimento da conversão em biodiesel (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Por isso, foi feita a análise em diferentes tempos, a fim de observar resultados com menores custos energéticos. O gráfico 2 mostra que apesar de diferentes aplicações de tempo, sem catalisador não houve avaliação de eficiência energética ou viabilidade do processo, comparando ao teor mínimo solicitado pela ANP.

**Gráfico 2** – Comparação do teor de éster mínimo em Resolução ANP e valores encontrados nas amostras sem catalisador.



Fonte: Autora, 2025.

Nas condições aplicadas, o uso do plasma isolado não resultou em conversões expressivas, permanecendo abaixo de 12,39%. O fato da amostra 1 de 6 minutos ter apresentado um valor distante das outras amostras pode ter acontecido por erro operacional. Esse desempenho sugere que, na ausência de catalisador, faltam sítios ativos capazes de direcionar a transesterificação, de modo que, embora espécies reativas sejam geradas, o equilíbrio entre ativação e seletividade não favorece a

formação de ésteres. Além disso, a variação do tempo de exposição, entre 6 e 21 minutos, não se traduziu em aumento significativo no teor obtido, o que reforça a hipótese de limitações cinéticas e de transferência de massa quando o processo é conduzido sem catalisador.

Inserir o catalisador junto ao plasma não-térmico tem se mostrado uma alternativa eficiente para direcionar a reação à formação de biodiesel (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Nesse ambiente, os elétrons acelerados geram diferentes espécies reativas, íons, radicais, moléculas excitadas ou átomos, que interagem com a superfície porosa do catalisador (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022). Essa interação potencializa o contato entre os reagentes adsorvidos e as espécies formadas no plasma, favorecendo o avanço da reação (Asghari, Samani e Ebrahimi, 2022).

Na produção de biodiesel em escala industrial, os catalisadores básicos homogêneos figuram entre as escolhas mais recorrentes, incluindo o hidróxido de potássio (KOH) (Maroa e Inambao, 2021). Esse tipo de catalisador se sobressai por elevada atividade catalítica, tempos de reação reduzidos, simplicidade nas condições de operação, além de baixo custo e ampla disponibilidade (Maroa e Inambao, 2021). Por isso, os testes também foram aplicados para amostras com catalisador e os teores de ésteres encontrados são apresentados na tabela 7.

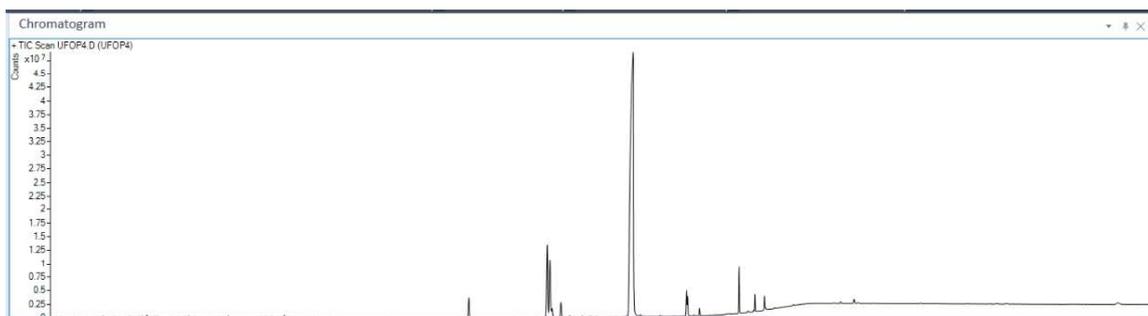
**Tabela 7 - Teor de éster das amostras sem catalisador.**

<b>Amostras com catalisador</b>	<b>Minutos</b>	<b>Teor de éster (%)</b>	<b>Cromatografia</b>
1	6	74,31	Figura 19
2	6	77,87	Figura 20
1	15	63,09	Figura 21
2	15	66,41	Figura 22
1	21	81,599	Figura 23
2	21	90,13	Figura 24

Fonte: Fonte: UFSC, adaptado pela autora.

