

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**NÁTALLI GEIK KLEMS**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOQUEROSENE A PARTIR DE ÓLEOS  
DE COCO E BABAÇU POR DESTILAÇÃO EM COLUNA DE VIGREUX**

**CAMPO MOURÃO**

**2025**

**NÁTALLI GEIK KLEMS**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOQUEROSENE A PARTIR DE ÓLEOS  
DE COCO E BABAÇU POR DESTILAÇÃO EM COLUNA DE VIGREUX**

**Production and characterization of biokerosene from coconut and babassu oils  
by distillation in a vigreux column**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Angela Maria Gozzo

**CAMPO MOURÃO**

**2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**NÁTALLI GEIK KLEMS**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOQUEROSENE A PARTIR DE ÓLEOS  
DE COCO E BABAÇU POR DESTILAÇÃO EM COLUNA DE VIGREUX**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/dezembro/2025

---

Angela Maria Gozzo  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Stephani Caroline Beneti  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gideã Taques Tractz  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO**

**2025**

Dedico este trabalho à minha família, base de tudo o que sou, por me ensinar que o conhecimento floresce quando é regado com amor, paciência e fé.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me permitir viver neste mundo, pela saúde, disposição e pelo acesso a todo o conhecimento que pude adquirir ao longo desta caminhada. Agradeço por nunca soltar a minha mão, mesmo nos dias mais escuros, e por me fazer compreender que tudo faz parte do processo da vida, que as tribulações existem para nos fortalecer e nos amadurecer.

À minha orientadora, Profa. Dra. Angela Maria Gozzo, agradeço pela dedicação, pelo acompanhamento constante em todas as etapas de construção deste trabalho e pela paciência em cada ajuste até que ele ficasse como desejávamos. Sou grata não apenas pela orientação acadêmica, mas também pela amizade, pelas palavras de incentivo e pelos pensamentos positivos que tantas vezes me deram forças para continuar.

À Profa. Dra. Stéphanie Caroline Beneti, membro da banca avaliadora, agradeço imensamente por todo o apoio na elaboração deste trabalho, pela ajuda em cada detalhe dos procedimentos e pela parceria nas dificuldades. Você foi a peça fundamental para que este estudo pudesse ser concluído com êxito.

Ao meu esposo, Yuri Yohan, agradeço por caminhar ao meu lado na decisão mais difícil da minha vida, por me fortalecer nos momentos de dor e angústia e por ser meu porto seguro e minha rede de apoio. É com você que compartilho todas as minhas experiências e é com você que desejo continuar dividindo cada dia da minha vida, se assim Deus permitir. Obrigada por ser o meu alicerce.

À minha família e amigos, ainda que fisicamente distante em muitos momentos, agradeço pelas forças que sempre me enviaram e, principalmente, pela educação e pelos valores que me foram dados. Sem vocês eu não teria chegado até aqui. Sinto-me imensamente feliz por poder compartilhar esta conquista com cada um de vocês.

Aos meus amigos Lívia, Bianca, Luiz Eduardo e Otto, deixo meu sincero agradecimento pela presença diária, pelo apoio, pelas conversas e pelas risadas que tornaram esta caminhada mais leve. Vocês me mostraram que ninguém passa por esse processo sozinho e que a amizade torna os desafios mais suportáveis e a graduação muito melhor.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por abrir portas, oferecer ensino público, gratuito e de qualidade, e por ter sido o espaço onde cresci como estudante, profissional e ser humano.

## RESUMO

A aviação ainda depende fortemente de combustíveis fósseis, o que resulta em elevados níveis de emissões atmosféricas e reforça a necessidade de introdução gradual de combustíveis renováveis, como o bioquerosene. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir bioquerosene a partir de dois óleos vegetais, babaçu e coco, avaliando o atendimento às especificações exigidas pelos órgãos reguladores para combustíveis aeronáuticos. Para isso, inicialmente foi obtido biodiesel por transesterificação etílica alcalina, utilizando razões molares óleo:álcool de 1:9 e 1:18 para ambos os óleos. Em seguida, esse biodiesel foi submetido à destilação a vácuo em coluna de Vigreux, visando à obtenção de duas frações principais: a fração de topo, considerada como bioquerosene, e a fração de fundo, composta pelos ésteres etílicos remanescentes. As frações obtidas foram caracterizadas por cromatografia gasosa com detecção por ionização de chama e por ensaios físico-químicos de densidade, viscosidade, acidez total, ponto de fulgor, ponto de congelamento e aparência, apresentando resultados coerentes com os perfis descritos na literatura, com maior concentração de ésteres de menor massa molar na fase de topo e de ésteres mais pesados na fase de fundo. A comparação com a Resolução ANP nº 856/2021 e com dados de referência indicou que ambos os óleos apresentam potencial para aplicação no setor aeronáutico, embora algumas propriedades ainda demandem ajustes para pleno atendimento às normas, sendo que o bioquerosene derivado do óleo de babaçu foi o que mais se aproximou dos critérios estabelecidos. Os resultados obtidos sugerem que os combustíveis produzidos não devem ser utilizados de forma isolada em motores a combustão, mas se mostram promissores para uso em mistura com o querosene de aviação de origem fóssil, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao setor aeronáutico.

Palavras-chave: bioquerosene; óleo de babaçu; óleo de coco; aviação.

## ABSTRACT

The aviation sector still depends heavily on fossil-based jet fuels, which leads to high levels of atmospheric emissions and reinforces the need for the gradual introduction of renewable fuels such as biokerosene. In this context, the present work aimed to produce biokerosene from two vegetable oils, babassu and coconut, and to evaluate its compliance with the specifications required by regulatory agencies for aviation fuels. For this purpose, biodiesel was first obtained by alkaline ethylic transesterification, using oil:alcohol molar ratios of 1:9 and 1:18 for both oils. This biodiesel was then subjected to vacuum distillation in a Vigreux column in order to obtain two main fractions: the top fraction, considered as biokerosene, and the bottom fraction, composed of the remaining ethyl esters. The fractions obtained were characterized by gas chromatography with flame ionization detection and by physicochemical tests of density, viscosity, total acidity, flash point, freezing point and appearance. The results were consistent with profiles reported in the literature, with a higher concentration of lower molar mass esters in the top fraction and heavier esters in the bottom fraction. Comparison with ANP Resolution No. 856/2021 and reference data indicated that both oils have potential for application in the aviation sector, although some properties still require adjustment to fully meet the standards, and the biokerosene derived from babassu oil was the one that most closely matched the established criteria. The results suggest that the fuels produced should not be used alone in combustion engines, but are promising for blending with fossil aviation kerosene, contributing to the reduction of the environmental impact associated with the aviation sector.

Keywords: biokerosene; babassu oil; coconut oil; aviation.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Corte esquemático do coco .....   | 25 |
| Figura 2 - Corte esquemático do fruto babaçu .....   | 27 |
| Figura 3 - Mecanismo reacional da transesterificação .....                                   | 29 |
| Figura 4 - Reação de transesterificação detalhada .....                                      | 31 |
| Figura 5 - Separação de fases entre biodiesel e glicerol .....                               | 33 |
| Figura 6 - Arranjo experimental: (a) Esquema ilustrativo (b) Montagem experimental .....     | 37 |
| Figura 7 - Separação de fases: (a) Esquema ilustrativo (b) e (c) Montagem experimental ..... | 38 |
| Figura 8 - Aparato experimental usado na destilação .....                                    | 39 |
| Figura 9 - Diferença visual entre o topo e fundo da destilação.....                          | 40 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 - Evolução no número de voos no Brasil ..... | 17 |
| Gráfico 2 - Cromatograma do BioqB1 .....               | 46 |
| Gráfico 3 - Cromatograma do BioqC1 .....               | 47 |
| Gráfico 4 - Cromatograma do BioqB2 .....               | 48 |
| Gráfico 5 - Cromatograma do BioqC2 .....               | 49 |
| Gráfico 6 - Fundo x Topo (BioqB1) .....                | 51 |
| Gráfico 7 - Fundo x Topo (BioqB2) .....                | 51 |
| Gráfico 8 - Fundo x Topo (BioC1) .....                 | 51 |
| Gráfico 9 - Fundo x Topo (BioqC2) .....                | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química do JET-A1 .....             | 20 |
| Tabela 2 - Composição química do óleo de coco.....        | 25 |
| Tabela 3 - Composição química do óleo de babaçu .....     | 27 |
| Tabela 4 - Metodologias usadas na caracterização .....    | 41 |
| Tabela 5 - Metodologias usadas na caracterização .....    | 43 |
| Tabela 6 - Porcentagem de ácido oleico nas amostras ..... | 43 |
| Tabela 7 - Informações reacionais.....                    | 44 |
| Tabela 8 - Conversão de ésteres.....                      | 45 |
| Tabela 9 - Composição química do bioquerosene .....       | 47 |
| Tabela 10 - Perfil dos ácidos graxos do topo .....        | 52 |
| Tabela 11 - Perfil dos ácidos graxos do fundo .....       | 53 |
| Tabela 12 - Caracterização do bioquerosene.....           | 54 |
| Tabela 13 - Comparação do bioquerosene com JET A-1.....   | 55 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                              |
| AGL             | Ácidos graxos livres  |
| ANAC            | Agência Nacional de Aviação Civil                                     |
| ANP             | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis           |
| ASTM            | <i>American Society for Testing and Materials</i>                     |
| AVGAS           | Gasolina de aviação   |
| CGEE            | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos                               |
| CG-FID          | Cromatografia gasosa com detecção por ionização de chama              |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono  |
| COVID-19        | Doença do Coronavírus 2019  |
| HDO             | Hidroxidação  |
| IBGE            | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                       |
| JET A-1         | Querosene de aviação do tipo JET A-1                                  |
| NBR             | Norma Brasileira  |
| OACI            | Organização de Aviação Civil Internacional                            |
| P.A.            | <i>Pro analysi</i> (grau de pureza de reagente)                       |
| PVBAB           | Plano de Voo para Biocombustíveis de Aviação no Brasil                |
| QAV             | Querosene de Aviação  |
| RSB             | <i>Roundtable on Sustainable Biomaterials</i>                         |
| SAF             | <i>Sustainable Aviation Fuel</i> (combustível sustentável de aviação) |
| UTFPR           | Universidade Tecnológica Federal do Paraná                            |
| WEF             | <i>World Economic Forum</i>   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|    |  |
|----|--|
| IA | Índice de acidez                       |
| f  | Fator de correção da solução titulante |
| m  | Massa                                  |
| M  | Massa molar                            |
| T  | Temperatura                            |
| V  | Volume                                 |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS .....</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Objetivo geral.....</b>                                   | <b>16</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>                            | <b>16</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                           | <b>17</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Panorama da aviação e combustíveis sustentáveis .....</b> | <b>17</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Combustíveis de aviação.....</b>                          | <b>18</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).....</b>       | <b>21</b> |
| 3.3.1      | Bioquerosene .....   | 21        |
| 3.3.2      | Biodiesel.....   | 23        |
| <b>3.4</b> | <b>Óleos vegetais .....</b>                                  | <b>24</b> |
| 3.4.1      | Óleo de coco .....   | 24        |
| 3.4.2      | Óleo de babaçu .....   | 26        |
| <b>3.5</b> | <b>Reação de transesterificação .....</b>                    | <b>29</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Produção do bioquerosene .....</b>                        | <b>32</b> |
| 3.6.1      | Separação e limpeza do biodiesel.....                        | 32        |
| 3.6.2      | Destilação a vácuo .....                                     | 34        |
| <b>4</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                             | <b>35</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Escolha das matérias-primas .....</b>                     | <b>35</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Produção do biodiesel (transesterificação) .....</b>      | <b>36</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Produção do bioquerosene .....</b>                        | <b>39</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Caracterização e análise cromatográfica .....</b>         | <b>41</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                          | <b>43</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                       | <b>57</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>59</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a sociedade global enfrentou um evento sem precedentes: a pandemia de COVID-19. Essa crise sanitária mundial transformou profundamente as relações interpessoais, tanto no âmbito pessoal quanto no profissional, além de alterar a forma como o ser humano compreende e interage com o mundo contemporâneo. Os impactos, contudo, não se restringiram às dinâmicas sociais; estenderam-se também ao setor produtivo, especialmente às organizações que precisaram enfrentar desafios significativos e adotar estratégias robustas para assegurar sua continuidade em um cenário de incertezas.

Esse contexto crítico também se refletiu na aviação civil, que experimentou, em 2020, uma redução de 53% no volume de passageiros em voos no Brasil, quando comparado ao ano anterior (IBGE, 2021). A recuperação efetiva desse setor somente ocorreu em 2023, momento em que o mercado aéreo nacional retomou índices equivalentes aos observados no período pré-pandêmico (Brasil, 2024).

Considerando que a demanda por voos domésticos e internacionais tem apresentado crescimento contínuo, o setor aeronáutico busca alternativas capazes de promover maior eficiência no uso dos combustíveis de aviação, denominados genericamente querosenes de aviação. Entre eles, destaca-se o querosene de aviação (QAV), derivado de fontes fósseis e caracterizado predominantemente pela presença de cadeias carbônicas contendo entre 9 e 15 átomos de carbono (Petrobras, 2021; Petrobras, 2024).

No que diz respeito ao consumo mundial de QAV, estima-se que, em 2019, a indústria aérea tenha utilizado aproximadamente 360 milhões de m<sup>3</sup> desse combustível, gerando a emissão de cerca de 914 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, valor correspondente a aproximadamente 2% das emissões antropogênicas globais (ATAG, 2020). Esse cenário evidencia que o principal entrave ambiental associado ao uso do QAV decorre da elevada emissão de dióxido de carbono e de outros poluentes atmosféricos resultantes de sua combustão.

Segundo o Plano de Voo para Biocombustíveis de Aviação no Brasil (PVBAB) (BOEING *et al.*, 2013), a meta estabelecida para o setor é reduzir, até 2050, cerca de 50% das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas às operações aéreas. Uma estratégia para atingir esse objetivo consiste na adoção de combustíveis sustentáveis, capazes de

mitigar os impactos ambientais e minimizar danos à saúde humana e aos ecossistemas.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da Resolução nº 856/2021, estabelece as especificações aplicáveis aos combustíveis aeronáuticos, incluindo o bioquerosene, definido como um combustível derivado de fontes alternativas. Sua produção pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas, tais como hidrotratamento de óleos vegetais, fermentação de açúcares, processo *Fischer-Tropsch* a partir de carvão ou biomassa e oligomerização de álcoois (Brasil, 2021).

A produção de bioquerosene de aviação a partir de óleos vegetais envolve, predominantemente, o processo de transesterificação. Nessa rota, triglicerídeos são convertidos em ésteres e glicerina por meio da reação com um álcool de cadeia curta, geralmente metanol ou etanol, na presença de catalisadores ácidos ou básicos (Schuchardt; Sercheli; Vargas, 1998). A seleção do óleo vegetal é etapa crucial, pois influencia diretamente a composição do bioquerosene obtido, sendo recomendada a utilização de matérias-primas ricas em ácidos graxos de cadeia curta, a fim de garantir maior compatibilidade com os combustíveis de aviação convencionais (Querino, 2014).

Atualmente, o bioquerosene produzido por transesterificação pode ser misturado ao QAV em proporções de até 50% em volume (Brasil, 2023a), o que reforça sua relevância como alternativa sustentável e seu potencial para impulsionar novas pesquisas no âmbito da engenharia aeronáutica e dos combustíveis renováveis.

Diante disso, considerando que uma das principais problemáticas associadas ao setor aeronáutico refere-se ao elevado potencial poluidor dos combustíveis fósseis, e tendo em vista que os biocombustíveis constituem uma alternativa promissora para a redução desses impactos, o presente trabalho tem como objetivo avaliar e caracterizar a produção de bioquerosene a partir dos óleos de babaçu e coco, utilizando para tal a destilação em coluna de Vigreux.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Produzir bioquerosene a partir dos óleos de coco e babaçu, por meio da transesterificação desses óleos, seguida de destilação a vácuo utilizando uma coluna de Vigreux, visando obter um combustível com propriedades físico-químicas compatíveis com os padrões de qualidade e desempenho estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para aplicação na aviação.

