



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

JÚLIA BARBOSA VILALVA

**Produção de ésteres leves derivados de óleo de amêndoa de macaúba para potencial
aplicação como biocombustível de aviação**

Rosana - SP
2021

JÚLIA BARBOSA VILALVA

Produção de ésteres leves derivados de óleo de amêndoa da macaúba para potencial aplicação como biocombustível de aviação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia do Campus Experimental de Rosana, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Energia.

Orientadora: Dra. Andréia Fátima Zanette

Rosana - SP
2021

V696p	Vilalva, Júlia Barbosa Produção de ésteres leves derivados de óleo de amêndoa de macaúba para potencial aplicação como biocombustível de aviação / Júlia Barbosa Vilalva. -- Rosana, 2021 58 f. : tabs., fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Rosana, Rosana Orientadora: Andréia Fátima Zanette 1. Bioquerosene. 2. Destilação. 3. Macaúba. 4. Querosene. 5. QAV-1. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Rosana

JÚLIA BARBOSA VILALVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE ENERGIA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Andréia de Fátima Zanette
Orientador/UNESP-Rosana

Prof. Dr. Leandro Ferreira Pinto
UNESP-Rosana

Prof. Dra. Leticia Sabo Boschi
UNESP-Rosana

Janeiro de 2021

Dedico este trabalho

às mulheres da minha vida: Silmara,
Gabriela, Ana Izide, Carmem, Jeny e
Maria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, aquela que zelou por mim à distância e se manteve presente em meus pensamentos e sentimentos. Sem eles, nenhuma palavra deste trabalho poderia ter sido escrita.

À minha orientadora Andréia Fátima Zanette, que aceitou a missão de me orientar no Trabalho de Conclusão de Curso, agradeço a disponibilidade, os ensinamentos acadêmicos e conselhos de vida compartilhados durante o período de pesquisa.

Aos docentes do curso de Engenharia de Energia, por terem me introduzido a vida acadêmica e que através de seus ensinamentos contribuíram para que me tornasse quem eu sou. Em especial, ao professor Leonardo Lataro Paim, por ter sido meu primeiro orientador e me apresentado a área de bicomcombustíveis. Também não poderia deixar de agradecer ao professor Leandro Ferreira Pinto, pela dedicação na organização da Semana Acadêmica de Engenharia de Energia, evento que me ensinou muito, e pela compreensão nos momentos difíceis.

A todos aqueles que viveram comigo a honra de ter participado da Fontes – Consultoria Energética, Empresa Júnior de Engenharia de Energia, por terem acreditado no poder do coletivo, da democratização do conhecimento e da capilarização do nosso impacto como estudantes de universidade pública. Em especial, agradeço aos fundadores da Empresa Júnior, com quem sonhei e dividi maravilhosos três anos. Tenho muito orgulho de toda a nossa trajetória.

Às amizades cultivadas em Primavera e que levarei para a vida toda, Ana Caroline Borges, Fernanda Viana, Thalita Botuem, Laís Meregaloti, Thais Domenegueti, Rogério Albuquerque, Victor Ferreira, Sarah Miguele, João Pedro Jenson, Harison Franca, Miguel Sales, Matheus de Paula, Luís Gonçalves, Patrick Allan, Thiago Fudimori, Otávio Mariotto e Diego Silva, por terem ficado ao meu lado em todos os melhores e piores momentos na faculdade e, principalmente, na vida.

Ao meu namorado Felipe Augusto, por toda amizade, paciência, amor, companheirismo e cuidado comigo ao longo desses anos e por sempre me mostrar que a coragem é o segredo de tudo.

Ao laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP, no departamento de Química, no Campus de Presidente Prudente, pela disposição para ajudar nas análises cromatográficas.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela doação do subsídio principal desta pesquisa, o óleo de amêndoa de macaúba.

Por fim, agradeço a todos aqueles que compartilharam momentos comigo durante a graduação. Agradeço o apoio, incentivo, suporte e troca de experiências. Sou muito feliz pela oportunidade de viver intensos cinco anos de UNESP Rosana.

“Me levanto
sobre o sacrifício
de um milhão de mulheres que vieram antes e penso
o que é que eu faço
para tornar essa montanha mais alta
para que todas as mulheres que vierem depois de mim
possam ver além”

- Rupi Kaur

RESUMO

Nas últimas décadas, em decorrência do rápido crescimento econômico global e maior acessibilidade às passagens aéreas, houve significativo aumento na demanda pelo transporte aéreo. Estima-se que a indústria de aviação cresça exponencialmente nos próximos anos, com projeção de triplicação nos números de passageiros até 2030. A aviação é um dos setores que mais influenciam nos indicadores socioeconômicos de regiões aeroportuárias e de países, sendo considerado um motor de globalização. Por outro lado, com o crescimento das viagens aéreas, surge a preocupação mundial sobre as emissões de CO₂, visto que o setor é responsável por cerca de 2% de todas as emissões do mundo, com previsão de crescimento para 5% até 2050. Neste contexto, a produção de biocombustíveis sustentáveis que possuem características semelhantes ao combustível tradicional de aviação, denominado querosene de aviação (QAV-1), são uma alternativa viável para a descarbonização sem que sejam necessárias modificações nos motores das aeronaves. Nesse sentido, o óleo de amêndoa de macaúba (*Acronomia Aculeata*) apresenta forte potencial para a produção de bioquerosene de aviação, devido sua alta concentração em ácidos graxos de cadeia curta (C8:0, C10:0, C12:0 e C14:0). Dessa forma, o presente trabalho propõe uma rota de obtenção de biodiesel leve derivado do óleo de amêndoa de macaúba, via transesterificação metílica por catálise homogênea, seguida de destilação atmosférica, obtendo-se seis frações de ésteres metílicos. As frações mais ricas em C8:0, C10:0, C12:0 e C14:0 devem ser utilizadas como combustível de aviação em misturas com QAV-1. A eficiência da transesterificação e da destilação atmosférica, a composição em ésteres do biodiesel produzido e suas frações foi determinada por cromatografia gasosa. Para verificação da qualidade, também foi realizada a determinação da massa específica a 20 °C das frações destiladas. O biodiesel obtido a partir do óleo de amêndoa de macaúba apresentou composição concentrada majoritariamente em ésteres leves. Para o biodiesel leve, a destilação evoluiu a concentração de ésteres leves de 63,47% para 84,74%, enquanto os valores de ésteres de maior cadeia (C16:0 e C18:0) diminuiu em relação ao biodiesel sintetizado, correspondendo a valores comparáveis ao combustível convencional de aviação. Os resultados obtidos apresentaram potencial de aplicação do biodiesel leve de amêndoa de macaúba como combustível alternativo de aviação, o que irá contribuir para minimizar a dependência do petróleo e, consequentemente, diminuir os riscos ambientais envolvidos.

PALAVRAS-CHAVE: Bioquerosene. Destilação. Macaúba. Querosene. QAV-1.

ABSTRACT

In recent decades, as a result of rapid global economic growth and greater accessibility to tickets, there has been a significant increase in the demand for air transport. It is estimated that the aviation industry will grow exponentially in the coming years, with a projected tripling in the number of passengers by 2030. Aviation is one of the sectors that most influence the socioeconomic indicators of airport regions and countries is considered an engine of globalization. On the other hand, with the growth of air travel, there is a worldwide concern about CO₂ information, since the sector is responsible for about 2% of all supplied in the world, with a forecast of 5% growth by 2050. In this context, the production of sustainable biofuels, which have characteristics similar to traditional aviation fuel, called aviation kerosene (QAV-1), are a viable alternative for decarbonization without being mandatory in aircraft engines. In this sense, macaúba almond oil (*Acronomia Aculeata*) has a strong potential for the production of aviation biokerosene, due to its high concentration in short-chain fatty acids (C8: 0, C10: 0, C12: 0, and C14: 0) Thus, the present work proposes a route to obtain light biodiesel derived from macaúba almond oil, via methyl transesterification by homogeneous catalysis, followed by atmospheric distillation, obtaining six fractions of methyl esters. The fractions richer in C8: 0, C10: 0, C12: 0, and C14: 0 should be used as aviation fuel in mixtures with QAV-1. The efficiency of transesterification and atmospheric distillation, an ester composition of the biodiesel produced and its fractions provided by gas chromatography. To check the quality, a determination of the specific mass at 20 °C of the distilled fractions was also carried out. Biodiesel distributes from macaúba almond oil a composition mostly concentrated in leaf esters. For light biodiesel, the distillation increased the concentration of ester levels from 63.47% to 84.74%, while the values of higher chain esters (C16: 0 and C18: 0) decreased about synthesized biodiesel, corresponding to values comparable to conventional aviation fuel. The results obtained showed potential for the application of light macaúba almond biodiesel as an alternative aviation fuel, which will help to minimize dependence on oil and, consequently, reduce the environmental risks involved.

KEYWORDS: Biokerosene. Distillation. Macaúba. Jet fuel. Jet A-1.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Custos e despesas do setor aéreo em 2019.....	19
Figura 2. Produtos da combustão de querosene emitidos por motores a jato.....	20
Figura 3. Principais tecnologias disponíveis para a produção de bioquerosene.....	26
Figura 4. Fruto da Macaúba.....	29
Figura 5. Esquema experimental da transesterificação metílica. (1) Vaso de alimentação, (2) Condensador de refluxo de bolas, (3) Agitador magnético com aquecimento, (4) Banho ultratermostático.	34
Figura 6. Etapas de produção para a obtenção de bioquerosene.	36
Figura 7. Sistema de destilação atmosférica.....	36
Figura 8. Comparação do teor de ácidos graxos no óleo e ésteres presentes no biodiesel sintetizado.....	42
Figura 9. Concentração de ésteres presentes no biodiesel leve.	44
Figura 10. Comparação de teor de ésteres presentes no biodiesel sintetizado e no biodiesel destilado.....	46
Figura 11. Somatório de ésteres leves e ésteres pesados do biodiesel produzido e do biodiesel leve.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados do Painel de Indicadores do Transporte Aéreo referentes aos anos de 2009 e 2019.	18
Tabela 2. Hidrocarbonetos presentes do querosene de aviação.	22
Tabela 3. Parâmetros para o querosene de aviação.	25
Tabela 4. Composição (%) de ácidos graxos presentes no fruto da macaúba.	30
Tabela 5. Propriedades físico-químicas do óleo de macaúba.	39
Tabela 6. Caracterização físico-química do biodiesel produzido.	40
Tabela 7. Concentração de ácidos graxos detectados no óleo de amêndoa de macaúba.	41
Tabela 8 – Temperatura inicial e final de cada fração destilada.	43
Tabela 9. Tempo de retenção dos ésteres metílicos presentes nas frações destiladas.	43
Tabela 10. Massa específica a 20 °C das frações destiladas.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Objetivo	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Breve panorama do mercado aéreo.....	18
2.2. O setor aéreo e as emissões de CO ₂	20
2.3. Querosene de aviação	21
2.4. Biocombustíveis no setor aéreo brasileiro	22
2.5. Bioquerosene	24
2.6. Rotas de síntese de bioquerosene.....	25
2.6.1. Processos Químicos.....	26
2.6.2. Processos Termoquímicos	27
2.6.3. Processos Bioquímicos.....	28
2.7. Matérias-primas para produção de bioquerosene	28
2.7.1. Óleo de amêndoa de macaúba	28
3. METODOLOGIA.....	31
3.1. Caracterização físico-química do óleo de amêndoa de macaúba.....	31
3.1.1. Determinação do índice de acidez.....	31
3.1.2. Determinação da densidade	32
3.1.3. Determinação da viscosidade	32
3.2. Tratamento do óleo de amêndoa de macaúba	33
3.2.1. Neutralização	33
3.3. Produção do biodiesel de óleo de amêndoa de macaúba	34
3.4. Destilação Atmosférica – Obtenção de Ésteres leves de biodiesel de óleo de macaúba	35
3.5. Análise dos ésteres obtidos	37

3.5.1.	Cromatografia Gasosa	37
3.5.2.	Massa específica a 20 °C	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1.	Caracterização físico-química.....	39
4.1.1.	Óleo de macaúba	39
4.1.2.	Biodiesel de macaúba	40
4.2.	Análise dos ácidos graxos e dos ésteres presentes no óleo e biodiesel de amêndoa de macaúba	41
4.3.	Características das Frações Destiladas	42
4.3.1.	Temperatura de retirada das Frações Destiladas.....	42
4.3.2.	Tempo de retenção dos ésteres das Frações Destiladas	43
4.4.	Composição em ésteres das Frações Destiladas	44
4.4.1.	Fração Destilada de Biodiesel de Macaúba	44
4.4.2.	Biodiesel e Destilado	45
4.5.	Análise da qualidade das Frações Destilados	47
4.5.1.	Massa específica das frações destiladas a 20 °C	47
5.	CONCLUSÃO.....	49
5.1.	Trabalhos Futuros	50
	REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional, seguido pelo uso excessivo de combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂), resultou em mudanças climáticas e uma degradação no planeta (DARDA; PAPALAS; ZABANIOTOU, 2019). Neste contexto, despertou-se a atenção e interesse global de economistas, pesquisadores, grandes empresas e políticos em reduzir a poluição atmosférica e tornar o meio ambiente mais sustentável, a partir da busca por combustíveis alternativos e de origem renovável (SILVA et al., 2016).