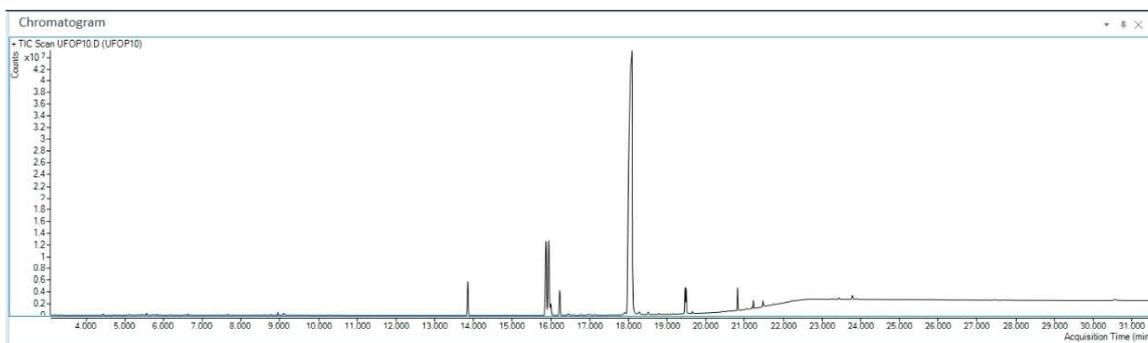
A seguir, são apresentados os cromatogramas obtidos por meio das análises de CG-MS das amostras com catalisador, realizados com o objetivo de verificar o teor de ésteres nas amostras.

**Figura 19** – Cromatograma 7: primeira amostra de 6 minutos, com catalisador.



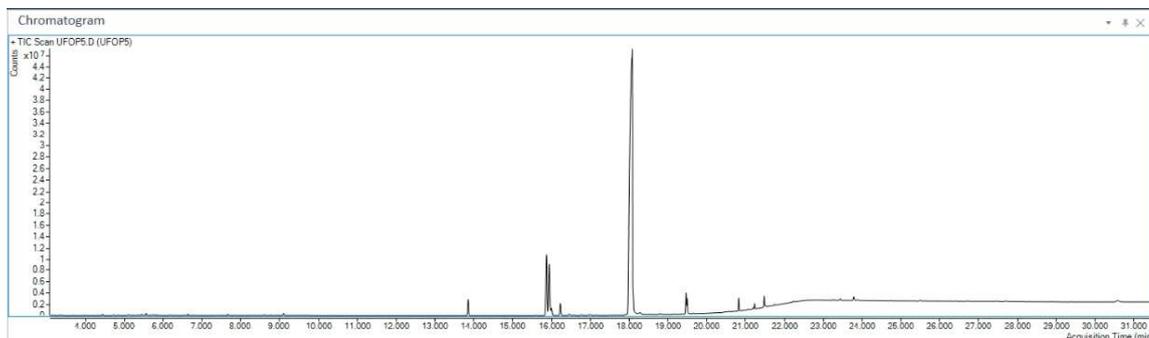
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 20** – Cromatograma 8: segunda amostra de 6 minutos, com catalisador.



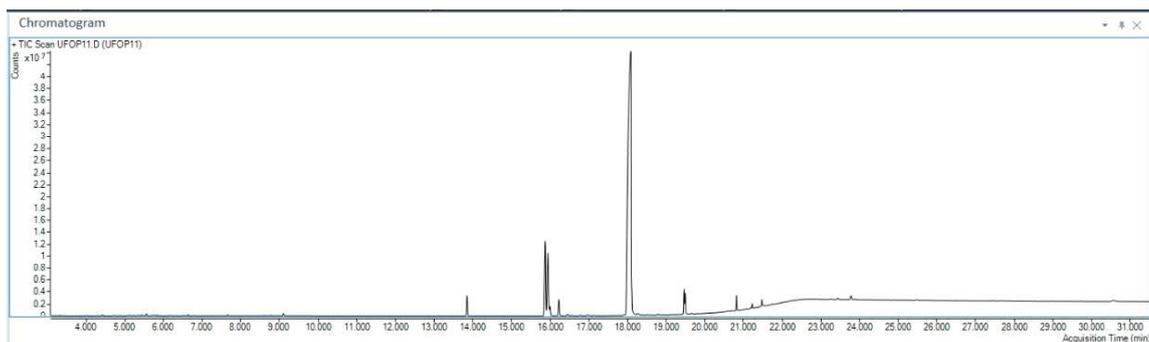
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 21** – Cromatograma 9: primeira amostra de 15 minutos, com catalisador.