### 2.2 Objetivos específicos

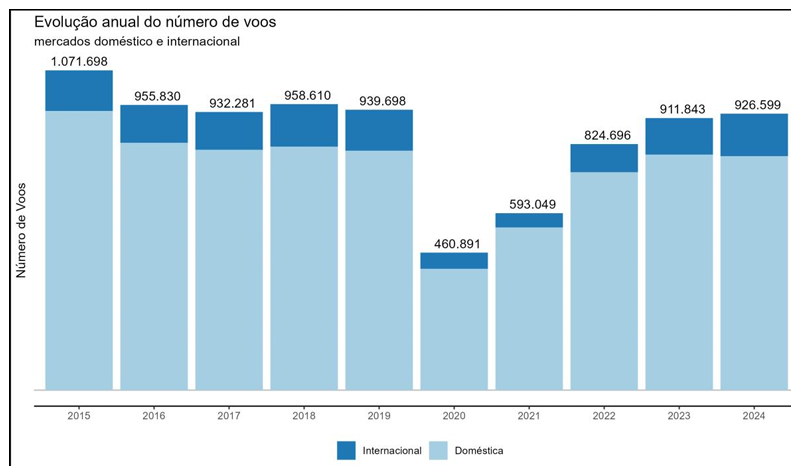
- Determinar o índice de acidez dos óleos de coco e babaçu, avaliando sua adequação à rota de transesterificação etílica alcalina;
- Produzir ésteres etílicos de ácidos graxos a partir desses óleos por transesterificação alcalina etílica, avaliando o efeito das razões molares óleo:álcool 1:9 e 1:18 no rendimento e na qualidade dos produtos obtidos;
- Obter bioquerosene por destilação a vácuo em coluna de Vigreux dos ésteres etílicos de ácidos graxos de coco e babaçu, quantificando as frações de topo e de fundo;
- Caracterizar o perfil cromatográfico das frações de topo e de fundo obtidas na destilação, por cromatografia gasosa com detecção por ionização de chama (CG-FID);
- Caracterizar os bioquerosenes produzidos quanto à aparência, densidade a 15 °C, viscosidade cinemática a - 20 °C, acidez total, ponto de fulgor e ponto de congelamento, comparando os resultados com as especificações da ANP e normas ASTM aplicáveis aos combustíveis de aviação;
- Avaliar o potencial dos óleos de coco e babaçu na produção de bioquerosene, comparando suas propriedades com as do querosene aeronáutico JET A-1.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Panorama da aviação e combustíveis sustentáveis

O setor de aviação civil tem se consolidado como um dos segmentos de maior expansão em escala global. Conforme dados do *Anuário do Transporte Aéreo* (Gráfico 1), foram contabilizados aproximadamente 926.599 voos realizados em território nacional em 2024 (ANAC, 2024). Ademais, informações do Observatório Nacional de Transporte e Logística revelam que, entre janeiro e agosto de 2025, o número de passageiros em voos domésticos apresentou um crescimento de 8,23% em relação ao mesmo período do ano anterior (ONTL, 2025). Esses indicadores evidenciam a relevância do transporte aéreo como um dos principais pilares de integração econômica e social, promovendo a conectividade entre diversas regiões e contribuindo de maneira significativa para o desenvolvimento nacional e global.

**Gráfico 1 - Evolução no número de voos no Brasil**



**Fonte: Anuário do Transporte Aéreo (2024)**

Entretanto, o crescimento contínuo desse setor tem intensificado os debates acerca de seu papel nas emissões de gases de efeito estufa e sobre a necessidade premente de uma transição para fontes energéticas mais limpas. Em 2019, o consumo de querosene de aviação (QAV) pela indústria aérea alcançou aproximadamente 360 milhões de m<sup>3</sup>, resultando na emissão de cerca de 914 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esse montante corresponde a cerca de 2% das emissões globais atribuídas às atividades humanas (ATAG, 2020). Tais indicadores reforçam a urgência de medidas efetivas voltadas à mitigação dos impactos ambientais associados às operações aéreas.

Nesse contexto, a aviação civil internacional tem assumido compromissos relevantes, destacando-se a meta de alcançar a neutralidade de carbono até 2050 (WEF, 2024). Esse objetivo está alinhado ao programa estabelecido pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), que prevê uma redução progressiva das emissões de gases de efeito estufa por meio de estratégias conjuntas, incluindo avanços tecnológicos, melhorias operacionais e o emprego de combustíveis sustentáveis. O Brasil, como país integrante desse esforço global, tem desenvolvido contribuições significativas tanto no âmbito tecnológico quanto operacional, com ênfase nas iniciativas voltadas à produção e à utilização de combustíveis sustentáveis de aviação (Costa *et al.*, 2024).

Observa-se assim, uma demanda crescente por combustíveis alternativos capazes de reduzir os impactos ambientais decorrentes das operações aéreas sem comprometer a eficiência energética e a segurança das aeronaves. Embora representem uma alternativa promissora, os combustíveis sustentáveis de aviação ainda enfrentam desafios técnicos, logísticos e econômicos que dificultam sua adoção em larga escala. O querosene de aviação convencional apresenta elevada densidade energética, característica fundamental para o desempenho e a autonomia dos motores aeronáuticos, o que torna sua substituição direta por biocombustíveis uma tarefa tecnicamente complexa (Walker III; Tatsutani; Lewis, 2024).

Ademais, a consolidação dos combustíveis sustentáveis na aviação depende de um robusto arcabouço regulatório. As diretrizes normativas e regulamentações específicas têm papel determinante ao estabelecer critérios de qualidade, composição, segurança e certificação necessários para autorizar o uso de biocombustíveis no setor. Esses padrões asseguram que os combustíveis alternativos atendam aos requisitos essenciais de desempenho e confiabilidade, preservando a integridade das operações aéreas.

### **3.2 Combustíveis de aviação**

O combustível é definido como uma substância que, ao reagir com o oxigênio, sofre combustão e libera energia na forma de calor. Sua classificação ocorre de acordo com o estado físico em que se apresenta, podendo ser sólido, gasoso ou líquido. Os combustíveis sólidos englobam materiais cuja queima ocorre externamente ao motor, como no caso da combustão de madeira em caldeiras. Já os combustíveis gasosos podem ser empregados, até determinado limite, em motores

de combustão interna, sendo o gás natural um dos principais exemplos dessa categoria (FAA, 1999).

No entanto, embora os motores aeronáuticos operem majoritariamente por combustão interna, os combustíveis gasosos mostram-se pouco adequados ao uso na aviação. Isso se deve ao fato de ocuparem volumes consideravelmente maiores, restringindo a quantidade de combustível que pode ser armazenada a bordo e, conseqüentemente, reduzindo a autonomia da aeronave (Reis, 2015).

Diante dessas limitações, os combustíveis líquidos são considerados os mais apropriados para motores aeronáuticos de combustão interna, nos quais a ignição ocorre no interior do cilindro. Esses combustíveis são classificados com base em sua volatilidade, sendo os de maior volatilidade preferidos na aviação em razão de seu elevado poder de evaporação. A principal característica dos combustíveis líquidos consiste na capacidade de converter a energia química contida em sua estrutura molecular em energia mecânica, que por sua vez é responsável pela geração do empuxo necessário ao deslocamento da aeronave (FAA, 1999).

No contexto da aviação, os dois combustíveis líquidos mais utilizados são a gasolina de aviação (AVGAS) e o querosene de aviação (QAV ou JET A-1), sendo este último o predominante no setor aeronáutico contemporâneo (Reis, 2015). Aeronaves modernas são equipadas majoritariamente com motores a turbina, que operam utilizando o querosene de aviação como combustível principal. O QAV é obtido por meio do fracionamento do petróleo em unidades de destilação atmosférica, dentro da faixa de temperatura de 130 a 300 °C (Camolesi, 2009). Sua composição é formada predominantemente por hidrocarbonetos contendo entre 8 e 16 átomos de carbono, conforme demonstrado na Tabela 1 (Baroutian *et al.*, 2013).

**Tabela 1 - Composição química do JET-A1**

| <b>Componente</b>          | <b>Fórmula</b>                  |
|----------------------------|---------------------------------|
| n-Octano                   | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>  |
| 2-Metilheptano             | C <sub>2</sub> H <sub>18</sub>  |
| 1-Metil-1-Etilciclopentano | C <sub>2</sub> H <sub>14</sub>  |
| Etilciclohexano            | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>  |
| o-Xileno                   | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>  |
| p-Xileno                   | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>  |
| Cis-decalina               | C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> |
| Tetralina                  | C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> |
| Naftaleno                  | C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>  |
| n-Dodecano                 | C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> |
| 2-Metilundecano            | C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> |
| 1-Etilnaftaleno            | C <sub>12</sub> H <sub>12</sub> |
| n-Hexilbenzeno             | C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> |
| n-Hexadecano               | C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> |
| 2-Metilpentadecano         | C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> |
| n-Decibenzeno              | C <sub>16</sub> H <sub>26</sub> |

**Fonte: Adaptado de Baroutian et al. (2013)**

O processo de obtenção do querosene de aviação ocorre por meio de uma unidade de destilação fracionada. De maneira simplificada, o petróleo previamente aquecido é submetido à separação em diferentes frações, fundamentada nos distintos pontos de ebulição dos componentes presentes na mistura (Camolesi, 2009). Durante o processo de destilação, as etapas de retificação correspondem às fases de purificação e concentração das frações desejadas, assegurando que o querosene atenda às especificações exigidas, especialmente no que se refere ao ponto de fulgor e ao ponto de congelamento. O produto obtido após essas etapas é denominado querosene de aviação (QAV) ou JET A-1 (Camolesi, 2009).

Segundo a Resolução nº 856/2021 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o QAV do tipo JET A-1 é um combustível de origem fóssil destinado exclusivamente ao uso em turbinas de aeronaves, apresentando ponto de congelamento máximo de -47 °C (Brasil, 2021). No âmbito regulatório, a ANP é a entidade responsável pela normatização, fiscalização e controle de qualidade dos combustíveis e biocombustíveis no Brasil. Em escala internacional, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define metodologias, requisitos técnicos e padrões de certificação aplicáveis à caracterização e à homologação dos combustíveis aeronáuticos.

Segundo os dados apresentados, faz-se necessária a utilização de combustíveis sustentáveis na aviação, incluindo alternativas como o bioquerosene e o biodiesel, que se apresentam como opções viáveis para a redução dos impactos ambientais do setor.

### **3.3 Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF)**

Os combustíveis sustentáveis de aviação, também conhecidos pela sigla SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), são biocombustíveis produzidos a partir de matérias-primas renováveis, como óleos vegetais e gorduras residuais, que passam por processos de refino e tratamento com hidrogênio, resultando em um produto quimicamente semelhante ao querosene fóssil utilizado em aeronaves (Walker III; Tatsutani; Lewis, 2024). Dentro dessa categoria, o bioquerosene destaca-se como um dos principais SAFs, por ser obtido de fontes alternativas de origem biológica e apresentar propriedades compatíveis com os requisitos técnicos da aviação.

#### **3.3.1 Bioquerosene**

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é a entidade responsável por regulamentar as especificações dos combustíveis utilizados na aviação no Brasil. A Resolução nº 856/2021 estabelece os parâmetros de qualidade aplicáveis tanto ao querosene de aviação convencional quanto ao bioquerosene, definindo este último como um combustível derivado de fontes alternativas e passível de obtenção por diferentes rotas tecnológicas, tais como o hidrotreamento de óleos vegetais, a fermentação de açúcares, o processo *Fischer-Tropsch* aplicado a carvão ou biomassa, e a oligomerização de álcoois (Brasil, 2021). Essa definição é complementada pela Lei nº 12.490/2011, que amplia o conceito de bioquerosene ao incluir como matérias-primas potenciais a biomassa, óleos vegetais, gorduras animais, gases residuais, resíduos sólidos, carvão e gás natural (Brasil, 2011).

Tais regulamentações são fundamentais, uma vez que os combustíveis sustentáveis obtidos a partir de fontes alternativas constituem candidatos promissores à substituição parcial ou total do querosene de origem fóssil. Esses combustíveis podem ser submetidos a processos termoquímicos ou transesterificados por métodos convencionais, desde que atendam às especificações técnicas exigidas, mantendo

compatibilidade plena com as infraestruturas aeroportuárias e com os motores utilizados na aviação comercial (CGEE, 2010).

No Brasil, o primeiro estudo envolvendo a produção de biocombustível obtido por transesterificação foi realizado em 1977 por pesquisadores do Núcleo de Fontes Não Convencionais de Energia da Universidade Federal do Ceará. O trabalho resultou na formulação de um querosene renovável denominado *Prosene*, produzido a partir da transesterificação de óleos vegetais. Sua homologação somente ocorreu ao final de 1982, após testes com diversas matérias-primas, entre as quais se destacou o óleo de babaçu (CGEE, 2010). Em 1983, após ajustes nas especificações, o combustível foi testado em um turboélice modelo Bandeirante EMB-110, que realizou decolagem em São José dos Campos com destino a Brasília, demonstrando a viabilidade do uso de biocombustíveis na propulsão aeronáutica (Gonçalves; Borges; Fraga, 2011).

De acordo com os estudos de Llamas *et al.* (2012), o bioquerosene produzido a partir de óleos como babaçu e camelina, quando misturado ao querosene fóssil em proporções de até 10% (v/v), apresenta conformidade com a norma ASTM D1655:2013, que regulamenta as especificações para os combustíveis JET A e JET A-1, dentre outros combustíveis destinados a turbinas aeronáuticas. De forma semelhante, Ranucci *et al.* (2015) investigaram misturas de ésteres metílicos obtidos por destilação do óleo de pinhão-manso com querosene fóssil, verificando que o produto resultante atendia às propriedades requeridas para combustíveis de aviação de origem fóssil.

Atualmente, a incorporação de bioquerosene em qualquer proporção aos combustíveis aeronáuticos convencionais é classificada como *drop-in* (Iha *et al.*, 2019). No cenário internacional, observa-se que, em 2020, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs) representaram apenas 0,1% do consumo total de combustíveis aeronáuticos; contudo, estima-se que, com políticas de incentivo adequadas, essa participação possa atingir 2,5% em poucos anos (RSB, 2021). Segundo a *Roundtable on Sustainable Biomaterials*, os SAFs provenientes de biomassa podem reduzir até 94% das emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida (RSB, 2021)

Diante das metas globais de redução das emissões associadas aos combustíveis fósseis, grandes potências do setor aeronáutico têm intensificado pesquisas e investimentos voltados à produção de biocombustíveis compatíveis com as tecnologias existentes (Gonçalves; Borges; Fraga, 2011). Esse movimento

acompanha a crescente demanda mundial por combustíveis sustentáveis capazes de contribuir para a descarbonização da aviação.

Nesse contexto, o Brasil apresenta considerável potencial para o desenvolvimento e a produção de combustíveis sustentáveis de aviação, especialmente devido à robustez de seu setor agropecuário e à experiência acumulada em pesquisas, produção e testes de bioquerosene em aeronaves (Milanez *et al.*, 2021).

### 3.3.2 Biodiesel

A Lei nº 11.097/2005 define o biodiesel como um combustível derivado de biomassa renovável, destinado ao uso em motores de combustão interna ou, conforme regulamentação específica, em outros sistemas de geração de energia capazes de substituir, parcial ou totalmente, os combustíveis de origem fóssil (Brasil, 2005). Esse biocombustível é obtido por meio do processo de transesterificação, no qual óleos e gorduras reagem com um álcool de cadeia curta, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador, resultando em uma mistura de ésteres e glicerina. Após as etapas de separação e purificação, essa mistura origina o biodiesel, que apresenta características adequadas para utilização em motores de ignição por compressão.

A Resolução nº 920/2023 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) complementa e detalha essa definição ao caracterizar o biodiesel como um combustível constituído por ésteres alquil de ácidos carboxílicos de cadeia longa, obtido pela transesterificação ou esterificação de matérias graxas de origem vegetal ou animal (Brasil, 2023b).

Além de seu uso consolidado em motores do ciclo Diesel, o biodiesel pode ser empregado como matéria-prima para a síntese de produtos de maior valor agregado, como o bioquerosene de aviação. A rota mais comum para essa conversão consiste na destilação fracionada sob vácuo, processo no qual o biodiesel é separado em diferentes frações com base na volatilidade de seus componentes. Durante esse procedimento, obtêm-se duas frações principais: uma mais pesada, composta por ésteres de maior massa molecular e baixa volatilidade, e outra mais leve, correspondente ao bioquerosene, formada por ésteres de menor massa molecular (Cunha; Gonçalves; Freitas, 2023).

A fração leve é particularmente desejada por apresentar propriedades físico-químicas compatíveis com os requisitos estabelecidos para combustíveis aeronáuticos. Nesse contexto, a escolha da matéria-prima oleaginosa torna-se um fator crucial. Óleos cuja composição apresenta maior proporção de ácidos graxos saturados e de cadeia curta, como os óleos de coco e babaçu, favorecem a formação de frações leves durante a transesterificação e a subsequente destilação a vácuo, contribuindo para o aumento do rendimento e para a melhoria da qualidade do bioquerosene obtido (Ponte, 2017).

### 3.4 Óleos vegetais

O Brasil é amplamente reconhecido como um dos países com maior potencial para a produção agrícola, em razão de sua localização em região tropical, caracterizada por elevada incidência de radiação solar e índices pluviométricos abundantes. A combinação desses fatores contribui significativamente para a elevada capacidade nacional de produção de alimentos, biocombustíveis e bioenergia (Laviola; Capdeville; Collares, 2015).

