



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS



JULIANA QUIERATI DA SILVA

**BIODIESEIS LEVES DERIVADO DOS ÓLEOS DA MACAÚBA E DO PALMISTE:
PROPRIEDADES DE MISTURAS COM O QUEROSENE NA PERSPECTIVA DE UM
COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO DE AVIAÇÃO**

Uberlândia

2019

JULIANA QUIERATI DA SILVA

**BIODIESEIS LEVES DERIVADO DOS ÓLEOS DA MACAÚBA E DO PALMISTE:
PROPRIEDADES DE MISTURAS COM O QUEROSENE NA PERSPECTIVA DE UM
COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO DE AVIAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Biocombustíveis.

Área de concentração: Produtos e coprodutos.

Orientador: Douglas Queiroz Santos

Coorientador: Luiz Vitor Leonardi Harter

Uberlândia

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586b Silva, Juliana Quierati da, 1992
2019 Biodieseis leves derivado dos óleos da macaúba e do palmiste [recurso eletrônico] : propriedades de misturas com o querosene na perspectiva de um combustível alternativo de aviação / Juliana Quierati da Silva. - 2019.

Orientador: Douglas Queiroz Santos.

Coorientador: Luiz Vitor Leonardi Harter.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Pós-Graduação em Biocombustíveis.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1263>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Biocombustíveis. 2. Biodiesel. 3. Combustíveis para motores. 4. Aviação - Combustíveis. I. Santos, Douglas Queiroz, 1980, (Orient.). II. Harter, Luiz Vitor Leonardi, 1970, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis. IV. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis V. Título.

CDU: 662.756

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

JULIANA QUIERATI DA SILVA

**BIODIESEIS LEVES DERIVADO DOS ÓLEOS DA MACAÚBA E DO PALMISTE:
PROPRIEDADES DE MISTURAS COM O QUEROSENE NA PERSPECTIVA DE UM
COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO DE AVIAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Biocombustíveis.

Área de concentração: Produtos e coprodutos.

Uberlândia, 11 de março de 2019

Douglas Queiroz Santos

José Domingos Fabris

Ricardo Reis Soares

Luiz Claudio de Almeida Barbosa

Uberlândia

2019

Às grandes mulheres da minha vida: Cleonice
Quierati, Lucia Thomazini, e Simone Matos que me
inspiraram a nunca desistir dos meus sonhos e
objetivos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado sabedoria e condições suficientes para concluir mais uma etapa, me proporcionando momentos magníficos.

Aos meus familiares e amigos que sempre me apoiam. Em especial ao meu maior incentivador Maiko Yanosteac Thomazini, que está ao meu lado em todos os momentos.

Ao Professor Dr. José Domingos Fabris pelas suas correções e contribuições além da excelência.

Ao meu orientador, Professor Dr. Douglas Queiroz Santos, por acreditar neste trabalho e me ajudar a desenvolver a pesquisa. Pelo incentivo e orientação.

Ao meu co-orientador, Professor Mestre Luís Vitor Leonardi Harter. Obrigada pela confiança e comprometimento.

À Universidade Federal de Uberlândia – UFU, por oferecerem o curso de Mestrado e Doutorado na área de biocombustíveis e proporcionar qualificação aos estudantes de diversos cursos.

Ao Laboratório de Biocombustível e Tecnologia Ambiental – LABTA, à Escola Técnica de Saúde – ESTES, e ao Instituto de Química – IQ, pela infraestrutura e todos os equipamentos cedidos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós Graduação em Biocombustíveis – PPGb e todos os docentes, por colaborarem com todo aprendizado que obtive durante estes dois anos.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigada!