No Brasil, o setor de transportes ocupa a segunda posição no consumo de energia, representando cerca de 33% de todo o consumo de energia no país (EPE, 2020). Tal setor é um dos principais contribuintes para emissões de gases de efeito estufa (GEE), seja no uso de veículos para transporte de passageiros, de cargas e de uso doméstico (SLOCAT, 2019). Ademais, prevê-se que as emissões de carbono no setor de transporte e a demanda de energia aumentem aproximadamente 84% até 2050 (DUTTA; DAVEREY; LIN, 2014).

Com o desenvolvimento de países emergentes e devido à agilidade e segurança, o transporte que mais cresce em escala mundial é o aéreo, responsável por 2% das emissões de CO₂ no mundo e com previsão de crescimento para 5% até 2050 (GRAVER; ZHANG; RUTHERFORD, 2019). Através da grande perspectiva de crescimento da aviação, há também o aumento na demanda de combustível e, conseqüentemente, aumento do impacto ambiental. Embora apresente baixo índice de emissão, o setor aéreo contribui com as emissões mais prejudiciais, resultado da incidência direta em grandes altitudes sobre a concentração de gases do efeito estufa, intensificando-se o fenômeno do aquecimento global (ZAMPAR, 2019).

Em 2020, o mundo enfrentou uma crise sanitária causada pela pandemia da COVID-19, que impactou globalmente diversos setores, principalmente a saúde. As medidas preventivas tomadas para controle da disseminação da doença, como o isolamento social e o fechamento de fronteiras, levaram à diminuição da circulação de transporte. O setor aéreo foi o mais afetado, chegando a uma redução de 90% das atividades no mês de abril na América do Sul (ICAO, 2020). Apesar do impacto, a aviação tem desempenhado um papel essencial no transporte de equipamentos e suprimentos médicos, no transporte da equipe médica, na repatriação de viajantes e na manutenção de cadeias de suprimentos globais (ATAG, 2020). Embora o setor tenha tido uma redução de 90% das atividades no ano de 2020, em função da pandemia da COVID-19, é visível que a evolução da mobilidade e na demanda de combustíveis no transporte aéreo continuará de forma acelerada nos próximos anos.

Antes da pandemia da COVID-19, o consumo anual de combustíveis no setor de aviação era de cerca de 343 bilhões de litros, dos quais apenas 0,015 bilhões de litros eram derivados de fontes renováveis de energia (SHAHABUDDIN et al., 2020). Este cenário está marcado para mudar a partir de 2020, visto que a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) firmou o compromisso de reduzir em 50% as emissões de CO₂ até 2050, em comparação ao que foi emitido em 2005 (IATA, 2020a). Além disso, a OACI aprovou o Plano de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional, conhecido como CORSIA, que prevê a limitação e a compensação de qualquer aumento anual das emissões totais de carbono da aviação civil internacional acima dos níveis de 2020 (ANAC, 2018).

A fim de promover um voo seguro, existem restrições em relação ao uso de combustíveis convencionais, decorrente à dependência por combustíveis líquidos com características específicas, como alta densidade energética, alto poder calorífico, permitir potências elevadas, baixo ponto de congelamento, não conter água em solução, ser quimicamente estável e apresentar baixa corrosividade e volatilidade adequada (RANUCCI, 2015). De acordo com as exigências, o combustível mais utilizado é o querosene de aviação (QAV-1) de origem fóssil, que em 2009 foi classificado como maior emissor de GEE por unidade de transporte (SHAFIEE; TOPAL, 2009).

Diante à luta pela descarbonização e zelo por evitar alterações e restrições nas aeronaves, é necessário um combustível de origem sustentável que seja compatível ao querosene de aviação. Neste sentido, para o alcance da ambiciosa meta proposta pela OACI, o bioquerosene (BioQAV) tem sido uma proposta ambientalmente correta e tecnicamente viável. Segundo a *International Air Transport Association* - IATA, os biocombustíveis de aviação emitem até 80% menos gases na atmosfera do que o QAV-1 (IATA, 2013).

O bioquerosene é caracterizado por hidrocarbonetos derivados de ésteres de ácidos graxos de cadeia molecular curta, entre 8 a 14 carbonos (DE OLIVEIRA et al., 2018). Uma forma de se obter o bioquerosene de aviação é através da reação de transesterificação de óleos ricos em ésteres de ácidos graxos, com álcool simples, metanol ou etanol, em virtude de ser um método relativamente mais simples quando comparado com as demais alternativas, e posteriormente concentrado via destilação atmosférica (HARTER; SANTOS; FABRIS, 2019; RANUCCI et al., 2018).

O Brasil é um dos maiores produtores de biocombustíveis devido às diferentes espécies de matérias-primas existentes no país (ZAMPAR, 2019). No caso da produção do bioquerosene, destaca-se as oleaginosas compostas por elevados teores de ácidos graxos cuja cadeia carbônica se assemelha à faixa do querosene de aviação (LLAMAS et al., 2012). O óleo de amêndoa de

macaúba (*Acronomia Aculeata*) destaca-se por possuir alta concentração em ácido láurico (C12:0), demonstrando um grande potencial energético (HARTER, 2019). Portanto, propõe-se uma rota de obtenção de bioquerosene a partir do óleo de amêndoa de macaúba, via transesterificação metílica e catálise homogênea, seguida de destilação atmosférica dos ésteres leves, a fim de avaliar a viabilidade da aplicação deste combustível alternativo ao querosene de aviação.

1.1. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a síntese de ésteres leves por meio de transesterificação e destilação atmosférica do biodiesel proveniente do óleo de amêndoa de macaúba, a fim de avaliar a potencialidade de uso em misturas com querosene de aviação, fazendo uso do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, eficientes e de baixo custo.

Para atingir o objetivo geral, o trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização físico-química e tratamento do óleo de amêndoa de macaúba;
- Síntese de ésteres metílicos pela reação de transesterificação via catálise homogênea básica;
- Destilação atmosférica do biodiesel obtido para obtenção de um destilado contendo maior concentração de ésteres metílicos leves, com características físico-químicas semelhantes ao querosene de aviação fóssil;
- Caracterização dos produtos obtidos a partir da cromatografia gasosa e identificação da composição dos ésteres;
- Avaliação de propriedades das frações obtidas do destilado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Breve panorama do mercado aéreo

Desde a sua criação no início do século XX, o modal aéreo apresenta importância mundial e é apontado como um fator estratégico para o enfrentamento do desafio da logística global, facilitando o transporte de passageiros e de cargas (SALGADO; OLIVEIRA, 2010). Impulsionada pelo crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) per capita, a demanda por viagens aéreas cresceu demasiadamente na última década, como observado na Tabela 1.

De acordo com o Painel de Indicadores do Transporte Aéreo de 2009, relatório elaborado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), 69,7 milhões de pessoas foram transportadas em viagens domésticas e internacionais (ANAC, 2011). Dez anos depois registrou-se o maior número de passageiros na aviação civil brasileira, com 119,4 milhões de pessoas, totalizando 951 mil voos. (ANAC, 2020).

Tabela 1. Dados do Painel de Indicadores do Transporte Aéreo referentes aos anos de 2009 e 2019.

Indicadores	2009¹	2019²
Passageiros Transportados	69,7 mi	119,4 mi
Quantidade de voos	835 mil	951 mil
Tarifas aéreas inferiores a R\$300	29,31%	46,1%

Fonte: ¹(ANAC, 2011) e ²(ANAC, 2021).

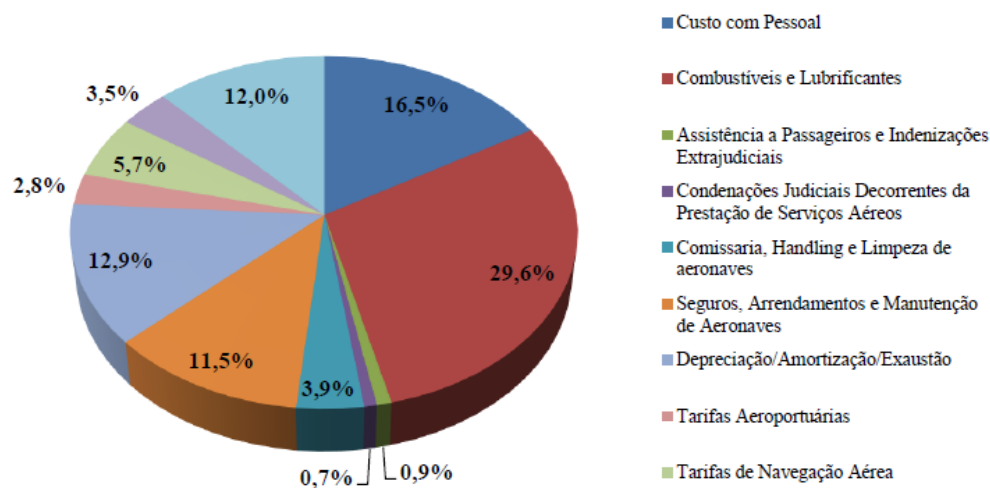
O desenvolvimento econômico global, a implementação de aviões mais eficientes e o aumento da acessibilidade às viagens aéreas são os principais fatores que justificam o aumento exponencial do mercado de aviação. Um exemplo é o voo de ida e volta de Boston (Massachusetts) a Los Angeles (Califórnia), que em 1940 custava US \$4500 e levava 15 horas com doze escalas ao decorrer do trajeto (GARCIA, 2017). Atualmente, o mesmo voo é direto, com duração de aproximadamente 6 horas e custa em média US \$300 (A4A, 2019).

Um exemplo é a América Latina, região em que o transporte aéreo possui forte influência nos indicadores de crescimento econômico. Segundo Sameh e Scavuzzi (2016), o mercado da aviação corresponde a 1,2 milhões de postos de trabalhos na América Latina e no Caribe. Além disso, o setor é responsável por parte da economia do turismo, através do fornecimento de transporte rápido de turistas, também transporta cargas como suprimentos

médicos, alimentos e outros bens essenciais em todo o mundo (DUBE; NHAMO; CHIKODZI, 2021).

Para a operação dos serviços aéreos são necessários o uso de diversos insumos que geram despesas para o setor, desde tarifas de navegação até pessoas. Em 2019, de acordo com o Anuário do Transporte Aéreo, os gastos da indústria brasileira somaram aproximadamente R\$43,7 bilhões, sendo os combustíveis o item operacional com maior participação, representando 29,6% dos custos totais, como apresentado na Figura 1 (CIVIL, 2019). Os principais combustíveis utilizados na aviação são, respectivamente, a gasolina (GAV) e o querosene de aviação, ambos de origem fóssil e que são afetados pela flutuação no preço dos barris de petróleo.

Figura 1. Custos e despesas do setor aéreo em 2019.



Fonte: (CIVIL, 2019).