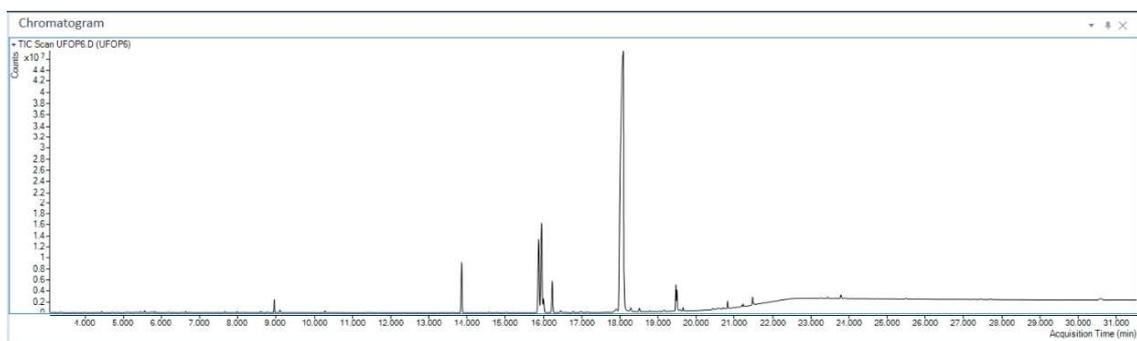
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 22** – Cromatograma 10: segunda amostra de 15 minutos, com catalisador.



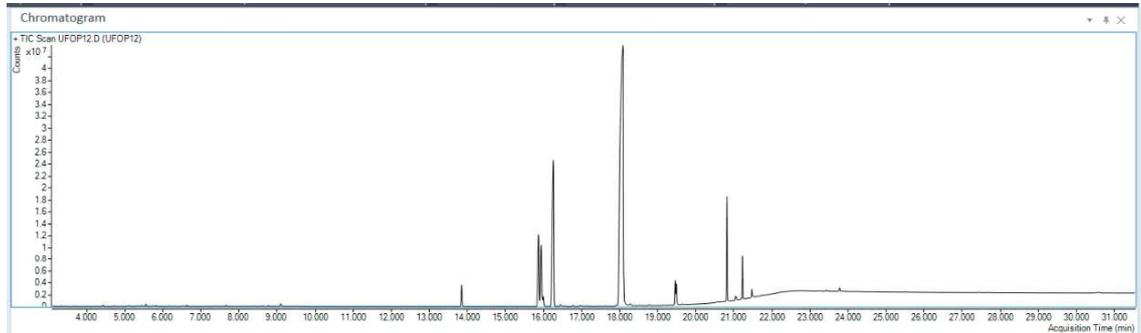
Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 23** – Cromatograma 11: primeira amostra de 21 minutos, com catalisador.



Fonte: UFSC, 2025.

**Figura 24** – Cromatograma 12: segunda amostra de 21 minutos, com catalisador.

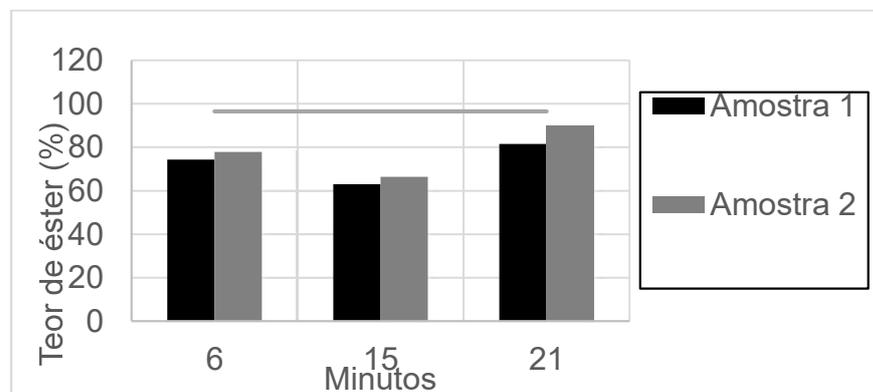


Fonte: UFSC, 2025.