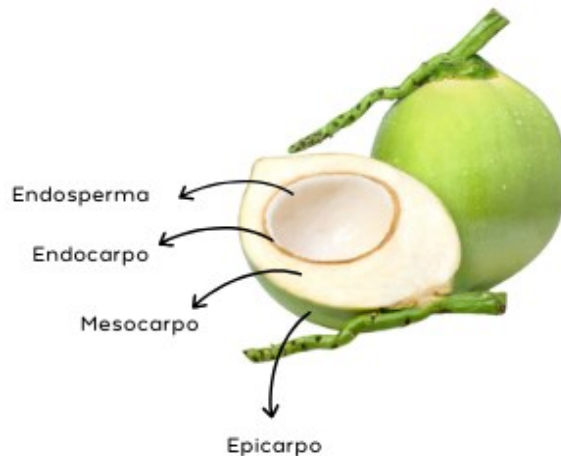
Ao longo dos últimos anos, diversas matérias-primas têm se destacado nas pesquisas voltadas à produção de biocombustíveis destinados ao uso em turbinas aeronáuticas. Entre essas fontes, destacam-se o pinhão-manso, o babaçu, a camelina, também conhecida como falso linho, e as algas (Bonassa *et al.*, 2014). O interesse crescente por essas matérias-primas decorre de seu elevado potencial produtivo e de sua composição favorável em termos de ácidos graxos, características essenciais para a obtenção de combustíveis verdes de qualidade e desempenho adequados (CGEE, 2010).

#### 3.4.1 Óleo de coco

O coco (*Cocos nucifera* L.) é uma oleaginosa amplamente distribuída em regiões tropicais, tendo origem no Sudeste Asiático e sido introduzida no Brasil durante o período colonial. Seu cultivo estabeleceu-se inicialmente na região Nordeste, favorecido pelas condições edafoclimáticas propícias, e posteriormente expandiu-se para outras regiões do país, consolidando-se como uma das principais culturas tropicais de relevância econômica e industrial (Pinho; Souza, 2018).

O fruto distingue-se pelo elevado teor de óleo presente em seu endosperma, porção interna que concentra a maior fração de compostos lipídicos empregados na produção de biocombustíveis e em diversas aplicações industriais. A Figura 1 apresenta a morfologia do fruto do coqueiro, destacando suas diferentes estruturas e evidenciando o endosperma (copra) como a principal fonte de óleo utilizado nos processos de interesse tecnológico.

**Figura 1 - Corte esquemático do coco**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

O endosperma do coco constitui a principal fonte mundial de ácido láurico, composto amplamente empregado nas indústrias alimentícia, cosmética e química devido às suas propriedades funcionais e elevada reatividade (Balachandran; Arumughan; Mathew, 1985). A composição do óleo de coco é predominantemente formada por ácidos graxos saturados de cadeia média, entre os quais se destacam os ácidos caprílico, cáprico, mirístico, palmítico, esteárico, oleico, linoleico e, sobretudo, o ácido láurico, presente em maior proporção (Araújo, 2008). Essa composição confere ao óleo características relevantes, como elevada estabilidade térmica e oxidativa, tornando-o especialmente adequado para aplicações energéticas, incluindo a produção de biocombustíveis.

A distribuição quantitativa desses ácidos graxos encontra-se apresentada na Tabela 2, com base nos dados reportados por Eller, Varga e Hancsók (2019).

**Tabela 2 - Composição química do óleo de coco**

| Ácido graxo     | Composto | %   |
|-----------------|----------|-----|
| Ácido caprílico | C8:0     | 7,7 |
| Ácido cáprico   | C10:0    | 6,1 |

|                 |       |      |
|-----------------|-------|------|
| Ácido láurico   | C12:0 | 46,9 |
| Ácido mirístico | C14:0 | 17,9 |
| Ácido palmítico | C16:0 | 8,9  |
| Ácido esteárico | C18:0 | 2,9  |
| Ácido oleico    | C18:1 | 6,5  |
| Outros          | -     | 3,1  |

**Fonte: Adaptado de Eller, Varga e Hancsók (2019)**

Considerando que a produção de bioquerosene demanda matérias-primas ricas em ácidos graxos cujas cadeias hidrocarbônicas variam entre C8:0 e C16:0, o óleo de coco apresenta-se como uma das fontes mais promissoras. Esse potencial decorre da predominância dos ácidos láurico (C14:0) e mirístico (C16:0), que, em conjunto, correspondem a mais de 60% de sua composição total (Araujo *et al.*, 2023). Tal perfil lipídico favorece a formação de frações leves durante o processo de destilação, conferindo ao óleo propriedades adequadas para sua aplicação na síntese de bioquerosene.

No cenário mundial, estima-se que a produção de coco tenha alcançado aproximadamente 63,6 milhões de toneladas em 2020, destacando-se Indonésia, Filipinas e Índia como os principais países produtores. O Brasil ocupa a quinta posição no ranking global, sendo responsável por cerca de 4,5% desse volume, o que o consolida como um relevante fornecedor de óleo de coco no mercado internacional (Rocha; Ferreira; Garcia, 2022).

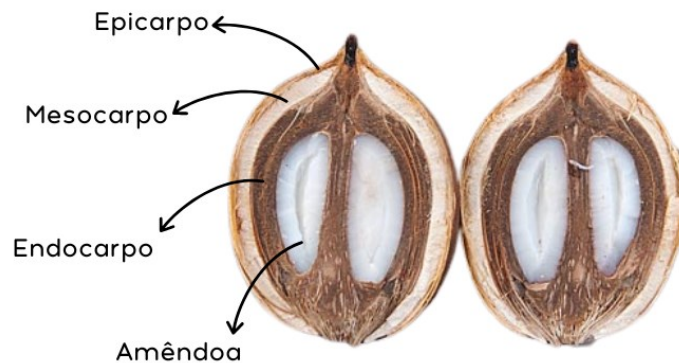
Além do coco, outras oleaginosas com composição lipídica semelhante também apresentam potencial para a produção de biocombustíveis destinados à aviação. Entre elas, destaca-se o babaçu, que, assim como o coco, possui elevado teor de ácidos graxos de cadeia curta e média, característica que favorece a conversão do biodiesel em bioquerosene e reforça seu valor estratégico como matéria-prima renovável.

#### 3.4.2 Óleo de babaçu

O babaçu (*Orbignya phalerata*, Mart.) é uma palmeira nativa da região de transição entre os biomas Caatinga e Amazônia. Trata-se de uma espécie arbórea de grande porte, pertencente à família *Arecaceae*, podendo atingir até 20 metros de altura (CGEE, 2010). Seus frutos, classificados como drupáceos, contêm amêndoas oleaginosas comestíveis, das quais se extrai o óleo de babaçu, matéria-prima de expressivo interesse econômico e industrial.

A morfologia do fruto é composta por quatro estruturas principais: o epicarpo, que corresponde a aproximadamente 11 a 13% do peso total; o mesocarpo, representando cerca de 20 a 23%; o endocarpo, que constitui a maior fração, variando entre 57 e 63%; e as amêndoas, responsáveis por aproximadamente 7 a 9% do peso do fruto (Santos *et al.*, 2023). A Figura 2 apresenta a estrutura do fruto do babaçu e a divisão proporcional de suas partes constituintes

**Figura 2 - Corte esquemático do fruto babaçu**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Correspondente a aproximadamente 7% do peso total do fruto, o óleo de babaçu é predominantemente constituído pelos ácidos graxos saturados láurico, mirístico e palmítico. Essa composição confere ao óleo baixa massa molecular média e elevada proporção de cadeias graxas curtas e médias, características que o tornam especialmente adequado para a produção de bioquerosene (Teixeira, 2002). A Tabela 3, elaborada com base nos dados reportados por Lima *et al.* (2007), apresenta a composição detalhada dos ácidos graxos que compõem o óleo de babaçu.

**Tabela 3 - Composição química do óleo de babaçu**

| Ácido graxo     | Composto | %    |
|-----------------|----------|------|
| Ácido caprílico | C8:0     | 5,0  |
| Ácido cáprico   | C10:0    | 6,0  |
| Ácido láurico   | C12:0    | 44,0 |
| Ácido mirístico | C14:0    | 17,0 |
| Ácido palmítico | C16:0    | 8,0  |
| Ácido esteárico | C18:0    | 4,5  |
| Ácido oleico    | C18:1    | 14,0 |
| Ácido linoleico | C18:2    | 2,0  |

**Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2007)**

O óleo de babaçu destaca-se entre as oleaginosas naturais por sua elevada concentração de ácidos graxos leves (C8:0 a C12:0), enquanto óleos vegetais como

os de soja e amendoim apresentam composição predominantemente formada por ácidos graxos de cadeia longa (C18:0 e C18:1) (Spers *et al.*, 2006). A composição dos ácidos graxos presentes nos óleos vegetais exerce influência direta sobre a produção de bioquerosene, em razão das diferenças nas propriedades físico-químicas entre os ácidos graxos de cadeias curtas e longas.

Ácidos graxos de menor comprimento de cadeia, como aqueles predominantes no óleo de babaçu (C8:0 a C12:0), são mais facilmente convertidos em hidrocarbonetos de cadeias curtas, desejáveis na formulação do bioquerosene. Esses compostos requerem menor energia para a quebra das ligações durante processos como hidrodessoxigenação (HDO) ou craqueamento térmico, resultando em maior eficiência de conversão (Shahbazi *et al.*, 2012). Adicionalmente, sua menor viscosidade e melhor fluidez em baixas temperaturas contribuem para um desempenho superior na combustão, atendendo às especificações da norma ASTM D1655 (ASTM, 2013).

Por outro lado, óleos ricos em ácidos graxos longos, como os de soja e amendoim, apresentam maior suscetibilidade à oxidação, favorecendo a formação de depósitos e gomas durante o armazenamento e utilização. Essa característica pode comprometer a estabilidade do bioquerosene, reduzindo sua adequação para uso em motores aeronáuticos (Gonçalves; Borges; Fraga, 2011). Além disso, esses óleos tendem a gerar maior quantidade de subprodutos e resíduos, impactando negativamente o rendimento global do processo de produção.

Em contrapartida, óleos com perfil graxo mais leve, como os de coco e babaçu, proporcionam melhor aproveitamento do material lipídico, resultando em maior rendimento de bioquerosene por unidade de óleo processado (Bonassa *et al.*, 2014). A seleção da matéria-prima também influencia o planejamento e a operação das unidades de processamento, uma vez que óleos com predominância de cadeias menores demandam menos etapas de purificação e ajustes químicos, reduzindo a complexidade dos processos e os custos operacionais (Engel *et al.*, 2016). Assim, o óleo de babaçu, devido à predominância de ácidos graxos leves e saturados, apresenta vantagens significativas para a produção de bioquerosene, como maior eficiência de conversão, melhor qualidade do combustível, elevada estabilidade oxidativa e maior rendimento global. Em contrapartida, óleos com maior proporção de cadeias longas podem apresentar desafios adicionais de processamento e desempenho inferior do produto final (Simomukay *et al.*, 2022).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção nacional de babaçu alcançou 30.478 toneladas em 2022, sendo o estado do Maranhão o principal produtor nesse período (IBGE, 2022). Diante do potencial comprovado dessa oleaginosa para a produção de bioquerosene, empresas brasileiras, como a Petrobras, têm implementado projetos voltados à produção de querosene renovável a partir do óleo de babaçu (Gonçalves; Borges; Fraga, 2011).

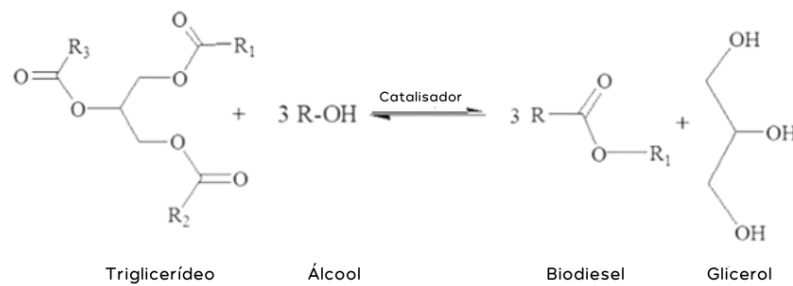
Desse modo, tanto o babaçu quanto o coco configuram-se como matérias-primas estratégicas para a produção de bioquerosene. A conversão desses óleos pode seguir diferentes rotas tecnológicas (química, termoquímica ou bioquímica) sendo a transesterificação o processo químico mais empregado para a obtenção de bioquerosene a partir de matérias-primas oleaginosas (CGEE, 2010).

### 3.5 Reação de transesterificação

A transesterificação corresponde a uma classe relevante de reações orgânicas nas quais um éster é convertido em outro mediante a substituição de um grupo alcoxi, processo que ocorre na presença de um catalisador responsável por acelerar a cinética reacional (Schuchardt; Sercheli; Vargas, 1998). O estudo da transesterificação de óleos vegetais foi relatado pela primeira vez em 1853 pelos pesquisadores E. Duffy e J. Patrick, antecedendo inclusive o desenvolvimento do primeiro motor a diesel (Lin *et al.*, 2011).

Trata-se de uma reação reversível, o que exige o emprego de um excesso de álcool a fim de deslocar o equilíbrio químico no sentido da formação dos ésteres, produtos desejados do processo (Avhad; Marchetti, 2015). A Figura 3, apresentada a seguir, ilustra o mecanismo reacional característico da transesterificação.

**Figura 3 - Mecanismo reacional da transesterificação**

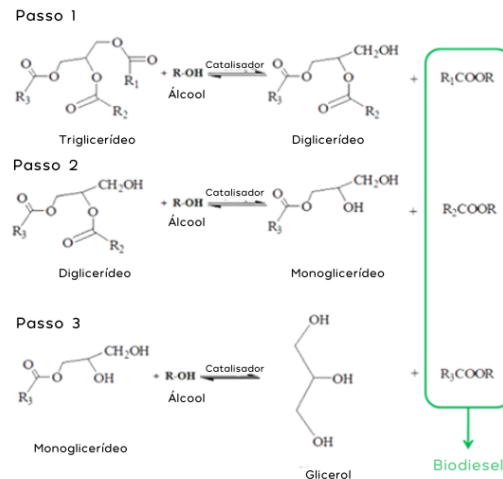


**Fonte: Adaptado de Avhad; Marchetti (2015)**

Nas reações de transesterificação de oleaginosas, os triglicerídeos reagem com um álcool na presença de um catalisador forte, ácido ou básico, resultando na formação de uma mistura composta por ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol (Schuchardt; Sercheli; Vargas, 1998). No caso da catálise básica, o álcool reage inicialmente com o catalisador, originando um íon alcóxido altamente reativo. Esse alcóxido atua como nucleófilo, atacando o triglicerídeo e promovendo a clivagem das ligações éster que unem o glicerol aos ácidos graxos.

O mecanismo reacional ocorre de maneira sequencial. No primeiro ataque nucleofílico, forma-se uma molécula de éster (éster de ácido graxo) e um diglicerídeo. Subseqüentemente, o diglicerídeo sofre novo ataque, produzindo uma segunda molécula de éster e um monoglicerídeo. Por fim, o monoglicerídeo reage novamente, liberando a terceira molécula de éster e originando o glicerol como subproduto final. As moléculas de éster geradas ao longo dessas etapas constituem o biodiesel, enquanto o glicerol, devido à sua maior densidade, separa-se na fase inferior ao término do processo (Meher; Vidya Sagar; Naik, 2006).

A Figura 4 apresenta, de forma detalhada, o mecanismo reacional característico da transesterificação.

**Figura 4 - Reação de transesterificação detalhada**

Fonte: Adaptado de Avhad; Marchetti (2015)

Diversos fatores influenciam a eficiência do processo de transesterificação, entre eles a natureza e a composição dos ácidos graxos presentes na matéria oleaginosa, o tipo de álcool empregado, a razão molar álcool:óleo, o tipo e a quantidade de catalisador, a temperatura e o tempo de reação, bem como o nível de agitação do sistema (Shahbazi *et al.*, 2012). Considerando-se a produção de biodiesel e, subsequentemente, de bioquerosene, o óleo ideal é aquele que apresenta predominância de ácidos graxos de cadeia curta e média, uma vez que esses compostos favorecem a formação de frações leves e voláteis durante as etapas de conversão (Ponte, 2017).

Quanto ao álcool utilizado na transesterificação, destacam-se metanol, etanol, propanol e butanol, sendo os dois primeiros os mais empregados devido à maior disponibilidade e ao baixo custo (Zabeti; Wan Daud; Aroua, 2009). A seleção do catalisador também requer atenção, pois catalisadores alcalinos promovem reações significativamente mais rápidas que os catalisadores ácidos; entretanto, para seu uso, os óleos devem apresentar alta qualidade, baixo teor de ácidos graxos livres e mínima umidade (Avhad; Marchetti, 2015; Shahbazi *et al.*, 2012).

A presença de água na matéria-prima favorece a hidrólise dos triglicerídeos, especialmente em meio ácido ou básico, aumentando o teor de ácidos graxos livres. Em meio catalisado por base, esses ácidos graxos livres reagem com o catalisador, originando sabões, substâncias indesejáveis que prejudicam a separação das fases e diminuem o rendimento global do processo (Shahbazi *et al.*, 2012). Desse modo, a seleção criteriosa da matéria-prima deve considerar tanto sua composição em ácidos

graxos quanto o teor de umidade, visando garantir a qualidade do biodiesel obtido por transesterificação.

Em função dessas características e do menor potencial corrosivo dos catalisadores alcalinos em comparação aos ácidos, processos industriais tendem a empregar catalisadores básicos, entre os quais se destacam hidróxidos, carbonatos e alcóxidos de metais alcalinos (Schuchardt; Sercheli; Vargas, 1998).