Antes da COVID-19 ser declarada uma pandemia pela Organização Mundial da Saúde (OMS), estimava-se que os números da indústria de aviação continuariam crescentes nos próximos anos, com expectativa de triplicação nos números de passageiros até 2030. De acordo com a IATA (2020b), esperava-se um aumento de 4,1% na receita de passageiros por quilômetro (RPKs) em 2020. Entretanto, para conter a crise sanitária, países adotaram medidas restritivas e fronteiras foram fechadas, provocando uma pausa na evolução do setor aéreo. Apesar dos impactos, o tráfego de carga aérea se sobressaiu em relação ao tráfego de passageiros. A OACI divulgou que em 2020 o número de voos cargueiros aumentou em 1,44% comparado aos números do ano anterior (OACI, 2020). As viagens aéreas vêm desempenhando um papel

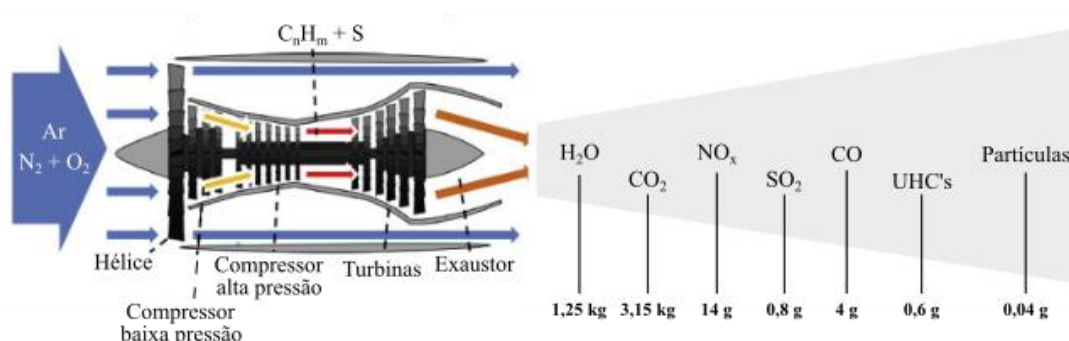
importante na pandemia, através de envio de cargas com vacinas, medicamentos e equipes médicas. Ademais, de acordo com Dube et al. (2021), a pandemia ofereceu à aviação a possibilidade de um recomeço com base na eficiência operacional e no avanço tecnológico, em busca de um futuro sustentável.

2.2. O setor aéreo e as emissões de CO₂

Com a tendência de aumento na demanda por viagens aéreas, surge a preocupação global sobre os impactos indesejados que a indústria da aviação tem sobre as mudanças climáticas. A combustão de combustíveis fósseis nos motores das aeronaves forma uma variedade de compostos poluentes que contribuem com o aquecimento global e destruição da camada de ozônio, como o CO₂, metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x) e fuligem (SAMEH; SCAVUZZI, 2016).

A Figura 2 demonstra a combustão de querosene, os produtos gerados e as respectivas emissões quantificadas para cada 1 kg de combustível queimado.

Figura 2. Produtos da combustão de querosene emitidos por motores a jato.



Fonte: Adaptado de (MASIOL; HARRISON, 2014).

O dióxido de carbono é o poluente emitido em maior concentração na combustão de querosene em um avião, o que torna a aviação responsável por aproximadamente 2% das emissões de dióxido de carbono no mundo. O CO₂ é causador do fenômeno do efeito estufa, suas emissões diretas na atmosfera podem permanecer durante anos, desempenhando um papel negativo no meio ambiente (KOUSOULIDOU; LONZA, 2016).

Em 2018, a soma de emissões das companhias aéreas resultou em 918 milhões de toneladas métricas de CO₂ (GRAVER; ZHANG; RUTHERFORD, 2019). No Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) divulgado em 2020, o consumo de querosene de

aviação no ano de 2019 foi de 4.033.000 m³, representando 99% do consumo do combustível no setor aéreo (EPE, 2020).

Com o compromisso de mitigar os impactos ambientais da aviação, em 2008 todas as partes interessadas da aviação global e associadas à IATA estabeleceram três pilares de desenvolvimento de 2009 a 2050: (1) estabilizar as emissões de CO₂ nos níveis observados a partir de 2020; (2) reduzir as emissões de CO₂ até 2050, em comparação aos níveis de 2005; (3) melhorar em 1,5% a eficiência de combustível até 2020 (AGENCY, 2019). A associação aposta em melhorias tecnológicas, operacionais e promoção de combustíveis alternativos sustentáveis.

O primeiro pilar do compromisso da OACI é o programa *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*, também conhecido por CORSIA, para redução e compensação de emissões de CO₂ provindas de voos internacionais. Com o programa, espera-se atingir o crescimento neutro de carbono a partir de 2020, estimulando o papel da aviação no combate à descarbonização enquanto reduz os custos com a operação, através da aquisição de créditos de carbono. Tais créditos serão emitidos por outros setores que utilizam alternativas mais sustentáveis de reduzir suas emissões de CO₂ que o setor aéreo (ANAC, 2019b).

Uma alternativa viável para a redução de grande quantidade de emissões de carbono em aeronaves são os biocombustíveis. Os biocombustíveis são combustíveis renováveis baseados em óleos vegetais, de origem renovável e menos nocivos à atmosfera. Neste sentido, o desenvolvimento de biocombustíveis se torna ponto focal para fabricantes de aeronaves, empresas de biocombustíveis, pesquisadores e governos (ABRANTES et al., 2021). Além dos benefícios ao meio ambiente, o estudo de Rains et al. (2017) constatou que os consumidores estão dispostos a pagar até 13% a mais por um voo em uma aeronave usando biocombustíveis e consideram uma prática mais sustentável em relação ao combustível de aviação tradicional.

2.3. Querosene de aviação

O querosene de aviação, nomeado pelas siglas QAV, QAV-1 e JET A-1, é um combustível fóssil, derivado de petróleo, obtido por destilação atmosférica com faixa de temperatura de 150 °C a 300 °C. É composto por hidrocarbonetos com estrutura de 9 a 15 átomos de carbono, majoritariamente parafínicos, conforme descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Hidrocarbonetos presentes do querosene de aviação.

Tipos de hidrocarbonetos	% Volume
Alcanos (Parafinas)	33 a 61
Cicloalcanos (Naftênicos)	33 a 45
Alcenos (Olefinas)	12 a 25
Aromáticos	0,5 a 5

Fonte: (PONTE, 2017).

O querosene de aviação é utilizado principalmente como combustível nos aviões modernos, dotados de motores à turbina, seja jato-puro, turboélices ou turbofans. Possui propriedades específicas como permanecer líquido e homogêneo até a zona de combustão das aeronaves, forte poder de solvência, taxa lenta de evaporação, baixo ponto de congelamento e ser insolúvel em água (PETROBRAS, 2019).

Devido às propriedades citadas, o QAV é o combustível mais utilizado no Brasil para abastecer as aeronaves, uma vez que é estável e não apresenta problemas de congelamento em elevadas altitudes, onde há baixas temperaturas e pressões. Também possui uma alta densidade energética, o que possibilita voos longos sem aumentar muito o peso da aeronave (DE CASTRO; DE ANDRADE; FERREIRA, 2019). Mundialmente, o querosene de aviação corresponde a 95% de todo o consumo no setor de aviação, colocando-se na posição de principal combustível utilizado no setor aéreo, enquanto o restante é suprido pela gasolina de aviação (IEA, 2011).

No Brasil, o combustível aéreo é regulamentado e especificado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Existem dois tipos de querosene de aviação produzidos e comercializados em território nacional, o de uso para aviação civil (QAV-1) e o de uso militar (QAV-5). A principal diferença entre ambos está na maior restrição em relação à presença de compostos leves, que promoverá segurança no manuseio e na estocagem do produto em embarcações (HARTER, 2019).

2.4. Biocombustíveis no setor aéreo brasileiro

Segundo a ANP, os biocombustíveis são definidos como derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia. No Brasil, existem dois principais biocombustíveis, o etanol obtido a partir da cana-de-açúcar e o biodiesel de óleos vegetais ou gorduras animais como matéria-prima (ANP, 2020).

O Brasil representa 22% de toda a produção de biocombustíveis do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos (BRITISH PETROLEUM - BP, 2018). O maior incentivador ao aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética do país é a Política Nacional de Biocombustíveis, mais conhecida como RenovaBio, instituída pela Lei nº 13.576/2017.

O uso de biocombustíveis proveniente de uma produção sustentável é considerado carbono neutro desde o crescimento da biomassa, ou seja, contribui para a redução de gases nocivos em todo o seu ciclo de vida. Enquanto a biomassa cresce, as plantas absorvem uma quantidade de CO₂ equivalente à quantidade produzida no processo de combustão em um motor, processo que torna o biocombustível um forte aliado na transição energética (LLAMAS et al., 2012).

Neste contexto, a indústria da aviação reconheceu a necessidade do desenvolvimento de biocombustível como estratégia para atingir as ambiciosas metas de 2050 e com o maior potencial para reduzir as emissões no setor (HASSAN; PFAENDER; MAVRIS, 2017). De acordo com a IATA, os biocombustíveis podem reduzir a pegada de carbono em cerca de 80% ao longo de seu ciclo de vida completo, em comparação aos combustíveis fósseis (IATA, 2013).

WANG et al. estudaram os impactos socioeconômicos da produção de biocombustíveis para aviação no Brasil e os resultados demonstraram que a produção de biocombustíveis para a aviação geraria grandes efeitos socioeconômicos positivos no Brasil, com a criação de cerca de 12.000-65.000 empregos, e contribuição de US \$200-1100 milhões para o PIB do país (WANG et al., 2019).

O uso de biocombustível na aviação é uma realidade no Brasil. Em 2005, a EMBRAER S.A. em parceria com o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) converteu o motor a gasolina para etanol e lançou o avião agrícola Ipanema EMB 202 A, o primeiro do mundo movido a etanol hidratado (EM et al., 2017). Em 2013, uma aeronave da Companhia Gol Linhas Aéreas abastecida com biocombustível partiu do Aeroporto de Congonhas, em São Paulo, com o destino ao Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília (UBRABIO, 2014). No mesmo ano a Companhia Aérea Azul também teste com bioquerosene produzido por leveduras que convertem açúcar de cana-de-açúcar em farneseno (MADSEN; HENKES, 2021). Em 2017 foi criada a Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para a Aviação, durante o seminário “Biodiesel e Bioquerosene: Sustentabilidade Econômica e Ambiental, promovido pela UBRABIO (União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene), com o objetivo de realização de pesquisa, desenvolvimento e inovação para apoiar a produção de bioquerosene no âmbito nacional (UBRABIO, 2017).

2.5. Bioquerosene

Um biocombustível que desperta interesse mundial por apresentar composição química semelhante ao querosene fóssil e ser ambientalmente correto é o bioquerosene. Definido pela Lei nº 12490/2011, o bioquerosene é uma substância derivada de biomassa renovável que pode ser usada em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir parcial ou totalmente combustível de origem fóssil (ANP, 2013).

O bioquerosene, assim como o querosene de aviação, é caracterizado por uma fração de ésteres leves, correspondente a uma faixa de carbono de C8-C14. Destaca-se que o bioquerosene é considerado como única alternativa ao combustível tradicional, devido às rígidas normas estabelecidas para os combustíveis de aviação (ASTM D7566, 2018).

Para substituir o combustível tradicional, o biocombustível deve apresentar características semelhantes e sem que seja necessárias mudanças estruturais nas aeronaves, visto que as aeronaves não são renovadas em períodos curtos e chegam a voar por mais de 30 anos. Tal biocombustível é denominado de *drop-in*, podem substituir integralmente ou ser misturados aos hidrocarbonetos de origem fóssil, sem necessidade de qualquer modificação estrutural na aeronave (SOUSA et al., 2018).

O querosene de aviação segue altos padrões de qualidade e devem seguir características físico-químicas determinadas pelas normas nacionais da NBR e da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e das normas internacionais da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), a fim de ser um produto intrinsecamente seguro e confiável devido as condições extremas em que a combustão é submetida, tais como: alta densidade energética, volatilidade adequada, estabilidade térmica, ausência de água, elevado poder calorífico e baixa temperatura de congelamento. Os principais parâmetros estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros para o querosene de aviação.

Parâmetros	Unidades	Valores
Aromáticos, máx.	% volume	25,0
Enxofre, máx.	% massa	0,30
Acidez, máx.	mg de KOH/g	0,15
Viscosidade a 20°C, máx.	mm ² /s	8,0
Densidade 15°C	Kg/m ³	775-840
Ponto de congelamento, máx.	°C	-47
Calor de combustão, min.	MJ/Kg	42,8
Ponto de fulgor, min.	°C	38
Existência de gomas, máx.	mg/100mL	7

Fonte: (ANP, 2009)

Na Resolução nº 788, de 5 de abril de 2019, a ANP estabelece as especificações do querosene de aviação, querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C. O querosene de aviação C é definido como combustível comercial composto de querosene de aviação alternativo, misturado em até 50%, em volume, ao querosene de aviação (ANP, 2019).

