

## Relatório Parcial

Estudo de Pré-Viabilidade Econômico-Financeira e Ambiental do aumento da  
Escala da Produção de Biodiesel a Partir do Óleo Residual da Produção de  
Etanol de Milho Via Rota Enzimática

Rio de Janeiro

- 2025 -

### **Autores**

Mariane Gonzalez da Costa

Victor Hugo de Abreu

### **Colaboradores**

Arsênio

Luís Otávio

### **Revisores**

Rejane Rocha

Márcio de Almeida D'Agosto

### **Coordenador**

Márcio de Almeida D'Agosto

## SUMÁRIO

|       |                                                                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introdução .....                                                                                        | 1  |
| 2     | Revisão Bibliográfica .....                                                                             | 4  |
| 2.1   | Protocolo de Revisão Bibliográfica Sistemática .....                                                    | 4  |
| 2.2   | Resultados Bibliométricos .....                                                                         | 6  |
| 2.3   | Resultados Sistemáticos .....                                                                           | 13 |
| 2.3.1 | <i>Importância da produção e uso do biodiesel</i> .....                                                 | 13 |
| 2.3.2 | <i>Desafios intrínsecos à produção e uso do biodiesel</i> .....                                         | 15 |
| 2.3.3 | <i>Produção e uso do biodiesel no contexto brasileiro</i> .....                                         | 17 |
| 2.3.4 | <i>Rotas de produção de biodiesel</i> .....                                                             | 19 |
| 2.3.5 | <i>Produção de biodiesel a partir de óleo de milho residual da destilação via rota enzimática</i> ..... | 20 |
| 3     | Metodologia de Pesquisa .....                                                                           | 22 |
| 4     | Desenvolvimento da Pesquisa .....                                                                       | 25 |
| 4.1   | Descrição do processo .....                                                                             | 25 |
| 4.2   | Etapa 1 – Projeto Piloto .....                                                                          | 27 |
| 4.2.1 | <i>Atividade 0 - Caracterização da fase de pré-análise</i> .....                                        | 27 |
| 4.2.2 | <i>Atividade 1 – Caracterização do óleo residual do etanol de milho</i> .....                           | 30 |
| 4.2.3 | <i>Atividade 2 – Produção de biodiesel via rota enzimática</i> .....                                    | 30 |
| 5     | Considerações finais e Próximos Passos .....                                                            | 41 |

## Lista de Figuras

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Evolução das publicações ao longo dos anos.....                        | 7  |
| Figura 2. Rede de interconexão entre palavras-chave. ....                        | 9  |
| Figura 3. Mapa de calor das principais áreas de pesquisa. ....                   | 12 |
| Figura 4. Fases da Metodologia de Pesquisa do projeto. ....                      | 22 |
| Figura 5. Fluxograma das fases da produção de biodiesel via rota enzimática..... | 25 |
| Figura 6. Enzima – lipase líquida .....                                          | 31 |
| Figura 7. Enzima imobilizada.....                                                | 31 |
| Figura 8. Tempo de reação de produção do biodiesel .....                         | 38 |
| Figura 9. Tempo de reação e uso da enzima líquida .....                          | 38 |
| Figura 10. Uso da enzima imobilizada e tempo de reação .....                     | 39 |
| Figura 11. Uso da enzima e impacto na acidez do biodiesel.....                   | 39 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Descrição das Estratégias de Buscas. ....                                                              | 5  |
| Tabela 2. Separação dos estudos por periódicos de publicação. ....                                               | 8  |
| Tabela 3. Benefícios da produção de biodiesel. ....                                                              | 14 |
| Tabela 4. Desafios da produção de biodiesel. ....                                                                | 15 |
| Tabela 5. Iniciativas brasileiras em prol da produção e uso de biodiesel.....                                    | 17 |
| Tabela 6. Entradas do processo enzimático para a produção do biodiesel proveniente do óleo de soja refinado..... | 27 |
| Tabela 7. Fases do processo de produção do biodiesel proveniente do óleo de soja refinado.....                   | 28 |
| Tabela 8. Entradas referentes a Fase 2. ....                                                                     | 28 |
| Tabela 9. Resultados dos processos envolvidos na Fase 2. ....                                                    | 29 |
| Tabela 10. Caracterização do óleo residual de milho.....                                                         | 30 |
| Tabela 11. Dados de entrada para todos os testes realizados – Fase 1.....                                        | 31 |
| Tabela 12. Dados e parâmetros da primeira Fase da reação.....                                                    | 33 |
| Tabela 13. Quantidade de enzima líquida utilizada nos testes de produção de biodiesel .....                      | 35 |
| Tabela 14. Dados da Fase 2 e fase de secagem .....                                                               | 36 |

## APRESENTAÇÃO

O Centro de Pesquisa e Caracterização de Petróleo Bruto e Combustíveis (Coppecomb) e o Laboratório de Transporte de Cargas (LTC) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), por meio do Processo CNPq 405875/2022-3, vinculado à chamada CNPq/MCTI/FNDCT No 18/2022, desenvolvem o “Estudo de Pré-Viabilidade Econômico-Financeira e Ambiental para o aumento da escala de produção de biodiesel a partir do óleo residual da produção de etanol de milho por meio da rota enzimática”. Este documento abrange todas as atividades realizadas durante o desenvolvimento do projeto.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento progressivo das preocupações ambientais e da busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, as fontes de energia renovável vêm ganhando crescente relevância no cenário energético global. Entre essas fontes, destaca-se o biodiesel, que se sobressai não apenas por sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, mas também por promover uma diversificação estratégica da matriz energética (DE ASSIS et al., 2022). Nesse contexto, o biodiesel tem se consolidado como uma alternativa viável e ambientalmente responsável ao diesel mineral, desempenhando um papel cada vez mais importante na promoção da segurança energética e na mitigação das mudanças climáticas, conforme salientado por Veljković et al. (2018).

Do ponto de vista técnico, o biodiesel apresenta diversas vantagens operacionais. Suas propriedades físico-químicas o tornam altamente compatível com motores a diesel convencionais, permitindo sua utilização em misturas com o diesel fóssil ou mesmo em sua forma pura, sem a necessidade de adaptações complexas no sistema de injeção ou combustão dos veículos (CORONADO et al., 2009). Além disso, a versatilidade na escolha das matérias-primas para sua produção — que inclui óleos vegetais, gorduras animais e até mesmo fontes de origem microbiana e algas (MARX, 2016) — representa um diferencial estratégico, possibilitando a adaptação da cadeia produtiva às especificidades regionais e à disponibilidade local de recursos.

Contudo, a dependência de óleos vegetais comestíveis, como a soja, o milho e o girassol, utilizados para a produção de biodiesel, é um ponto de atenção quanto aos possíveis conflitos entre a destinação de recursos para fins energéticos e alimentares. O uso intensivo desses óleos, além de exercer pressão sobre os sistemas agrícolas, pode comprometer a segurança alimentar global e agravar a volatilidade dos preços dos alimentos. Ademais, conforme apontado por Canesin et al. (2014), essas matérias-primas representam aproximadamente 70% dos custos totais de produção do biodiesel, o que compromete sua competitividade econômica em relação aos combustíveis fósseis, especialmente em contextos de instabilidade nos mercados de *commodities* agrícolas.

Diante desse panorama, torna-se evidente a urgência de identificar e viabilizar fontes alternativas de matéria-prima que não estejam inseridas na cadeia alimentar. Nesse sentido, o óleo de milho residual, conhecido como *Distiller Corn Oil* (DCO), desponta

como uma solução inovadora e promissora. Proveniente do processo de produção de etanol a partir do milho, o DCO é um subproduto que não possui valor nutricional significativo e não é destinado ao consumo humano. Sua utilização como insumo para a produção de biodiesel não apenas evita o conflito entre produção de energia e oferta de alimentos, como também contribui para o aproveitamento mais eficiente dos resíduos gerados pelas indústrias agroenergéticas.

Além disso, o uso do DCO favorece a integração entre diferentes cadeias produtivas, promovendo sinergias entre os setores agrícola, energético e industrial. Essa abordagem integrada permite reduzir o desperdício de recursos, otimizar o uso da biomassa disponível e fomentar a economia circular dentro do setor de biocombustíveis. Ao empregar um resíduo agroindustrial de baixo valor comercial, o processo produtivo do biodiesel torna-se economicamente viável, ao mesmo tempo em que se alinha aos princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social.

Portanto, a adoção de matérias-primas alternativas como o DCO representa um avanço significativo na busca por um modelo de produção de biodiesel mais sustentável e eficiente. Ao aliar benefícios ambientais com vantagens econômicas e sociais, o uso de resíduos não alimentares na produção de biocombustíveis se consolida como uma estratégia essencial para enfrentar os desafios energéticos do século XXI e promover um desenvolvimento mais equilibrado e resiliente.

Dessa forma, o presente projeto tem como objetivo realizar um estudo de pré-viabilidade econômico-financeira e ambiental para a adaptação parcial da capacidade instalada de uma usina de biodiesel, incorporando uma nova tecnologia de produção por rota enzimática, utilizando óleo residual proveniente da produção de etanol de milho. O estudo será conduzido com base em uma usina de biodiesel convencional, que opera pela rota química, pertencente à empresa Cesbra, do grupo Sumatex, em funcionamento desde 2006 e localizada no estado do Rio de Janeiro. A proposta busca levantar o custo real de produção do biodiesel nas condições estudadas, além de avaliar sua competitividade no mercado nacional, visando ampliar a oferta desse combustível para atender ao aumento progressivo da proporção de biodiesel na mistura com o diesel mineral.

O projeto pretende, portanto, fundamentar tecnicamente a aplicação da rota enzimática para a produção em larga escala de biodiesel a partir de resíduos industriais, com foco no óleo residual da produção de etanol de milho. A integração entre as cadeias produtivas

dos dois principais biocombustíveis do país — biodiesel e etanol — representa uma oportunidade estratégica para a otimização de recursos, redução de impactos ambientais e fortalecimento da sustentabilidade do setor.

Além disso, o estudo buscará identificar os principais desafios, limitações e oportunidades associados à implementação dessa rota tecnológica alternativa em escala industrial. Essa análise contribuirá significativamente para o avanço científico e tecnológico no desenvolvimento de combustíveis renováveis. Como parte das entregas previstas, serão elaborados relatórios técnicos e submetidos artigos científicos, com o intuito de disseminar os resultados obtidos e os conhecimentos gerados ao longo do projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados bibliométricos e sistemáticos obtidos por meio da aplicação do protocolo de revisão bibliográfica sistemática desenvolvido com o objetivo de reunir o maior número possível de estudos relevantes e aplicados à produção de biodiesel a partir do óleo residual via rota enzimática.

### 2.1 Protocolo de Revisão Bibliográfica Sistemática

O procedimento metodológico deste capítulo consiste em uma revisão sistemática com abordagem bibliométrica para mapeamento dos principais estudos sobre a produção de biodiesel a partir do óleo residual via rota enzimática.

As técnicas bibliométricas têm sido extensivamente empregadas em várias áreas acadêmicas com o propósito de monitorar o estado atual de um determinado campo e examinar como ele evolui ao longo do tempo. Diversas pesquisas foram conduzidas para investigar essas técnicas, trazendo perspicazes contribuições sobre o avanço e a expansão de domínios de conhecimento particulares.

As revisões sistemáticas, por sua vez, auxiliam na detecção de lacunas no conhecimento, na avaliação da qualidade e coerência dos estudos existentes, além de estabelecerem uma base sólida para a tomada de decisões. Ao combinar e analisar minuciosamente os resultados de múltiplas pesquisas, essas revisões proporcionam uma visão abrangente das evidências, reduzindo a probabilidade de tendenciosidade e incerteza, e contribuindo de maneira robusta e confiável para o avanço do conhecimento científico.

Nesse sentido, os termos utilizados, os critérios de inclusão e qualificação, bem como os detalhes para a busca e extração do banco de dados, são apresentados na Tabela 1, em que a abreviação TS corresponde ao Tópico (TS = Tópico) e significa as palavras que são pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos estudos incluídos na base de dados.

Para escolha do tópico de pesquisa, considerou-se adequado utilizar as variações em inglês do termo produção de biodiesel ou biocombustível por meio de '*Biodiesel production*' ou '*Biofuel production*', '*Biodiesel processing*' ou '*Biofuel processing*' e '*Biodiesel synthesis*' ou '*Biofuel synthesis*', do termo '*Residual oil*' e do termo rota enzimática por meio de '*Enzymatic*'. Destaca-se que em um primeiro momento, considerou-se pertinente utilizar os termos '*Enzymatic route*' e '*Enzymatic pathway*';

entretanto, como a pesquisa não obteve resultados, buscou-se ser menos restritivo e utilizar apenas o termo ‘Enzymatic’.

Cabe mencionar que a escolha do termo em inglês, em detrimento a outras línguas, como o próprio português, origina-se do fato de que a maioria dos estudos de prestígio publicados internacionalmente são desenvolvidos em inglês, além disso, na maior parte das vezes, mesmo os estudos publicados em outras línguas possuem o *Abstract*.