No que se refere aos parâmetros operacionais, estudos conduzidos por Samuel, Giwa e El-Suleiman (2016) e por Paiva (2010) demonstraram que os óleos de coco e de babaçu apresentam rendimentos superiores a 90% na produção de biodiesel quando se utilizam concentrações de catalisador KOH entre 0,5 e 1,5% em massa, razões molares etanol:óleo entre 4:1 e 6:1, tempos de reação de 30 a 90 minutos e temperaturas variando de 25 a 70 °C. Esses valores evidenciam condições eficientes para a transesterificação etílica de óleos vegetais com características semelhantes, como é o caso dos óleos de coco e babaçu.

### **3.6 Produção do bioquerosene**

Após a etapa de transesterificação, inicia-se uma sequência de processos de separação e purificação que antecedem a destilação do biodiesel para a obtenção do bioquerosene. Durante a reação, forma-se glicerol como subproduto, o qual deve ser removido juntamente com impurezas remanescentes, como traços de álcool não reagido, catalisador residual e água. A eliminação desses contaminantes é essencial para garantir a eficiência da etapa subsequente de destilação, bem como para assegurar a pureza, a estabilidade e o desempenho do biodiesel produzido (Leung; Wu; Leung, 2010).

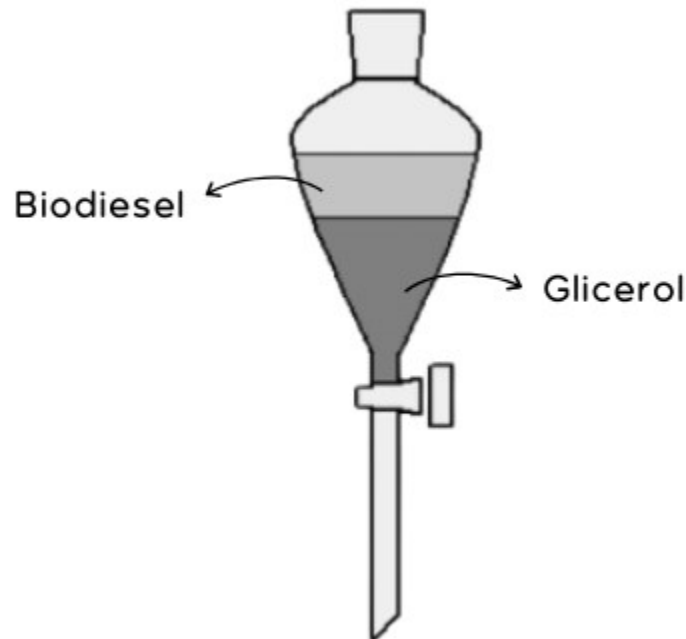
#### **3.6.1 Separação e limpeza do biodiesel**

Em escala laboratorial, a separação e a purificação do biodiesel após a transesterificação envolvem uma série de etapas essenciais para a remoção de subprodutos e impurezas. Inicialmente, observa-se a formação de duas fases: a fase orgânica, constituída predominantemente por biodiesel, e a fase inferior, composta por glicerol, além de quantidades residuais de álcool, catalisador e água. Para promover a separação, a mistura reacional é deixada em repouso, permitindo a decantação

natural dos componentes. Esse procedimento é usualmente realizado em um funil de separação, no qual a ação gravitacional favorece a estratificação das fases.

Nessa etapa, o biodiesel, por apresentar menor densidade, acumula-se na camada superior, enquanto o glicerol, mais denso, deposita-se no fundo do funil (Van Gerpen, 2005). O tempo necessário para a completa separação das fases pode variar conforme as condições reacionais e as propriedades físico-químicas do óleo empregado. No entanto, estudos conduzidos por Oliveira (2016) indicam que um período de aproximadamente 24 horas é suficiente para assegurar a separação adequada entre biodiesel e glicerol. A Figura 5 ilustra o processo de decantação e a distinção entre as camadas formadas antes da etapa subsequente de purificação.

**Figura 5 - Separação de fases entre biodiesel e glicerol**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Durante a reação de transesterificação, além da formação de biodiesel e glicerol, ocorre também a geração de subprodutos, tais como resíduos de catalisador, álcool não reagido e sabões resultantes da reação entre o catalisador e os ácidos graxos livres (AGL) presentes na matéria-prima (Atadashi; Aroua; Aziz, 2011). Esses compostos permanecem dispersos na fase orgânica e, portanto, devem ser removidos, uma vez que podem comprometer a pureza, a estabilidade e, conseqüentemente, a qualidade do bioquerosene obtido após a etapa de destilação.

A purificação do biodiesel geralmente envolve a lavagem com água destilada, procedimento amplamente relatado na literatura, como no estudo de Ranucci *et al.*

(2015). Entretanto, a lavagem exclusivamente aquosa pode favorecer a formação de emulsões estáveis, especialmente devido à presença de sabões, o que dificulta a separação completa das fases. Para contornar essa limitação, alguns autores, como Oliveira (2016), propuseram o uso complementar de soluções ácidas, notadamente ácido sulfúrico diluído, em quantidades controladas, com o objetivo de neutralizar o catalisador residual e romper emulsões previamente formadas, facilitando a purificação do biodiesel.

Além disso, ajustes adicionais podem ser empregados para elevar o nível de pureza do produto, como a aplicação de aquecimento em estufa ou a realização de destilação simples, métodos destinados à remoção de traços residuais de água e de álcoois. Esses procedimentos visam proporcionar um biodiesel mais puro e estável, adequado para a etapa subsequente de destilação destinada à produção de bioquerosene.

### 3.6.2 Destilação a vácuo

A destilação constitui um processo amplamente empregado para a separação de misturas líquidas, fundamentado nas diferenças de volatilidade entre seus componentes, permitindo a obtenção de produtos com maior grau de pureza. Trata-se de uma operação unitária de grande relevância em diversos setores industriais, especialmente na indústria química, onde desempenha papel essencial na produção, separação e no refino de combustíveis. O querosene, por exemplo, é obtido em faixas de temperatura compreendidas entre 150 °C e 300 °C, por meio da destilação fracionada do petróleo bruto sob condições atmosféricas (Ponte, 2017).

Em escala laboratorial, distintas configurações de destilação podem ser aplicadas para a obtenção de biocombustíveis, como o bioquerosene. Estudos conduzidos por Ranucci *et al.* (2015) propuseram a utilização de uma coluna de Vigreux acoplada a um sistema de vácuo, estratégia que permite a redução dos pontos de ebulição dos compostos e evita a degradação térmica dos ésteres durante o processo. Resultados convergentes foram relatados por Damasceno *et al.* (2022), que também empregaram a coluna de Vigreux em destilações fracionadas, demonstrando sua eficiência e aplicabilidade em procedimentos laboratoriais destinados à obtenção de frações leves de biocombustíveis.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Escolha das matérias-primas

A produção de ésteres etílicos de ácidos constitui a etapa central para a obtenção do bioquerosene, uma vez que este último é gerado a partir da separação da fração de ésteres de menor massa molecular presente no biodiesel (Querino, 2014). Dessa forma, a qualidade do bioquerosene obtido está diretamente associada às condições reacionais e aos insumos empregados na síntese do biodiesel.

Com o objetivo de alcançar maior rendimento e melhor desempenho do produto final, foram selecionados dois óleos vegetais com perfis lipídicos semelhantes: óleo de coco (*Cocos nucifera* L.) e óleo de babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.). O óleo de coco foi adquirido no comércio local de Campo Mourão - Paraná, enquanto o óleo de babaçu foi obtido da Destilaria Bauru (São Paulo), produzido por prensagem a frio.

Na etapa de transesterificação, recomenda-se o uso de álcoois em excesso e de menor comprimento de cadeia carbônica, a fim de favorecer o deslocamento do equilíbrio químico da reação. Entre os álcoois comumente utilizados destacam-se metanol, etanol e butanol (Querino, 2014). Seguindo este critério, neste estudo empregou-se etanol 99,5% P.A., proveniente dos laboratórios multiusuários da UTFPR - Campus Campo Mourão, como agente alcoólico da reação.

Com base nos estudos de Paiva (2010), verificou-se que o catalisador hidróxido de potássio (KOH) apresenta melhor desempenho na transesterificação etílica em relação ao hidróxido de sódio (NaOH), devido à menor formação de sabões e à maior eficiência de conversão. Além disso, considerando sua disponibilidade nos laboratórios multiusuários da instituição, o KOH P.A. foi selecionado como catalisador para este estudo, adotando-se a rota de catálise alcalina homogênea para a síntese do biodiesel.

Antes da transesterificação, determinou-se o índice de acidez dos óleos vegetais utilizados, com o propósito de verificar sua adequação ao processo. Essa análise é essencial, pois quantifica a quantidade de KOH (em mg) necessária para neutralizar os ácidos graxos livres (AGL) presentes em 1 g de óleo. Valores reduzidos deste parâmetro são desejáveis na rota de catálise alcalina homogênea, uma vez que óleos com baixo teor de AGL apresentam menor propensão à formação de sabões, favorecendo maior eficiência na transesterificação (Atadashi *et al.*, 2013).

A metodologia adotada para a determinação do índice de acidez e do fator de correção da solução titulante seguiu o procedimento descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Inicialmente, pesaram-se 2 g de óleo em um erlenmeyer de 125 mL. Em seguida, adicionaram-se 25 mL da solução etéreo-alcoólica neutra, preparada pela mistura de éter etílico e álcool etílico na proporção de 2:1 (v/v), promovendo-se agitação até completa solubilização da amostra. Posteriormente, adicionaram-se duas gotas de solução alcoólica de fenolftaleína a 1%, procedendo-se à titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M até o surgimento de uma coloração rósea persistente.

O índice de acidez foi calculado conforme as equações estabelecidas pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), considerando-se o volume de solução titulante consumido, o fator de correção obtido na padronização da solução de NaOH e a massa da amostra analisada. Esses parâmetros permitiram a obtenção do valor final do índice de acidez após o devido tratamento matemático, observado pelo desenvolvimento das equações 1, 2 e 3 abaixo.

$$IA = \frac{V \times f \times 5,61}{P} \quad (1)$$

$$\% \text{ ácido oleico} = \frac{V \times f \times 100 \times 0,0282}{M} \quad (2)$$

$$f = \frac{m_{KHP}}{M_{KHP} \times V_{NaOH}} \quad (3)$$

Em que:

IA = índice de acidez (mg KOH. g<sup>-1</sup>)

V = Volume de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M gasto na titulação (mL)

P = massa de óleo (g)

f = fator de correção da solução titulante

$m_{KHP}$  = massa de biftalato de potássio (KHP) (g)

$M_{KHP}$  = massa molar do biftalato de potássio (KHP) (g/mol)

$V_{NaOH}$  = volume de hidróxido de sódio (NaOH) gasto na titulação (L)

#### 4.2 Produção do biodiesel (transesterificação)

Para a produção do biodiesel, o procedimento tem início com o preparo da solução contendo o catalisador e o álcool. A utilização de álcool em excesso visa deslocar o equilíbrio reacional em direção à formação dos ésteres, favorecendo o rendimento da reação (Avhad; Marchetti, 2015). Neste estudo, serão avaliadas duas

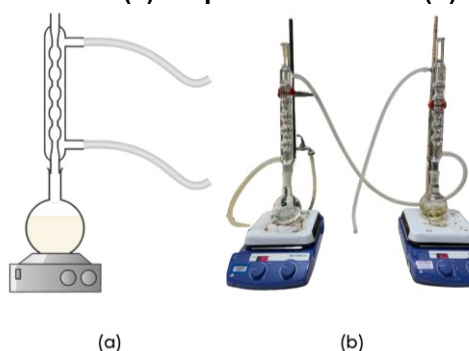
proporções molares álcool:óleo (1:9 e 1:18) aplicadas tanto ao óleo de coco quanto ao óleo de babaçu. A escolha dessas proporções fundamenta-se nos resultados apresentados por Oliveira *et al.* (2010), que reportaram rendimentos próximos de 99% na produção de biodiesel a partir de óleo de coco sob condições semelhantes.

Os demais parâmetros reacionais foram definidos com base nos trabalhos de Samuel, Giwa e El-Suleiman (2016) e Paiva (2010). Assim, adotaram-se tempo de reação de 3 horas, agitação de 400 rpm, temperatura de 60 °C e concentração de catalisador igual a 1%. O processo experimental iniciou-se pelo preparo da solução catalisadora. Para isso, pesou-se 1 g de KOH, que foi dissolvido em 100 mL de álcool etílico em um balão de 100 mL. A mistura foi submetida à homogeneização em agitador magnético, sem aquecimento, por aproximadamente 30 minutos, até a completa solubilização do catalisador.

Em seguida, procedeu-se ao preparo das misturas reacionais. Para cada ensaio, foram adicionados cerca de 100 mL de óleo (coco ou babaçu) em balões de fundo chato de 250 mL. Posteriormente, incorporou-se o volume da solução alcoólica correspondente à proporção óleo:álcool previamente estabelecida, iniciando-se a reação de transesterificação.

A reação foi conduzida sob condições controladas de operação. Utilizou-se um condensador de refluxo do tipo Allihn, empregando-se água como fluido de troca térmica, de modo a assegurar a estabilidade térmica do sistema ao longo do processo. A agitação foi mantida a 400 rpm e a temperatura controlada em 60 °C durante todo o período reacional, que teve duração total de 3 horas. O arranjo experimental utilizado para a condução da reação encontra-se ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 - Arranjo experimental: (a) Esquema ilustrativo (b) Montagem experimental**

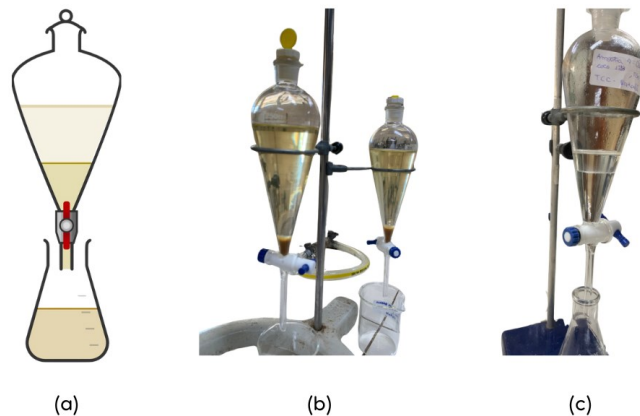


**Fonte: Autoria própria (2025)**

Após a reação de transesterificação, a mistura reacional foi transferida para um funil de separação e mantida em repouso por 24 horas, permitindo a separação

das fases em função da diferença de densidades entre os componentes. Nesse intervalo, o glicerol, por apresentar maior densidade, acumulou-se na região inferior do funil, possibilitando sua remoção adequada. Todos os equipamentos e vidrarias empregados foram disponibilizados pelos Laboratórios Multiusuários da UTFPR - Câmpus Campo Mourão. Esse procedimento seguiu a metodologia descrita na literatura especializada e encontra-se ilustrado na Figura 7.

**Figura 7 - Separação de fases: (a) Esquema ilustrativo (b) e (c) Montagem experimental**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Após a remoção do glicerol do biodiesel obtido, foram realizadas três etapas de lavagem utilizando uma solução ácida diluída, conforme as recomendações de Ranucci *et al.* (2015) e Oliveira (2016). Para este estudo, empregou-se uma solução de ácido acético a 0,01% ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), preparada a partir de ácido acético e água destilada disponíveis no Laboratório Multiusuário da UTFPR - Câmpus Campo Mourão, totalizando 1 L de solução. As lavagens foram conduzidas em intervalos de aproximadamente 30 a 40 minutos e, em cada etapa, aguardou-se a completa separação das fases no funil de separação, removendo-se a fase inferior, responsável pelo transporte das impurezas. Tanto o glicerol quanto os resíduos eliminados durante o processo de lavagem foram descartados de forma adequada.

Segundo o procedimento descrito por Ranucci *et al.* (2015), recomenda-se submeter a amostra de biodiesel à secagem em estufa por 24 horas, a fim de remover impurezas remanescentes. Assim, as amostras foram acondicionadas em estufa de secagem com circulação de ar, pertencente ao Laboratório Multiusuário da UTFPR - Câmpus Campo Mourão, por um período de 24 horas, mantendo-se a temperatura constante de 70 °C. Ao término desse período, o biodiesel foi armazenado à

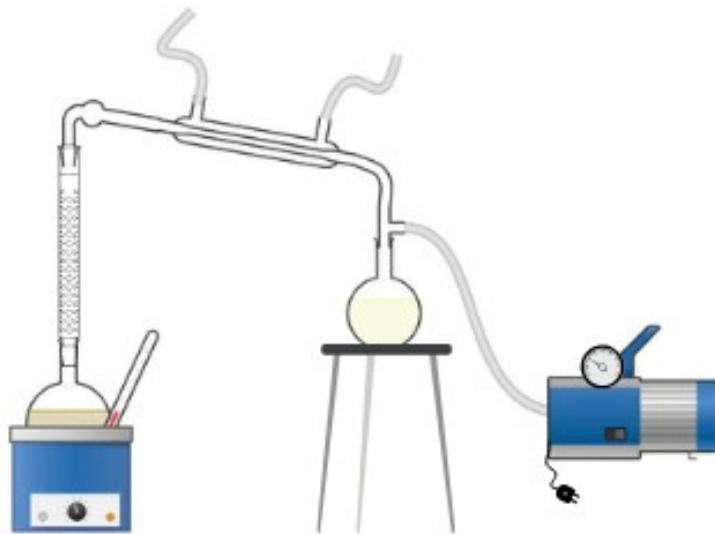
temperatura ambiente, possibilitando sua posterior utilização no processo de destilação.