Atualmente, o maior desafio na obtenção de um biocombustível de aviação é torná-lo economicamente viável, com um preço competitivo no mercado de transportes. Para aumentar a escala de produção, é necessário o uso de matérias-primas abundantes na natureza, de baixo custo e sustentáveis, com propriedades físico-químicas e composição que atendam aos mesmos requisitos do querosene de aviação, além de rotas de conversão eficientes e baratas (SCALDAFERRI, 2019).

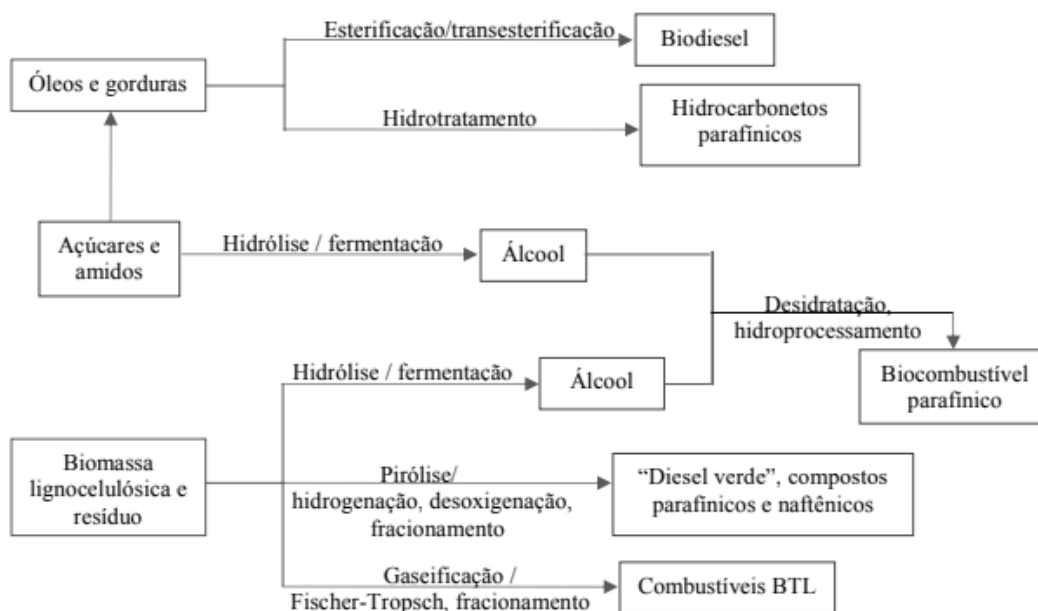
2.6. Rotas de síntese de bioquerosene

Para a produção do bioquerosene deve-se seguir rígidas qualificações a fim de atender as exigências de desempenho, transporte, segurança e armazenamento. Como trata-se de um produto com alto padrão de qualidade, a ANP controla e aplica os regulamentos especificados nas normas ASTM e ABNT (HARTER, 2019).

Existe uma grande movimentação em relação ao desenvolvimento da extração e viabilização do bioquerosene para mistura de 50-50% com o querosene petroquímico. A movimentação se resume a busca de composição química das matérias-primas sustentáveis semelhantes ao combustível tradicional, como apresentar ácidos graxos de cadeia molecular curta

(SANTOS, 2015). Diferentes tecnologias para a produção de bioquerosene para aviação tem sido avaliada, conforme observado na Figura 3.

Figura 3. Principais tecnologias disponíveis para a produção de bioquerosene.



Fonte: (DAMASCENO, 2019).

Ao todo são seis rotas diferentes para a síntese de bioquerosene, podendo ser divididas em: a) processos químicos, como a transesterificação/esterificação e o hidrotratamento; b) termoquímicos, como a pirólise/hidrogenação e gaseificação/Fisher-Tropsch; c) bioquímicos, através da fermentação de açúcares e amidos. Os detalhes dos processos são abordados na próxima seção.

2.6.1. Processos Químicos

A primeira rota na Figura 3 demonstra o processo químico de conversão de óleos e gorduras em biodiesel. O biodiesel é produzido por meio de reação de transesterificação, um processo relativamente menos complexo, com baixo custo e com alta capacidade de transformar grandes cadeias de óleos em cadeias menores e menos ramificadas em comparação às rotas mencionadas anteriormente. Para obtenção de combustível alternativo ao querosene fóssil, é necessária uma etapa posterior de purificação e separação das frações mais leves, semelhante à faixa de destilados correspondentes ao querosene fóssil (SANTOS, 2015).

A reação de transesterificação é influenciada por algumas variáveis, destacando-se: a agitação, o tempo e temperatura da matéria-prima, concentração do catalisador, concentração do álcool utilizado, entre outras (BATISTELLA et al., 2011). O processo mais utilizado atualmente emprega a transesterificação metílica na presença de catalisadores homogêneos básicos (PEREIRA et al., 2012).

Na busca por biocombustível alternativo de aviação, Ranucci (2015) reportou a utilização de frações com maiores teores de ésteres de cadeia curta obtidas por destilação à vácuo de biodiesel de óleos de pinhão manso (*Jatropha curcas L.*), babaçu (*Orbignya phalerata*) e palmito (*Elaeis guineenses*) e posteriormente misturadas ao querosene fóssil comercial nas proporções de 5, 10 e 20%. As misturas de até 20% do destilado obtido atenderam aos parâmetros de qualidade avaliados, como a viscosidade cinemática, massa específica e ponto de fulgor, sendo que apenas o poder calorífico não atendeu os limites exigidos.

Llamas et al. (2012) produziram o bioquerosene via transesterificação por meio de óleos vegetais de babaçu e camelina com o propósito de avaliar as propriedades físico-químicas de suas misturas com o querosene fóssil nas respectivas proporções de 5, 10 e 20% (v/v). Verificou-se que as misturas de até 10% (v/v) em proporção do bioquerosene sintetizado a partir do biodiesel de babaçu e camelina com o querosene fóssil encontraram-se em conformidade com a norma da ASTM D1655.

2.6.2. Processos Termoquímicos

Em processos termoquímicos, o bioquerosene pode ser produzido através da hidrogenação ou da gaseificação da biomassa.

Na hidrogenação, a matéria-prima passa pelo processo de craqueamento (decomposição térmica) na presença de moléculas de hidrogênio e catalisador, cuja finalidade é eliminar os produtos oxigenados e obter uma mistura de hidrocarbonetos, os quais são posteriormente submetidos ao processo de separação por destilação, resultando em compostos com frações similares ao querosene de aviação (OLIVEIRA; SUAREZ; SANTOS, 2008).

Na gaseificação, também conhecida por processo de Fischer-Tropsch, a biomassa sólida é gaseificada em elevadas temperaturas, em torno de 1000° C, posteriormente é convertida em uma mistura de gases (CO, H₂, CO₂ e vapor de água). Em seguida, os gases são purificados e podem ser utilizados para síntese de hidrocarbonetos líquidos com o emprego de catalisadores com ferro e cobalto. Ao final do processo, são obtidos hidrocarbonetos similares ao combustível

tradicional de aviação (DATAR et al., 2004). O custo do processo de gaseificação é considerado alto devido às condições especiais exigidas.

2.6.3. Processos Bioquímicos

A rota bioquímica para produção de bioquerosene é semelhante ao processo de produção do etanol. Para converter açúcares em hidrocarbonetos utiliza-se leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) modificadas geneticamente. O resultado dessa fermentação é a produção de isoprenóides, como o farneseno, que passa por um processo de hidrogenação e se transforma em farneseno, uma molécula que apresenta excelentes características como combustível (CGGE, 2010).

2.7. Matérias-primas para produção de bioquerosene

As principais fontes de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, com potencial para substituir o querosene petrolífero, são substancialmente as provenientes de óleos vegetais e matérias açucaradas que na síntese obtém-se o bioquerosene, principalmente as que não são destinados ao consumo alimentício (CGGE, 2010).

Dentre as oleaginosas existentes, tem-se os substratos que se destacam por possuir rica composição em ácido láurico (C12:0) e tamanho de cadeia semelhante ao querosene fóssil quando destilados, que varia entre 8 a 14 carbonos.

2.7.1. Óleo de amêndoa de macaúba

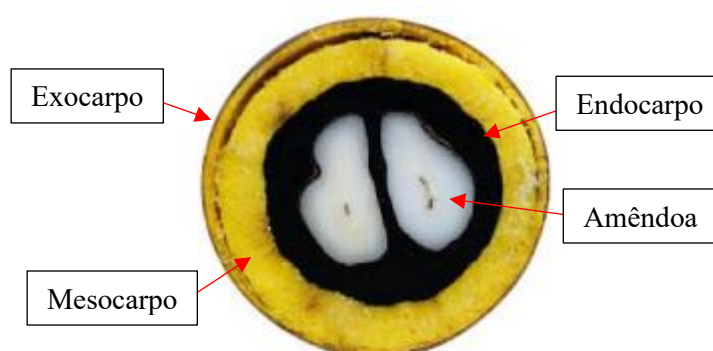
A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira da família Aceraceae, nativa das florestas tropicais da América Central e Sul, muito comum no cerrado brasileiro, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins, Piauí e Ceará (MOTA et al., 2011). A maior vantagem do cultivo da macaúba é que a oleaginosa pode ser cultivada em quase todo território brasileiro devido suas características menos exigentes no fator água, clima e fertilidade do solo, além do seu fruto conservar a qualidade por longo período em comparação a outras oleaginosas (BIODIESELBR, 2012).

A palmeira da família Aceraceae mostra-se uma interessante alternativa devido seu grande potencial na produção de biocombustíveis, principalmente para os usos na aviação

(LANES; COSTA; MOTOIKE, 2014). A macaúba possui grande potencial na produção de óleo, capaz de produzir até seis vezes a mais que a soja (MELO, 2012).

O fruto da macaúba, representada pela Figura 4, é dividido em três partes: exocarpo, mesocarpo e endocarpo. O exocarpo é a parte mais externa do fruto. O mesocarpo, também chamada de polpa, é a parte internada de coloração amarela ou esbranquiçada, de textura fibrosa e mucilaginosa. O endocarpo, ou castanha, é a porção mais interna do fruto da macaúba, possui uma camada escura e dura com uma ou duas amêndoas ao seu interior (MATSIMBE, 2012).

Figura 4. Fruto da Macaúba



Fonte: Adaptado de (DA SILVA, 2019).

A polpa da macaúba contém cerca de 46-58% de óleo em base seca, majoritariamente composta por ácidos graxos monoinsaturados, com predominância de 70% em massa de ácido oleico (C18:1). Já na amêndoa encontra-se aproximadamente 70% de óleo em base seca, com abundância de ácidos graxos saturados de cadeia curta (71 – 85%), destacando-se o ácido láurico (C12:0) e o ácido oleico (C18:1), com cerca de 44% e 26% em massa, respectivamente (MOTA et al., 2011). Os teores de ácidos graxos presentes no fruto da macaúba são observados na Tabela 4.

Tabela 4. Composição (%) de ácidos graxos presentes no fruto da macaúba.

Ácidos Graxos	Composição em ácidos graxos livres de Macaúba		
	Casca	Polpa	Amêndoa
Ácido Caprílico	-	-	6,2
Ácido Cáprico	-	-	5,3
Ácido Láurico	-	-	43,6
Ácido Mirístico	-	-	8,5
Ácido Palmítico	24,6	18,7	5,3
Ácido Palmitoleico	6,2	4,0	-
Ácido Esteárico	5,1	2,8	2,4
Ácido Oleico	51,5	53,4	25,5
Ácido Linoleico	11,3	17,7	3,3
Ácido Linolênico	1,3	1,5	-
Ácido Saturados	29,7	21,5	71,2
Ácidos Insaturados	70,3	78,5	78,5

Fonte: (AMARAL, 2017).

Harter (2019) relata a produção de ésteres metílicos via reação de transesterificação do óleo de amêndoa de macaúba e de palmiste, com posterior destilação atmosférica. As frações mais ricas em C8-C14 foram misturadas com o querosene fóssil em proporção de 5%, 10% e 20% e apresentaram resultados dentro dos limites recomendados.

Da Silva (2019) também investigou a produção de bioquerosene de aviação a partir do óleo de amêndoa de macaúba e de palmiste, através da destilação atmosférica de biodiesel produzido pela transesterificação metílica sob catálise alcalina homogênea. As frações enriquecidas em ésteres de cadeia molecular curta, variando de C8 a C14, foram misturadas com combustível de jato mineral convencional. As misturas correspondentes a 5, 10 e 20% em volume de biodiesel leve misturado com Jet A-1 apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos.