Tabela 1. Descrição das Estratégias de Buscas.

| Critério      | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tópicos       | <p><b>Web of Science</b> - TS=(“Biodiesel production” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TS=(“Biodiesel processing” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TS=(“Biodiesel synthesis” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TS=(“Biofuel production” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TS=(“Biofuel processing” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TS=(“Biofuel synthesis” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”)</p> <p><b>Scopus</b> - TITLE-ABS-KEY (“Biodiesel production” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TITLE-ABS-KEY (“Biodiesel processing” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TITLE-ABS-KEY (“Biodiesel synthesis” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TITLE-ABS-KEY (“Biofuel production” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TITLE-ABS-KEY (“Biofuel processing” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”) OR TITLE-ABS-KEY (“Biofuel synthesis” AND “Residual oil” AND “Enzymatic”)</p> |
| Base de Dados | Web of Science e Scopus                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Indexes       | Todos os indexes de ambas as bases                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Inclusão      | (I) Tempo de cobertura: todos os anos da base de dados (1945 – 2023); (II) Enquadramento com o objetivo proposto; (III) Relevância da fonte de publicação.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Qualificação  | (I) A pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica bem fundamentada? (II) O estudo apresenta inovação técnica? (III) As contribuições são discutidas? (IV) As limitações são explicitamente declaradas? e (V) Os resultados e conclusões são consistentes com os objetivos pré-estabelecidos?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|         |                                                                             |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Data da | 24 de Setembro de 2023, as 19h00min e atualizado em 12 de Abril de 2024, as |
| Procura | 08h00min                                                                    |

**Fonte:** Elaboração Própria.

Destaca-se ainda que decidiu-se utilizar os bancos de dados do *Web of Science* e do Scopus como principal ferramenta de busca devido à sua difusão na comunidade acadêmica e à confiabilidade de seus padrões de seleção (CAVIGGIOLI & UGHETTO, 2018; AMEEN *et al.*, 2018). Além disso, essas bases de dados apresentam alcance e cobertura satisfatórios (CHEN, 2010), atendendo aos requisitos desta pesquisa.

Outro aspecto que precisa ser mencionado é que, enquanto os critérios de inclusão servem principalmente para uma triagem mais superficial do estudo, até mesmo porque consideram aspectos relacionados ao ano, tipo de estudo e revista de publicação, os critérios de qualificação são utilizados para uma triagem mais profunda dos estudos, analisando aspectos de aplicabilidade e qualidade, os quais só são possíveis de determinar por meio de análise e leitura mais específica dos estudos.

É crucial considerar a data de busca durante a revisão bibliográfica com abordagem bibliométrica, pois ela indica o momento em que as pesquisas foram realizadas. Isso pode afetar os resultados apresentados, especialmente se houver estudos publicados posteriormente à busca inicial. Por exemplo, se a revisão fosse realizada no final de 2023, é provável que novos estudos fossem incluídos na busca, o que poderia alterar as estatísticas relacionadas ao número de publicações e citações por ano.

## 2.2 Resultados Bibliométricos

Antes de iniciar as análises bibliométricas é importante destacar que, embora alguns estudos tenham sido usados para embasar fundamentações, apenas aqueles que tratam especificamente sobre a produção de biodiesel a partir do óleo residual via rota enzimática foram utilizados para desenvolvimento desta seção. Cabe destacar que os resultados bibliométricos advém da base de dados desenvolvida por De Abreu *et al.* (2025).

Inicialmente, foi realizada uma avaliação dos estudos com base no ano de publicação. Conforme ilustrado na Figura 1, a primeira publicação remonta a 2008, abordando as perspectivas para a produção biotecnológica de biodiesel e seus impactos. No entanto,

somente a partir de 2017 as publicações passaram a ocorrer de forma regular, com contribuições anuais consecutivas.

É importante destacar que 2021 registrou o maior número de publicações, representando 30% do total, o que aponta para uma intensificação da produção científica e uma maior relevância do tema nesse período específico. Contudo, a redução no número de publicações em 2022 e 2023 sugere uma possível necessidade de renovação do interesse ou redirecionamento dos estudos sobre o tema.

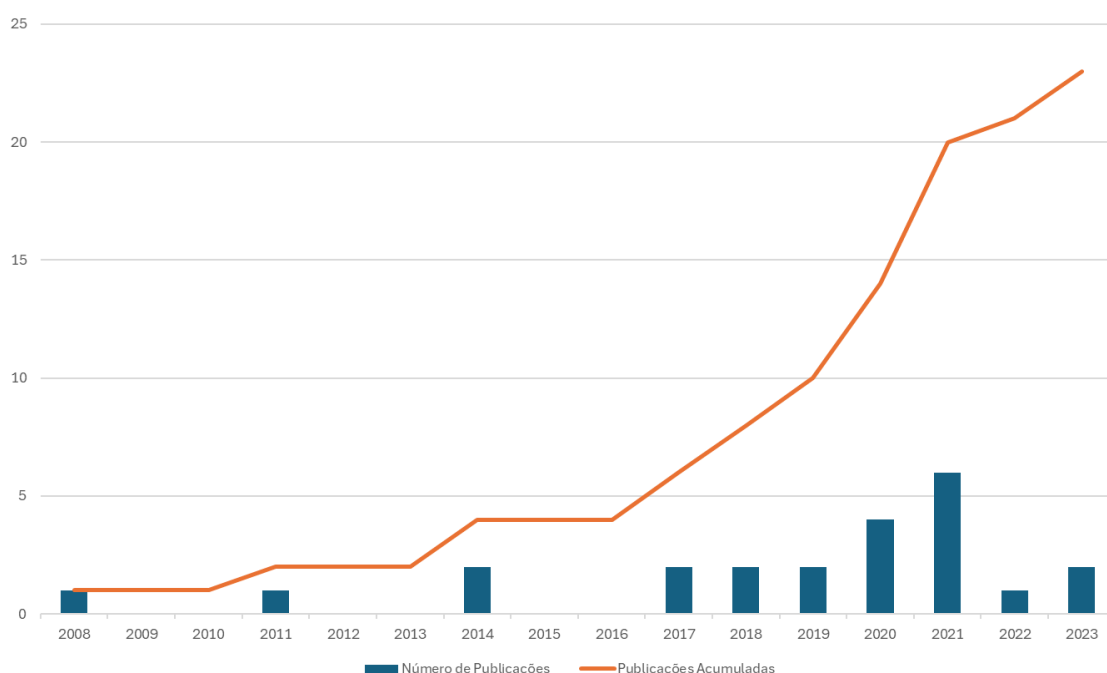


Figura 1. Evolução das publicações ao longo dos anos.

**Fonte:** Elaboração Própria.

Uma outra abordagem pode ser realizada com base nos periódicos que mais frequentemente publicam estudos sobre o tema, juntamente com seus respectivos Fatores de Impacto (FI), conforme apresentado na Tabela 3.2, onde "N" representa o número de publicações relacionadas ao tópico no periódico analisado. Essa análise permite direcionar os esforços de submissão para periódicos que estão alinhados ao escopo dos estudos, ajudando a identificar os periódicos de maior relevância e, assim, otimizar o tempo de publicação do trabalho dentro da comunidade científica.

A Tabela 3.2 revela que os periódicos com maior número de publicações incluem *Renewable Energy*, *Catalysts*, *Fuel*, *Journal of The American Oil Chemists' Society* e

*Brazilian Journal of Chemical Engineering*, destacando sua importância no campo de pesquisa sobre a produção biotecnológica de biodiesel e seus impactos. Além disso, é possível observar outros 12 periódicos, como *Journal of Cleaner Production* e *Sustainable Energy & Fuels*, que também desempenham um papel relevante na disseminação de pesquisas nesta área. Vale ressaltar que o fator de impacto dos periódicos listados na Tabela 2 pode influenciar a visibilidade e o reconhecimento dos estudos publicados, sendo um critério importante para os pesquisadores ao escolherem onde submeter seus trabalhos.

Tabela 2. Separação dos estudos por periódicos de publicação.

| Revista                                              | N | FI   |
|------------------------------------------------------|---|------|
| <i>Renewable Energy</i>                              | 3 | 8.7  |
| <i>Catalysts</i>                                     | 2 | 3.9  |
| <i>Fuel</i>                                          | 2 | 7.4  |
| <i>Journal of The American Oil Chemists' Society</i> | 2 | -    |
| <i>Brazilian Journal of Chemical Engineering</i>     | 2 | 1.2  |
| <i>Applied Energy</i>                                | 1 | 11.2 |
| <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i>        | 1 | 5.0  |
| <i>Biofuels, Bioproducts and Biorefining</i>         | 1 | 3.9  |
| <i>Biomass Conversion and Biorefinery</i>            | 1 | 4.0  |
| <i>Biotechnology for Biofuels</i>                    | 1 | 6.3  |
| <i>Chiang Mai Journal of Science</i>                 | 1 | 0.4  |
| <i>Ecletica Química</i>                              | 1 | -    |
| <i>Eurasian Chemical Communications</i>              | 1 | -    |
| <i>Journal of Cleaner Production</i>                 | 1 | 11.1 |
| <i>Methodsx</i>                                      | 1 | 1.9  |
| <i>Processes</i>                                     | 1 | 4.5  |
| <i>Sustainable Energy &amp; Fuels</i>                | 1 | 5.6  |

Nota: (\*) Não foi possível encontrar a FI desta revista.

**Fonte:** Elaboração Própria.

É relevante destacar também a possibilidade de criar uma rede de interconexões entre palavras-chave, conforme ilustrado na Figura 2, gerada pelo VOSviewer (Versão 1.6.20). Essa representação visual mostra a frequência das palavras-chave mais recorrentes, evidenciando os temas centrais e as áreas predominantes de interesse. Por exemplo,

**Fonte:** Elaboração Própria.

Entre os principais termos que emergem da análise, destaca-se a presença de conceitos cruciais para a compreensão do processo de produção de biodiesel. Por exemplo, a palavra-chave “Transesterificação” é essencial para entender os processos de conversão química de óleos residuais em biodiesel, sendo um ponto central nas pesquisas relacionadas ao tema. A expressão “Bioconversão”, por sua vez, sublinha a relevância da

transformação biológica de substratos como parte integrante da rota enzimática, mostrando a interação entre processos biotecnológicos e a produção de biocombustíveis. O termo “Eficiências catalíticas” direciona a atenção para a importância da eficácia dos catalisadores empregados nesse processo, indicando que o desempenho desses agentes catalíticos é crucial para a otimização das reações de conversão. Além disso, “Lipase de *Pseudomonas fluorescens*” surge como uma palavra-chave significativa, apontando para uma enzima que se destaca como potencial catalisador nas reações de transesterificação, ampliando as possibilidades de pesquisa e aplicação prática.

Esses exemplos ilustram como a rede de palavras-chave não apenas aponta para os conceitos mais frequentemente discutidos, mas também revela áreas de interesse específico que são essenciais para o avanço da produção biotecnológica de biodiesel. A análise mais profunda dessa rede interconectada enriquece significativamente a compreensão do panorama científico e tecnológico associado ao tema. Ela oferece insights importantes para pesquisadores e profissionais que buscam explorar novas frentes de pesquisa, identificar lacunas no conhecimento atual e desenvolver abordagens inovadoras.

Ao considerar essas palavras-chave no contexto da produção de biodiesel a partir de óleo residual de etanol de milho via rota enzimática, os pesquisadores podem descobrir oportunidades promissoras para a inovação no campo. Isso inclui a exploração de novas enzimas, como a lipase de *Pseudomonas fluorescens*, ou o aprimoramento das eficiências catalíticas por meio de inovações tecnológicas. Além disso, a análise dessas interconexões sugere caminhos para o desenvolvimento de novas metodologias, que possam não apenas otimizar a produção de biodiesel, mas também expandir as possibilidades de aplicação e comercialização de biocombustíveis, contribuindo de maneira significativa para o avanço dessa área promissora, que está em constante evolução.

A Figura 3, elaborada com o VOSviewer (Versão 1.6.20), revela que as áreas de 'Energia e Combustíveis' e 'Transportes' destacam-se, com 12 ocorrências cada, seguidas por Química, com 8 ocorrências. Engenharia aparece com 5 ocorrências, enquanto Ciências e Tecnologias Ambientais somam 4 e Ciências dos Materiais têm 3 ocorrências. Esta análise amplia a visão sobre a interdisciplinaridade da pesquisa na área de biodiesel,

evidenciando a relevância de diversas áreas do conhecimento. A importância de cada uma delas pode ser compreendida da seguinte forma:

**Energia e Combustíveis:** O estudo sobre energia e combustíveis é essencial para avaliar a eficiência e a viabilidade econômica da produção de biodiesel (DE CARVALHO & FERREIRA, 2014). Isso inclui a análise do balanço energético do processo, assegurando que ele seja capaz de fornecer um retorno energético positivo, além de avaliar sua sustentabilidade. A otimização dos métodos de produção e a integração de fontes de energia renováveis são fundamentais para reduzir os custos, melhorar a eficiência do processo e diminuir o impacto ambiental (SALLA et al., 2010).

**Transportes:** A pesquisa no setor de transportes é vital, pois o uso de biodiesel pode diminuir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Ao substituir ou complementar os combustíveis fósseis, o biodiesel contribui para a redução da pegada de carbono no setor de transportes, além de fortalecer a segurança energética, diminuindo a dependência de combustíveis não renováveis. Essa transição favorece combustíveis mais limpos e impulsiona inovações tecnológicas nos motores, o que é crucial para a sustentabilidade energética e preservação ambiental a longo prazo (GUERRA & FUCHS, 2010).

**Química:** A compreensão das reações químicas envolvidas na produção de biodiesel é fundamental para melhorar a conversão de óleos residuais em biocombustíveis de alta qualidade. Este conhecimento permite otimizar as condições de reação, aumentando a eficiência e o rendimento, ao mesmo tempo em que minimiza a formação de subprodutos indesejáveis. Refinar esses processos químicos também resulta em redução de custos e impactos ambientais, garantindo que a produção de biodiesel seja tanto eficaz quanto sustentável.

**Engenharia:** A engenharia é essencial na criação e aprimoramento de equipamentos e processos de produção de biodiesel (DE ABREU et al., 2024). O objetivo é melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e assegurar a segurança em todas as etapas da produção. Ao aplicar princípios de engenharia, como o design de processos, automação e integração de sistemas, os engenheiros podem desenvolver tecnologias que agilizem a produção, promovam um uso mais eficiente da energia e minimizem o desperdício. Além disso, a engenharia garante que os sistemas operem de maneira segura, atendendo aos

padrões industriais e regulatórios, o que contribui para a sustentabilidade e viabilidade econômica do setor de biocombustíveis.