### 4.3 Produção do bioquerosene

A etapa de destilação foi realizada após a obtenção do biodiesel, com o propósito de isolar a fração correspondente aos ácidos graxos de cadeia curta e média (C8:0 a C16:0), que constituem a base para a produção do bioquerosene. O procedimento seguiu as diretrizes propostas por Ranucci *et al.* (2015), com as adaptações necessárias para compatibilizar o método às condições e aos equipamentos disponíveis nos Laboratórios Multiusuários da UTFPR - Câmpus Campo Mourão.

O aparato experimental empregado foi composto por: coluna de destilação Vigreux de 30 cm de comprimento, manta aquecedora, termômetro analógico, balão de fundo chato de 250 mL, balão de fundo redondo de 250 mL, condensador Liebig, conexões (juntas e cotovelos) destinadas à montagem do sistema, manômetro acoplado a bomba de vácuo e água utilizada como fluido de troca térmica. A coluna de Vigreux foi revestida com encamisamento térmico laminado, com o objetivo de assegurar uma distribuição uniforme de temperatura ao longo de toda a sua extensão. A Figura 8 apresenta o aparato experimental utilizado nesta etapa, o qual foi montado no interior de uma capela, garantindo as condições adequadas de segurança operacional.

**Figura 8 - Aparato experimental usado na destilação**

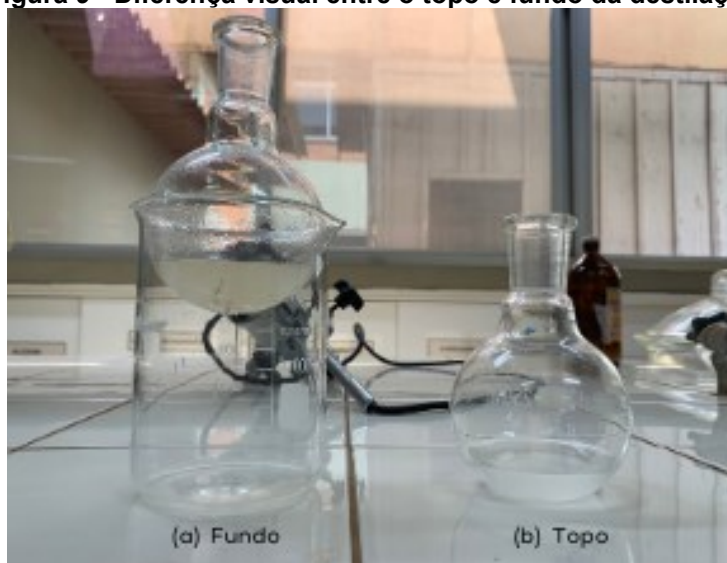


Fonte: Autoria própria (2025)

Para o início do processo de destilação, foram transferidos aproximadamente 50 mL a 80 mL de éster etílico de ácido graxo para um balão de fundo redondo de 250 mL. A manta aquecedora foi mantida ajustada a 220 °C durante toda a etapa, e a formação da primeira gota de bioquerosene foi observada por volta de 160 °C. Embora esse valor possa variar entre as amostras, adotou-se, para este estudo, a média registrada experimentalmente. A destilação foi conduzida sob vácuo de aproximadamente -700 mmHg, empregando-se um revestimento térmico de alumínio ao redor da coluna para assegurar a manutenção uniforme da temperatura ao longo de toda a sua extensão.

Cada destilação teve duração média de 90 minutos. A Figura 9 apresenta a distinção visual entre as frações coletadas: no topo da coluna (imagem b), o bioquerosene obtido, e na base (imagem a), a fração remanescente que não volatilizou ao longo do processo.

**Figura 9 - Diferença visual entre o topo e fundo da destilação**



**Fonte: Autoria própria (2025)**

Ao término de cada destilação, foram utilizados aproximadamente 100 mL de n-hexano ( $C_6H_{14}$ ) para realizar uma etapa adicional de limpeza da coluna, assegurando a remoção de impurezas remanescentes e evitando contaminações entre as amostras subsequentes. Inicialmente, foram processadas todas as amostras de biodiesel provenientes do óleo de coco; posteriormente, conduziram-se as destilações referentes ao óleo de babaçu.

Após o processamento, os bioquerosenes obtidos foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar a 70 °C por aproximadamente 24 horas, com

o objetivo de eliminar eventuais resíduos de n-hexano. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em frascos âmbar, fornecidos pelo Laboratório Multiusuário da UTFPR - Câmpus Campo Mourão, e armazenadas em congelador até a realização das análises.

#### 4.4 Caracterização e análise cromatográfica

Com as amostras devidamente preparadas, estas foram encaminhadas a uma instituição parceira da UTFPR - Câmpus Campo Mourão para a realização das análises de caracterização. As propriedades avaliadas incluíram: aparência, densidade a 15 °C, ponto de fulgor, ponto de congelamento, acidez total e viscosidade cinemática. As metodologias adotadas para cada determinação seguiram os procedimentos padronizados pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, conforme apresentado na Tabela 4.

Cabe destacar que, previamente à execução dessas análises físico-químicas, o laboratório responsável realizou a unificação das amostras correspondentes às razões óleo:álcool 1:9 e 1:18, resultando em uma amostra composta (*pooled*).

| <b>Parâmetro</b>                      | <b>Metodologia</b>    |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Aparência (Inspeção visual)           | ASTM D4176 - Método 1 |
| Densidade a 15°C (kg/m <sup>3</sup> ) | ASTM D4052            |
| Ponto de fulgor (°C)                  | ASTM D56              |
| Ponto de congelamento (°C)            | ASTM D2386            |
| Acidez total (mg KOH /g)              | ASTM D3242            |
| Viscosidade (mm <sup>2</sup> /s)      | ASTM D445-24          |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

Antes do envio das amostras para as análises de caracterização, as alíquotas destinadas à cromatografia foram coletadas separadamente, de modo a preservar a distinção entre as proporções molares 1:9 e 1:18. Essa etapa permitiu a caracterização individual de cada razão molar quanto ao perfil cromatográfico e à distribuição dos compostos. A metodologia empregada baseou-se na Cromatografia Gasosa com Detecção por Ionização de Chama (CG-FID), técnica amplamente utilizada para a identificação e quantificação de compostos orgânicos, em razão de sua elevada sensibilidade, estabilidade e rápida resposta analítica (Flumignan, 2005).

As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás Shimadzu GC-2010 Plus, disponível na UTFPR - Câmpus Campo Mourão. Utilizou-se isooctano (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>)

como solvente das amostras e tricosanoato de metila ( $C_{24}H_{46}O_2$ ) como padrão interno. O gás de arraste empregado foi hidrogênio, operando com fluxo de  $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , enquanto ar sintético, a  $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , foi utilizado para a sustentação da chama do detector.

A curva de aquecimento adotada corresponde ao método denominado “Palma 2021”, cujos parâmetros operacionais são apresentados a seguir: a temperatura do injetor, operando no modo *split*, foi ajustada para  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ . A programação de temperatura da coluna cromatográfica iniciou-se em  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , com manutenção por 5 minutos; em seguida, aplicou-se uma taxa de aquecimento de  $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  até  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , mantendo essa temperatura por 5 minutos. Posteriormente, a coluna foi aquecida a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , também a  $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , permanecendo nessa condição por 4 minutos. A etapa final consistiu em elevar a temperatura a  $225 \text{ }^\circ\text{C}$ , ainda a  $5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , mantendo-se esse valor por 5 minutos. A temperatura do detector FID foi ajustada para  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme especificado no método.

O preparo das amostras para injeção no cromatógrafo seguiu o procedimento descrito a seguir. Inicialmente, pesaram-se  $0,25 \text{ g}$  de cada amostra em balões volumétricos de  $10 \text{ mL}$ . Após a pesagem, o volume foi completado com isooctano, seguido de homogeneização da solução. Para a preparação da solução do padrão interno, pesou-se  $0,05 \text{ g}$  de tricosanoato de metila ( $C_{23:0}$ ) em um balão volumétrico de  $10 \text{ mL}$ , completando-se o volume igualmente com isooctano.

Para cada análise, transferiram-se para um vial âmbar de  $10 \text{ mL}$  os seguintes volumes:  $50 \text{ } \mu\text{L}$  da solução da amostra previamente preparada,  $50 \text{ } \mu\text{L}$  da solução contendo o padrão interno e  $900 \text{ } \mu\text{L}$  de isooctano. Todas as amostras foram preparadas e analisadas em duplicata. Após o preparo dos *vials*, estes foram submetidos à injeção no cromatógrafo para aquisição dos cromatogramas. Todos os reagentes utilizados no preparo das soluções foram fornecidos pelos Laboratórios Multiusuários da UTFPR - Câmpus Campo Mourão.

Dessa forma, todos os procedimentos foram conduzidos de maneira padronizada, assegurando a reprodutibilidade das análises e a confiabilidade dos resultados. Com as amostras devidamente preparadas e as condições analíticas definidas, foi possível prosseguir para a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas dos óleos de coco e de babaçu são apresentados a seguir, com ênfase inicial no índice de acidez, por se tratar de um parâmetro fundamental para avaliar a qualidade das matérias-primas e sua adequação às rotas de conversão. A partir das equações descritas na seção anterior, foram determinados os valores de índice de acidez para cada tipo de óleo, conforme apresentado na Tabela 5. Para ambas as amostras, as análises foram conduzidas em duplicata, visando garantir a reprodutibilidade dos dados, sendo posteriormente calculada a média representativa de cada óleo. Dessa forma, o óleo de coco apresentou índice de acidez de 0,01743 mg KOH/g, enquanto o óleo de babaçu apresentou valor de 0,01252 mg KOH/g.

**Tabela 5 - Metodologias usadas na caracterização**

| Amostra        | Duplicata 1 (mg KOH/g) | Duplicata 2 (mg KOH/g) | Média (mg KOH/g)   |
|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| Óleo de coco   | 0,02341                | 0,01145                | 0,01743 ± 0,00846  |
| Óleo de babaçu | 0,01227                | 0,01278                | 0,01252 ± 0,000357 |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

Além da determinação do índice de acidez, também foi possível calcular a porcentagem de ácido oleico presente em cada amostra, a partir das equações previamente apresentadas na seção de Materiais e Métodos. Para o óleo de coco, a análise indicou teor de ácido oleico igual a 0,00876%, enquanto o óleo de babaçu apresentou valor de 0,00630%. Os valores médios obtidos para essa determinação encontram-se organizados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Porcentagem de ácido oleico nas amostras**

| Amostra        | Duplicata 1 (%) | Duplicata 2 (%) | Média (%)          |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Óleo de coco   | 0,01177         | 0,00576         | 0,00876 ± 0,004251 |
| Óleo de babaçu | 0,00617         | 0,00642         | 0,00630 ± 0,000179 |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

De acordo com a Resolução nº 270/2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), óleos prensados a frio e não refinados devem apresentar índice de acidez máximo de 4 mg KOH/g (ANVISA, 2005). Os valores obtidos neste trabalho encontram-se, portanto, dentro dos limites estabelecidos pela legislação e são significativamente baixos. Essa característica é desejável para a produção de biodiesel via transesterificação, uma vez que menores índices de acidez implicam menor quantidade de hidróxido de potássio necessária para neutralizar os ácidos

graxos livres presentes em 1 g de óleo. Consequentemente, quanto menor o índice de acidez, menores são as probabilidades de ocorrência de saponificação durante o processo de transesterificação catalisado por base homogênea (Atadashi *et al.*, 2013).

Considerando que os valores de índice de acidez obtidos foram baixos, era esperado que a porcentagem equivalente de ácido oleico também apresentasse valores reduzidos, uma vez que ambas as grandezas são diretamente proporcionais. Esse comportamento confirma a baixa concentração de ácidos graxos livres nos óleos analisados, característica essencial para a produção de biocombustíveis, visto que, em processos como a transesterificação, baixos teores de acidez minimizam o consumo estequiométrico do catalisador e reduzem a formação de sabões, fatores que prejudicam a eficiência reacional (Ferrari; Oliveira; Scabio, 2005). Dessa forma, as matérias-primas selecionadas para a produção de biodiesel e, posteriormente, de bioquerosene apresentam condições favoráveis ao bom desempenho do processo.

Após a determinação do índice de acidez dos óleos, procedeu-se ao processo de transesterificação. Para as reações, empregou-se catalisador básico (KOH) na concentração de 1% em massa e etanol nas proporções molares 1:9 e 1:18 (óleo:álcool). As reações foram conduzidas por 3 horas, sob agitação de 400 rpm e temperatura controlada a 60 °C. As condições reacionais adotadas encontram-se sintetizadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Informações reacionais**

| Amostra | Matéria-prima | Razão óleo:álcool | Tempo de reação (h) |
|---------|---------------|-------------------|---------------------|
| B1      | Babaçu        | 1:9               | 3                   |
| C1      | Coco          | 1:9               | 3                   |
| B2      | Babaçu        | 1:18              | 3                   |
| C2      | Coco          | 1:18              | 3                   |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

Definidas as condições reacionais, as amostras foram submetidas ao processo de transesterificação e, posteriormente, às etapas de purificação. Embora a conversão dos óleos em biodiesel não constitua o foco central deste trabalho, a análise cromatográfica permitiu quantificar a fração convertida em ésteres para cada condição estudada. Para a proporção de 1:9 (óleo:álcool), as conversões obtidas foram de 68,8123% para o biodiesel produzido a partir do óleo de babaçu e de 72,0532% para aquele obtido do óleo de coco. Já para a proporção de 1:18, observaram-se valores de 71,2077% e 77,6943%, respectivamente para os óleos de babaçu e coco. Esses resultados estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Conversão de ésteres**

| <b>Amostra</b> | <b>Razão óleo:álcool</b> | <b>Conversão (%)</b> |
|----------------|--------------------------|----------------------|
| B1             | 1:9                      | 68,8123              |
| C1             | 1:9                      | 72,0532              |
| B2             | 1:18                     | 71,2077              |
| C2             | 1:18                     | 77,6943              |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

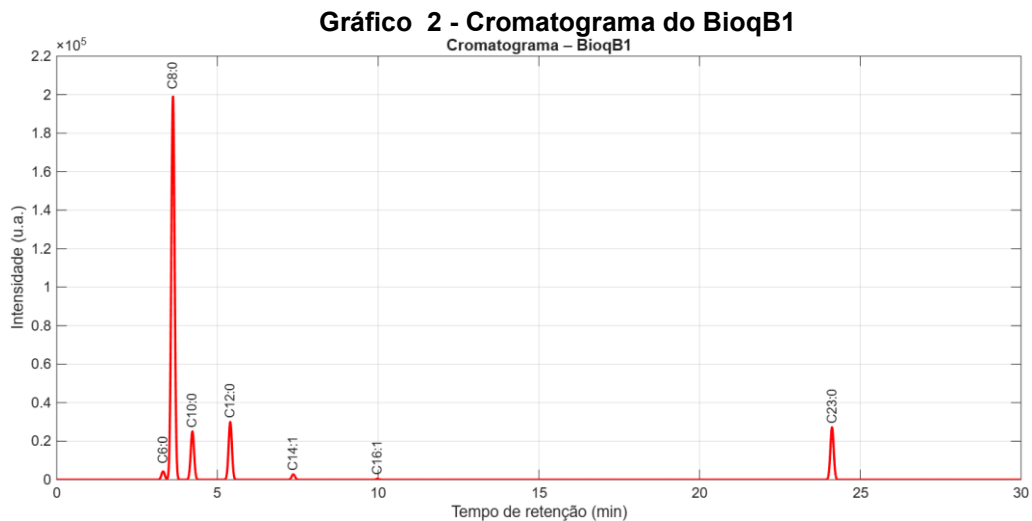
O comportamento observado para as conversões está em consonância com a literatura, que descreve que o aumento da razão molar álcool:óleo desloca o equilíbrio da transesterificação no sentido de formação dos ésteres, elevando, portanto, os valores de conversão (Avhad; Marchetti, 2015). No entanto, embora o uso de excesso de álcool favoreça o rendimento da reação, essa condição pode acarretar desvantagens econômicas, além de dificultar etapas posteriores, como a purificação do biodiesel e a separação do glicerol. Assim, a otimização da razão molar deve considerar não apenas aspectos cinéticos, mas também fatores associados ao custo operacional e à qualidade do produto final (Zheng; Cho, 2025).