Nesse sentido, o óleo de amêndoa de macaúba destaca-se para a produção de biocombustível para a aviação por ser rico em ácidos graxos de cadeia carbônica entre 8 a 14 carbonos,

sendo composto majoritariamente por ácido láurico e com alta concentração de ácidos graxos saturados. Por esse motivo, a oleaginosa foi escolhida para o presente trabalho.

3. METODOLOGIA

A seguir serão apresentados os materiais utilizados para cada experimento e a descrição das metodologias empregadas para as análises de caracterização físico-química da oleaginosa, do biodiesel sintetizado e do biodiesel leve (destilado). O óleo de amêndoa de macaúba foi gentilmente doado pela Universidade Federal de Viçosa – Minas Gerais.

3.1. Caracterização físico-química do óleo de amêndoa de macaúba

A caracterização físico-química da matéria-prima antecede a etapa de produção de ésteres, sendo considerada muito importante para a identificação das propriedades e da qualidade do oleaginosa escolhida. Com o fornecimento de informações, é possível comparar as características com a literatura, e a partir disso definir as metodologias de tratamento que serão utilizadas.

3.1.1. Determinação do índice de acidez

O índice de acidez (IA) é o número de miligramas de hidróxido de potássio (KOH) necessários para neutralizar os ácidos graxos livres em 1,0 grama de amostra. O estudo do índice de acidez está ligado com a natureza e a qualidade da matéria-prima, fornecendo dados importantes na avaliação da condição de conservação do óleo. Um índice elevado de acidez indica estado de degradação, que afeta a estabilidade térmica e oxidativa de óleos e combustíveis (BRASILINO, 2010).

Para determinar o valor ácido (VA) utilizou a Metodologia Padrão Alemã para a Análise de Gorduras e outros Lipídios, segundo a referência IUPAC 2.201 / AOCS Cd 3d -63. Inicialmente, em um frasco Erlenmeyer de 250 mL, pesou-se aproximadamente 2,5 g de óleo da amêndoa da macaúba. Em seguida adicionou-se 50 mL de uma mistura neutralizada de éter e álcool etílico (1:1 v/v) para dissolução da amostra. Após, foram adicionadas 3 gotas da solução indicadora fenolftaleína. A solução foi titulada com solução de hidróxido de sódio (KOH) 0,1 N, previamente padronizada, até a obtenção de uma coloração levemente rósea. O valor de

acidez (VA), expresso em mg de KOH/g, é calculado conforme a Equação 1:

$$VA = \frac{(56,1 \cdot N \cdot G)}{m} \quad (1)$$

Em que G é o volume gasto, em mL, da solução de KOH; N é o valor da normalidade da solução de KOH; e m é a massa da amostra de óleo, em gramas. Para maior precisão dos dados, o procedimento foi realizado em duplicata.

3.1.2. Determinação da densidade

Para a determinação da densidade do óleo de amêndoa de macaúba utilizou-se o método de picnometria. Em temperatura ambiente (20 °C), as amostras foram pesadas em picnômetro do tipo Gay-Lussac em 50 mL. Inicialmente, realizou a aferição da massa do picnômetro vazio e com água destilada. Em seguida, a amostra de óleo foi pesada. A densidade (ρ) foi determinada utilizando a relação entre as três pesagens, por meio da Equação 2:

$$\rho_{\text{óleo}} = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_3 - m_1)} \rho_{\text{água}} \quad (2)$$

Sendo m_1 correspondente à massa do picnômetro vazio, m_2 à massa do óleo de amêndoa de macaúba e a massa da água representada por m_3 . O procedimento de medida para todas as amostras foi realizado em triplicata.

3.1.3. Determinação da viscosidade

A viscosidade de um material é a propriedade física dos fluidos que caracteriza a sua resistência ao escoamento (PARK; LEITE, 2010). A propriedade depende da temperatura do escoamento do fluido.

A fim de determinar a viscosidade cinemática do óleo de amêndoa de macaúba foi utilizado o viscosímetro de Ostwald Cannon Fenske. Inicialmente o viscosímetro é colocado em um béquer contendo água a uma temperatura conhecida. Em seguida, o viscosímetro deve ser preenchido com amostra de óleo até a extremidade abaixo do capilar. Com o auxílio de uma pêra de borracha succiona-se o fluido até este atingir nível acima do menisco do capilar. Poste-

riormente, aguarda-se o líquido escoar através do tubo capilar pela ação da gravidade, registrando o tempo (t) necessário para que o fluido atinja o menisco superior do tubo capilar. O mesmo procedimento é realizado para água destilada, o líquido padrão mais comum, para comparação com as informações obtidas.

A viscosidade cinemática (η) do óleo de amêndoa de macaúba é determinada de acordo com a Equação 3:

$$\eta_{\text{óleo}} = \eta_{\text{água}} \left(\frac{\rho_{\text{óleo}} t_{\text{óleo}}}{\rho_{\text{água}} t_{\text{água}}} \right) \quad (3)$$

3.2. Tratamento do óleo de amêndoa de macaúba

3.2.1. Neutralização

Com a neutralização do óleo é possível abaixar os níveis de acidez, removendo ácidos graxos livres e outros componentes indesejáveis, como produtos de decomposição de glicerídeos, por exemplo.

De acordo com ANP, o índice de acidez do biodiesel deve ser inferior a 0,50 mg de KOH/g, conforme registrado na Resolução nº 45 de 25.08.2014 – DOU 26.08.2014. Dessa forma, o óleo utilizado como matéria-prima deve apresentar índice de acidez inferior a 1,0 mg de KOH/g para ser transformado em biodiesel pelo processo de transesterificação via catálise básica (ANP, 2015).

Neste caso, após a análise físico-química, verificou-se que o óleo de amêndoa de macaúba apresentou índice de acidez superior a 1,0 mg de KOH/g, sendo necessária a neutralização.

O tratamento foi realizado seguindo uma adaptação do método descrito por Pimenta e Andrade (2010). Inicialmente, colocou 50 g de óleo em Erlenmeyer em uma manta de aquecimento com temperatura estabilizada em 80 °C. Em seguida, adicionou-se 1,75 mL de solução de NaOH, mantido durante 15 minutos sob agitação constante. Após a reação, procedeu-se a centrifugação a 3000 rpm por 10 minutos. Ao final dessa etapa, o resíduo de sabões ficou no fundo dos tubos de ensaio, sendo o óleo da superfície transferido para um funil de separação para posterior lavagem. A lavagem foi realizada com água destilada e agitação manual do funil, e foi repetida até o descarte límpido do resíduo aquoso atingir pH na faixa entre levemente ácido a neutro, o que indica que não há mais sabão na amostra. Depois o óleo foi levado para

secagem em estufa a 80 °C por 12 horas e, em seguida, resfriado em dessecador para não absorver umidade.

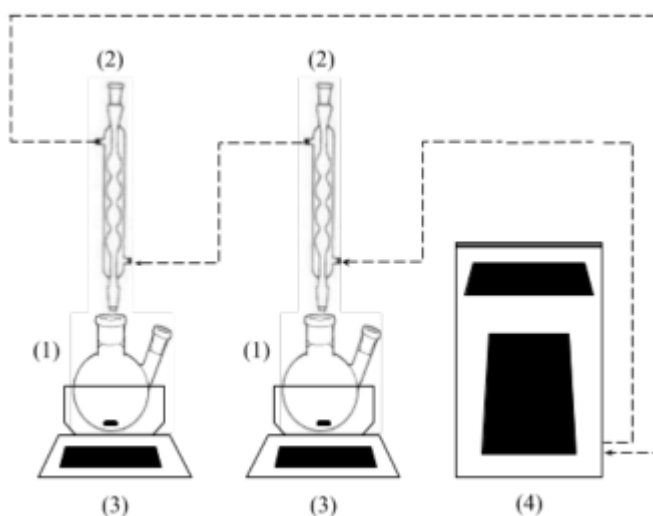
Os óleos neutralizados foram analisados quanto ao índice de acidez, conforme método descrito na seção 3.1.

3.3. Produção do biodiesel de óleo de amêndoa de macaúba

O biodiesel foi produzido através da transesterificação metílica da amostra de óleo de amêndoa de macaúba em presença de catalisador alcalino (NaOH), procedimento detalhado a seguir.

Para a síntese do biodiesel, pesou-se cerca de 30 g de óleo neutralizado, que foi encaminhado em um vaso de alimentação (1) para um banho maria sobre manta de aquecimento (3), acoplado em um condensador de refluxo (2) sob sistema de refluxo (4), até atingir a temperatura de 60 °C, conforme representado na Figura 5. Ao estabilizar a temperatura, adicionou-se metanol na proporção de molar de 1:6 (óleo:metanol) e 1% de NaOH, m/m, previamente diluído no álcool. Em seguida, o óleo foi colocado sob agitação mecânica constante por 2 horas. Após a reação, a solução foi transferida para um funil de separação para decantação da glicerina e dos ésteres.

Figura 5. Esquema experimental da transesterificação metílica. (1) Vaso de alimentação, (2) Condensador de refluxo de bolas, (3) Agitador magnético com aquecimento, (4) Banho ultratermostático.



Fonte: (SANDER, 2018).

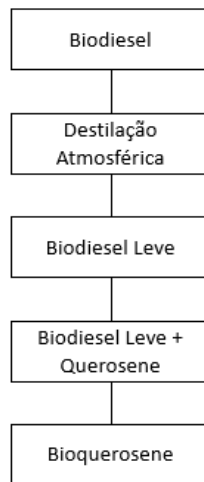
Os produtos obtidos foram analisados por cromatografia gasosa para determinação do rendimento da reação. Para verificação da qualidade do produto obtido, foram realizados os experimentos de identificação das características físico-químicas.

3.4. Destilação Atmosférica – Obtenção de Ésteres leves de biodiesel de óleo de macaúba

Tradicionalmente, a destilação atmosférica consiste em um procedimento realizado para o refino do petróleo e obtenção de seus derivados, como o QAV-1. É através de uma torre de destilação, no interior da qual o combustível fóssil é aquecido a altas temperaturas, que ocorre a separação dos produtos em diferentes frações. A composição das cadeias carbônicas dos produtos é diretamente proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será a cadeia carbônica do produto, e vice-versa. Sendo assim, a separação acontece ao longo da torre de destilação, visto que em seu interior a temperatura é controlada de modo a variar do fundo (região mais quente) para o topo (região menos quente) (RANUCCI, 2015). Nesse sentido, o mesmo procedimento para a síntese do combustível aéreo convencional mostra-se como uma excelente alternativa para a obtenção de bioquerosene.

As frações de ésteres leves de cadeia curta do óleo de macaúba foram obtidos por meio da destilação atmosférica dos ésteres metílicos utilizando um sistema convencional de destilação. Os produtos obtidos em cada etapa seguem a sequência representada na Figura 6. Tal sistema é composto por uma manta elétrica como fonte de aquecimento, um balão de fundo redondo de 500 mL, coluna de destilação tipo Vigreux de 30 cm de comprimento, junta de conexão com saída lateral para conexão de condensador e abertura superior para conexão de rolha perfurada com inserção de termômetro de vidro de 300 mm de comprimento. A coluna de destilação foi revestida com papel alumínio, conforme Figura 7.

Figura 6. Etapas de produção para a obtenção de bioquerosene.



Fonte: Autor.

Para a destilação do biodiesel produzido foi inserido 200 mL da amostra no balão de fundo redondo e iniciada a destilação, sendo recolhido um total de seis frações de 20 mL consecutivas, separadas em função da temperatura e armazenadas separadamente para estudo da eficiência da destilação e da composição do destilado em relação ao teor de ésteres.

Figura 7. Sistema de destilação atmosférica.



Fonte: Autor.

3.5. Análise dos ésteres obtidos

A análise dos ésteres obtidos pela reação de transesterificação e dos ésteres obtidos na destilação atmosférica foi realizada por cromatografia gasosa. A determinação da massa específica a 20 °C dos ésteres leves obtidos foi realizada a fim de determinar a qualidade dos ésteres obtidos.

3.5.1. Cromatografia Gasosa

Para estudo da eficiência da reação de transesterificação e da destilação foi realizada análises das amostras coletadas dos destilados por cromatografia gasosa, segundo a Norma nº 14103, do Comitê Europeu para Padronizações, a fim de se obter o rendimento total em ésteres. O cromatógrafo é equipado com detector de ionização de chama (FID), coluna capilar Rtx-WAX e o programa de temperaturas iniciou em 50 °C com rampa de aquecimento de 15 °C/min até 250 °C, sendo injetada 1 µL de cada amostra no modo *split*, em duplicata. As análises foram desenvolvidas em parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP, no departamento de Química, no Campus de Presidente Prudente.