**Ciências e Tecnologias Ambientais:** As ciências ambientais são essenciais para avaliar os impactos ambientais da produção de biodiesel, como emissões de gases de efeito estufa e o uso de recursos. A análise do ciclo de vida do biodiesel permite entender os impactos globais e identificar maneiras de reduzir sua pegada ambiental. Essas informações ajudam a desenvolver estratégias para melhorar a sustentabilidade do biodiesel e aumentar sua eficácia na mitigação das mudanças climáticas.

**Ciências dos Materiais:** O desenvolvimento de materiais avançados para catalisadores, reatores e membranas tem um papel crucial na melhoria da eficiência da produção de biodiesel (DE ABREU et al., 2025). Catalisadores e reatores aprimorados tornam o processo de conversão mais eficiente, reduzindo o consumo de energia, enquanto membranas especializadas garantem a qualidade do biodiesel, facilitando a purificação e separação do produto. Esses avanços não só tornam o processo mais econômico, mas também contribuem para a sustentabilidade do biodiesel, diminuindo o desperdício e o impacto ambiental (DE ABREU et al., 2024).

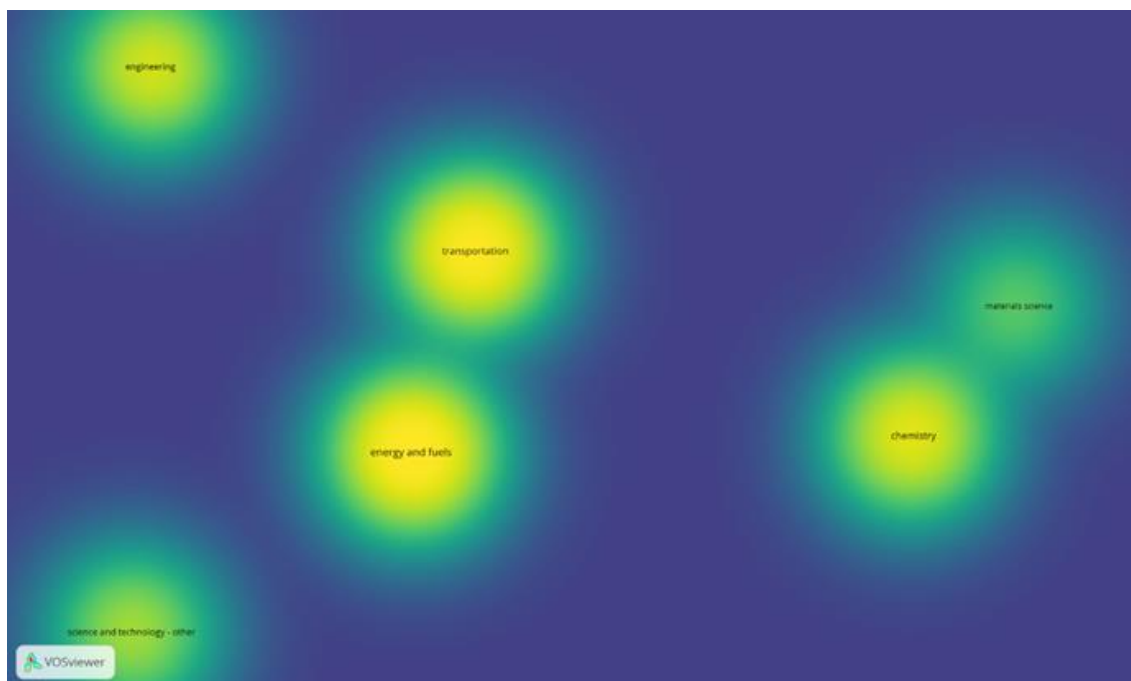


Figura 3. Mapa de calor das principais áreas de pesquisa.

**Fonte:** Elaboração Própria.

## 2.3 Resultados Sistemáticos

A dependência global dos combustíveis fósseis como principal fonte de energia impacta nos elevados níveis de poluição ambiental devido à sua natureza não renovável. Nesse contexto, fontes alternativas e renováveis de energia têm sido amplamente investigadas e debatidas como alternativas promissoras na busca por um futuro mais sustentável (DUARTE et al., 2022).

Neste sentido, o biodiesel tem se consolidado como uma alternativa renovável ao diesel derivado do petróleo, destacando-se por sua capacidade de reduzir as emissões de gases poluentes e contribuir para a sustentabilidade ambiental (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018). Contudo, sua produção e utilização envolvem desafios técnicos, econômicos e logísticos que necessitam de soluções inovadoras para garantir sua viabilidade em larga escala. No Brasil, o biodiesel desempenha um papel estratégico na diversificação da matriz energética, além de impulsionar o desenvolvimento rural.

Este capítulo explora as principais rotas de produção de biodiesel, destacando suas implicações tecnológicas e ambientais, com especial atenção à rota enzimática. Esta rota utiliza óleos residuais, como o óleo de milho proveniente da destilação, uma alternativa promissora para a produção sustentável de biodiesel. A escolha por óleos residuais, além de reduzir a dependência de matérias-primas alimentícias, pode contribuir para a minimização de desperdícios e o aproveitamento de recursos que, de outra forma, seriam descartados.

A rota enzimática, que emprega catalisadores biológicos para promover a transesterificação, tem se mostrado eficiente, porém apresenta desafios relacionados à eficiência dos processos enzimáticos, custos operacionais e a necessidade de otimização dos métodos de produção (DE ABREU et al., 2024). Neste contexto, o capítulo busca aprofundar a análise das vantagens dessa rota, como a menor necessidade de condições rigorosas de temperatura e pH, e os obstáculos a serem superados para garantir sua aplicação em larga escala no Brasil, considerando a realidade da indústria de biodiesel e as políticas públicas voltadas para a sustentabilidade energética.

### 2.3.1 Importância da produção e uso do biodiesel

Inegavelmente, o biodiesel tem sido apontado como uma alternativa promissora para substituir ou complementar os combustíveis convencionais, utilizando matérias-primas naturais ou recursos biológicos renováveis em seu processo de produção (LUQUE et al., 2010; MOREIRA et al., 2020). Este biocombustível apresenta uma série de vantagens

notáveis, uma vez que representa uma fonte de energia renovável, de baixa emissão de poluentes, biodegradável, não tóxica e de impacto ambiental reduzido em comparação com o diesel de petróleo. Além dessas características, outras vantagens associadas ao uso do biodiesel são detalhadas no Tabela 3.

Tabela 3. Benefícios da produção de biodiesel.

| Benefício                                                     | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solução necessária                                            | O biodiesel nasceu basicamente como uma solução para a crise internacional do petróleo, mas também e principalmente por causa dos problemas ambientais que o planeta enfrenta atualmente (KHALAF e SALIH, 2021).                                                                                                                                                                                                    |
| Fonte Renovável                                               | O biodiesel é produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais, gorduras animais e óleos usados, o que significa que é uma alternativa mais sustentável aos combustíveis fósseis (GUERRA & FUCHS, 2010; ACHARYA et al., 2019; MOREIRA et al., 2020; FERRERO, FABA & EIMER, 2021; ZAVARISE et al., 2022).                                                                                                |
| Diversificação da Matriz Energética                           | O uso de biodiesel diversifica a fonte de combustíveis utilizados no setor de transporte, reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis e aumentando a segurança energética (MOREIRA et al., 2020).                                                                                                                                                                                                              |
| Redução das emissões de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | Os benefícios ambientais que o biocombustível pode trazer são imensos, como a redução de até 78% das emissões de dióxido de carbono, que é absorvido pela fotossíntese das próprias sementes oleaginosas (REŞITOĞLU, ALTINIŞIK e KESKIN, 2015).                                                                                                                                                                     |
| Biodegradabilidade                                            | O biodiesel é biodegradável e não tóxico, o que significa que, em caso de vazamento ou derramamento, ele se decompõe naturalmente e possui menor impacto ambiental do que os combustíveis fósseis (ACHARYA et al., 2019; MOREIRA et al., 2020; WANCURA et al., 2021).                                                                                                                                               |
| Redução das emissões de fumaça                                | O biodiesel pode acarretar a redução de até 90% das emissões de fumaça (REŞITOĞLU, ALTINIŞIK e KESKIN, 2015).                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Redução das emissões de enxofre                               | O biodiesel pode acarretar a redução de até 98% das emissões de enxofre na atmosfera (REŞITOĞLU, ALTINIŞIK e KESKIN, 2015).                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Estímulo à Economia Local                                     | A produção de biodiesel a partir de culturas locais pode criar oportunidades de emprego e estimular a economia regional, principalmente em áreas rurais onde a agricultura é uma parte importante da economia. As fontes de energia renovável, com ênfase nos biocombustíveis, têm o potencial de promover a inclusão produtiva e o aumento da renda nas áreas rurais (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2023). |
| Melhoria da Lubrificação do Motor                             | O biodiesel possui propriedades lubrificantes naturais, o que pode ajudar a prolongar a vida útil dos motores a diesel e reduzir o desgaste das peças.                                                                                                                                                                                                                                                              |

Fonte: ABREU et al. (2024).

### 2.3.2 Desafios intrínsecos à produção e uso do biodiesel

Contudo, como em qualquer processo inovador, a produção de biodiesel também enfrenta desafios, conforme destacado no Tabela 4.

Tabela 4. Desafios da produção de biodiesel.

| Desafio                     | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Como minimizar tal desafio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matéria-Prima Adequada      | A disponibilidade e a qualidade da matéria-prima são fundamentais para a produção de biodiesel (FERRERO, FABIA & EIMER, 2021). A produção em grande escala depende de fontes sustentáveis de óleos vegetais, gorduras animais ou outras biomassas que possam ser convertidas em biodiesel de maneira eficiente (KHALAF e SALIH, 2021).                                                                                                                                                                                                                                       | A inserção de uma nova fonte de matéria-prima residual para obtenção de biodiesel para uso em transportes promove a redução da pressão sobre recursos naturais e não implica na competição com o consumo humano.                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Demanda competitiva         | O uso de óleo vegetal de grau alimentício como matéria-prima para a produção de biodiesel pode ser economicamente desafiador, especialmente em grande escala. Isso ocorre porque os óleos vegetais destinados ao consumo humano são frequentemente mais caros e têm uma demanda competitiva na indústria alimentícia (KHALAF e SALIH, 2021). Além disso, a utilização em larga escala de óleos vegetais refinados como componente principal na produção de biodiesel poderia resultar em escassez de alimentos e provocar desequilíbrios econômicos (ZAVARISE et al., 2022). | Para tornar a produção de biodiesel mais viável comercialmente, muitas vezes são exploradas alternativas, como o uso de óleos de baixo custo provenientes de culturas não alimentícias ou resíduos de óleo de cozinha reciclados (FERRERO, FABIA & EIMER, 2021). Além disso, pesquisas também estão em andamento para desenvolver técnicas mais eficientes e econômicas de produção de biodiesel, como a utilização de catalisadores mais eficazes e processos mais otimizados (ZAVARISE et al., 2022). |
| Tecnologia de Processamento | A eficiência da produção de biodiesel depende de tecnologias avançadas de processamento (ZAVARISE et al., 2022), como a transesterificação, que é o método mais comum. A pesquisa contínua é necessária para desenvolver métodos mais eficientes e sustentáveis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | É importante investir em tecnologias avançadas de processamento, como a melhoria de catalisadores e processos de transesterificação, otimizar processos contínuos e utilizar matérias-primas alternativas e sustentáveis, como óleos de resíduos e microalgas. A integração de tecnologias sustentáveis, como o uso de energia renovável e a valorização de subprodutos como a glicerina, também é essencial. Além disso,                                                                               |

| Desafio                                | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Como minimizar tal desafio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | explorar novas rotas de produção, como a biocatálise e a transesterificação em fase supercrítica, pode resultar em processos mais eficientes e ecológicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Impactos Ambientais e Sustentabilidade | Embora o biodiesel seja considerado uma fonte de energia mais limpa em comparação com os combustíveis fósseis, a produção em larga escala pode ter impactos ambientais negativos, como desmatamento, uso intensivo de água e emissões de GEE associados ao cultivo de matéria-prima.                                                                                                                                                                                              | As pesquisas atuais têm se concentrado em novas tecnologias de produção e purificação de biodiesel que visam alcançar uma pegada neutra de carbono, bem como usar matérias-primas baratas, renováveis e abundantes não utilizadas para a produção de alimentos (FERRERO, FABA & EIMER, 2021).                                                                                                                                                                                                                                            |
| Padrões e Regulamentações              | A produção e o uso de biodiesel estão sujeitos a regulamentações e padrões que variam de país para país.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | A harmonização desses regulamentos pode facilitar o comércio internacional de biodiesel e promover sua aceitação global.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Viabilidade Econômica                  | A produção de biodiesel é desafiada por seu custo de fabricação, que é consideravelmente superior ao do diesel tradicional (ZAVARISE et al., 2022). A viabilidade econômica da produção de biodiesel é influenciada por vários fatores, incluindo o preço das matérias-primas, os custos de produção e os incentivos governamentais. Flutuações nos preços do petróleo e políticas de subsídios também afetam a competitividade do biodiesel em relação aos combustíveis fósseis. | É essencial utilizar matérias-primas de baixo custo, como óleos residuais, e otimizar os processos de produção para aumentar a eficiência. A escalabilidade das plantas de produção e a implementação de tecnologias avançadas também podem reduzir custos. Além disso, manter incentivos governamentais e investir em pesquisa para novas tecnologias pode tornar a produção mais competitiva. A valorização de subprodutos, como a glicerina, também pode ajudar a compensar custos, tornando a produção mais econômica e sustentável. |

Fonte: Baseado em ABREU et al. (2024).