A conversão relativamente menor obtida neste estudo pode estar associada ao tempo de reação empregado. Trabalhos anteriores, como os de Paiva (2010) e Samuel, Giwa e El-Suleiman (2016), reportam que a transesterificação catalisada por base alcança conversões superiores a 90% em aproximadamente 60 minutos, desde que parâmetros como temperatura, agitação e razão molar sejam adequadamente controlados. Esses resultados sugerem que, para reações alcalinas homogêneas, tempos significativamente menores que 180 minutos podem ser suficientes para atingir altas conversões, indicando que o tempo empregado neste trabalho não foi o fator limitante para o aumento da conversão.

Após a obtenção e purificação dos ésteres etílicos de ácidos graxos, prosseguiu-se com a etapa de destilação a vácuo em coluna de Vigreux, visando ao isolamento da fração correspondente aos ácidos graxos de menor peso molecular (bioquerosene). O sistema operou sob vácuo aproximado de -700 mmHg, com a manta aquecedora ajustada para 220 °C e tempo médio de destilação de 90 minutos. Observou-se que a primeira gota de bioquerosene foi coletada por volta dos 10 minutos de processamento, condição atingida quando a temperatura na manta alcançou aproximadamente 160 °C.

O bioquerosene coletado foi utilizado nas análises de identificação e quantificação de sua composição química, referentes às frações obtidas a partir dos óleos de coco e babaçu. Para isso, empregou-se a técnica de Cromatografia Gasosa com Detecção por Ionização de Chama (CG-FID), sendo todas as análises realizadas em duplicata. Os cromatogramas obtidos foram posteriormente exportados para o software MATLAB® (MathWorks, 2024a), permitindo melhor visualização dos perfis cromatográficos e comparação entre as frações de entrada e saída da destilação. Para fins de interpretação, definiu-se como *topo* a fração destilada (bioquerosene) e como *fundo* a fração não destilada, composta pelos ésteres remanescentes.

A composição química do bioquerosene de babaçu do primeiro ensaio (BioqB1), obtido a partir da destilação do biodiesel produzido com razão óleo:álcool de 1:9, foi determinada em duplicata. Para essa amostra, assim como para as demais, os cromatogramas foram construídos a partir das médias das duas injeções sucessivas. O cromatograma referente aos compostos médios presentes na amostra BioqB1 é apresentado no Gráfico 2. Os cromatogramas foram elaborados utilizando o tempo de retenção no eixo x e a intensidade do sinal no eixo y, empregando o tricosenoato de metila como padrão interno (C23:0).



A análise do cromatograma da amostra BioqB1 permitiu identificar ácidos graxos no intervalo de C6:0 a C16:1, com maior contribuição de ácidos de cadeia média, em especial o ácido caprílico (C8:0), além dos ácidos cáprico (C10:0) e láurico (C12:0). Esse perfil, dominado por ácidos graxos entre C6 e C16, é compatível com o descrito na literatura para bioquerosene derivado de óleo de babaçu, em que a fração de topo apresenta teores elevados de C8:0, C10:0 e C12:0 (Simomukay *et al.*, 2022).

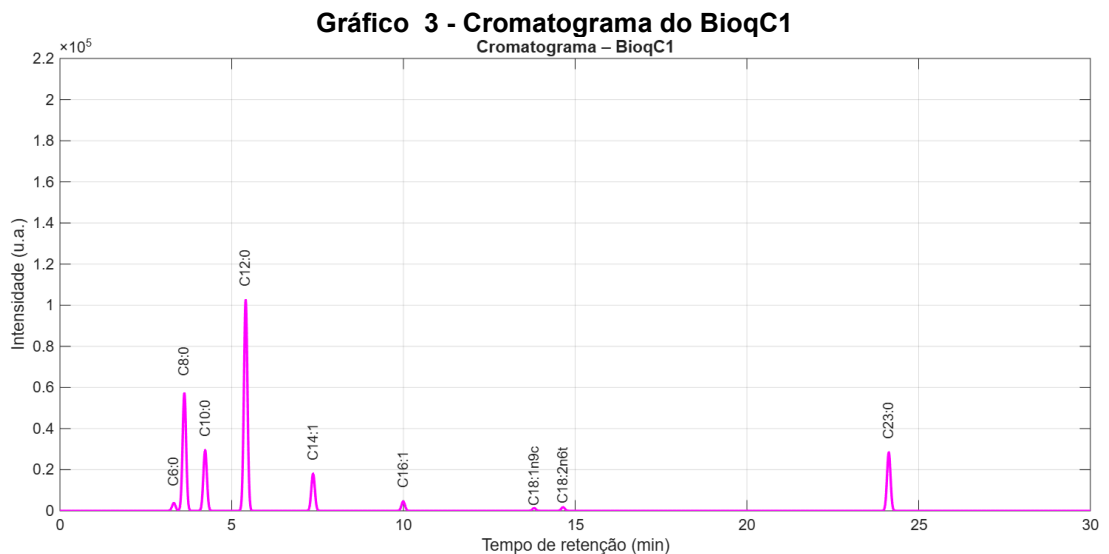
Na Tabela 9 são apresentados os compostos identificados e a respectiva percentagem de contribuição de cada ácido graxo, reunindo dados tanto para o bioquerosene de babaçu quanto para o de coco (Ponte, 2017).

**Tabela 9 - Composição química do bioquerosene**

| Ácido graxo     | Composto | % (Babaçu) | % (Coco) |
|-----------------|----------|------------|----------|
| Ácido capróico  | C6:0     | 4,1        | 0,0      |
| Ácido caprílico | C8:0     | 26,0       | 39,1     |
| Ácido cáprico   | C10:0    | 18,0       | 15,6     |
| Ácido láurico   | C12:0    | 33,4       | 36,0     |
| Ácido mirístico | C14:0    | 12,6       | 5,3      |
| Ácido palmítico | C16:0    | 5,0        | 2,0      |
| Ácido esteárico | C18:0    | 0,0        | 0,4      |
| Ácido oleico    | C18:1    | 0,0        | 0,8      |
| Ácido linoleico | C18:2    | 0,0        | 0,8      |

Fonte: Adaptado de Ponte *et al.*, (2017)

O Gráfico 3 apresenta o cromatograma da amostra de bioquerosene de coco 1 (BioqC1), obtida a partir da destilação do biodiesel preparado com razão óleo:álcool de 1:9.

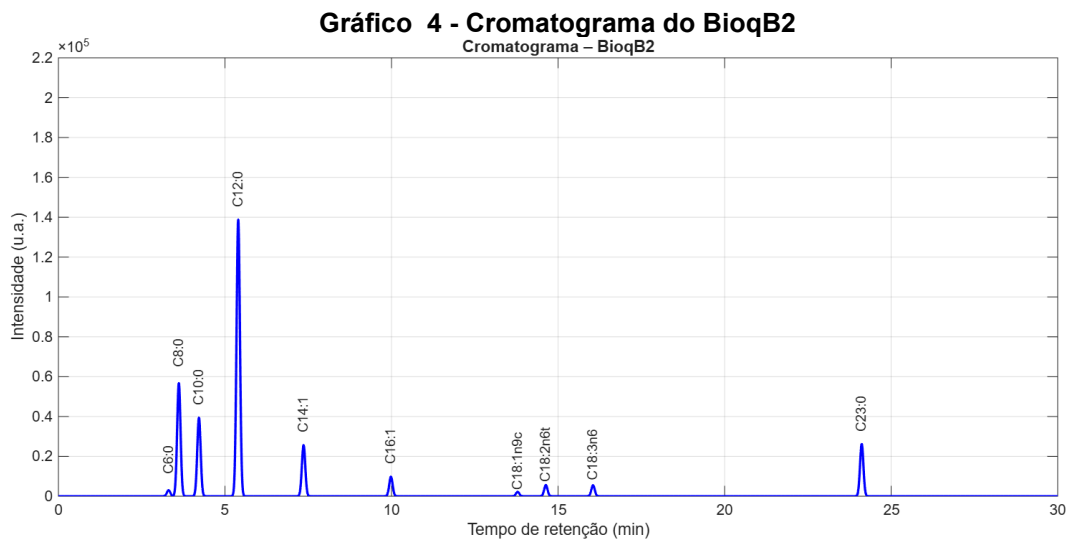


Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se a predominância de ácidos graxos de cadeia curta e média, no intervalo de C6:0 a C16:1, o que confirma a obtenção de uma fração mais leve após a etapa de destilação. Em menores proporções, também foram identificados ácidos graxos de cadeia mais longa, como C18:1n9c e C18:2n6t. Esse perfil é coerente com o apresentado na Tabela 7, construída a partir dos dados de Ponte (2017), na qual se observa que os bioquerosenes derivados de óleos de babaçu e de coco são

majoritariamente constituídos por ácidos graxos na faixa de C6 a C16, com participação residual de espécies C18 insaturadas. Dessa forma, tanto a amostra BioqB1 (babaçu) quanto a BioqC1 (coco) exibem perfis de composição compatíveis com aqueles reportados na literatura, mesmo sob condições de processo distintas das adotadas por (Ponte, 2017).

De maneira análoga ao procedimento empregado para a razão óleo:álcool de 1:9, também foi avaliada a razão de 1:18. O cromatograma correspondente ao bioquerosene de babaçu 2 (BioqB2), obtido nesta segunda condição, é apresentado no Gráfico 4, permitindo comparar o efeito da razão óleo:álcool sobre a distribuição dos ácidos graxos na fração destilada.

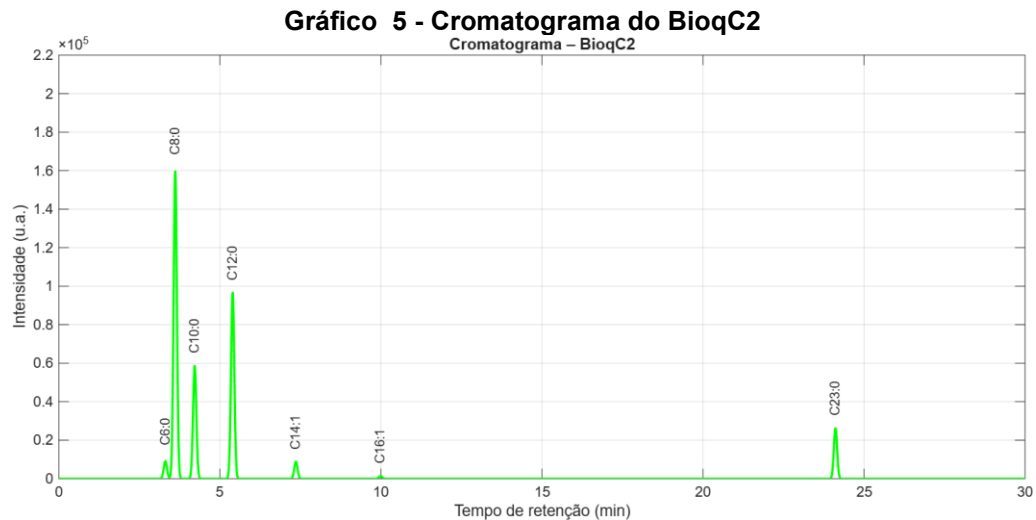


**Fonte: Autoria própria (2025)**

A partir da interpretação dos picos do cromatograma de BioqB2, observa-se a predominância de ésteres etílicos de ácidos graxos de cadeia curta e média, com destaque para os compostos C12:0, C10:0 e C8:0. Embora esses compostos sejam típicos de matérias-primas ricas em triglicerídeos de cadeias médias, a razão óleo:álcool de 1:18 também revelou a presença de ésteres de cadeia mais longa, principalmente derivados de ácidos graxos C18, ainda que em baixas intensidades. Estudos como o de Ponte (2017) indicam que bioquerosenes produzidos a partir de óleo de babaçu são constituídos majoritariamente por ácidos graxos entre C8 e C14, com teores menores de espécies C18, o que é consistente com o comportamento observado neste trabalho. Mesmo quando presentes, os ácidos graxos de cadeia longa permanecem em concentrações significativamente inferiores às de cadeias

curtas e médias, que são mais desejáveis quando o objetivo é obter um combustível leve para aplicações aeronáuticas.

Para a mesma razão óleo:álcool de 1:18, procedeu-se à análise do bioquerosene de óleo de coco 2 (BioqC2), cujo cromatograma é apresentado no Gráfico 5.



Fonte: Autoria própria (2025)

O cromatograma do BioqC2 apresentou composição semelhante à observada para o BioqC1, quando considerados os principais ácidos graxos identificados. A diferença mais relevante é que, em BioqC2, não foi constatada a presença dos ácidos graxos de maior massa molar detectados em BioqC1. Ainda assim, os ácidos graxos de interesse aparecem em ambas as amostras, mesmo tendo sido obtidas sob diferentes razões óleo:álcool, o que indica consistência no perfil dos produtos formados.

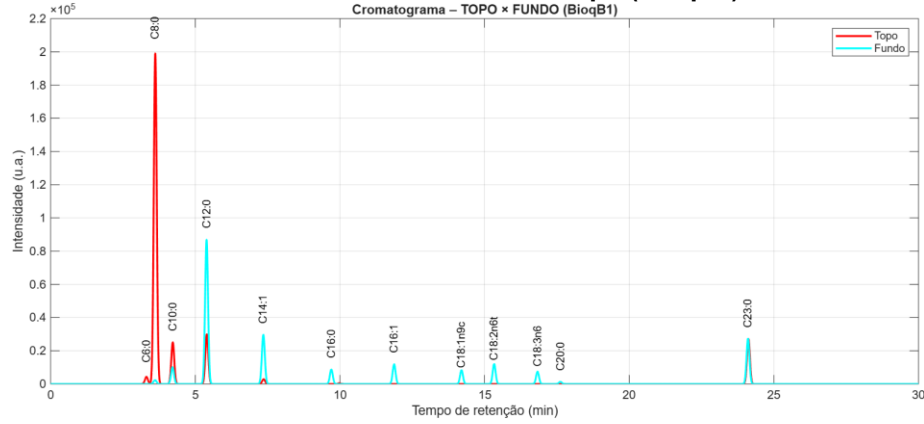
De forma geral, os perfis obtidos nas diferentes proporções (1:9 e 1:18) são qualitativamente coerentes com o que a literatura descreve para óleos de babaçu e coco e para os produtos gerados a partir desses óleos após transesterificação e destilação, ou seja, uma predominância de ácidos graxos de cadeia média (principalmente C8:0, C10:0 e C12:0) e menores teores de espécies de cadeia mais longa (Harter; Santos; Fabris, 2019). As diferenças observadas entre as razões 1:9 e 1:18, como a maior formação de ácido caprílico (C8:0) em 1:9 para o babaçu e em 1:18 para o coco, bem como a variação na abundância de ácido láurico (C12:0) entre as matérias-primas, decorrem dos resultados experimentais deste trabalho, indicando que as condições de processo influenciam a distribuição relativa dos ésteres, sem destoar do comportamento esperado por esses óleos.

Além disso, constatou-se a presença de ácidos graxos insaturados, especialmente C14:1, C16:1, C18:1, C18:2 e C18:3. Esses compostos tendem a reduzir a estabilidade oxidativa do biocombustível, uma vez que as duplas ligações constituem sítios altamente reativos frente ao oxigênio (Pullen; Saeed, 2012). Estudos como os de Knothe (2007) e Pullen; Saeed (2012) mostram que, mesmo em teores relativamente baixos, ácidos graxos mono e poli-insaturados favorecem a formação de radicais livres e peróxidos, acelerando o processo de oxidação. Embora tais compostos não inviabilizem o uso do bioquerosene, níveis elevados de insaturação podem comprometer sua estabilidade oxidativa e térmica, sobretudo em condições severas de operação.

A oxidação, por sua vez, pode provocar alterações significativas nas propriedades físico-químicas do combustível, como ponto de fulgor, viscosidade e tendência à formação de gomas, as quais podem gerar depósitos capazes de obstruir filtros e componentes do sistema de injeção da aeronave (Knothe, 2007). Assim, a presença excessiva de ácidos graxos insaturados representa um fator crítico para a qualidade do bioquerosene. Conforme relatado por Knothe (2007) e por Pullen; Saeed (2012), uma das principais estratégias de mitigação consiste na adição de antioxidantes, que diminuem a suscetibilidade dos ésteres insaturados ao processo oxidativo e contribuem para prolongar a estabilidade do bioquerosene durante o armazenamento e a operação.