A quantidade determinada de cada amostra foi diluída em heptano e heptadecanoato de metila foi utilizado como padrão interno. A concentração de cada fração foi calculada por meio da Equação 4:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

Onde C_1 é a concentração calculada; C_2 corresponde a concentração da amostra; e V_1 e V_2 representam o volume da amostra no vial (100 µL) e da solução (1 mL), respectivamente.

Para calcular o teor de ésteres, utilizou-se a Equação 5:

$$\% \text{ Ésteres} = \frac{\sum A - A_{PI}}{A_{PI}} \cdot \frac{C_{PI}}{C_{amostra}} \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo A_{PI} a área do padrão interno (C17:0 – Heptadecanoato de metila); C_{PI} é a concentração de padrão interno na amostra injetada; $\sum A$ é o somatório das áreas dos componentes majoritários do biodiesel e do padrão interno; $C_{amostra}$ é a concentração da amostra injetada.

3.5.2. Massa específica a 20 °C

Para a determinação da massa específica a 20 °C dos ésteres leves utilizou-se um pipetador automático. Inicialmente, a balança foi calibrada com a pesagem de água destilada em um béquer. Em seguida, tendo como referência 1 mL, foi medida a massa específica de todas as amostras de destilado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização físico-química

A análise dos resultados experimentais requer informações sobre as características físico-químicas das amostras. Através da caracterização identifica-se a qualidade do óleo de amêndoa de macaúba e do biodiesel produzido. Desta forma, é possível estabelecer os parâmetros ideais para a transesterificação do óleo e para a síntese de bioquerosene. Os parâmetros avaliados neste trabalho são o índice de acidez, a densidade e a viscosidade.

4.1.1. Óleo de macaúba

O óleo foi utilizado como substrato para a produção dos ésteres leves. A Tabela 5 apresenta os dados referentes à caracterização físico-química do óleo de amêndoa da macaúba, obtida a partir de ensaios laboratoriais.

Tabela 5. Propriedades físico-químicas do óleo de macaúba.

Parâmetro avaliado	Resultados
Índice de acidez	3,49 mg de KOH/g
Densidade	914,75 kg/m ³
Viscosidade	34,41 mm ² /s

Fonte: Autor.

Para um melhor rendimento da transesterificação, é necessário analisar a qualidade do óleo utilizado como matéria-prima e suas características, principalmente o índice de acidez. De acordo com Ranucci (2015), para teores de acidez acima de 2,0 mg de KOH/g, o óleo é considerado impróprio para a transformação em biodiesel via transesterificação metílica por catálise homogênea.

O teor de acidez do óleo de amêndoa de macaúba demonstrou um valor relativamente alto em relação às exigências de qualidade, o que indica a presença de ácidos graxos livres. A presença excessiva de ácidos livres em óleos vegetais aumenta a probabilidade de ocorrer reações de saponificação, o que influencia negativamente na produção de biocombustíveis via transesterificação na presença de hidróxidos (RANUCCI, 2015).

Ao identificar o elevado índice de acidez, foi realizada a redução dos ácidos graxos

livres pelo método da neutralização, resultando em um teor de 1,17 mg de KOH/g, valor que está dentro dos parâmetros recomendados de acordo com a seção 3.2.1.

4.1.2. Biodiesel de macaúba

A determinação das propriedades físico-químicas do biodiesel produzido foi identificada e analisada por meio de experimentos laboratoriais semelhantes a caracterização físico-química do óleo. Os parâmetros encontrados estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Caracterização físico-química do biodiesel produzido.

Parâmetro avaliado	Resultados	Padrões ANP para biodiesel
Índice de acidez	0,3 mg de KOH/g	0,5 mg de KOH/g
Densidade	867,06 kg/m ³	850 a 900 kg/m ³
Viscosidade	3,37 mm ² /s	3 a 6 mm ² /s

Fonte: Autor.

O índice de acidez do biodiesel preparado foi de 0,3 mg KOH/g e demonstrou-se adequado conforme os padrões estabelecidos pela ANP, que estabelece que o índice de acidez do biodiesel não ultrapasse 0,5 mg de KOH/g.

A densidade, ou massa específica, também é uma propriedade que prejudica o funcionamento dos motores diesel. Tal propriedade está relacionada com a estrutura molecular da amostra, ou seja, se o biodiesel apresenta cadeia carbônica de tamanho grande, sua densidade também apresentará um valor consideravelmente alto. O biodiesel sintetizado apresentou densidade de 867,06 kg/m³, sendo os limites estabelecidos na resolução de 850 a 900 kg/m³.

A viscosidade influencia significativamente no funcionamento de motores de injeção por compressão (motores diesel). Os óleos vegetais, matérias-primas de biocombustível, apresentam viscosidade elevada e por isso devem passar pela reação de transesterificação para se tornar um combustível alternativo sem que sejam necessárias alterações nos motores. Um combustível com alta viscosidade pode causar combustão fraca, aumento de fuligem e emissões, além de prejudicar o funcionamento dos motores (DAMASCENO, 2019). A viscosidade do biodiesel de amêndoa de macaúba foi de 3,37 mm²/s, valor menor que a viscosidade da matéria-prima, resultado de uma transesterificação eficiente e que está de acordo com as normas da ANP.

4.2. Análise dos ácidos graxos e dos ésteres presentes no óleo e biodiesel de amêndoa de macaúba

A identificação da composição e concentração de ácidos graxos do óleo em relação ao tamanho de suas respectivas cadeias carbônicas, de C8:0, C10:0, C12:0, C14:0, C16:0, C18:0 e C18:1, foi realizada por cromatografia gasosa descrita na seção 3.6.1. Os resultados obtidos para a oleaginosa estão apresentados na Tabela 7.

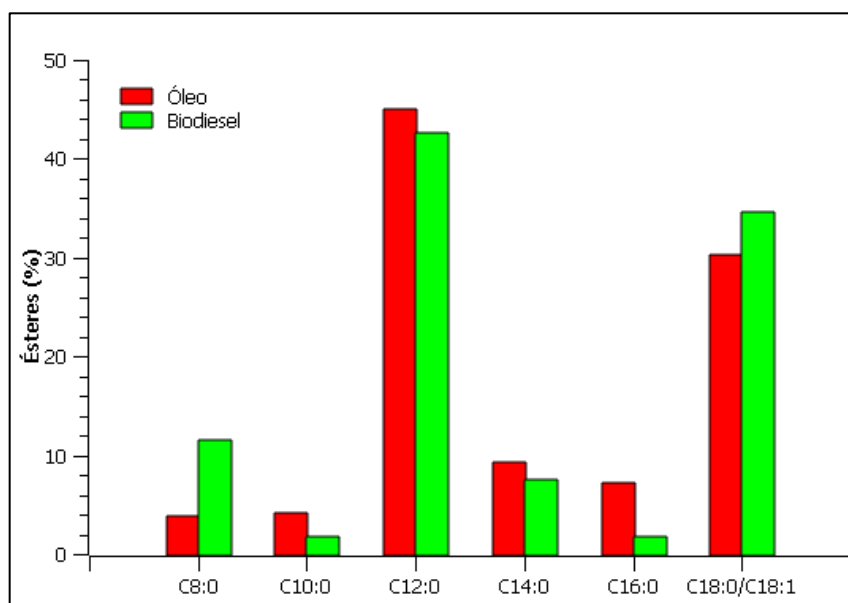
Tabela 7. Concentração de ácidos graxos detectados no óleo de amêndoa de macaúba.

Ácidos graxos	Concentração (%)
Ácido Caprílico (C8:0)	3,92
Ácido Cáprico (C10:0)	4,21
Ácido Láurico (C12:0)	45,15
Ácido Mirístico (C14:0)	9,3
Ácido Palmítico (C16:0)	7,16
Ácido Esteárico/Ácido Oleico (C18:0/C18:1)	30,24

Fonte: Autor.

Com o propósito de identificar os ácidos graxos convertidos em ésteres por meio da transesterificação, foi realizado o mesmo procedimento para o biodiesel produzido. Os resultados das cromatografias do óleo e do biodiesel de óleo de amêndoa de macaúba estão apresentados na Figura 8.

Figura 8. Comparação do teor de ácidos graxos no óleo e ésteres presentes no biodiesel sintetizado.



Fonte: Autor.

Ao analisar o teor de ácidos graxos presentes no óleo de amêndoa de macaúba, repara-se que as maiores concentrações são de ácido láurico (C12:0) e ácido oleico (C18:1), representando 43% e 31%, respectivamente. Os valores encontrados se assemelham com os valores da Tabela 4, o que comprova a qualidade do óleo para ser utilizado na produção de biodiesel. O biodiesel de macaúba apresentou ótimos teores de ésteres, também com maiores concentrações em C12:0, com cerca de 41%, e em C18:1, com 33%.

4.3. Características das Frações Destiladas

4.3.1. Temperatura de retirada das Frações Destiladas

As temperaturas de retirada das frações de biodiesel de macaúba foram registradas com o auxílio de um termômetro instalado no topo da coluna de destilação e os valores apresentados na Tabela 8. Foi anotada a temperatura inicial e final, sequencialmente, para cada fração de destilado com volume de 20 mL.

Tabela 8 – Temperatura inicial e final de cada fração destilada.

Temperatura (°C)	Fração					
	1	2	3	4	5	6
Inicial	214	247	253	255	260	262
Final	245	252	255	260	266	241

Fonte: Autor.

É possível verificar que a destilação do biodiesel atingiu altas temperaturas, o que pode ter influenciado na eficiência da destilação e na concentração dos ésteres de menor cadeia molecular. Por ter utilizado como fonte de aquecimento uma manta de aquecimento, não foi possível controlar a temperatura com maior precisão. O menor valor registrado foi a temperatura inicial da destilação, de 214 °C. O maior valor registrado para o biodiesel de macaúba foi de 266 °C, sendo no final da retirada da Fração 5.

4.3.2. Tempo de retenção dos ésteres das Frações Destiladas

A Tabela 9 retrata sobre o tempo de retenção dos ésteres presentes em cada fração destilada.

Tabela 9. Tempo de retenção dos ésteres metílicos presentes nas frações destiladas.

Ésteres	Tempo de retenção					
	Fração 1	Fração 2	Fração 3	Fração 4	Fração 5	Fração 6
C8:0	4,838	5,015	4,773	4,984	-	-
C10:0	5,530	5,311	5,294	5,271	4,975	4,949
C12:0	6,270	6,820	6,807	6,790	6,759	6,701
C14:0	7,570	8,110	8,095	8,080	8,075	9,301
C16:0	9,467	9,355	9,338	9,321	9,309	9,394
C18:0/C18:1	-	10,005	9,987	9,970	9,946	9,941

Fonte: Autor.

Os ésteres de cadeia curta possuem temperatura de ebulição menor que os demais ésteres e, portanto, apresentam tempo de retenção baixo. Observou-se um padrão no tempo de retenção

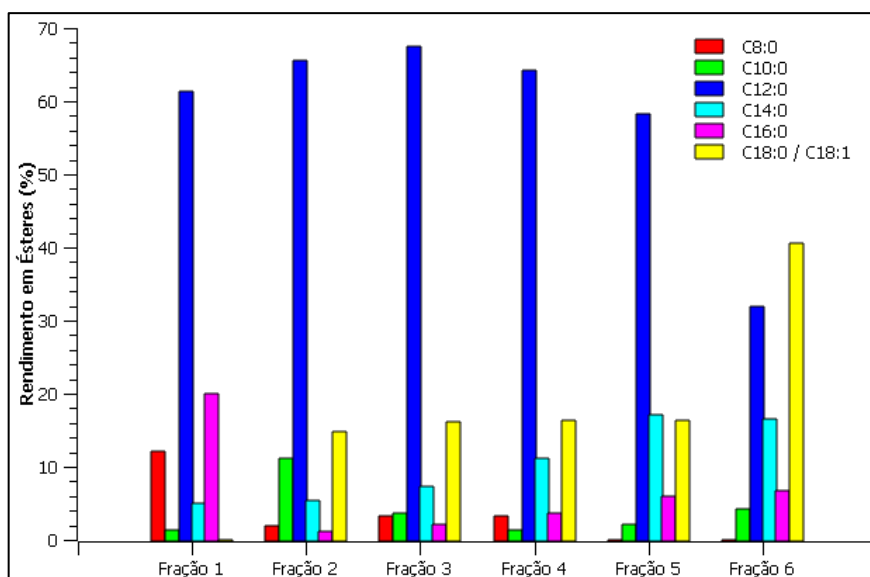
de todos os ésteres presentes na Fração 1 até a Fração 6, sendo o menor tempo registrado na Fração 1, de 4,83 minutos para o C8:0, e o maior tempo registrado encontra-se na Fração 2, para o éster C18:0/C18:1.