Nota-se que superar os desafios da produção de biodiesel exige uma abordagem integrada que envolve avanços tecnológicos, políticas públicas eficazes e a colaboração de vários setores da sociedade, incluindo governos, indústrias e organizações de pesquisa. Além disso, a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental devem ser consideradas em todas as etapas da produção de biodiesel.

### 2.3.3 Produção e uso do biodiesel no contexto brasileiro

Atualmente, as políticas e planos governamentais voltados para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) têm ganhado crescente relevância, proporcionando um ambiente propício para a expansão do desenvolvimento dos biocombustíveis. A busca por alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis tem se intensificado, impulsionada pela necessidade urgente de mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Neste sentido, países como o Brasil, o segundo maior produtor mundial de biodiesel, tem implementado ações para aumentar a produção e o uso de biodiesel em sua matriz energética, conforme exemplos de iniciativas apresentadas no Tabela 5

Tabela 5. Iniciativas brasileiras em prol da produção e uso de biodiesel.

| Benefício                                               | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL)                 | Em 1975, o PROALCOOL foi uma ação estratégica do governo brasileiro para promover a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, com o objetivo de reduzir a dependência do petróleo importado e incentivar a substituição da gasolina por etanol. Esse programa foi crucial para o desenvolvimento da indústria do etanol no país e para a criação de um mercado de biocombustíveis, sendo considerado um marco na busca por alternativas energéticas sustentáveis. A medida também contribuiu para o aumento da segurança energética do Brasil e para o fortalecimento da agricultura.                        |
| Implementação da Tecnologia Flex-Fuel                   | Em 2003, a introdução da tecnologia flex-fuel foi uma inovação tecnológica significativa, permitindo que veículos automotores pudessem rodar tanto com etanol quanto com gasolina, de forma automática. Essa ação visou aumentar a utilização do etanol e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, proporcionando ao consumidor maior liberdade de escolha em relação ao combustível, dependendo da disponibilidade e dos preços. A tecnologia flex-fuel facilitou a popularização do uso do etanol no Brasil, tornando o país líder mundial na produção e consumo de veículos movidos por biocombustíveis. |
| Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) | Lançado em 2004, o PNPB é um programa interministerial do Governo Federal cujo objetivo é promover de maneira sustentável, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, a produção e utilização de biodiesel, com um foco especial na inclusão social e no desenvolvimento regional, por meio da geração de empregos e aumento da renda (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2023).                                                                                                                                                                                                                        |
| Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel (RBTB)       | A RBTB tem como principais objetivos: (1) Estabelecer um sistema de coordenação eficaz entre os diversos atores envolvidos na pesquisa, desenvolvimento e produção de biodiesel, visando à convergência de esforços e à otimização dos investimentos públicos. (2) Identificar e superar desafios tecnológicos que possam surgir ao longo do progresso do PNPB, por meio de pesquisas contínuas e desenvolvimento                                                                                                                                                                                                 |

| Benefício                                                           | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                     | tecnológico em colaboração entre instituições de pesquisa e desenvolvimento e o setor produtivo."                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Lei do Biodiesel de combustível.                                    | Em 2005, o Brasil aprovou a Lei nº 11.097, que estabeleceu as diretrizes para a produção e uso do biodiesel no país. A lei definiu a mistura obrigatória de biodiesel no diesel vendido nos postos (GONÇALVES, 2022).                                                                                                                                 |
| Programa de Desenvolvimento da Cadeia Produtiva de Biodiesel (PDPB) | O PDPB visa estimular o desenvolvimento da cadeia produtiva do biodiesel, desde a produção das matérias-primas até a distribuição do produto final. Isso inclui ações para fomentar a agricultura familiar e a pesquisa tecnológica.                                                                                                                  |
| Incentivos Fiscais e Créditos                                       | O governo brasileiro oferece incentivos fiscais e créditos para produtores de biodiesel, como a isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e a concessão de créditos via Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores e Displays (PADIS).                                                            |
| Certificação e Sustentabilidade                                     | O Brasil adotou sistemas de certificação e sustentabilidade para garantir que a produção de biodiesel não prejudique o meio ambiente nem a sociedade. Isso inclui a Certificação da Produção de Biocombustíveis (RenovaBio) e a verificação da conformidade com critérios de sustentabilidade, como não desmatamento e respeito aos direitos humanos. |

Fonte: Baseado em ABREU et al. (2024).

Embora seja viável fabricar biodiesel a partir de diversas oleaginosas, como soja, milho, palma e girassol, cada uma dessas fontes exige um processo de otimização específico para garantir que o produto final atenda aos rigorosos padrões de qualidade e desempenho exigidos pelas regulamentações vigentes (DE ABREU et al., 2024). A Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece critérios técnicos detalhados sobre as características do biodiesel, como o índice de acidez, o teor de ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME), a viscosidade, a densidade, o ponto de fulgor e a composição dos ácidos graxos. Esses parâmetros são essenciais para garantir que o biodiesel produzido tenha desempenho adequado em motores, não cause danos aos sistemas de injeção e combustão e seja ambientalmente seguro.

Cada tipo de oleaginosa possui características distintas, como a composição de ácidos graxos, que impacta diretamente no processo de transesterificação e na qualidade do biodiesel produzido. Por exemplo, o biodiesel derivado de óleos com altos teores de ácidos graxos saturados, como o óleo de palma, pode exigir diferentes condições de processo em comparação com o óleo de soja, que contém uma maior proporção de ácidos

graxos insaturados. Isso implica ajustes na escolha dos catalisadores, na proporção de reagentes, na temperatura e no tempo de reação para otimizar a conversão do óleo em biodiesel.

Além disso, a presença de compostos indesejáveis, como a água, pode interferir no processo de transesterificação, exigindo etapas de pré-tratamento, como a desidratação do óleo. A adição de enzimas ou a utilização de processos de transesterificação com catalisadores ácidos ou básicos pode ser necessária dependendo do perfil do óleo, principalmente em casos em que o material apresenta elevado teor de ácidos graxos livres (FFA), o que dificulta o processo convencional de transesterificação.

Portanto, para que o biodiesel atenda aos requisitos da ANP e seja competitivo no mercado, cada oleaginosa deve passar por um processo de otimização que envolva desde a escolha adequada das matérias-primas até as condições ideais de processamento. A constante evolução das tecnologias de produção e a busca por processos mais eficientes e sustentáveis também influenciam as escolhas e estratégias de produção, com o objetivo de reduzir custos e impactos ambientais, enquanto assegura a qualidade e a conformidade do biodiesel.

#### 2.3.4 Rotas de produção de biodiesel

O biodiesel é um biocombustível renovável produzido por meio de reações entre óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais com álcoois, em presença de catalisadores. Existem duas abordagens principais para sua produção: a rota química e a rota biológica (DE ABREU et al., 2024).

As rotas químicas mais comuns incluem a transesterificação alcalina, onde os óleos reagem com uma base, como hidróxido de sódio ou potássio, formando biodiesel e glicerina como subproduto (KHALAF e SALIH, 2021; ANP, 2024). Outra rota é a transesterificação ácida, que usa catalisadores ácidos, mas enfrenta desafios relacionados ao custo e à remoção do catalisador (DELATORRE, 2011). Outras rotas incluem a hidrogenação, que converte ácidos graxos insaturados em ésteres saturados (WANCURA et al., 2021), e a rota Stollide, que utiliza a polimerização de ácidos graxos insaturados (FERRERO, FABA & EIMER, 2021). A biomassa líquida (BTL) é uma rota que converte biomassa lignocelulósica em líquidos intermediários, que podem ser refinados em biodiesel (WANCURA et al., 2021).

Apesar da maturidade tecnológica das rotas químicas, elas têm desvantagens, como o alto consumo de energia e o impacto ambiental devido ao uso de grandes quantidades de

catalisadores e ao tratamento de efluentes (DELATORRE, 2011; FERRERO, FABA & EIMER, 2021).

A rota biológica, por sua vez, utiliza enzimas como catalisadores para a transesterificação, operando em condições de temperatura mais baixas (30°C a 60°C), o que reduz o consumo de energia e pode ser mais eficiente devido à especificidade das enzimas, aumentando o rendimento do biodiesel (EVERTON et al., 2023; WANCURA et al., 2023). A conversão pode ocorrer de forma homogênea, com enzimas líquidas, ou heterogênea, com enzimas imobilizadas. Esta última opção é vantajosa porque permite a reutilização das enzimas, tornando o processo mais econômico e sustentável (WANCURA et al., 2023).

Embora o custo das enzimas seja elevado, a rota biológica oferece diversos benefícios sobre a rota química, como a eliminação de custos com catalisadores e tratamentos de resíduos, maior especificidade, e a capacidade de processar diferentes tipos de matérias-primas em uma única etapa. Além disso, o impacto ambiental é menor, pois não há geração de efluentes perigosos, e a recuperação do produto é facilitada (CHRISTOPHER, KUMAR & ZAMBARE, 2014; EVERTON et al., 2023).

Portanto, enquanto as rotas químicas continuam sendo amplamente utilizadas, as rotas biológicas se destacam como uma alternativa mais sustentável, embora ainda desafiada por questões de custo. A escolha entre as duas depende de fatores como eficiência, sustentabilidade e custo total de produção (FERRERO, FABA & EIMER, 2021; WANCURA et al., 2021).

### 2.3.5 Produção de biodiesel a partir de óleo de milho residual da destilação via rota enzimática

A produção de biodiesel a partir de óleo de milho residual da destilação (DCO) vem sendo estudada como uma alternativa sustentável, especialmente no contexto da utilização de subprodutos da produção de etanol de milho, como os DDGS. O DCO, proveniente da destilação de grãos secos de milho (DDGS), tem se mostrado uma matéria-prima de baixo custo e de fácil disponibilidade no mercado (VELJKOVIĆ et al., 2018). Embora o óleo de milho tenha sido historicamente considerado impróprio para biodiesel devido ao seu alto valor comercial e uso como alimento, estudos recentes mostram que subprodutos como o gérmen de milho e os DDGS, após a remoção do DCO, apresentam potencial para essa aplicação (GU et al., 2015).

A produção de biodiesel a partir do DCO pode ser realizada por reações de transesterificação ou esterificação (VELJKOVIĆ et al., 2018). Estudos laboratoriais, como o de Mata et al. (2012), evidenciam que a transesterificação do óleo de milho transgênico com enzimas suportadas resulta em bons rendimentos de FAEE (ésteres etílicos de ácidos graxos), mesmo quando alguns parâmetros de qualidade ficam fora dos limites da norma EN 14214:2009. A caracterização do DCO revela que sua composição é predominantemente de triacilgliceróis, com elevados níveis de ácidos graxos livres (FFA), o que torna necessária a utilização de tecnologias mais adequadas à conversão desse óleo, como a rota enzimática (MOREAU, 2020).

O processo de extração de óleo de milho dos DDGS é comumente realizado por métodos como a extração com solventes ou CO<sub>2</sub> supercrítico, com etanol anidro sendo um dos solventes mais utilizados (SINGH & CHERYAN, 1998). O processo de extração, conforme mostrado por Li et al. (2015) e Kwiatkowski & Cheryan (2002), tem se mostrado eficaz, com rendimentos de óleo de até 70% utilizando etanol. No entanto, o DCO bruto apresenta desafios, como alta acidez e teor de água, o que torna a rota enzimática uma alternativa viável, dispensando a necessidade de um pré-tratamento para reduzir a acidez, ao contrário do processo químico convencional (WANCURA et al., 2023; EVERTON et al., 2023).

Apesar de seu baixo grau de maturidade tecnológica, a rota enzimática é promissora para a conversão de DCO, devido à sua capacidade de processar óleos com alto teor de FFA, sem a necessidade de tratamento prévio (MOREAU & HUM, 2005). No entanto, a rota enzimática ainda enfrenta desafios relacionados ao custo e à viabilidade econômica, e mais estudos são necessários para avaliar seu potencial em escala comercial. A pesquisa futura deverá focar em otimizar os processos de produção, melhorar a eficiência e reduzir os custos operacionais, além de promover a integração da produção de biodiesel com a de etanol de milho para reduzir os custos gerais das plantas industriais (VELJKOVIĆ et al., 2018). Além disso, deve-se considerar as propriedades do biodiesel, seu desempenho, emissões e impactos ambientais e socioeconômicos (VELJKOVIĆ et al., 2018).

### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa é estruturada em 11 atividades, subdivididas em três fases, como apresentado na Figura 4.

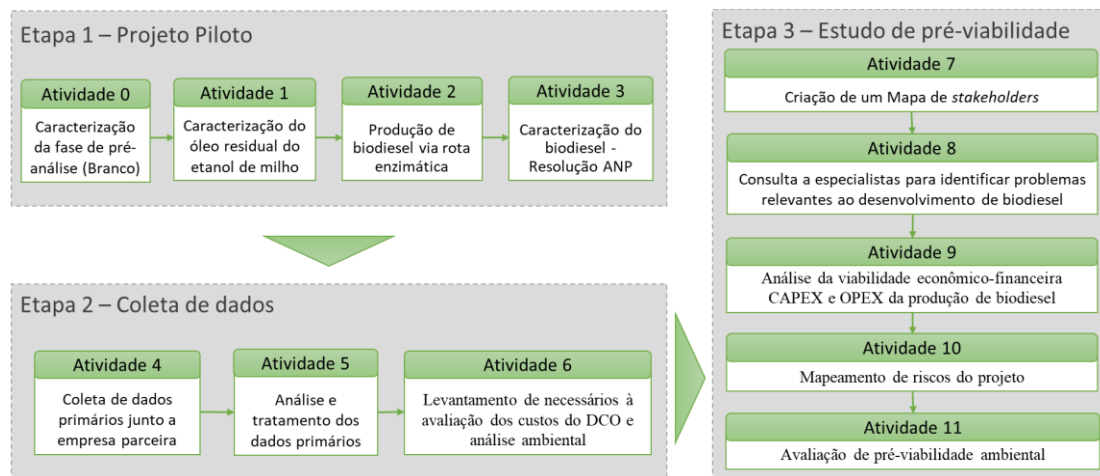


Figura 4. Fases da Metodologia de Pesquisa do projeto.