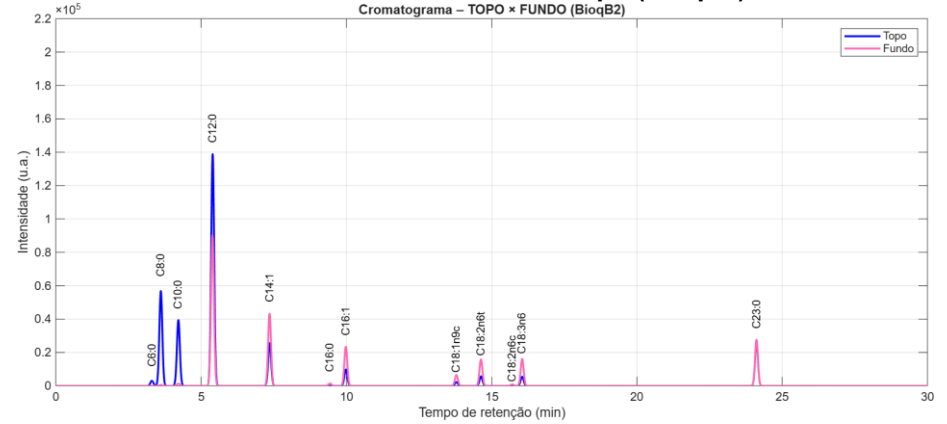
De forma semelhante ao procedimento adotado para a fração de topo (bioquerosene), também foi obtido o cromatograma das frações de fundo, a fim de identificar quais ésteres permaneceram na porção não destilada. Ainda, observou-se na Figura 9 (seção de materiais e métodos) que a fração de fundo (imagem a) apresenta aspecto mais turvo e coloração levemente mais amarelada que a fração de topo (imagem b), comportamento visto para todas as amostras. Essa diferença visual pode ser atribuída, sobretudo, à maior presença de ésteres de cadeia longa na fração de fundo, como será detalhado nos cromatogramas de topo e fundo apresentados nos Gráficos 6, 7, 8 e 9. Além disso, mesmo após as etapas de purificação e lavagem, o biodiesel pode reter traços de ácidos graxos livres, sabões, glicerol e resíduos de catalisador que, na presença de pequenas quantidades de água, favorecem a formação de emulsões finas, aumentando a turbidez e conferindo aspecto opalescente à fração de fundo (Atadashi; Aroua; Aziz, 2011).

**Gráfico 6 - Fundo x Topo (BioqB1)**



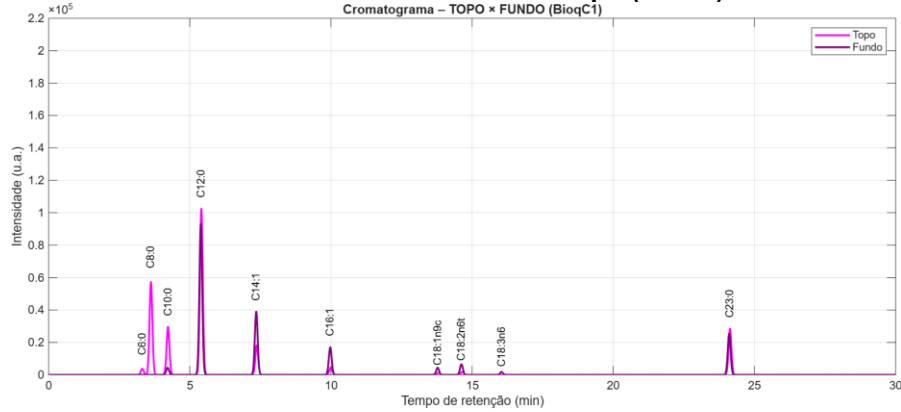
Fonte: Autoria própria (2025)

**Gráfico 7 - Fundo x Topo (BioqB2)**



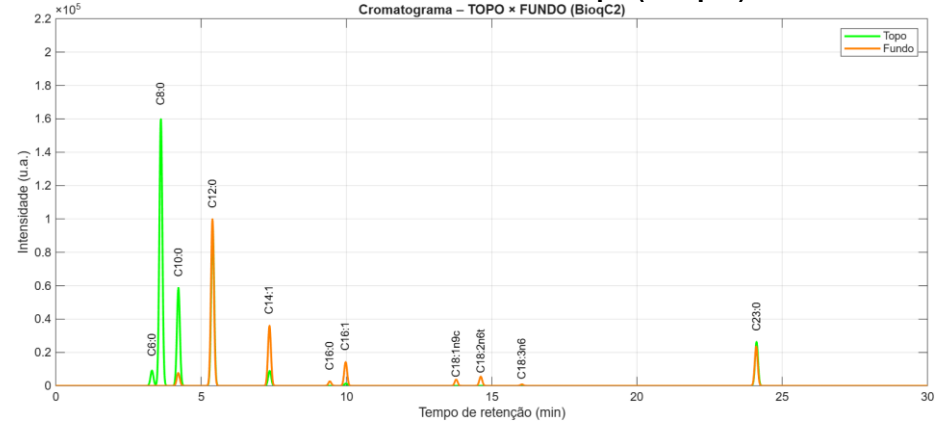
Fonte: Autoria própria (2025)

**Gráfico 8 - Fundo x Topo (BioC1)**



Fonte: Autoria própria (2025)

**Gráfico 9 - Fundo x Topo (BioqC2)**



Fonte: Autoria própria (2025)

De forma geral, os cromatogramas mostraram que os ésteres etílicos de ácidos graxos de cadeia curta e média (C6 - C12) tendem a se concentrar na fração de topo (bioquerosene), enquanto a fração de fundo apresenta enriquecimento relativo em ésteres de cadeia mais longa. Em praticamente todas as amostras, o topo é dominado pelos ésteres de C6:0, C8:0, C10:0 e C12:0, ao passo que, na fração de fundo, se observa aumento da intensidade dos picos associados a C16 e C18, quando comparada ao topo. Esse comportamento está em concordância com o estudo de Harter, Santos e Fabris (2019), que relata a predominância de ésteres mais leves (C8–C14) nas frações destiladas e a presença de frações mais pesadas ( $\geq$  C16) no resíduo de destilação.

Um aspecto particular evidenciado nas comparações topo  $\times$  fundo dos cromatogramas de BioqB1 e BioqC2 é que o éster etílico de C12:0 apresenta pico mais intenso na fração de fundo do que na de topo. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, ao longo da destilação, os ésteres com menor ponto de ebulição (C6:0, C8:0 e C10:0) são destilados preferencialmente e se acumulam na fração de topo. Já os ésteres de cadeia média a longa (C12:0, C14:0, C16:0/C16:1 e C18:x), embora possam destilar parcialmente, possuem pontos de ebulição mais elevados e, em condições de operação, podem não vencer completamente a coluna de destilação, permanecendo em maior proporção na fração de fundo (Yuan; Hansen; Zhang, 2005). A Tabela 10 apresenta as concentrações, em porcentagem, dos compostos identificados nas frações de topo dos bioquerosenes. Essas porcentagens foram calculadas pelo método de padrão interno, a partir da massa de cada amostra, da massa de padrão interno adicionada e das áreas dos respectivos picos cromatográficos.

**Tabela 10 - Perfil dos ácidos graxos do topo**

| <b>Composto</b> | <b>BioqB1 (%)</b> | <b>BioqB2 (%)</b> | <b>BioqC1 (%)</b> | <b>BioqC2 (%)</b> |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| C6:0            | 1,42              | 0,76              | 1,37              | 2,26              |
| C8:0            | 72,42             | 15,12             | 20,47             | 42,58             |
| C10:0           | 10,11             | 11,86             | 12,24             | 17,26             |
| C12:0           | 14,39             | 49,65             | 50,47             | 33,81             |
| C14:1           | 1,48              | 10,34             | 9,76              | 3,52              |
| C16:1           | 0,19              | 4,43              | 2,81              | 0,57              |
| C18:1n9c        | -                 | 1,35              | 1,59              | -                 |
| C18:2n6t        | -                 | 3,45              | 1,29              | -                 |
| C18:3n6         | -                 | 3,04              | -                 | -                 |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

A partir das porcentagens apresentadas na Tabela 10, observa-se que todas as amostras de bioquerosene possuem perfil típico de matérias-primas ricas em ácidos graxos de cadeia curta e média ( $\leq$  C12:0), com predominância de C8:0 e C12:0. Esse comportamento está de acordo com Ponte (2017), que descreve o bioquerosene obtido a partir do óleo de babaçu como mais enriquecido em ácido láurico (C12:0) e o derivado de óleo de coco como mais enriquecido em ácido caprílico (C8:0), conforme mostrado na Tabela 9.

O presente estudo verificou que a variação da proporção óleo:álcool não alterou o caráter predominante de cadeias curtas e médias ( $\leq$  C12:0) nas frações de topo, embora tenha modificado de forma significativa a distribuição relativa entre os ácidos graxos e a participação de alguns componentes de cadeia mais longa. Em particular, os resultados indicam que a razão óleo:álcool modula a relação entre C8:0 e C12:0 nas frações de topo, podendo inclusive alterar qual desses ésteres se torna majoritário em cada condição de reação. Para o bioquerosene de babaçu, a proporção 1:18 resultou em maior participação de C12:0 em relação à proporção 1:9, na qual o C8:0 se mostrou claramente predominante (BioqB1). Já para o bioquerosene de coco observou-se o comportamento inverso, mostrando que a proporção 1:18 (BioqC2) favoreceu a formação relativa de C8:0, enquanto a 1:9 (BioqC1) apresentou maior participação de C12:0.

Por fim, a Tabela 11 abaixo apresenta a composição em ésteres etílicos de ácidos graxos correspondente às frações de fundo das mesmas amostras.

**Tabela 11 - Perfil dos ácidos graxos do fundo**

| <b>Composto</b> | <b>BioqB1 (%)</b> | <b>BioqB2 (%)</b> | <b>BioqC1 (%)</b> | <b>BioqC2 (%)</b> |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| C6:0            | -                 | -                 | -                 | -                 |
| C8:0            | 0,79              | 0,21              | -                 | -                 |
| C10:0           | 4,02              | 0,44              | 2,06              | 3,58              |
| C12:0           | 41,46             | 37,91             | 50,56             | 53,80             |
| C14:1           | 15,54             | 20,28             | 24,22             | 21,59             |
| C16:0           | 5,20              | 0,68              | -                 | 1,63              |
| C16:1           | 9,75              | 12,47             | 11,80             | 9,71              |
| C18:1n9c        | 7,46              | 5,38              | 3,51              | 3,70              |
| C18:2n6t        | 9,39              | 11,42             | 6,40              | 5,26              |
| C18:2n6c        | -                 | 0,50              | -                 | -                 |
| C18:3n6         | 5,62              | 10,71             | 1,44              | 0,73              |
| C20:0           | 0,79              | -                 | -                 | -                 |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

A análise da composição das frações de fundo vistas na Tabela 11 mostra um aumento na participação relativa de ácidos graxos de cadeia mais longa em praticamente todas as amostras, bem como a ausência ou forte redução dos compostos mais leves. Esses ésteres de menor massa molar, como C6:0, C8:0 e C10:0, apresentam menores pontos de ebulição e, por isso, tendem a migrar preferencialmente para a fração de topo durante a destilação, resultando em maior enriquecimento nessas cadeias na fase leve. Já ésteres de cadeia média a longa ( $\geq$  C12:0) embora parcialmente destiláveis, permanecem em proporções mais elevadas na fração de fundo devido aos seus pontos de ebulição mais altos e às limitações operacionais do sistema de destilação (Yuan; Hansen; Zhang, 2005). De acordo com Harter, Santos e Fabris (2019) esse comportamento é coerente com o que se observa em processos de destilação de biodiesel. Do ponto de vista de processo, estratégias como o emprego de colunas com maior eficiência de separação, otimização das condições operacionais (temperatura, pressão e razão de refluxo) ou mesmo a utilização de correntes de reciclo da fração de fundo para estágios adicionais de destilação podem ser adotadas para aumentar a recuperação de ésteres (Harter; Santos; Fabris, 2019).

Após finalizada a etapa de análise cromatográfica, as alíquotas de cada amostra foram reunidas (*pooled*) e encaminhadas para a etapa de caracterização, realizada por instituição parceira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os resultados obtidos, bem como as metodologias empregadas na caracterização dos bioquerosenes de coco e de babaçu em amostras *pooled*, estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Caracterização do bioquerosene**

| <b>Parâmetro</b>                            | <b>Metodologia</b>                  | <b>Bioquerosene de babaçu</b>                 | <b>Bioquerosene de coco</b>                   |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Aparência<br>(Inspeção visual)              | ASTM D4176 -<br>Método 1            | Visualmente limpa e sem<br>separação de fases | Visualmente limpa e sem<br>separação de fases |
| Densidade a 15°C<br>(kg/m <sup>3</sup> )    | ASTM D4052<br>(Picnometria digital) | 810,0   | 770,0   |
| Ponto de fulgor (°C)                        | ASTM D56 (Tag)                      | 39,2  | 37,8  |
| Ponto de<br>congelamento (°C)               | ASTM D2386                          | -46,7   | -45,4   |
| Acidez total<br>(mg KOH /g)                 | ASTM D3242                          | 0,047   | 0,086   |
| Viscosidade a -20°C<br>(mm <sup>2</sup> /s) | ASTM D445-24                        | 6,6   | 9,4   |

**Fonte: A autoria própria (2025)**

Os valores obtidos na caracterização foram comparados às faixas especificadas para combustíveis de aviação na Resolução nº 856/2021 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), tomando-se o querosene de aviação JET A-1 como referência. As metodologias analíticas empregadas seguem os métodos recomendados pela ANP para ensaios em combustíveis. Os limites e intervalos normativos utilizados para comparação estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 - Comparação do bioquerosene com JET A-1**

| <b>Parâmetro</b>                          | <b>Bioquerosene de babaçu</b>              | <b>Bioquerosene de coco</b>                | <b>Jet A-1 Res. nº 856/2021 (ANP)</b>  |
|---|--|--|--|
| Aparência (Inspeção visual)               | Visualmente limpa e sem separação de fases | Visualmente limpa e sem separação de fases | Limpo, sem partículas e sem água livre |
| Densidade a 15°C (kg/m <sup>3</sup> )     | 810,0                                      | 770,0                                      | 771,3 - 836,6 (20°C)                   |
| Ponto de fulgor (°C)                      | 39,2                                       | 37,8                                       | ≥ 38                                   |
| Ponto de congelamento (°C)                | -46,7                                      | -45,4                                      | ≤ -47                                  |
| Acidez total (mg KOH /g)                  | 0,047                                      | 0,086                                      | ≤ 0,015                                |
| Viscosidade a - 20°C (mm <sup>2</sup> /s) | 6,6  | 9,4  | ≤ 8,0                                  |

**Fonte: Autoria própria (2025)**

A partir dos resultados de caracterização, verifica-se que, quanto à aparência, ambos os bioquerosenes atendem ao que é esperado para combustíveis de aviação, apresentando-se límpidos e sem separação de fases. No caso da densidade, as medições foram realizadas a 15 °C, enquanto a Resolução nº 856/2021 da ANP estabelece o intervalo de densidade a 20 °C. Mesmo considerando essa diferença de temperatura, observa-se que o bioquerosene de babaçu se situa dentro da faixa especificada para o Jet A-1, enquanto o bioquerosene de coco apresenta valor ligeiramente inferior ao limite mínimo, embora ainda próximo e compatível com sua composição mais leve. Em relação ao ponto de fulgor, a amostra de babaçu atendeu ao valor mínimo exigido, ao passo que a de coco ficou ligeiramente abaixo do especificado. Já para o ponto de congelamento, ambos os bioquerosenes apresentaram valores um pouco acima do limite máximo estabelecido pela ANP, sendo o bioquerosene de babaçu aquele que mais se aproximou da faixa requerida.

No que se refere ao índice de acidez total, observa-se uma diferença mais expressiva em relação ao valor máximo previsto na Resolução nº 856/2021, com

ambas as amostras apresentando acidez superior ao limite, isso pode estar associado ao tempo decorrido até a realização das análises laboratoriais, bem como à ausência de antioxidantes nos bioquerosenes. Esse resultado indica a provável presença de traços de impurezas, como ácidos graxos livres, sabões ou resíduos de processos anteriores, sugerindo a necessidade de etapas adicionais de purificação ou de otimização do procedimento de polimento do combustível. Em relação à viscosidade cinemática a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o bioquerosene de babaçu apresentou valor em conformidade com o intervalo estabelecido para o Jet A-1, indicando um comportamento fluido adequado nas condições avaliadas. Já o bioquerosene de coco não atendeu ao intervalo especificado, o que evidencia a necessidade de ajustes nas etapas do processo para que esse combustível cumpra integralmente os requisitos normativos.

De forma geral, a análise conjunta dos parâmetros evidencia que o bioquerosene obtido a partir do óleo de babaçu foi o que apresentou maior proximidade global com os requisitos normativos para combustíveis aeronáuticos de origem fóssil, embora nenhum dos biocombustíveis produzidos atenda integralmente, em sua forma pura, a todas as especificações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Assim, uma estratégia tecnicamente viável para o aproveitamento dessas frações seria o seu uso na forma de combustível do tipo *drop-in*, por meio da mistura em determinadas proporções com querosene de aviação fóssil, de modo a corrigir os parâmetros que ainda se encontram fora da faixa especificada. Estudos como os de Ranucci *et al.* (2015) mostram que misturas de bioquerosene com Jet A-1 podem resultar em propriedades finais compatíveis com as normas vigentes, o que reforça o potencial de aplicação dos biocombustíveis produzidos neste trabalho no contexto de formulações híbridas.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo produzir bioquerosene a partir dos óleos de babaçu e coco, por meio de transesterificação etílica alcalina seguida de destilação a vácuo em coluna de Vigreux, visando obter um combustível com propriedades físico-químicas compatíveis com as normas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e com os métodos propostos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para combustíveis de aviação. De modo geral, o objetivo proposto foi alcançado.