Nos cromatogramas das amostras tratadas com a presença de catalisador, observa-se que, em geral, são picos altos e finos, que demonstram maior formação de ésteres. O grande ponto dessa análise é que além de bons teores de ésteres, o catalisador apresentou grande funcionalidade. Pode-se observar também que os pontos de impurezas são muito inferiores em comparação às amostras sem catalisador, garantindo um produto final mais limpo. Destaca-se os cromatogramas 7, 9, 10, 11 e 12, por apresentarem picos altos e finos, ou seja, essas são as melhores formações de ésteres e as menores interferências de impurezas.

O gráfico 3 evidencia a importância e dependência do catalisador na conversão do biodiesel, oferecendo resultados promissores e mais próximos aos estabelecidos pela resolução da ANP.

**Gráfico 3** - Comparação do teor de éster mínimo em Resolução ANP e valores encontrados nas amostras com catalisador.



Fonte: Autora, 2025.

A queda nas amostras de 15 minutos pode indicar variabilidade experimental, efeito que indica saponificação pontual (água/ácidos graxos livres), ou regime de mistura/descarga ainda não otimizado.

Os resultados indicam que o plasma isolado, a 160 V, não promoveu conversões expressivas, ao passo que a introdução de KOH elevou o teor de éster para até 90,13% em 21 min, sendo o melhor resultado encontrado. Embora promissores, os valores ainda não atingem o mínimo regulatório (96,5% m/m), evidenciando a necessidade de otimização integrada de razão molar, carga de catalisador e condições de descarga.

É possível observar, ainda, que à medida que o tempo de tratamento aumenta de 6 para 21 minutos, observa-se um aumento na conversão em ésteres para ambas as amostras. O aumento da conversão com o tempo está relacionado ao maior tempo de exposição dos reagentes, favorecendo o equilíbrio da reação de esterificação ou transesterificação, evidenciada pela estabilização das descargas do sistema de plasma.

## **6 CONCLUSÃO**

A caracterização do óleo de rícino como matéria-prima evidenciou suas particularidades, especialmente a elevada viscosidade e densidade decorrentes da presença do ácido ricinoleico. Esse resultado permitiu atingir o objetivo de caracterizar o óleo de rícino in natura e avaliar suas propriedades físico-químicas, revelando os principais entraves à transesterificação e justificando a necessidade de tecnologias alternativas para sua conversão em biocombustível.

A aplicação do plasma não-térmico promoveu alterações perceptíveis nas propriedades do óleo, como a redução da viscosidade e a variação do pH em amostras tratadas sem catalisador. Dessa forma, foi possível cumprir o objetivo de analisar os efeitos do tratamento por plasma sobre o óleo de rícino, comprovando que a tecnologia é capaz de induzir transformações químicas, ainda que com limitações em termos de rendimento global.

A avaliação do teor de ésteres em amostras sem catalisador revelou rendimentos baixos, inferiores a 12,39%, mesmo com diferentes tempos de exposição. Esse resultado atendeu ao objetivo de avaliar a viabilidade da conversão por plasma sem o uso de catalisadores, demonstrando que a técnica, quando aplicada

isoladamente, não é capaz de atingir os níveis mínimos de qualidade definidos pela ANP, o que reforça a necessidade de condições adicionais para viabilizar o processo.

A utilização do catalisador KOH associada ao plasma não-térmico elevou significativamente os teores de éster, alcançando até 90,13% em 21 minutos, valor próximo ao limite de 96,5% estabelecido pela Resolução ANP nº 920/2023. Esse avanço possibilitou atingir o objetivo de avaliar a eficiência da associação entre plasma não-térmico e catalisador básico homogêneo na conversão do óleo de rícino em biodiesel, confirmando o potencial promissor da tecnologia frente aos métodos convencionais.

Ainda que os resultados tenham se aproximado do valor de referência regulatória, a conversão não atingiu integralmente os padrões mínimos exigidos. Comprovou-se, portanto, que a associação com catalisadores potencializa o processo, mas ajustes em parâmetros operacionais continuam necessários para consolidar sua aplicabilidade em escala industrial.