**Fonte:** Elaboração Própria.

A Etapa 1 do projeto contempla o Projeto Piloto, que tem como finalidade a realização do processo de produção de biodiesel via rota enzimática em uma escala ampliada quando comparada à escala laboratorial, de modo a se obter resultados referentes a taxa de conversão da reação, produção de glicerina, taxa de recuperação enzimática e do álcool utilizados na reação. Para isso, esta etapa é estruturada por meio de quatro atividades, como as citadas a seguir: (i) Atividade 0 – caracterização da fase de pré análise do óleo de milho residual e óleo de milho refinado por meio da calibração dos equipamentos, a partir do uso de óleo de soja refinado; (ii) Atividade 1 – caracterização do óleo residual do etanol de milho, de modo a definir parâmetros como umidade e acidez; (iii) Atividade 2 – produção de biodiesel via rota enzimática; e (iv) Atividade 3 – caracterização do biodiesel – Resolução ANP em vigência, de modo a garantir a qualidade do biodiesel a ser inserido no mercado nacional.

Na Etapa 2 do projeto, ocorre a coleta de dados, cujo objetivo é fazer o levantamento de informações e dados relativos ao processo de produção de biodiesel a partir do óleo residual da produção de etanol de milho por meio da rota enzimática. Desta forma, esta fase é dividida em: (i) Atividade 4 - coleta de dados primários junto a empresa parceira Cesbra, localizada no município de Volta Redonda (RJ), por meio de reuniões periódicas e visitas técnicas à instalação da usina; (ii) Atividade 5 - análise e tratamento dos dados

primários obtidos junto a empresa; e (iii) Atividade 6 - levantamento de dados primários e secundários necessários à avaliação dos custos de investimento, operação e manutenção, de distribuição do DCO, bem como para a análise ambiental qualitativa e quantitativa.

Por fim, a Fase 3 abrange o Estudo de pré-viabilidade, o qual tem a finalidade de avaliar aspectos econômicos como custos, financeiros com investimentos, assim como, ambientais, conforme atividades descritas a seguir: (i) Atividade 7 - criação de um mapa de *stakeholders*; (ii) Atividade 8 - consulta a especialistas para identificar problemas relevantes a partir de abordagem semiestruturada a fim de promover a identificação de problemas relevantes às questões reais relacionadas à cadeia de desenvolvimento e implantação do biodiesel no Brasil; (iii) Atividade 9 - análise da viabilidade econômica-financeira Capital Expenditure (CAPEX) e Operational Expenditure (OPEX) da produção de biodiesel a partir do óleo residual da produção de etanol de milho por meio da rota enzimática, no qual será estimado o Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE) dos custos totais de cada tipo de operação – produção por rota química versus por rota química e enzimática em paralelo, ao longo do seu período de vida. Além disso, a análise da viabilidade econômico-financeira do projeto considerará a Taxa Interna de Retorno (TIR) para avaliar a viabilidade do projeto (Simulações via Software Crystal Ball<sup>1</sup>); (iv) Atividade 10 - mapeamento de riscos do projeto, por meio da avaliação dos riscos do negócio a partir do mapeamento de riscos do projeto, que será desenvolvido no contexto do mercado de biocombustíveis, por meio de comparação dos riscos teóricos com o das estimativas realizadas. Para tal, será realizada uma Análise SWOT<sup>2</sup>, ou seja, das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Além disso, também serão avaliadas possibilidades de fontes de financiamento, como *comercial papers* e os financiamentos verde; e (v) Atividade 11 - Avaliação de pré-viabilidade ambiental alinhada aos ODS, a partir da análise do alinhamento da proposta com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), além do cálculo das emissões de GEE, por meio do método do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que

---

<sup>1</sup> O software Crystal Ball é uma ferramenta de simulação e análise de risco desenvolvida pela Oracle. Ele é amplamente utilizado em áreas como finanças, engenharia, gerenciamento de projetos e outras disciplinas que envolvem tomada de decisões baseadas em incertezas e dados probabilísticos.

<sup>2</sup> A análise SWOT é uma ferramenta de gestão amplamente utilizada para avaliar as Forças (*Strengths*), Fraquezas (*Weaknesses*), Oportunidades (*Opportunities*) e Ameaças (*Threats*) de uma organização, projeto ou situação

considera fatores de caracterização para a categoria de impacto *midpoint* Mudanças Climáticas.

## 4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

As atividades apresentadas na metodologia de pesquisa e desenvolvidas ao longo do projeto são descritas neste capítulo. A primeira atividade (0) consiste em testes utilizando óleo de soja refinado, com objetivo de verificar o funcionamento dos equipamentos, de modo a garantir seu funcionamento adequado. Isso porque quando utilizado o óleo refinado, os resultados esperados já são conhecidos e permitem avaliar o bom funcionamento do sistema.

Nas atividades posteriores (1-3), é possível realizar a caracterização do óleo residual da produção do etanol de milho, a produção do éster por rota enzimática a partir dele e a caracterização do biodiesel final, verificando o atendimento dos padrões

### 4.1 Descrição do processo

A Tabela 5 ilustra, de forma detalhada, o fluxograma das diferentes etapas envolvidas na produção de biodiesel por meio da rota enzimática. Esse processo abrange desde a seleção e preparação das matérias-primas até a purificação do biocombustível final, destacando as principais reações químicas e operações unitárias envolvidas.

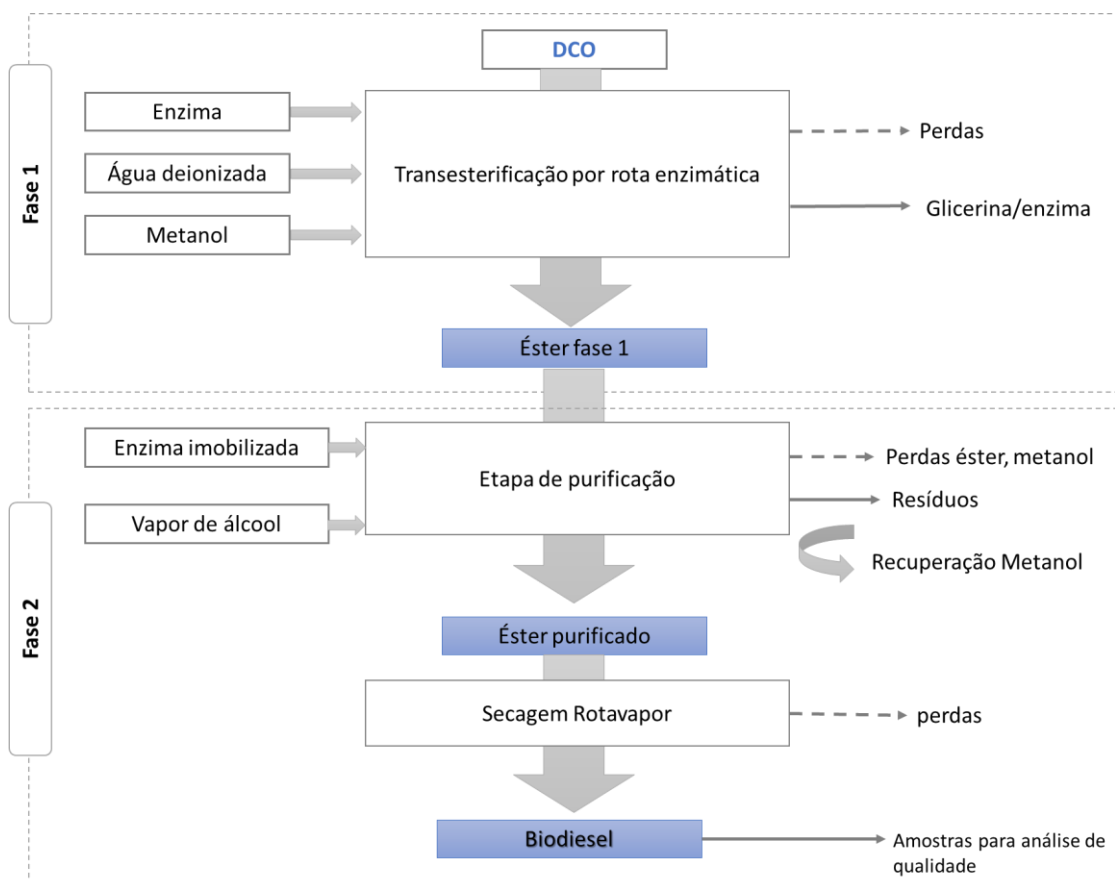


Figura 5. Fluxograma das fases da produção de biodiesel via rota enzimática.

Fonte: Elaboração Própria.

A Fase 1 consiste na transesterificação do óleo em éster utilizando-se a enzima, na presença de metanol. O primeiro passo consiste em medir o óleo em um beaker, transferindo o conteúdo para um frasco de reação. O óleo é aquecido até atingir uma temperatura de 40°C, submergindo o frasco de reação no manto de aquecimento. Em seguida, a enzima líquida e a água deionizada são adicionadas ao óleo sob leve agitação. O controlador de temperatura e um PT100 mantêm a temperatura estável, evitando a desnaturação enzimática e, ao mesmo tempo, mantendo a atividade enzimática em seu melhor desempenho. Em seguida, agitadores mecânicos mantêm a solução sob agitação 1.000 rotações por minuto (RPM) durante uma hora, permitindo a quebra das moléculas de ácidos lipídicos presentes no óleo.

Em seguida, o metanol é adicionado em seis etapas que devem ocorrer a cada uma hora. Em cada etapa, é retirada uma amostra para análise de viscosidade e densidade até que alcance uma viscosidade inferior a 6 mm<sup>2</sup>/s, conforme determinado pela resolução ANP 45/2014. As amostras são reincorporadas à reação após as análises.

A solução permanece em repouso no frasco de reação sem aquecimento para permitir a separação em duas fases: (1) superior, composta pelo éster, e (2) inferior, composta por glicerina e enzima. Após a separação completa, o éster é coletado e passa para a Fase 2, que consiste na sua purificação. A glicerina e as enzimas são transferidas para que possa ser realizada a recuperação enzimática e, após esse processo, a glicerina é destinada a outros usos.

Na Fase 2, o éster da Fase 1 é adicionado a um reator junto a enzima imobilizada. O vapor de álcool é, então, adicionado separadamente a uma temperatura de 35°C e conectado ao fundo do reator. O sistema é fechado por uma bomba de vácuo, que permite que os vapores de metanol entrem no reator e passem pela mistura de éster e enzima. O processo leva aproximadamente 13 horas e, ao final deste período, a bomba de vácuo é desligada, diminuindo a pressão interna no reator. No final, o fundo do reator é desconectado, e a mistura éster/enzima é coletada. O éster é, então, separado desta mistura, que passa para a fase de secagem. A enzima também é recuperada e separada para uso futuro. O vapor de álcool utilizado na Fase 2 também é recuperado após o uso.

Na fase de secagem, o sistema de aquecimento do rotavapor seca o éster obtido após a purificação ao aquecê-lo a uma temperatura de 80°C. O banho de gelo é utilizado no rotavapor a cerca de 10°C positivos. Dessa forma, o éster metílico passa para um frasco

que é imerso no banho de aquecimento do rotavapor. A bomba de vácuo e o agitador funcionam no sistema fechado do rotavapor. O processo de secagem leva cerca de 7 horas.

## 4.2 Etapa 1 – Projeto Piloto

Esta etapa do projeto foi realizada no laboratório do Centro de Pesquisa e Caracterização de Petróleo Bruto e Combustíveis (Coppecomb), sendo os testes realizados pela equipe de químicos que atuaram no projeto e os resultados avaliados em conjunto com os demais membros da equipe.

As atividades que foram desenvolvidas nessa etapa em

### 4.2.1 Atividade 0 - Caracterização da fase de pré-análise

Para o teste e calibração dos equipamentos, foi utilizado como referência o óleo de soja tratado. O objetivo desta atividade foi avaliar a qualidade, adequação e confiabilidade dos equipamentos e aparelhos laboratoriais, reagentes químicos e enzimas, por meio da verificação da consistência dos resultados dos parâmetros físico/químicos, como viscosidade, densidade, teor de água (Karl Fischer) e acidez.

Desta forma, para o teste de calibração, realizado de acordo com os processos de esterificação via rota enzimática descritos na Seção 5.1, foram utilizadas as matérias primas, reagentes e demais insumos descritos no Tabela 6. Para esta etapa foram realizados três processos (P1, P2, P3), com modificações nas proporções de entrada para verificar o processo que resultará na conversão mais otimizada do processo.