Os índices de acidez determinados para os óleos de coco e babaçu indicaram que ambas as matérias-primas foram adequadas à rota de transesterificação etílica alcalina. Foi possível produzir biodieseis que apresentaram bom desempenho na etapa de destilação, permitindo a obtenção de frações de topo com perfil de bioquerosene compatível com o descrito na literatura, isto é, enriquecidas em ácidos graxos de cadeia curta e média. Observou-se ainda que as diferentes razões molares óleo:álcool influenciaram a distribuição dos compostos na mistura reacional e, conseqüentemente, nas frações obtidas.

A análise cromatográfica permitiu avaliar o perfil de ácidos graxos das frações de topo e de fundo para ambas as matérias-primas. Verificou-se que as frações de topo apresentaram maior teor de ácidos de cadeia curta e média, como caprílico, caprílico, cáprico e láurico, enquanto as frações de fundo mostraram redução desses compostos e maior presença de ácidos de maior massa molar.

A partir da caracterização físico-química dos bioquerosenes obtidos, quanto à aparência, densidade, viscosidade, acidez total, ponto de fulgor e ponto de congelamento, constatou-se que o bioquerosene produzido a partir do óleo de babaçu foi o que mais se aproximou dos requisitos estabelecidos pela Resolução ANP nº 856/2021 e das características relatadas para o querosene de aviação de origem fóssil, indicando melhor desempenho dessa matéria-prima nas condições estudadas.

Apesar dos resultados promissores, o estudo apresentou limitações, principalmente por ter sido conduzido em escala de bancada e por envolver um número restrito de condições operacionais. Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação de outros catalisadores, diferentes proporções óleo:álcool e o uso de outros álcoois na etapa de transesterificação, visando aumentar a conversão a biodiesel. Para a etapa de destilação, sugere-se o uso de destilação

fracionada para maior controle das frações, bem como a realização de ensaios com misturas do bioquerosene produzido com o querosene fóssil, na forma de combustível *drop-in*, além de testes de desempenho em motores a combustão.

Em síntese, o trabalho contribuiu para o entendimento do potencial dos óleos de coco e babaçu como matérias-primas para produção de bioquerosene, reforçando sua viabilidade como alternativas renováveis ao querosene de aviação convencional e como parte de estratégias para uma matriz energética mais sustentável no setor aéreo.

## REFERÊNCIAS

- ANAC. **Anuário do transporte aéreo 2024: gráficos e tabelas**. Brasília, DF: [s. d.], 2024.
- ANVISA. **Resolução RDC nº 270, de 22 de setembro de 2005: Regulamento Técnico para óleos vegetais, gorduras vegetais e creme vegetal**. Brasília, DF: [s. d.], 2005. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0270\\_22\\_09\\_2005.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0270_22_09_2005.html). Acesso em: 20 nov. 2025.
- ARAUJO, Jhudson Guilherme Leandro de *et al.* Óleo de coco (Cocos Nucifera) como potencial biomassa para produção de bioquerosene de aviação. *In: Anais do II Congresso da Rede Brasileira de Bioquerosene e hidrocarbonetos sustentáveis de aviação*. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2023. p. 73–75.
- ARAÚJO, Giselle. **Produção de biodiesel a partir de óleo de coco (Cocos nucifera L.)**. 2008. 1–105 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- ASTM. **ASTM D1655-13: Standard specification for aviation turbine fuels**. West Conshohocken: [s. d.], 2013.
- ATADASHI, I. M. *et al.* The effects of catalysts in biodiesel production: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], vol. 19, nº 1, p. 14–26, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X1200233X>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- ATADASHI, I. M.; AROUA, M. K.; AZIZ, A. Abdul. Biodiesel separation and purification: A review. **Renewable Energy**, [s. l.], vol. 36, nº 2, p. 437–443, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003435>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- ATAG. **Aviation: benefits beyond borders**. Genebra: [s. d.], 2020.
- AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. **A Review on Recent Advancement in Catalytic Materials for Biodiesel Production**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015a.
- AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 50, p. 696–718, 2015b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004979>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- BALACHANDRAN, F. M.; ARUMUGHAN, C.; MATHEW, A. G. Distribution of major chemical constituents and fatty acids in different regions of coconut endosperm.

**Journal of the American Oil Chemists' Society**, [s. l.], vol. 62, nº 11, p. 1583–1586, 1985.

BAROUTIAN, Saeid *et al.* Blended aviation biofuel from esterified *Jatropha curcas* and waste vegetable oils. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s. l.], vol. 44, nº 6, p. 911–916, 2013.

BOEING *et al.* **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: plano de ação**. Campinas: [s. d.], 2013.

BONASSA, Gabriela *et al.* Bioquerosene: panorama da produção e utilização no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, p. 1–10, 2014.

BRASIL. **Biocombustíveis de aviação**. [S. l.], 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis-de-aviacao>. Acesso em: 3 jun. 2024.

BRASIL. **Com mais de 112 milhões de passageiros, setor aéreo tem melhor ano desde o início da pandemia**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/com-mais-de-112-milhoes-de-passageiros-setor-aereo-tem-melhor-ano-desde-o-inicio-da-pandemia#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20ano%20de,%25%20e m%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%202022>). Acesso em: 3 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Brasília, DF: [s. d.], 2005. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/11097.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/11097.htm). Acesso em: 15 nov. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011** **Diário Oficial da União**. Brasília/DF, Brasil: [s. d.], 2011. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12490&ano=2011&ato=c9fgXRU1UMVpWT922>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BRASIL. **Resolução ANP nº 856, de 22 de outubro de 2021**. Brasília, DF: [s. d.], 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021-estabelece-as-especificacoes-do-querosene-de-aviacao-jet-a-e-jet-a-1-dos-querosenes-de-aviacao-alternativos-e-do-querosene-de-aviacao-c-jet-c-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializam-esses-produtos-em-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 6 jun. 2024.

BRASIL. **Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023**. Brasília, DF: [s. d.], 2023b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anp-n-920-de-4-de-abril-de-2023-475197674>. Acesso em: 15 nov. 2025.

CAMOLESI, Valmir José. **Caracterização do querosene através da espectroscopia de infravermelho próximo**. 2009. 1–101 f. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CGEE. **Biocombustíveis aeronáuticos: progressos e desafios**. Brasília, DF: [s. d.], 2010.

COSTA, Ricardo Cunha da *et al.* Combustíveis sustentáveis de aviação. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, vol. 30, nº 58, p. 97–142, 2024.

CUNHA, Isabel Matos Fraga; GONÇALVES, Cláudia Roberta; FREITAS, Karen Cristina. Obtenção de bioquerosene de aviação a partir do óleo de coco babaçu. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, [s. l.], vol. 16, nº 9, p. 18498–18510, 2023.

DAMASCENO, Eduardo Neto de Andrade *et al.* Caracterização físico-química das frações destiladas do bio-óleo de gordura residual. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], vol. 8, nº 5, p. 36822–36839, 2022.

ELLER, Z.; VARGA, Z.; HANCSÓK, J. Renewable jet fuel from kerosene/coconut oil mixtures with catalytic hydrogenation. **Energy & Fuels**, [s. l.], vol. 33, nº 7, p. 6444–6453, 2019.

ENGEL, Randall G. *et al.* **Química orgânica experimental: técnicas de escala pequena**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522123469/pageid/3>. Acesso em: 12 jun. 2024.

FAA. **Airframe & powerplant mechanics: general handbook**. 1. ed. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, 1999.

FERRARI, Roseli Aparecida; OLIVEIRA, Vanessa da Silva; SCABIO, Ardalla. Biodiesel de soja - Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, [s. l.], vol. 28, nº 1, p. 19–23, 2005.

FLUMIGNAN, Danilo Luiz. **Caracterização da qualidade e interpretação das propriedades físico-químicas de gasolinas C brasileiras através de cromatografia gasosa e métodos quimiométricos**. 2005. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Araraquara, 2005.

GONÇALVES, Flavio dos Reis; BORGES, Luiz Eduardo Pizarro; FRAGA, Marco André. Combustíveis de aviação: perspectivas e futuro. **IME (Instituto Militar de Engenharia)**, Rio de Janeiro, p. 1–9, 2011.

HARTER, Luiz Vitor Leonardi; SANTOS, Douglas Queiroz; FABRIS, José Domingos. Destilação atmosférica do biodiesel derivado do óleo de macaúba ou do palmiste para obtenção da fração de ésteres leves para uso como combustível de aviação. **Química Nova**, [s. l.], vol. 42, nº 2, p. 143–148, 2019.

IBGE. **Estudo mostra retrato do setor aéreo nacional e impactos da Covid-19**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/32525-estudo-mostra-retrato-do-setor->

aereo-nacional-e-impactos-da-covid-19#:~:text=Destaques,cargas%20caiu%2029%2C6%25. Acesso em: 11 jun. 2024.

IBGE. **Produção de babaçu**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/babacu/b>. Acesso em: 12 jun. 2024.

IHA, Bruno K.V. *et al.* Equações lineares e não lineares para prever o comportamento de propriedades físico-químicas de combustível de aviação misturado com bioquerosene drop-in alternativo. **Química Nova**, [s. l.], vol. 42, nº 1, p. 1–9, 2019.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

KNOTHE, Gerhard. Some aspects of biodiesel oxidative stability. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], vol. 88, nº 7, p. 669–677, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382007000185?via%3Dihub>. Acesso em: 17 nov. 2025.

LAVIOLA, Bruno Galvêas; CAPDEVILLE, Guy de; COLLARES, Daniela. **Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3344909/artigo-materias-primas-oleaginosas-para-a-producao-de-bioquerosene--oportunidades-e-desafios>. Acesso em: 12 jun. 2024.

LEUNG, Dennis Y.C.; WU, Xuan; LEUNG, M. K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, [s. l.], vol. 87, nº 4, p. 1083–1095, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909004346>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LIMA, José Renato de Oliveira *et al.* Biodiesel de babaçu (*Orbignya sp.*) obtido por via etanólica. **Química Nova**, [s. l.], vol. 30, nº 3, p. 600–603, 2007.

LIN, Lin *et al.* Opportunities and challenges for biodiesel fuel. **Applied Energy**, [s. l.], vol. 88, nº 4, p. 1020–1031, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910003946>. Acesso em: 20 nov. 2025.

LLAMAS, Alberto *et al.* Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene. **Fuel**, [s. l.], vol. 102, p. 483–490, 2012. Disponível em: Acesso em: 5 jun. 2024.

MEHER, L. C.; VIDYA SAGAR, D.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 10, nº 3, p. 248–268, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032104001236>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MILANEZ, Artur Yabe *et al.* Biocombustíveis de Aviação no Brasil: Uma Agenda de Sustentabilidade. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, Rio de Janeiro, vol. 28, p. 361–398, 2021. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22048>. Acesso em: 12 jun. 2024.

OLIVEIRA, João Felipe G. *et al.* Biodiesel production from waste coconut oil by esterification with ethanol: The effect of water removal by adsorption. **Renewable Energy**, [s. l.], vol. 35, nº 11, p. 2581–2584, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110001527>. Acesso em: 20 nov. 2025.

OLIVEIRA, Vanessa Fernandes de. **Estudo da obtenção de bioquerosene a partir da destilação molecular de biodiesel de babaçu**. 2016. 1–60 f. Monografia - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ONTL. **Panorama transportes: agosto de 2025**. Brasília, DF: [s. d.], 2025. Disponível em: <https://www.infrasa.gov.br/aviacao-brasileira-atinge-recorde-historico-e-puxa-crescimento-do-setor-de-transportes-em-agosto/>. Acesso em: 9 nov. 2025.

PAIVA, Eduardo Jose Mendes de. **Estudo da produção de biodiesel a partir de óleo de babaçu e etanol utilizando a transesterificação alcalina tradicional com agitação mecânica e assistida por ultrassons**. 2010. 1–173 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, Lorena, 2010.

PETROBRAS. **Querosene de aviação: informações técnicas** Informações Técnicas. Rio de Janeiro: [s. d.], 2021. Disponível em: Acesso em: 20 nov. 2025.

PETROBRAS. **Querosene de aviação (QAV): seu principal parceiro de viagens**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.petrobras.com.br/quem-somos/querosene-de-aviacao>. Acesso em: 3 jun. 2024.

PINHO, Ana Paula Santos de; SOUZA, Aline Francisca de. Extração e caracterização do óleo de coco (*Cocos nucifera* L.). **Revista Perspectivas Online: Biológicas & Saúde**, [s. l.], vol. 8, nº 26, p. 9–18, 2018.

PONTE, Flávio Albuquerque Ferreira da. **Obtenção de bioquerosene a partir de resíduos dos óleos de babaçu e coco via catálise heterogênea**. 2017. 1–167 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

PULLEN, James; SAEED, Khizer. An overview of biodiesel oxidation stability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], vol. 16, nº 8, p. 5924–5950, 2012. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112004170?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112004170?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 20 nov. 2025.

QUERINO, Victor Sabatini. **Balanco de massa e energia em uma planta de produção de bioquerosene**. 2014. 1–53 f. - Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

RANUCCI, Carolline Rodrigues *et al.* Obtenção de bioquerosene de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) e suas misturas ao querosene fóssil. **Revista Tecnológica - Edição Especial**, Paraná, p. 43–52, 2015. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/25927>. Acesso em: 12 jun. 2024.

REIS, Vanderlei dos. **Combustíveis e Sistemas de Combustível**. Florianópolis: Aero TD Escola de Aviação Civil, 2015.

ROCHA, Keli Daiane Camargo; FERREIRA, Marcela Santos; GARCIA, Carlos Eduardo Rocha. Produção e produtos à base de coco (*Cocos nucifera* L.): uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], vol. 8, nº 5, p. 41476–41491, 2022.

RSB. **Decarbonising aviation: the sustainable way forward**. Geneva: [s. d.], 2021. Disponível em: <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Alternative-Aviation-Fuels-A-Sustainable-Future-is-Taking-Off.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SAMUEL, Olusegun David; GIWA, Solomon Olanrewaju; EL-SULEIMAN, Abdulssalam. Optimization of coconut oil ethyl esters reaction variables and prediction model of its blends with diesel fuel for density and kinematic viscosity. **Biofuels**, [s. l.], vol. 7, nº 6, p. 723–733, 2016.

SANTOS, Solange Sousa *et al.* Babaçu: explorando suas características e potencialidades. *In*: CARVALHO, Rusbene Bruno Fonseca de *et al.* (orgs.). **Biotecnologia e farmacologia: abordagens interdisciplinares na terapêutica com recursos naturais**. Atena Editoraed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2023. p. 97–116.

SCHUCHARDT, Ulf; SERCHELI, Ricardo; VARGAS, Rogério Matheus. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], vol. 9, nº 3, p. 1–12, 1998. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-50531998000300002&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-50531998000300002&lng=en&nrm=iso&tlng=en).

SHAHBAZI, Mohammad Reza *et al.* Biodiesel Production via Alkali-Catalyzed Transesterification of Malaysian RBD Palm Oil – Characterization, Kinetics Model. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s. l.], vol. 43, nº 4, p. 504–510, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107012000107>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SIMOMUKAY, Elton *et al.* **Fundamentos de análise instrumental**. 1. ed. Porto Alegre: Ledur, 2022. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556903347/pageid/1>. Acesso em: 12 jun. 2024.

SPERS, Rodolfo Cláudio *et al.* Efeito da suplementação dietética com óleo de babaçu sobre o desempenho de éguas em lactação. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, p. 120–128, 2006.

Disponível em:

<https://www.revistas.usp.br/bjvras/article/view/26544?articlesBySameAuthorPage=4>.  
Acesso em: 12 jun. 2024.

TEIXEIRA, Marcos Alexandre. Biomassa de Babaçu no Brasil. 2002, Campinas. (UNICAMP, Org.) **Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas: Departamento de Energia, 2002. p. 1–10. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100032&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100032&script=sci_arttext). Acesso em: 12 jun. 2024.

VAN GERPEN, Jon. Biodiesel processing and production. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], vol. 86, nº 10, p. 1097–1107, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382004001924>. Acesso em: 20 nov. 2025.

WALKER III, Thomas K.; TATSUTANI, Marika; LEWIS, Jonathan. **Decarbonizing aviation: enabling technologies for a net-zero future**. [s.l.]: [s. d.], 2024.

WEF. **Decarbonizing Brazil's steel, aluminium and aviation sectors**. Cologny; Geneva: [s. d.], 2024.

YUAN, W.; HANSEN, A. C.; ZHANG, Q. Vapor pressure and normal boiling point predictions for pure methyl esters and biodiesel fuels. **Fuel**, [s. l.], vol. 84, nº 7–8, p. 943–950, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236105000256>. Acesso em: 18 nov. 2025.

ZABETI, Masoud; WAN DAUD, Wan Mohd Ashri; AROUA, Mohamed Kheireddine. Activity of solid catalysts for biodiesel production: A review. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], vol. 90, nº 6, p. 770–777, 2009. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009000629?ref=cra\\_js\\_challenge&fr=RR-1](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009000629?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1). Acesso em: 20 nov. 2025.

ZHENG, Fangyuan; CHO, Haeng Muk. **Study on biodiesel production: feedstock evolution, catalyst selection, and influencing factors analysis**. [S. l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2025.