4.4. Composição em ésteres das Frações Destiladas

4.4.1. Fração Destilada de Biodiesel de Macaúba

Conforme descrito anteriormente, para obtenção das frações foi realizada a destilação atmosférica de 200 mL de biodiesel sintetizado e recolhidas seis frações consecutivas de 20 mL. A análise do teor de ésteres das frações destiladas foi realizada através da cromatografia gasosa. O teor de ésteres das seis frações destiladas do biodiesel de óleo de amêndoa de macaúba é mostrado na Figura 9.

Figura 9. Concentração de ésteres presentes no biodiesel leve.



Fonte: Autor.

Uma vez que o óleo e o biodiesel de macaúba são ricos em C12:0, todas as frações demonstraram um elevado teor do éster. O maior teor foi encontrado na Fração 3, com rendimento de 67,54%, já o menor valor foi de 31,87%, correspondente a Fração 6.

Observa-se que as maiores concentrações de teor de ésteres com cadeias carbônicas menores, entre 8 a 12 carbonos, estão presentes nas primeiras frações coletadas. Da Fração 1 à Fração 6, o maior valor para C8:0 foi de 12,05%, sofrendo um declínio a partir da Fração 5.

Para C10:0 o maior valor encontrado foi de 11,17%, sendo o menor valor de 1,33%, encontrados na Fração 2 e na Fração 1, respectivamente.

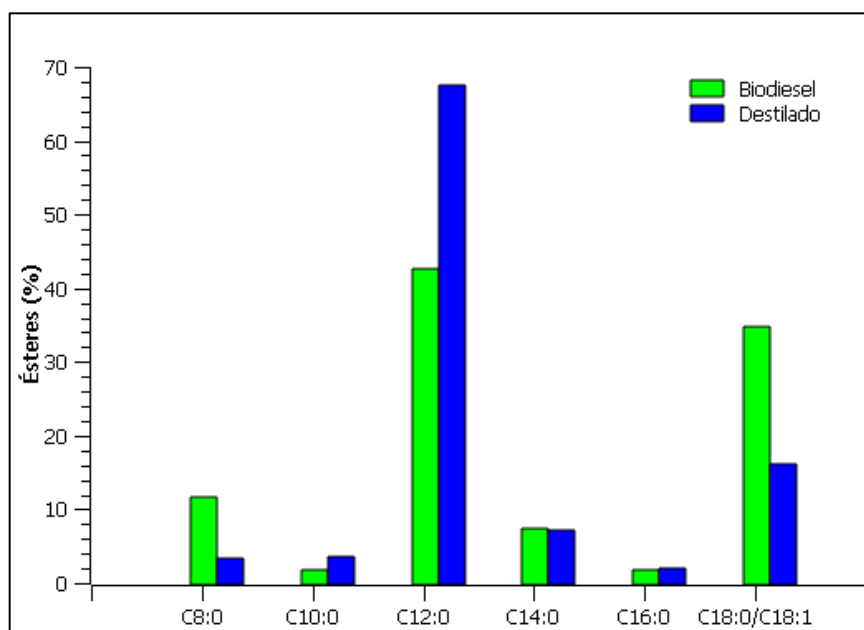
Enquanto os ésteres com cadeias carbônicas maiores, entre 14 a 18 carbonos, estão concentrados nas últimas frações. O éster C16:0 apresentou o maior valor na Fração 1, com o valor de 20,27%, e menor valor na Fração 2, de 1,11%. A partir da Fração 3, o éster demonstra crescimento contínuo, chegando a 6,75% na última fração coletada. Em comparação com os resultados da pesquisa de Harter (2019), o qual realizou a destilação nas mesmas condições, os valores encontrados para C16:0 apresentam divergência. Como mencionado anteriormente, na destilação atmosférica os ésteres leves são os primeiros a serem evaporados por possuírem menor temperatura de ebulição. Os resultados distintos podem ser explicados pela falta de controle de temperatura na manta de aquecimento ou por algum erro experimental.

Por outro lado, obteve-se ótimos resultados em relação aos ésteres C18:0/C18:1, que mostraram crescimento nas concentrações ao decorrer da destilação. O maior teor foi de 40,56% na Fração 6, indicando que o último ponto para retirada dos destilados seria a Fração 5, por apresentar características semelhantes ao bioquerosene de aviação.

4.4.2. Biodiesel e Destilado

A fim de analisar a eficiência da destilação do biodiesel de macaúba, foi escolhida a Fração 3 por apresentar maior concentração em ésteres metílicos de cadeia curta para comparação com as amostras de óleo e biodiesel. A Figura 10 representa o teor de ésteres no biodiesel produzido e na Fração 3 do biodiesel leve.

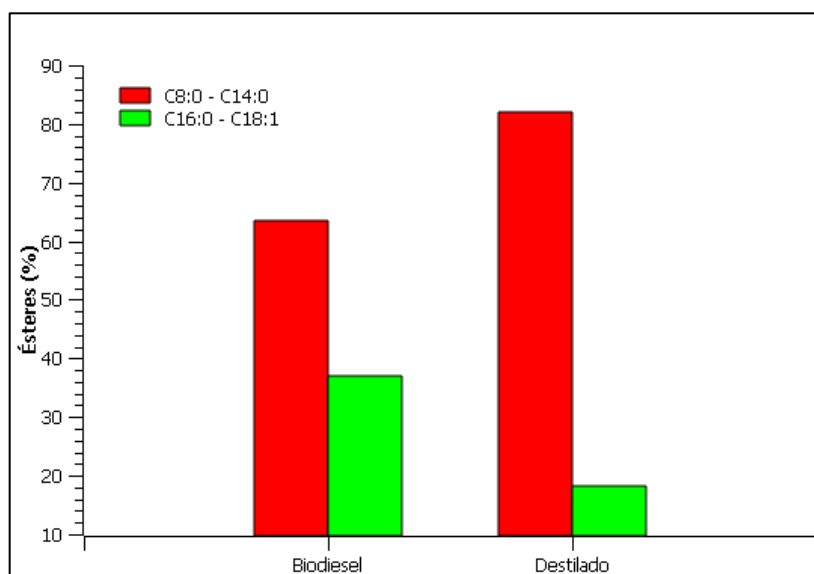
Figura 10. Comparação de teor de ésteres presentes no biodiesel sintetizado e no biodiesel destilado.



Fonte: Autor.

Visualiza-se que a partir da destilação atmosférica foi possível produzir destilados com concentração de ésteres leves com valores significativamente maiores em comparação com o biodiesel utilizado, exceto pelo teor de C8:0. O somatório de ésteres metílicos de cadeia curta entre 8 a 14 átomos no biodiesel de macaúba foi de 63,47%. Por outro lado, o destilado (Fração 3) apresentou somatório de 81,74%. Os somatórios estão representados na Figura 11.

Figura 11. Somatório de ésteres leves e ésteres pesados do biodiesel produzido e do biodiesel leve.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para os teores de ésteres leves presente no biodiesel de amêndoa de macaúba ficaram próximos aos resultados desenvolvidos por Silva (2019), somando 62,79% de C8:0-C14:0. Para os teores de ésteres no destilado, os resultados se aproximam com os valores apresentados por Harter (2018) e Da Silva (2019), que atingiu somatório de aproximadamente 81,20% de ésteres de cadeia curta.

4.5. Análise da qualidade das Frações Destilados

O combustível alternativo de aviação deve seguir rígidos parâmetros de qualidade, como a massa específica, ponto de fulgor, poder calorífico e ponto de congelamento, de forma a assegurar a segurança e eficiência da aeronave. Para o controle de qualidade foi possível executar em laboratório o teste de massa específica, descrito na seção a seguir.

4.5.1. Massa específica das frações destiladas a 20 °C

De acordo com a resolução ANP nº 37, norma ASTM D15298, os valores da massa específica a 20 °C do bioquerosene de aviação podem variar entre 771,3 a 836,6 kg/m³. A Tabela 10 apresenta a massa específica das 06 frações do destilado obtido.

Tabela 10. Massa específica a 20 °C das frações destiladas.

Amostra	Massa específica (kg/m³)	Padrão Norma ASTM D1298
Fração 1	842,2	771,3 – 836,6 kg/m ³
Fração 2	838,9	
Fração 3	838,2	
Fração 4	810,1	
Fração 5	830,7	
Fração 6	811,5	

Fonte: Autor.

Observa-se que as três primeiras frações coletadas apresentam valores acima do padrão, entre 838 e 842 kg/m³. Embora a variação seja pouca, cerca de 0,66%, os valores acima do limite estabelecido para o QAV-1 podem ser justificados por erro experimental e pela impossibilidade de manter a temperatura a 20 °C. Enquanto os resultados encontrados para massa específica da Fração 4, Fração 5 e Fração 6 atendem o parâmetro estabelecido pela ANP, que variam entre 771,3 – 836,6 kg/m³.

5. CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso avaliou a potencialidade do óleo de amêndoa de macaúba como fonte de matéria-prima para a síntese de combustível alternativo sustentável de aviação por meio de transesterificação metílica via catálise homogênea, com hidróxido de sódio como catalisador e álcool metílico com solvente. O tema do trabalho está inserido na pesquisa pelo uso consciente dos recursos energéticos disponíveis, visando atingir carbono neutro a fim de mitigar os efeitos prejudiciais ao meio ambiente causados pela emissão de gases de efeito estufa.

Neste trabalho, comprovou-se experimentalmente a viabilidade de utilizar óleo vegetal de amêndoa de macaúba em ácidos graxos de cadeia curta para a obtenção de biodiesel com alto teor em ésteres leves. O óleo vegetal utilizado é rico em ácidos graxos de cadeia curta, essencialmente ácido láurico (C12:0), demonstrando grande potencial como matéria-prima para a produção de combustíveis renováveis no setor aéreo.

Na análise das propriedades físico-químicas, o óleo e biodiesel de óleo de amêndoa de macaúba apresentaram resultados que atendem ao padrão da legislação, apresentando ótimos parâmetros para a destilação atmosférica.

Através da cromatografia gasosa comprovou-se a eficiência da reação de transesterificação e da destilação atmosférica. O biodiesel sintetizado apresentou composição concentrada majoritariamente em ésteres leves, entre C8:0 a C12:0. Após destilado, em relação à Fração 3 do biodiesel leve, a concentração evoluiu de 63,47% para 81,74% em ésteres de cadeia curta, enquanto os valores de ésteres de maior cadeia, C16:0 e C18:0 sofreram declínio em comparação ao biodiesel produzido, correspondendo a valores semelhantes a faixa de tamanho de cadeia carbônica dos hidrocarbonetos do querosene.

Quanto ao controle de qualidade das frações destiladas obtidas, a massa específica a 20° C apresentou similaridade aos padrões técnicos ao querosene fóssil, com exceção das três primeiras frações destiladas.

Portanto, as frações de biodiesel leve apresentaram propriedades adequadas em relação aos parâmetros analisados para posterior misturas ao querosene fóssil, com potencialidade para substituto do combustível tradicional na aviação. O presente trabalho revelou resultados interessantes no âmbito ambiental, minimizando a dependência do petróleo, e no âmbito econômico, visto que os ésteres metílicos foram produzidos por meio de um processo menos complexo, conhecido e relativamente barato.

5.1. Trabalhos Futuros

A continuidade do presente trabalho pode abordar misturas das frações destiladas com querosene fóssil na proporção volumétrica de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, com o propósito de se obter um combustível alternativo sustentável de acordo com os limites estabelecidos pela ANP. Analisar também as misturas dos destilados produzidos, do querosene de aviação puro e das misturas através dos parâmetros de controle de qualidade, como a massa específica a 20 °C, ponto de fulgor, análise de destilação, teor de umidade, análise termogravimétrica (TGA), ponto de congelamento e poder calorífico.