Tabela 6. Entradas do processo enzimático para a produção do biodiesel proveniente do óleo de soja refinado.

|                      |                      |      |                        |
|----------------------|----------------------|------|------------------------|
| <b>Óleo vegetal:</b> | Óleo de soja tratado | 0,5  | l                      |
| <b>Enzima</b>        | Enzima líquida       | 5    | ml                     |
| <b>Álcool</b>        | Metanol              | P1   | 150 ml                 |
|                      |                      | P2   | 200 ml                 |
|                      |                      | P3   | 200 ml                 |
| <b>Água grau II</b>  |                      | P1   | 10 ml                  |
|                      |                      | P2   | 50 ml                  |
|                      |                      | P3   | 50 ml                  |
| <b>Temperatura</b>   | P1/P2/P3             | 40   | °C                     |
| <b>Rotação</b>       | P1/P2/P3             | 1000 | rpm                    |
| <b>Data</b>          | 04/03/2024           | P1   | Início 10h50 Fim 15h50 |
|                      | 11/03/2024           | P2   | Início 10h30 Fim 16h30 |
|                      | 14/03/2024           | P3   | Início 10h05 Fim 16h05 |

**Fonte:** Elaboração Própria.

Como resultado da Fase 1, os parâmetros físico/químicos, como viscosidade e densidade são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Fases do processo de produção do biodiesel proveniente do óleo de soja refinado.

| Etapas        | VISCOSIDADE 40°C (mm <sup>2</sup> /s) |         |         | DENSIDADE 40°C (g/cm <sup>3</sup> ) |        |        |
|---------------|---------------------------------------|---------|---------|-------------------------------------|--------|--------|
|               | P1                                    | P2      | P3      | P1                                  | P2     | P3     |
| <b>Início</b> | 38,8930                               | 32,0820 | 34,8600 | 0,9163                              | 0,9133 | 0,9129 |
| <b>2</b>      |                                       |         | 21,8110 |                                     |        | 0,9059 |
| <b>3</b>      |                                       |         | 14,1500 |                                     |        | 0,9002 |
| <b>4</b>      |                                       |         | 8,9435  |                                     |        | 0,8954 |
| <b>5</b>      |                                       |         | 6,7515  |                                     |        | 0,8913 |
| <b>6</b>      |                                       |         | 6,3211  |                                     |        | 0,8870 |
| <b>Fim</b>    | 9,8220                                | 6,3395  | 5,6163  | 0,9003                              | 0,9004 | 0,8853 |

| RESULTADOS BALANÇO DE MASSA       |          |   |        |    |        |    |
|-----------------------------------|----------|---|--------|----|--------|----|
| Processo                          | P1       |   | P2     |    | P3     |    |
| <b>Fase superior (ester):</b>     | 381,29   | g | 484,64 | ml | 552,99 | ml |
| <b>Fase inferior (glicerina):</b> | 224,67   | g | 201,77 | ml | 176,21 | ml |
| <b>Perdas:</b>                    | 156,61   | g | 18,59  | ml | 25,8   | ml |
| <b>Alíquota</b>                   | 10,4245  | g | 12     | ml | 12,37  | ml |
| <b>Vai para a fase 2</b>          | 370,8655 | g | 472,64 | ml | 540,62 | ml |

**Fonte:** Elaboração Própria.

Por fim, as entradas da Fase 2 são apresentadas na Tabela 8 e os resultados do processo, tais como os parâmetros físico/químicos, como viscosidade, densidade, teor de água (Karl Fischer) e acidez, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 8. Entradas referentes a Fase 2.

| Dados                                       | P1     |    | P2     |    | P3     |    |
|---------------------------------------------|--------|----|--------|----|--------|----|
| <b>Enzima:</b> imobilizada (Habio Lipazyme) | 3,7175 | g  | 4,1836 | g  | 4,8    | g  |
| <b>Alcool:</b> vapor metanol                | 1000   | ml | 1000   | ml | 1000   | ml |
| Reagiu                                      | 425    | ml | 483    | ml | 335    | ml |
| Recuperado                                  | 405    | ml | 465    | ml | 410    | ml |
| Não reagiu                                  | 170    | ml | 52     | ml | 255    | ml |
| <b>Rendimento do óleo</b>                   |        |    |        |    | 385,25 | g  |

**Fonte:** Elaboração Própria.

Tabela 9. Resultados dos processos envolvidos na Fase 2.

| Fase 2                   | P1                        |                           | P2                       |                           | P3                       |                          |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | Início (Fase 1)           | Conclusão                 | Início (Fase 1)          | Conclusão                 | Início (Fase 1)          | Conclusão                |
| <b>Data</b>              | 06/03/2024                | 07/03/2024                | 12/03/2024               | 13/03/2024                | 19/03/2024               | 20/03/2024               |
| <b>Horário</b>           | 08:40                     | 16:25                     | 09:00                    | 17:00                     |                          |                          |
| <b>Ester</b>             | 370,87 g                  | 335 g                     | 472,9 ml                 | 427,21 ml                 | 540,62 ml                | 434,66 ml                |
| <b>Alíquota análise</b>  |                           | 10,48 g                   |                          |                           |                          | 12,12 ml                 |
| <b>ANÁLISE</b>           | P1                        |                           | P2                       |                           | P3                       |                          |
| Viscosity 40°C           | 4,07 mm <sup>2</sup> /s   | 4,48 mm <sup>2</sup> /s   | 4,40 mm <sup>2</sup> /s  | 5,17 mm <sup>2</sup> /s   | 5,60 mm <sup>2</sup> /s  | 5,30 mm <sup>2</sup> /s  |
| Density 20°C             | 0,8794 g/cm <sup>3</sup>  | 0,8813 g/cm <sup>3</sup>  | 0,882 g/cm <sup>3</sup>  | 0,8847 g/cm <sup>3</sup>  | 0,89 g/cm <sup>3</sup>   | 0,89 g/cm <sup>3</sup>   |
| Karl Fischer             | 3.044 mg/Kg               | 1.432 mg/Kg               | 3.446 mg/Kg              | 1.531 mg/Kg               | 1.522 mg/Kg              | 1.673 mg/Kg              |
| Acidity                  | 4,10 mg KOH/g             | 5,20 mg KOH/g             | 4,40 mg KOH/g            | 5,10 mg KOH/g             | 6,30 mg KOH/g            | 4,08 mg KOH/g            |
| <b>Secagem Rotavapor</b> | P1                        |                           | P2                       |                           | P3                       |                          |
|                          | Início (Fase 1)           | Conclusão                 | Início (Fase 1)          | Conclusão                 | Início (Fase 1)          | Conclusão                |
| <b>Data</b>              | 06/03/2024                | 07/03/2024                | 12/03/2024               | 13/03/2024                | 19/03/2024               | 20/03/2024               |
| <b>Horário</b>           | 08:40                     | 16:25                     | 09:00                    | 17:00                     |                          |                          |
| <b>Final Ester</b>       | 324,52 g                  | 0 g                       | 427,2 ml                 | 427,21 ml                 | 422,54 ml                | 434,66 ml                |
| <b>Alíquota análise</b>  |                           | 10,48 g                   |                          |                           |                          | 12,12 ml                 |
|                          | P1                        |                           | P2                       |                           | P3                       |                          |
| <b>Tempo</b>             | Início 9h40               | Final 16h30               | Início 09:00             | Final 17:00               | Início                   | Final                    |
| Viscosity 40°C           | 4,4791 mm <sup>2</sup> /s | 4,6929 mm <sup>2</sup> /s | 5,172 mm <sup>2</sup> /s | 5,1723 mm <sup>2</sup> /s | 5,600 mm <sup>2</sup> /s | 5,302 mm <sup>2</sup> /s |
| Density 20°C             | 0,8813 g/cm <sup>3</sup>  | 0,8820 g/cm <sup>3</sup>  | 0,885 g/cm <sup>3</sup>  | 0,8847 g/cm <sup>3</sup>  | 0,892 g/cm <sup>3</sup>  | 0,886 g/cm <sup>3</sup>  |
| Karl Fischer             | 1.432 mg/Kg               | 1.136 mg/Kg               | 1.531 mg/Kg              | 1.531 mg/Kg               | 1.522 mg/Kg              | 1.673 mg/Kg              |
| Acidity                  | 5,2 mg KOH/g              | 10,4 mg KOH/g             | 5,1 mg KOH/g             | 5,1 mg KOH/g              | 6,3 mg KOH/g             | 4,08 mg KOH/g            |
| <b>Alíquota análise</b>  |                           | 10,46 g                   |                          |                           |                          | 12,12 ml                 |

#### 4.2.2 Atividade 1 – Caracterização do óleo residual do etanol de milho

Nessa atividade é realizada a caracterização do óleo a ser utilizado como matéria-prima. As propriedades do óleo de milho residual têm diferenças importantes, sobretudo no que se refere a sua acidez, frente aos óleos refinados. Os diversos parâmetros físicos e/ou químicos foram determinados entre aqueles considerados relevantes para a formação do biodiesel, tais como índice de refração, massa específica, viscosidade, teor de água, índice de iodo, saponificação e índice de acidez, além de sua composição em ácidos graxos, conforme Tabela 10.

Tabela 10. Caracterização do óleo residual de milho

| Características                                  |                | Padrões    | Faixa - Óleos vegetais | Resultado                 |
|--------------------------------------------------|----------------|------------|------------------------|---------------------------|
| Índice de refração, 20°C                         |                | ASTM D1218 |                        | 1,4720                    |
| Massa específica, 20°C, Kg/m <sup>3</sup>        |                | ASTM D4052 | 0,917 – 0,925          | 0,9166                    |
| Viscosidade cinemática, 40°C, mm <sup>2</sup> /s |                | ASTM D7042 |                        | 32,58                     |
| Teor de água, máx, mg/Kg                         |                | ASTM D6304 |                        | 1540                      |
| Índice de iodo, g/100g                           |                | EN 14111   | 107-195                | 89,2                      |
| Índice de saponificação, mgKOH/g                 |                |            | 187 - 195              | 197                       |
| Índice de peróxidos, mEq Peróxido/1000g          |                |            | <10                    |                           |
| Nível de acidez, mgKOH/g                         |                | ASTM D664  | < 0,3% (Oleic acid)    | 27,5 (13,82 % Oleic acid) |
| Perfil de ácido graxo, %                         | Laurico        |            | <=0,3                  |                           |
|                                                  | Mirístico      |            | <=0,3                  | 0,0                       |
|                                                  | Palmítico      |            | 9,2 – 16,5             | 16,3                      |
|                                                  | Palmitoleico   |            | <=0,4                  | 0,1                       |
|                                                  | Estearico      |            | <=3,3                  |                           |
|                                                  | Oleico         |            | 20,0 – 42,2            | 35,2                      |
|                                                  | Linoleico      |            | 39,4 – 65,6            | 42                        |
|                                                  | Linolênico     |            | 0,5 – 1,5              | 1,3                       |
|                                                  | Araquídico     |            | 0,3 – 0,7              | 0,7                       |
|                                                  | Eicosenico     |            | <= 0,4                 |                           |
|                                                  | Eicosadienoico |            | <=0,1                  |                           |
|                                                  | Behêmico       |            | <=0,5                  | 0,2                       |
|                                                  | Erúcito        |            | <=0,1                  |                           |
|                                                  | Lignocérico    |            | <=0,4                  |                           |

#### 4.2.3 Atividade 2 – Produção de biodiesel via rota enzimática

A produção de biodiesel via rota enzimática na presença de metanol foi realizada utilizando a enzima - lipase líquida, obtida por doação da Tsinghua University, na China, no final de 2023. Na Figura 6 é possível observar o aspecto da enzima.



Figura 6. Enzima – lipase líquida  
**Fonte:** Elaboração Própria.

A enzima imobilizada utilizada na Fase 2 do processo de produção foi a Habio lipozyme, também obtida por meio de doação da Tsinghua University, China, conforme apresentado na Figura 7.



Figura 7. Enzima imobilizada.  
**Fonte:** Elaboração Própria.

Os dados de entrada para a produção do biodiesel na fase 1 da reação é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Dados de entrada para todos os testes realizados – Fase 1

| Dados de entrada      | Óleo vegeta DCO |     | Temperatura |     | Rotação  |     |     |     |     |
|-----------------------|-----------------|-----|-------------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|
|                       | P1 - P9         |     | P1 - P9     |     | P1 - P9  |     |     |     |     |
|                       | 0,5 l           |     | 40 °C       |     | 1000 rpm |     |     |     |     |
| Enzima Líquida (ml)   | P1              | P2  | P3          | P4  | P5       | P6  | P7  | P8  | P9  |
|                       | 30              | 30  | 40          | 30  | 30       | 15  | 15  | 5   | 15  |
| Álcool – Metanol (ml) | P1              | P2  | P3          | P4  | P5       | P6  | P7  | P8  | P9  |
|                       | 150             | 150 | 150         | 200 | 150      | 150 | 150 | 150 | 150 |

| Água grau II (ml) | P1 | P2 | P3 | P4  | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|-------------------|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|
|                   | 50 | 50 | 50 | 100 | 75 | 75 | 75 | 75 |    |

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 12 apresenta os dias em que foram realizados os nove testes de produção do biodiesel (P1 – 9), bem como os horários de início de finalização da Fase 1 da reação. Ainda, pode-se observar a densidade e a viscosidade das alíquotas retiradas para análise. Idealmente a primeira fase da reação deve ter seis horas de duração. No entanto, em alguns testes a viscosidade manteve-se alta após esse tempo, o que demandou uma extensão do tempo para que a viscosidade e densidade pudessem atingir um patamar para que o éster produzido pudesse passar para a próxima fase da produção.

Os dados referentes ao balanço de massa também são apresentados, podendo-se observar a quantidade de glicerina produzida na reação, as perdas e a alíquota retirada para análise, que não retorna para a reação, gerando, assim, a quantidade de éster que passa para a Fase 2 da reação.

Vale destacar, que a quantidade de enzima líquida utilizada variou para estimar o impacto no alcance da viscosidade e densidade desejada.