Como recomendações futuras, sugere-se a quantificação da energia específica de entrada, de modo a relacionar consumo energético e rendimento, bem como a ampliação das análises de qualidade do biodiesel, abrangendo parâmetros como viscosidade, teor de glicerol e estabilidade oxidativa. Recomenda-se ainda a investigação de diferentes configurações de reatores, a fim de conciliar eficiência técnica, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, consolidando o plasma não-térmico como uma rota inovadora para a produção de biodiesel a partir do óleo de rícino.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULL-MAJEED, W.; AAI-THANI, G.; AI-SABAHI, J. **Application of Flying Jet Plasma for Production of Biodiesel Fuel from Wasted Vegetable Oil**, New York, 2016.

ADAMA, K. K.; ANANI, O. A. **Experimental and theoretical assessment of phenomena linked with separation and purification of biodiesel from Ricinus communis seed oil**, Maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, G. N. E. B. **Tabelas de conversão de densidade e de volume previstas na Resolução ANP nº 894**. [S.l.]. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Tabelas de conversão de densidade e de volume previstas na Resolução ANP nº 894**. [S.l.]. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RESOLUÇÃO ANP Nº 920, DE 4 DE ABRIL DE 2023**, 2023. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023-estabelece-a-especificacao-do-biodiesel-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializem-o-produto-em-territorio-nacional?origin=instituicao>>.

ALAGHA, S. M. et al. Production of Biodiesel from Caster Oil: Experimental and Optimization Study. **Academic Scientific Journals**, Março 2024.

AL-SBANI, N. H. et al. Biodiesel Production from Castor Oil. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, Junho 2025. ISSN 10.22153.

ARAUJO, M. L. M. D. **Análise do teor de ésteres metílicos de ácidos graxos no biodiesel por cromatografia de exclusão por tamanho**, 2024.

ASGHARI, M. et al. **Optimization of methyl ester synthesis using gas/liquid phase pulsed discharge plasma in a novel oscillatory slug flow reactor**. [S.l.]. 2024.

ASGHARI, M.; SAMANI, B. H.; EBRAHIMI, R. **Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors**, v. 258, Abri 2022. ISSN 0196-8904.

- ASGHARI, M.; SAMANI, B. H.; EBRAHIMI, R. Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors, **Energy Conversion and Management**, v. 258, 2022. ISSN 0196-8904.
- ASSCHE, H. L.-V.; THOMASSEN, G.; COMPERNOLLE, T. O projeto inicial do plasma para a conversão de CO<sub>2</sub> em produtos químicos: uma avaliação técnico-econômica prospectiva. **Revista de Utilização de CO<sub>2</sub>**, v. 64, 2022. ISSN 102156.
- AZCAN, N.; DANISMAN, A. **Microwave assisted transesterification of rapeseed oil**, v. 87, 2008.
- BARROS, T. D.; JARDINE, J. G. **Transesterificação**. Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/tecnologia/transesterificacao?>>. Acesso em: 15 maio 2025.
- BASHIR, M. A. et al. **Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review**, v. 227, 2022. ISSN 0378-3820.
- BINDER et al. Chromatographic analysis of seed oils. Fatty acid composition of castor oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 39, 1962. ISSN 0003-021X.
- BRUNDTLAND, G. H. **Nosso futuro comum**. [S.l.]. 1987.
- BUCHORI, L. et al. **Preliminary Testing of Hybrid Catalytic-Plasma Reactor for Biodiesel Production Using Modified-Carbon Catalyst**, 2016.
- CENTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA. **Resumo do Composto PubChem para CID 5354133, Ricinoleato de Metila**. Biblioteca Nacional de Medicina (EUA). [S.l.]. 2004.
- CHANDRASEKARAN, M.; AALAM, C. S. **Recent Trends in Biodiesel Production Techniques: A Review**. [S.l.]. 2024.
- CORR, D. J. et al. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 1007–1012, 2004.
- DAMIAN, A. et al. **REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BIODIESEL**. [S.l.]. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2023**. [S.l.]. 2024.

ENCINAR, J. M. et al. **Biolubricants from Rapeseed and Castor Oil Transesterification by Using Titanium Isopropoxide as a Catalyst: Production and Characterization**, v. 10, n. 4, Março 2020.

ESMAEILI, H. **A critical review on the economic aspects and life cycle assessment of biodiesel production using heterogeneous nanocatalysts**, v. 230, 2022.

FAROUK, S. M. et al. **Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: a comprehensive review**, v. 31, n. 9, 2024. ISSN 12722–12747.