Quanto à metodologia empregada para a síntese de bioquerosene, pode-se estudar formas de otimizar a destilação atmosférica, como um controle da temperatura para a coleta da amostra destilada. Também é interessante a avaliação da eficiência da destilação atmosférica por meio de simulações em software de simulação computacional de processos. A transesterificação metílica em catálise homogênea seguida de destilação atmosférica é uma rota mais barata em comparação a outras rotas de obtenção, por isso é importante o incentivo a partir de políticas públicas em busca por melhorias no processo.

Pesquisas com ênfase na análise ambiental em relação à utilização de bioquerosene de macaúba em misturas com querosene podem considerar valores de ensaios laboratoriais em testes em motores reais de combustão. Em questão das viagens aéreas, pode-se avaliar a redução das emissões de CO₂, tal como os impactos socioambientais e financeiros em regiões aeroportuárias.

REFERÊNCIAS

A4A, A. FOR A.-. **Airlines for America projects record-setting number of passengers for summer 2019**. Disponível em: <<https://www.airlines.org/news/airlines-for-america-projects-record-setting-number-of-passengers-for-summer-2019/>>. Acesso em: 20 maio. 2021.

ABRANTES, I. et al. Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO2 emissions evolution towards 2050. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, n. February, p. 127937, 2021.

AGENCY, E. U. A. S. European Aviation Environmental Report. 2019.

AMARAL, F. P. DO. **Estudo das características físico-químicas dos óleos da amêndoa e polpa da macaúba**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2017.

ANAC. **Painel de Indicadores do Transporte Aéreo 2010**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/paineis-anos-anteriores/painel-2010>>. Acesso em: 20 maio. 2021.

ANAC. Conexão Internacional. **Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)**, v. 2, n. 2, 2018.

ANAC, A. N. DE A. C.-. **Mercado aéreo em 2019: maior número de passageiros transportados da série histórica**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/noticias/2020/mercado-aereo-registra-maior-numero-de-passageiros-transportados-da-serie-historica>>. Acesso em: 20 abr. 2021a.

ANAC, A. N. DE A. C.-. **Corbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/corsia>>. Acesso em: 2 jun. 2021b.

ANAC, A. N. DE A. C.-. **Painel de Indicadores do Transporte Aéreo 2019**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo>>.

2019>. Acesso em: 5 maio. 2021.

ANP, A. N. DE P.-. **Resolução ANP N° 45, DE 25.08.2014 - DOU 26.08.2014**. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/.%0Aagosto/ranp 45 - 2014.xml%3E](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/.%0Aagosto/ranp%2045-2014.xml%3E)>. Acesso em: 2 maio. 2021.

ANP, A. N. DE P.-. **Biocombustíveis**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

ANP, A. N. DO P.-. **Resolução ANP 37**. [s.l: s.n.].

ANP, A. N. DO P.-. Arcabouço regulatório necessário ao uso do querosene de aviação sintético - Nota técnica nº 56/2013/SBQ. 2013.

ANP, A. N. DO P.-. **Resolução nº 788, de 5 de abril de 2019**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/70491356/do1-2019-04-08-resolucao-n-778-de-5-de-abril-de-2019-70491250>.

ASTM D7566. **Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons**.

ATAG. **Aviation Helping to combat COVID-19**. Disponível em: <<https://www.atag.org/our-activities/aviation-helping-to-combat-covid-19.html>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

BATISTELLA, C. B. et al. Bioquerosene e Processo de Obtenção do Mesmo. 2011.

BIODIESELBR. Silvicultor apresenta projeto de plantio de macaúba em Tocantins. 2012.

BRASILINO, M. DAS G. A. **Avaliação da estabilidade oxidativa do biodiesel de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e suas misturas ao diesel**. [s.l.] Universidade Federal de Paraíba, 2010.

BRITISH PETROLEUM - BP. **Statistical Review of World Energy**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy->

economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.

CGGE. Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios. v. 8, 2010.

CIVIL, A. N. DE A. Anuário do Transporte Aéreo 2019. 2019.

DA SILVA, J. Q. Biodiesel leve derivado dos óleos da macaúba e do plmiste: propriedades de misturas como o querosene na perspectiva de um combustível alternativo de aviação. p. 75, 2019.

DAMASCENO, S. M. **Separação seletiva de ésteres metílicos de ácidos graxos para produção de biocombustíveis destinados à aviação.** [s.l.] Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), 2019.

DARDA, S.; PAPALAS, T.; ZABANIOTOU, A. **Biofuels journey in Europe: Currently the way to low carbon economy sustainability is still a challenge** *Journal of Cleaner Production*, 2019.

DATAR, R. P. et al. Fermentation of biomass-generated producer gas to ethanol. 2004.

DE CASTRO, A. C.; DE ANDRADE, V. A.; FERREIRA, V. L. **Produção de combustível renovável de aviação através de processos hidrotérmicos utilizando óleo de mamona.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

DE OLIVEIRA, V. F. et al. Short-chain esters enriched biofuel obtained from vegetable oil using molecular distillation. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 96, n. 5, p. 1071–1078, 2018.

DUBE, K.; NHAMO, G.; CHIKODZI, D. COVID-19 pandemic and prospects for recovery of the global aviation industry. **Journal of Air Transport Management**, v. 92, n. January, p. 102022, 2021.

DUTTA, K.; DAVEREY, A.; LIN, J. G. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. **Renewable Energy**, v. 69, p. 114–122, 2014.

EM, P. D. E. P. et al. MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM AEROPORTOS : A QUALIDADE DO AR NO AEROPORTO MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM AEROPORTOS : A QUALIDADE DO AR NO AEROPORTO. 2017.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2020: Ano Base 2019** Rio de Janeiro, 2020.

GARCIA, M. **What Flights Used to Cost in the “Golden Age” of Air Travel**. Disponível em: <<https://www.travelandleisure.com/airlines-airports/history-of-flight-costs>>. Acesso em: 20 maio. 2021.

GRAVER, B.; ZHANG, K.; RUTHERFORD, D. **CO2 emissions from commercial aviation, 2018** International Council on Clean Transportation, 2019. [s.l: s.n.].

HARTER, L.; SANTOS, D.; FABRIS, J. 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**, 2018.

HARTER, L. V. L. **Destilação atmosférica de biodieseis derivados do óleo da amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeata*) e do palmiste (*Elaeis guineensis*) para obtenção de fração de ésteres leves para uso em misturas com o querosene de aviação**. [s.l.] Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2019.

HARTER, L. V. L.; SANTOS, D. Q.; FABRIS, J. D. 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**, v. 42, n. 2, p. 143–148, 2019.

HASSAN, M.; PFAENDER, H.; MAVRIS, D. N. Feasibility analysis of aviation CO2 emission goals under uncertainty. 2017.

IATA, I. A. T. A. **Report on Alternative Fuels**, 2013. Disponível em: <www.iata.org/publications/documents/2013-report-alternative-fuels.pdf>

IATA, I. A. T. A. **Sustainable Aviation Fuels (SAF)**, 2020a.

IATA, I. A. T. A. IATA Economics Chart of the Week. p. 100, 2020b.

ICAO. **Global COVID-19 Airport Status**. Disponível em:

<<https://www.icao.int/Safety/Pages/Covid-19-Airport-Status.aspx>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

IEA, I. E. A.-. **World energy investment outlook**. Disponível em:

<<https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

KOUSOULIDOU, M.; LONZA, L. Biofuels in aviation: Fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 46, p. 166–181, 2016.

LANES, E. C. M. DE; COSTA, P. M. DE A.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, 2014.

LLAMAS, A. et al. Biokerosene from babassu and camelina oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 9, p. 5968–5976, 2012.

MADSEN, R.; HENKES, J. A. A AVIAÇÃO CIVIL E A INSERÇÃO DO BIOQUEROSENE NO BRASIL. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, p. 6–34, 2021.

MASIOL, M.; HARRISON, R. M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. **Atmospheric Environment**, v. 95, p. 409–455, 2014.

MATSIMBE, S. F. S. Utilização De Características Ópticas Para Estimar O Teor De Óleo E Volume Do Mesocarpo Nos Frutos De Macaúba. v. D, 2012.

MELO, P. G. DE. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIODIESEIS OBTIDOS A PARTIR DA OLEAGINOSA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*). p. 80, 2012.

MOTA, C. S. et al. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel : colheita , pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41–51, 2011.

OACI, O. DE A. C. I.-. **Operational Impact on Air Transport**. Disponível em: <<https://data.icao.int/coVID-19/operational.htm>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

OLIVEIRA, F. C. C.; SUAREZ, P. A. Z.; SANTOS, W. L. P. Biodiesel: Possibilidades e Desafios. **Química Nova na Escola**, p. 3–8, 2008.

PARK, K. J.; LEITE, J. T. C. **Reologia**. Disponível em: <<ftp://ftp.agr.unicamp.br/pub/disciplinas/fa-20/.Reologia>>.

PEREIRA, C. M. P. et al. Biodiesel derived from microalgae: Advances and perspectives. **Química Nova**, v. 35, n. 10, p. 2013–2018, 2012.

PEREIRA, D. DA S.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B. Efficiency evaluation of Brazilian airlines operations considering the Covid-19 outbreak. **Journal of Air Transport Management**, v. 91, n. November 2020, p. 101976, 2021.

PETROBRAS. Querosene de Aviação. p. 1–13, 2019.

PIMENTA, T. V.; ANTONIASSI, R.; ANDRADE, M. H. C. DE. **Neutralização do óleo da polpa da Macaúba** 7º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, 2010. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/874213>>

PONTE, F. A. F. DA. **Obtenção de bioquerosene a partir de resíduos dos óleos de babaçu e coco via catálise heterogênea**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2017.

RAINS, T. et al. Biofuel and commercial aviation: will consumers pay more for it? 2017.

RANUCCI, C. R. Transesterificação seguida de destilação para a obtenção de bioquerosene de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.), babaçu (*Orbignya phalerata*) e palmiste (*Elaeis guineenses*). p. 103, 2015.

RANUCCI, C. R. et al. Potential alternative aviation fuel from jatropha (*Jatropha curcas* L.), babassu (*Orbignya phalerata*) and palm kernel (*Elaeis guineensis*) as blends with Jet-A1 kerosene. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 860–869, 2018.

SALGADO, L. H.; OLIVEIRA, A. V. M. Revista de Literatura dos Transportes Diretório de Pesquisas Preços: Considerações sobre o Transporte Aéreo no Brasil. n. October, 2010.

SAMEH, M. M.; SCAVUZZI, J. Sustainable Development Initiatives in the Aviation Industry in Latin America : Focus on Brazil by Sustainable International Civil Aviation. **Occasional Paper Series**, v. IX, p. 16, 2016.

SANDER, R. F. Síntese enzimática heterogênea do biodiesel a partir do óleo de pinhão manso. 2018.

SANTOS, F. I. V. DOS. BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO: panorama e perspectivas do biocombustível. 2015.

SCALDAFERRI, C. A. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para produção de bioquerosene de aviação e diesel verde**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SHAFIEE, S.; TOPAL, E. When will fossil fuel reserves be diminished? **Energy Policy**, v. 37, n. 1, p. 181–189, 2009.

SHAHABUDDIN, M. et al. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. **Bioresource Technology**, v. 312, n. May, p. 123596, 2020.

SILVA, W. L. G. DA. **Biodiesel de óleo de macaúba e desenvolvimento de método alternativo para análise do teor de ésteres em biodiesel**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2019.

SILVA, L. N. et al. Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C. **Fuel**, 2016.

SLOCAT. **Transport and Climate Chance Global Status Report 2018**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <slocat.net/tcc-gsr/>.

SOUSA, L. P. R. et al. Combustíveis alternativos para aviação. n. September 2017, 2018.

TAKRITI, S. EL; PAVLENKO, N.; SEARLE, S. **Mitigating International Aviation Emissions: risks and opportunities for alternative jet fuels**, 2017.

UBRABIO. **Bioquerosene para aviação**. Disponível em:

<http://ubrabio.com.br/1891/noticias/bioqueroseneparaaviacao_232010/>. Acesso em: 3 jun. 2021.

UBRABIO. **Bioquerosene no Brasil**. Disponível em: <<https://ubrabio.com.br/wp-content/uploads/2018/03/BioquerosenenoBrasil.pdf>>. Acesso em: 8 jun. 2021.

WANG, Z. et al. Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, n. 2019, p. 1036–1050, 2019.

ZAMPAR, M. V. D. C. Biocombustíveis no futuro da aviação. **Universidade do Sul de Santa Catarina**, 2019.