Tabela 12. Dados e parâmetros da primeira Fase da reação

|               | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Data</b>   | 04/04/2024 | 15/04/2024 | 25/04/2024 | 03/06/2024 | 04/07/2024 | 06/08/2024 | 09/09/2024 | 27/09/2024 | 16/10/2024 |
| <b>Início</b> | 10h50      | 9h50       | 9h25       | 9h30       | 8h30       | 8h00       | 8h40       | 7h50       |            |
| <b>Fim</b>    | 16h50      | 15h50      | 16h10      | 15h30      | 15h30      | 14h00      | 15h40      | 15h50      |            |

| Etapas                             | VISCOSIDADE 40°C (mm <sup>2</sup> /s) |         |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | P1                                    | P2      | P3      | P4      | P5      | P6      | P7      | P8      | P9      |
| <b>Início</b>                      | 40,7940                               | 35,8340 | 40,4940 | 42,2590 | 30,6850 | 30,8060 | 30,8060 | 30,8060 | 30,9950 |
| <b>1</b>                           |                                       | *       |         |         | 40,3830 | 35,4940 | 36,2260 | 36,8200 | 36,2970 |
| <b>2</b>                           | *                                     |         |         |         |         |         |         |         | 28,3470 |
| <b>3</b>                           |                                       |         |         |         |         |         |         |         | 18,7970 |
| <b>4</b>                           |                                       |         |         |         |         |         |         |         | 22,6920 |
| <b>5</b>                           |                                       |         |         |         | *       |         |         |         |         |
| <b>6</b>                           |                                       |         |         |         |         | *       |         |         |         |
| <b>Fim</b>                         | 4,9641                                | 4,2780  | 16,2680 | 21,9850 | 9,4641  | 8,6253  | 4,0443  | 4,8045  | 4,8729  |
| Dia seguinte ao início da produção |                                       |         | 4,6702  | 15,6630 |         | 4,9756  | 5,0577  |         |         |

| Etapas                             | DENSIDADE 40°C (g/cm <sup>3</sup> ) |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                    | P1                                  | P2     | P3     | P4     | P5     | P6     | P7     | P8     | P9     |
| <b>Início</b>                      | 0,9166                              | 0,9159 | 0,9189 | 0,9129 | 0,9021 | 0,9022 | 0,9022 | 0,9022 | 0,9024 |
| <b>2</b>                           |                                     |        |        |        |        | 0,9167 | 0,9168 | 0,9139 | 0,9160 |
| <b>3</b>                           |                                     |        |        |        |        |        |        |        | 0,9133 |
| <b>4</b>                           |                                     |        |        |        |        |        |        |        | 0,9034 |
| <b>5</b>                           |                                     |        |        |        |        |        |        |        | 0,8950 |
| <b>6</b>                           |                                     |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>Fim</b>                         | 0,8671                              | 0,8814 | 0,8819 | 0,8847 | 0,9127 |        | 0,8950 | 0,9018 | 0,8681 |
| Dia seguinte ao início da produção |                                     |        |        |        | 0,9186 | 0,8793 | 0,8689 |        |        |

| RESULTADOS BALANÇO         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Processo                   | P1 (ml) | P2 (ml) | P3 (ml) | P4 (ml) | P5 (ml) | P6 (ml) | P7 (ml) | P8 (ml) | P8 (ml) |
| Fase superior (ester):     | 402,49  | 402,67  | 399,95  | 514,13  | 496,51  | 473     | 417,97  | 474,58  | 483,23  |
| Fase inferior (glicerina): | 330,98  | 312,58  | 328,04  | 287,34  |         |         |         | 215,94  | 209,11  |
| Perdas:                    | 9,78    | 14,75   | 12,01   | 28,53   |         |         |         |         | 47,66   |
| Alíquota                   | 12,01   | 10,13   | 9,98    | 11,93   | 10,66   | 10,88   | 10,23   |         | 9,81    |
| Vai para a fase 2          | 390,48  | 392,54  | 389,97  | 502,20  | 485,85  | 462,12  | 407,74  | 474,58  | 473,42  |

\* Devido a rápida separação das fases, não foi possível realizar as análises de densidade e viscosidade a partir desta etapa

Fonte: Elaboração própria

Na fase 2, tem como entrada para a reação, além do éster proveniente da primeira fase, cerca de 1000 ml de vapor de álcool (metanol). Além dele, entra a enzima imobilizada, com variação na sua quantidade para estimar a sua contribuição no alcance da acidez de acordo com os parâmetros estabelecidos para a qualidade do biodiesel pela ANP. Essa quantidade pode ser observada na Tabela 13.

Tabela 13. Quantidade de enzima líquida utilizada nos testes de produção de biodiesel

| Enzima imobilizada (g)<br>(Habio Lipozyme) | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   | P6    | P7    | P8    | P9    |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                                            | 7,05 | 7,13 | 3,40 | 4,60 | 4,68 | 12,01 | 20,01 | 25,00 | 15,09 |

Na fase 2, busca-se alcançar, portanto, a acidez baixa, com uma reação que utiliza a enzima imobilizada com duração ideal de oito horas de reação. A Tabela 14 apresentada os resultados obtidos na fase 2 e na fase de secagem rotavapor. No teste da primeira produção (P1) houve interrupção da reação devido à contaminação do éster com a água decorrente da desconexão entre equipamentos, não tendo sido realizada as análises de acidez, viscosidade, densidade e Karl Fischer.

Tabela 14. Dados da Fase 2 e fase de secagem

| Data                                | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Início                              | 05/04/2024 | 16/04/2024 | 26/04/2024 | 05/06/2024 | 08/07/2024 | 07/08/2024 | 10/09/2024 | 30/09/2024 | 16/10/2024 |
|                                     | 9h00       | 10h05      | 9h15       | 9h30       | 9h25       | 9h10       | 9h30       | 8h30       | 8h35       |
| Parâmetros                          | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
| Viscosity 40°C (mm <sup>2</sup> /s) | 4,6771     | 4,6278     | 4,6702     | 23,2320    | 4,7231     | 4,9759     | 5,0577     |            | 4,8729     |
| Density 20°C (g/cm <sup>3</sup> )   | 0,8816     | 0,8814     | 0,8819     | 0,9123     | 0,8854     | 0,8840     | 0,8839     |            | 0,8828     |
| Karl Fischer (mg/Kg)                | 2538       | 2329       | 2634       | 11803      | 2697       | 2520       | 2432       |            | 2.589      |
| Acidity (mg KOH/g)                  | 5,31       | 5,32       | 5,47       | 26,18      | 6,40       | 6,21       | 5,60       |            | 5,57       |
|                                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Ester (fase 2)                      | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
|                                     | 347,03     | 351,79     | 359,75     | 460,78     | 447,57     | 378,06     | 340,00     | 373,31     | 414,29     |
| Alíquota (ml)                       | 9,59       | 9,88       | 9,68       | 11,30      | 8,80       | 9,15       | 7,57       | 10,8       | 11,29      |
|                                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Data                                | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
| Fim                                 | 06/04/2024 | 17/04/2024 | 27/04/2024 | 06/06/2024 | 09/07/2024 | 08/08/2024 | 11/09/2024 | 01/10/2024 | 17/10/2024 |
|                                     | 17h00      | 16h00      | 16h30      |            |            |            |            |            |            |
| Parâmetros                          | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
| Viscosity 40°C (mm <sup>2</sup> /s) | 4,9273     | 4,8823     | 5,0503     | 12,0610    | 4,9173     | 5,0396     | 5,0077     | 5,1124     | 5,027      |
| Density 20°C (g/cm <sup>3</sup> )   | 0,8827     | 0,8826     | 0,8834     | 0,9007     | 0,8828     | 0,8840     | 0,8838     | 0,8844     | 0,8836     |
| Karl Fischer (mg/Kg)                | 1251       | 1041       | 1207       | 905        | 1522       | 1176       | 1230       | 1049       | 1208       |
| Acidity (mg KOH/g)                  | 5,27       | 4,58       | 5,81       | 3,06       | 4,50       | 1,92       | 1,70       | 2,28       | 4,49       |
|                                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recuperação Metanol                 | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
| Reagiu                              | 270        | 415        | 490        | 300        | 115        | 186        | 160        | 540        | 100        |
| Recuperado                          | 545        | 405        | 360        | 490        | 100        | 289        | 280        | 360        | 250        |
| Não reagiu                          | 185        | 180        | 150        | 210        | 745        | 525        | 560        | 100        | 650        |
|                                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Fase de secagem - Rotavapor         |            |            |            |            |            |            |            |            |            |

|                          | P1     | P2     | P3            | P4     | P5     | P6     | P7     | P8     | P9     |
|--------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Ester (da fase 2)</b> | 337,44 | 341,91 | <b>348,67</b> | 449,48 | 438,77 | 368,92 | 332,43 | 362,51 | 414,29 |
| <b>Alíquota (ml)</b>     |        | 10,00  | 10,65         | 11,82  | 10,23  | 10,09  | 9,98   | 9,33   | 11,29  |

|               | P1         | P2         | P3         | P4         | P5         | P6         | P7         | P8         | P9         |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Data</b>   | 07/04/2024 | 17/04/2024 | 27/04/2024 | 07/06/2024 | 10/07/2024 | 06/08/2024 | 12/09/2024 | 03/10/2024 | 21/10/2024 |
| <b>Início</b> | 8h30       | 8h20       | 7h55       | 8h00       | 8h00       | 8h00       | 11h00      | 8h30       | 10h00      |
| <b>Fim</b>    | *          | 16h00      | 16h30      | 16h30      | 16h30      | 16h00      | 16h00      | 16h00      | 16h:30     |

|                                     | P1 | P2     | P3     | P4      | P5     | P6     | P7     | P8     | P9     |
|-------------------------------------|----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Parâmetros</b>                   |    |        |        |         |        |        |        |        |        |
| Viscosity 40°C (mm <sup>2</sup> /s) |    | 4,9659 | 5,0967 | 12,4980 | 5,0401 | 5,1695 | 5,1131 | 5,1487 | 5,1048 |
| Density 20°C (g/cm <sup>3</sup> )   |    | 0,8827 | 0,8834 | 0,9140  | 0,8835 | 0,8835 | 0,8841 | 0,8848 | 0,8837 |
| Karl Fischer (mg/Kg)                |    | 507    | 514    | 304     | 551    | 313    | 605    | 976    | 330    |
| Acidity (mg KOH/g)                  |    | 4,33   | 2,88   | 3,20    | 5,14   | 2,06   | 1,70   | 2,29   | 4,41   |

|                    | P1 | P2     | P3     | P4     | P5     | P6     | P7     | P8     | P9     |
|--------------------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Ester Final</b> |    | 331,91 | 338,02 | 441,58 | 435,77 | 366,47 | 329,29 | 372,16 | 403,00 |
| <b>Perdas</b>      |    |        |        | 7,90   |        |        |        |        | 0,035  |

Fonte: Elaboração própria

No entanto, as reações da fase 2 apresentaram uma duração que variou entre 13 e 16 horas, enquanto a fase de secagem no rotavapor variou de cerca de oito a 17 horas. A Figura 8 apresenta os tempos de reação por fase e o tempo total da reação.

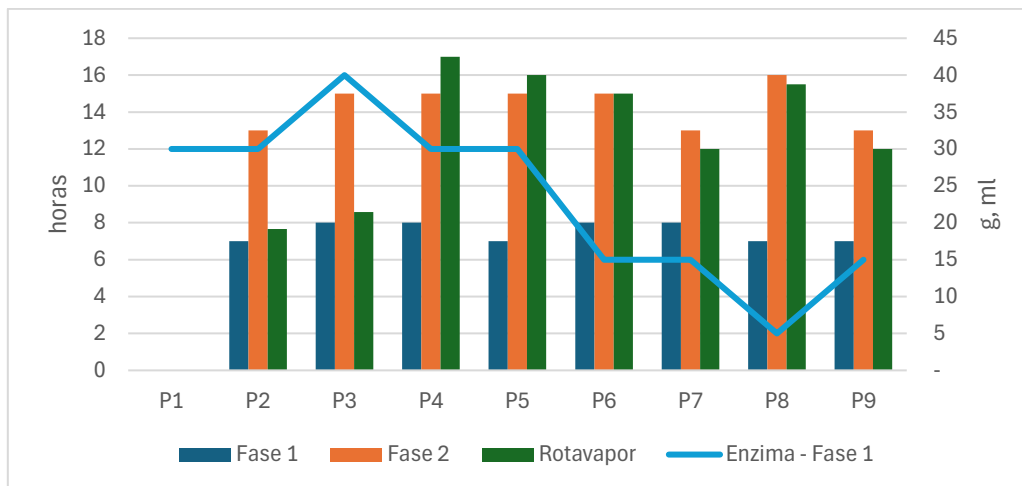


Figura 8. Tempo de reação de produção do biodiesel

A Figura 9 apresenta o uso da enzima líquida e os tempos de reação obtidos nas produções (P1-9).

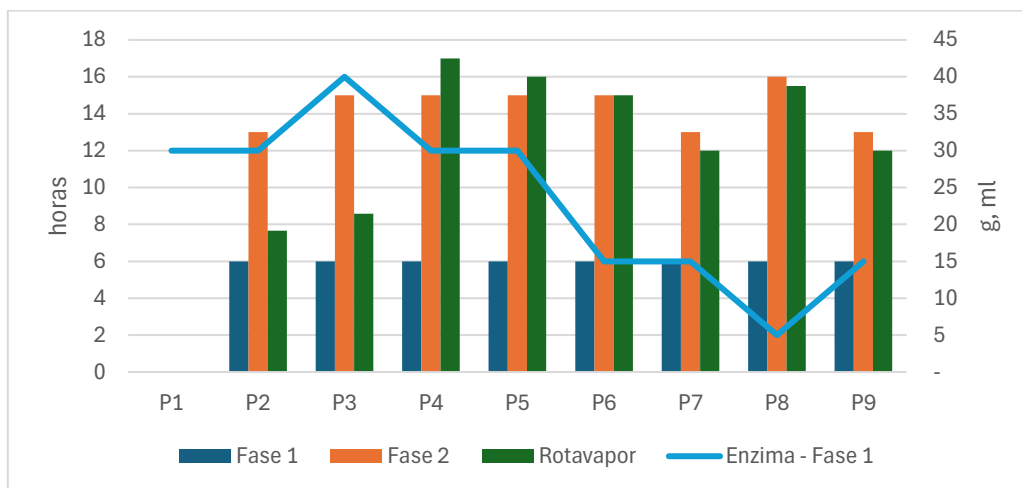


Figura 9. Tempo de reação e uso da enzima líquida

A Figura 10 apresenta o uso da enzima imobilizada e os tempos de reação obtidos nas produções (P1-9).