FRIDMAN, A. **Plasma Chemistry**. New York: [s.n.], 2008.

GOKHALE, D.; MHETRAS, N. **Sustainable biodiesel production: importance of feedstock resources and production methods**. [S.l.]. 2025.

GONÇALVES, V. O.; BORTOLETO, G. G. Determinação de metais em biodiesel: importância e desafios. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 11, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. A indústria de biocombustíveis está se aproximando de uma crise de matéria-prima? **IEA**, Paris, 2022.

ISTADI et al. Biodiesel Production from Vegetable Oil over Plasma Reactor: Optimization of Biodiesel Yield using Response Surface Methodology. **BCREC**, v. 4, 2009.

JESUS, A. A. D. **Síntese de biodiesel em meio contínuo pressurizado empregando hidrotalcitas como catalisadores heterogêneos**. Universidade Tiradentes. Aracaju. 2010.

KANWAL, A. et al. **Biofuel as a Sustainable Option to Control Environmental Changes**. [S.l.]: [s.n.], 2022.

KAZEROONI, E. A. et al. **The Novel Approach of Catalytic Interesterification, Hydrolysis and Transesterification of Pongamia pinnata Oil**, v. 12, n. 8, p. 896, 2022.

KEMPERS, P. et al. Method for producing esters of short-chains alcohols from triglyceride-rich oils, 2009.

KHAN, A. M. et al. Biodiesel synthesis from waste cooking oil using a variety of waste marble as heterogeneous catalysts. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 2019.

KNOTHE, G. **Biodiesel and renewable diesel: A comparison**, 2009.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J. **Basic of the transesterification reaction - The Biodiesel handbook**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

LEE, S. et al. **Solvated Electrons and Hydroxyl Radicals at the Plasma-Liquid Interface**, 2024.

MACHADO, M. D. M. **Conversão de óleo vegetal residual em ésteres através da tecnologia de plasma: Avaliação do potencial de sustentabilidade do processo frente ao processo convencional de conversão de ésteres**, Florianópolis, 2018.

MARCANTONIO, V.; FALCO, M. D.; BOCCI, E. **Non-Thermal Plasma Technology for CO<sub>2</sub> Conversion—An Overview of the Most Relevant Experimental Results and Kinetic Models**, 2022. ISSN 7790.

MARCHETTI, J. M. **A Comparison Between Raw Material**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

MAROA, S.; INAMBAO, . **A review of sustainable biodiesel production using biomass derived heterogeneous catalysts**, Outubro 2021.

MATTOX, D. M. **The Foundations of Vacuum Coating Technology**, New York, 2003. ISSN 0-8155-1495-6.

MEHER; SAGAR; NAIK. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, p. 248-268, 2006.

MEJÍA, J. D.; SALGADO, N.; ORREGO, C. E. Effect of blends of Diesel and Palm-Castor biodiesels on viscosity, cloud point and flash point. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 791-797, 2013. ISSN 0926-6690.

MENG, S. et al. Nonthermal Plasma-Assisted Photocatalytic Conversion of Simulated Natural Gas for High-Quality Gasoline Production near Ambient Conditions. **The Journal of Physical Chemistry Letters**, v. 11, n. 10, 2020.

MEYER, D. D. **Avaliação da biodegradabilidade de misturas de diesel e de biodiesel (B0, B20 e B100) em dois solos com diferentes granulometrias.**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

MISRA, N. et al. **Tratamento de morangos com plasma frio sob pressão atmosférica em embalagem.** [S.l.]. 2014.

MU, Y.; WILLIAMS, T. **Recent advances in the abatement of volatile organic compounds (VOCs) and chlorinated-VOCs by non-thermal plasma technology: A review**, 2022. ISSN 136481.

NGUYEN, H. M. et al. **Non-thermal plasma catalysis driven sustainable pyrolysis oil upgrading to jet fuel under near-ambient conditions.** [S.l.]. 2024.

OLIVEIRA, B. A. D. et al. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DA MAMONA.** Universidade de Uberaba. Uberaba. 2011.

OLIVEIRA, C. A. et al. Síntese de Ésteres de Aromas de Frutas: Um Experimento para Cursos de Graduação dentro de um dos Princípios da Química Verde. **Revista Virtual de Química**, v. 6, 2014.