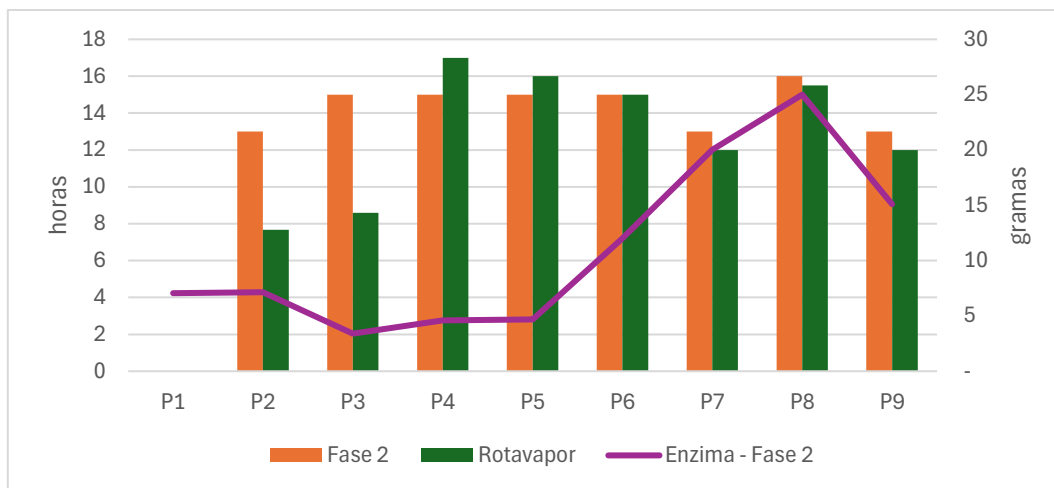


Figura 10. Uso da enzima imobilizada e tempo de reação

Ainda que o tempo de reação tenha sido maior, não foi possível alcançar nível de acidez desejada, com valor máximo, de 0,5 mg KOH/g de óleo residual, conforme RANP 45/2014 RANP 798/2019, como pode ser observado na Figura 11, que apresenta a variação da acidez do biodiesel em relação à variação do uso das enzimas.

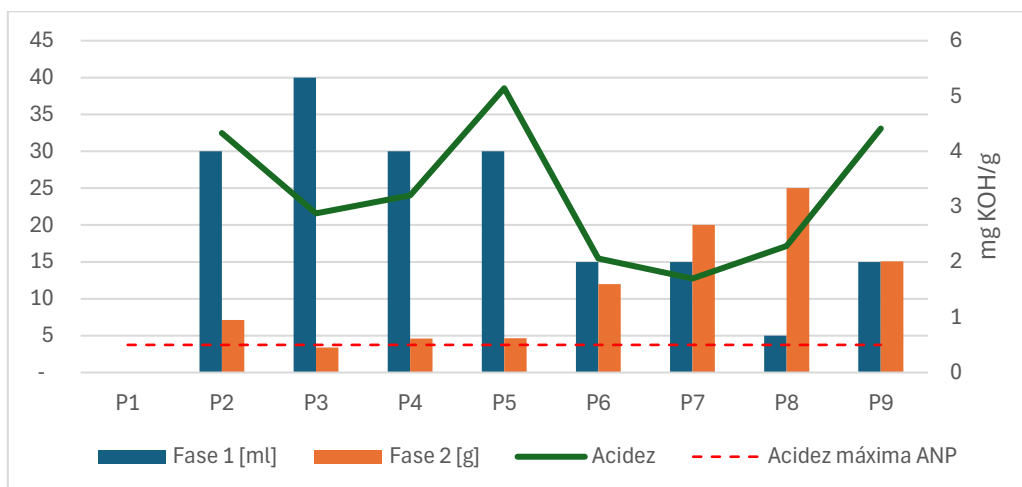


Figura 11. Uso da enzima e impacto na acidez do biodiesel

Inicialmente projetada com a utilização das enzimas produzidas pela Novozymes, que não oferta mais suas enzimas imobilizadas para a produção de biocombustíveis<sup>3</sup>, a reação utilizando-se nova enzima líquida e a enzima imobilizada - com baixa atividade, por estar com prazo expirado – impactou no tempo de reação e nas características do biodiesel fora dos padrões da ANP para ser comercializado.

<sup>3</sup> Informação obtida diretamente com a empresa, durante negociações para aquisição da enzima

Dessa forma, a variação na quantidade da enzima durante os testes busca avaliar o seu impacto na produção do biodiesel. A realização de diversos testes busca viabilizar a produção, otimizando o processo, sem impactar no aumento do uso da enzima, que pode impactar nos custos de aquisição desses insumos, que como apontado na revisão da literatura, é o ponto crítico para a viabilidade financeira da aplicação da rota enzimática em larga escala.

Portanto, novos testes são necessários para ajuste dessas proporções de modo a garantir a viabilidade técnica, prevendo o aumento de ambas as enzimas para garantir a viabilidade técnica, desconsiderando o possível impacto nos custos em primeiro momento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMOS PASSOS

O presente relatório buscou apresentar o andamento das atividades do projeto de pré-viabilidade econômico-financeira e ambiental da produção por rota enzimática, utilizando óleo residual proveniente da produção de etanol de milho. Especificamente, foram elaboradas as etapas de revisão da literatura e realizados testes para avaliação da viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir do óleo residual de milho (DCO) via rota enzimática.

De acordo com o identificado na literatura, do ponto de vista ambiental, a utilização do DCO como matéria-prima apresenta vantagens significativas, uma vez que evita a competição com a cadeia alimentar e promove o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Além disso, a rota enzimática apresenta menor impacto ambiental se comparada aos processos químicos convencionais, devido à redução no consumo energético e da geração de efluentes.

A integração entre as cadeias produtivas do etanol e do biodiesel, conforme observado no contexto brasileiro, pode representar uma oportunidade estratégica para reduzir custos e aumentar a sustentabilidade do setor. Adicionalmente, a análise de riscos e o alinhamento do projeto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU serão essenciais para consolidar sua contribuição socioambiental.

A análise bibliométrica e sistemática realizada reforçou a relevância do tema no cenário científico atual, destacando o crescente interesse em rotas biotecnológicas para a produção de biocombustíveis. Periódicos de alto impacto, como *Renewable Energy* e *Fuel*, têm publicado pesquisas que abordam avanços em catalisadores enzimáticos e no aproveitamento de óleos residuais, corroborando a inovação proposta neste projeto. Contudo, há escassez de estudos aplicados em escala industrial evidencia a necessidade de pesquisas que integrem viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Os resultados obtidos nos testes piloto evidenciaram a necessidade de otimização do processo enzimático na conversão do DCO em ésteres metílicos frente aos desafios relacionados à alta acidez e umidade do óleo residual. Isso se deve às limitações da atividade enzimática. Novas enzimas foram adquiridas no final do ano de 2024 para realização de novos testes para alcance dos parâmetros físico-químicos do biodiesel estabelecidos pela ANP.

Portanto, os próximos passos do projeto incluem a otimização das condições reacionais, com ênfase no ajuste das proporções de enzimas, caso não seja identificada uma nova enzima no mercado. Após validada as proporções dos insumos, será possível realizar o dimensionamento e a avaliação econômico-financeira da produção.

## Referências

- ACHARYA, N. et al. A comparative study of stability characteristics of mahua and jatropha biodiesel and their blends. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, v. 31, n. 2, p. 184-190, 2019.
- ANP Produção de Biodiesel. 2024. Available at: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTlkODYyODctMGJjNS00MGlyLWJmMWItNGJlNDg0ZTg5NjBliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtyNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMjY9&pageName=ReportSection8aa0cee5b2b8a941e5e0%22>. Accessed 28 Jun 2023
- CHRISTOPHER, Lew P.; KUMAR, Hemanathan; ZAMBARE, Vasudeo P. Enzymatic biodiesel: Challenges and opportunities. *Applied Energy*, v. 119, p. 497-520, 2014.
- CONCEIÇÃO, L.R.V., SANTOS NETO, O., MARES, E. K. L. (2014) Produção De Biodiesel Metílico De Palma Via Catálise Enzimática: Otimização Das Condições Reacionais. In: Química e sociedade: Motores da Sustentabilidade.
- CANESIN, Edmilson Antonio et al. Characterization of residual oils for biodiesel production. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 17, n. 1, p. 39-45, 2014. doi:10.1016/j.ejbt.2013.12.007.
- CORONADO, Christian Rodriguez; DE CARVALHO JR, João Andrade; SILVEIRA, José Luz. Biodiesel CO2 emissions: A comparison with the main fuels in the Brazilian market. *Fuel processing technology*, v. 90, n. 2, p. 204-211, 2009. doi:10.1016/j.fuproc.2008.09.006.
- DELATORRE, A. B. (2011). Produção De Biodiesel: Considerações Sobre As Diferentes Matérias-Primas E Rotas Tecnológicas De Processos. BS 1.: <https://doi.org/10.25242/8868112011510>
- DE ABREU V. H. S. et al. (2024). Perspectivas Críticas Sobre A Produção De Biodiesel A Partir De Distillers Corn Oil No Contexto Brasileiro. 38º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. At: Florianópolis, Santa Catarina.
- DE ABREU V. H. S. et al. (2025). Enzymatic Biodiesel Synthesis: Transforming Waste Oil into Renewable Energy. *Recent Advances in Transportation*. Springer.
- DE ASSIS, Tássia Faria et al. Sustainable transport indicators and mitigation actions applied to the green bond principles. In: *Carbon Footprints of Manufacturing and Transportation Industries*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 139-169.
- DE CARVALHO, Ana Paula Campos; FERREIRA, Rafael Lopes. A utilização de biocombustível como alternativa sustentável na matriz energética brasileira. *Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 5, n. 3, 2014.
- DUARTE, Victória Huch et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. *Meio Ambiente (Brasil)*, v. 4, n. 2, 2022.
- EVERTON, Stefanni S. et al. The role of Brazil in the advancement of enzymatic biodiesel production. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 40, n. 1, p. 67-80, 2023.
- FERRERO, Gabriel Orlando; FABA, Edgar Maximiliano Sánchez; EIMER, Griselda Alejandra. Biodiesel production from alternative raw materials using a heterogeneous low ordered biosilicified enzyme as biocatalyst. *Biotechnology for Biofuels*, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2021.
- GONÇALVES, D. N. S. Elaboração de Cenários prospectivos para o uso de energia e para emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes brasileiro - uma abordagem multinível. *Coppe - Universidade Federal do Rio de Janeiro*. 2022.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, Lina María et al. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1137-1148, 2018.

GUERRA, Edson Perez; FUCHS, Werner. Biocombustível renovável: uso de óleo vegetal em motores. *Revista Acadêmica Ciência Animal*, v. 8, n. 1, p. 103-112, 2010.

GU, Jiahui et al. Studies on biodiesel production from DDGS-extracted corn oil at the catalysis of Novozym 435/super absorbent polymer. *Fuel*, v. 146, p. 33-40, 2015.

KHALAF, A. M.; SALIH, N. Y. Study of enzymatic production of biodiesel using vegetable oils and commercial ethanol. *Eurasian Chem. Commun*, v. 3, p. 665-677, 2021.

KWIATKOWSKI, Jason Richard; CHERYAN, M. Extraction of oil from ground corn using ethanol. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 79, n. 8, p. 825-830, 2002.

LI, Hongjun et al. Study on the parameters of extrusion pretreatment of corn germ with semi-wet milling in solvent oil extraction. *Cereal Chemistry*, v. 92, n. 4, p. 411-417, 2015.

LUQUE, Rafael et al. Biodiesel as feasible petrol fuel replacement: a multidisciplinary overview. *Energy & Environmental Science*, v. 3, n. 11, p. 1706-1721, 2010.

MATA, Teresa M. et al. Biodiesel production from corn oil via enzymatic catalysis with ethanol. *Energy & fuels*, v. 26, n. 5, p. 3034-3041, 2012.

MARX, Sanette. Glycerol-free biodiesel production through transesterification: a review. *Fuel Processing Technology*, v. 151, p. 139-147, 2016.

Ministério da Agricultura e Pecuária. Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). 2023. Disponível: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/mda/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>

MOREAU, Robert A.; HUMS, Megan E. Corn oil and distillers corn oil. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, p. 1-27, 2005.

MOREIRA, Katerine S. et al. Optimization of the production of enzymatic biodiesel from residual babassu oil (*Orbignya sp.*) via RSM. *Catalysts*, v. 10, n. 4, p. 414, 2020.

NASCIMENTO, Jean Gleison Andrade do. Valorização de óleo residual por catálise enzimática suportada em nanopartículas magnéticas para produção de biodiesel. 2022. Tese de Doutorado.

REŞİTOĞLU, İbrahim Aslan; ALTINIŞIK, Kemal; KESKIN, Ali. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 17, p. 15-27, 2015.

SALLA, Diones Assis et al. Estudo energético da produção de biocombustível a partir do milho. *Ciência Rural*, v. 40, p. 2017-2022, 2010.

SINGH, N.; CHERYAN, M. Extraction of oil from corn distillers dried grains with solubles. *Transactions of the ASAE*, v. 41, n. 6, p. 1775-1777, 1998.

VELJKOVIĆ, Vlada B. et al. Biodiesel production from corn oil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 531-548, 2018.

WANCURA, João HC et al. Demystifying the enzymatic biodiesel: How lipases are contributing to its technological advances. *Renewable Energy*, p. 119085, 2023.

WANCURA, João HC et al. Semi-continuous production of biodiesel on pilot scale via enzymatic hydroesterification of waste material: Process and economics considerations. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, p. 124838, 2021.

ZAVARISE, Julio Pansiere et al. Produção De Biodiesel A Partir Da Transesterificação Enzimática De Resíduos Oleosos: Uma Análise Bibliométrica De 2001 A 2021. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, v. 19, n. 1, p. 01-21, 2022.