ORGANIZAÇÃO das Nações Unidas no Brasil. **ODS 12 – Consumo e produção responsáveis.** Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

OSORIO-GONZÁLEZ, C. et al. **Production of Biodiesel from Castor Oil: A Review**, 2020.

PADMANABAN, D. B. et al. **Understanding plasma–ethanol non-equilibrium electrochemistry during the synthesis of metal oxide quantum dots**, 2021. ISSN 3983-3995.

PALM, M. O. **Investigação de rota catalítica assistida por plasma em reações de transesterificação e avaliação de desempenho ambiental por meio de indicadores de sustentabilidade. [Tese de doutorado]** – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2022.

PARKER, S. **Biodiesel Transesterification Byproducts as Soil Amendments Biodiesel Transesterification Byproducts as Soil Amendments.** University of Arkansas. [S.l.]. 2013.

PIPLIYA, S. et al. **Recent trends in non-thermal plasma and plasma activated water: Effect on quality attributes, mechanism of interaction and potential application in food & agriculture**, v. 2, 2023. ISSN 2772-753X.

PRODUTOS SODACASA. **Ficha de dados de segurança - Óleo de Rícino**. [S.I.], p. 9. 2022.

RAJAK, A. K. et al. **A comprehensive review of biomass-derived heterogeneous catalysts for efficient biodiesel production**. [S.I.]. 2025.

REZANIA, S. et al. **Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications**, v. 201, 2019.

ROCHA, G. O. D. et al. **Química Sem Fronteiras: o desafio da energia**. **Química Nova**, 2013.

SALAHDELDEEN, M. et al. **Current State and Perspectives on Transesterification of Triglycerides for Biodiesel Production**, 2021.

SAMANI, B. H.; ASGHARI, M.; EBRAHIMI, R. **Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors**, v. 258, 2022. ISSN 0196-8904.

SCHENEIDER, R. D. C. D. S. **Extração, caracterização e transformação do óleo de rícino**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.I.], p. 240. 2002.

SEGAT, A. et al. **Efeito do plasma frio sob pressão atmosférica (ACP) na atividade e estrutura da fosfatase alcalina**. [S.I.]. 2016.

SUAREZ, P. A. Z. et al. **Transformação de triglicerídeos em combustíveis, materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica**. **Química Nova**, 2007.

TALEBIAN-KIAKALAIEH, A.; AMIN, N. A. S.; MAZAHERI, H. **A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil**, v. 104, Abril 2013.

TAMPIERI, F.; GINEBRA, M.-P.; CANAL, C. **Quantification of Plasma-Produced Hydroxyl Radicals in Solution and their Dependence on the pH**. [S.I.]. 2021.

ULEJCZYK, B. et al. **Plasma-Catalytic Process of Hydrogen Production from Mixture of Methanol and Water**. [S.I.]. 2021.

VEKATESWARULU, T. C. et al. **A Review on Methods of Transesterification of Oils and Fats in Bio-diesel Formation**, Agosto 2014.

VELIČKOVIĆ, A. V. et al. Avanços na produção de biodiesel a partir do óleo de mamona: uma revisão abrangente. **Energy Conversion and Management**, v. 330, 2025. ISSN 0196-8904.

WARNE, G. R. et al. **Esterification and volatile compound manipulation using radiofrequency cold**, Julho 2024.

WONG, K. S.; CHEW, N.; TAN, M. **Plasma-Activated Water: Physicochemical Properties, Generation Techniques, and Applications**. [S.l.]. 2023.

WU, S. et al. **Highly Efficient Biodiesel Conversion from Soybean Oil Using Liquid-Phase Plasma Discharge Technology**, v. 62, Dezembro 2018.

YAN, X. et al. **Research Progress of Nonthermal Plasma for Ammonia Synthesis**, 2025.

ZAFAR, M. Z.; AHMAD, M.; ROZINA. **Conversion of waste seed oil of Citrus aurantium into methyl ester via green and recyclable nanoparticles of zirconium oxide in the context of circular bioeconomy approach**, 2021.

ZARA, K. et al. **Biodiesel synthesis in DBD plasma reactor using hot mixture of castor oil and used palm oil - Methanol**, 2019.