RESUMO

A busca contínua por novos combustíveis renováveis, em resposta à crescente demanda global de energia, mas também, e até principalmente, às questões ambientais, enfatiza fortemente a importância de se desenvolver combustíveis alternativos para a aviação, particularmente aqueles derivados da biomassa obtidos de frações destiladas do biodiesel convencional, para comporem misturas, com ou mesmo substituir integralmente, os combustíveis fósseis. Óleos da amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeate*) e do palmiste (*Elaeis guineensis*) foram previamente, cada um, transesterificados com metanol pela reação clássica sob catálise alcalina homogênea. Os ésteres metílicos do ácido graxo da macaúba ou do palmiste (FAME) foram então submetidos à destilação fracionada sob pressão atmosférica para obtenção de frações enriquecidas em ésteres de cadeia molecular curta, variando de C8 a C14, para serem misturadas com o combustível de jato mineral convencional. Neste estudo, misturas de tais biodieseis leves foram preparadas com o querosene Jet A-1 (conforme denominação da ASTM, ou QAV-1, de acordo com a nomenclatura da ANP brasileira) e caracterizadas por sua densidade, frações de destilação, comportamento térmico (termogravimetria e análise calorimétrica diferencial), ponto de congelamento, ponto de fulgor e poder calorífico. Essas análises foram realizadas como critério para se determinar a razão (biodiesel leve):(querosene) mais adequada, baseando-se nos valores recomendados pela ANP para as propriedades avaliadas. As misturas correspondentes a 5, 10 e 20% em volume de ésteres metílicos de ácidos graxos enriquecidos em cadeia curta, no combustível misturado com Jet A-1 apresentaram valores dentro dos limites recomendados pelas resoluções ANP 37 e ASTM D1655.

Palavra-chave: Biodiesel leve. Macaúba. Palmiste. Combustível aéreo alternativo. Misturas com querosene fóssil.

ABSTRACT

The continuous search for new renewable fuels, as a response to the growing global demand of energy but also and mostly to environmental issues, strongly stresses the importance of developing alternative aviation fuels, particularly those derived from biomass, as could be from distilled fractions of the conventional biodiesel, to be blended with or even to entirely replace the aircraft mineral kerosene. Oils from the macaúba (*Acrocomia aculeate*) and palm kernel (*Elaeis guineensis*) were individually transesterified with methanol through the classical reaction under homogeneous alkaline catalysis. The raw macaúba or palmiste fatty acid methyl esters (FAME) were then subjected to atmospheric distillation in order to obtain fractions enriched in short-chain esters, ranging from C8 to C14, to be blended with the conventional mineral jet fuel. In this study, blends of such light biodiesels were prepared with the Jet A-1 (as named by the ASTM, or QAV-1, according to the Brazilian ANP nomenclature) kerosene and characterized for their density, distillation fractions, thermal behavior (thermogravimetry and differential calorimetry analyses), freezing point, flash point, and calorific value. These analyses were carried out as criteria to determine the most suitable light biodiesel:kerosene ratio, basing on the values recommended by ANP for such assessed properties. The blends corresponding to 5; 10 and 20 vol% of enriched short-chain esters from macaúba or palm kernel in the blended fuel with Jet A-1 showed values well within the limits recommended by both ANP 37 and ASTM D1655.

Keywords: Light biodiesel. Macaúba. Palm kernel. Alternative jet fuel. Blends with fossil kerosene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico da projeção da emissão de CO ₂ pelo setor aeronáutico	24
Figura 2. Fruto da macaúba (<i>Acrocomia aculeata</i>)	35
Figura 3. Fruto da palmeira (<i>Elaeis guineenses</i>)	36
Figura 4. Produção mundial do óleo de palma	39
Figura 5. Porcentagem de ésteres no biodiesel, biodiesel leve e resíduo de macaúba e palmiste	46
Figura 6. Conteúdo de água em relação à porcentagem em volume de biodiesel leve	48
Figura 7. Massa específica em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve	49
Figura 8. Análise da propriedade de destilação de acordo com a temperatura	51
Figura 9. Curva TGA obtida sob atmosfera de oxigênio a 50 mL min ⁻¹ e taxa de aquecimento de 10°C min ⁻¹	52
Figura 10. Curva TGA obtida sob atmosfera de nitrogênio a 50 mL min ⁻¹ e taxa de aquecimento de 10°C min ⁻¹	53
Figura 11. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o QAV-1 e misturas de macaúba QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20	54
Figura 12. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o QAV-1 e misturas de palmiste QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20	54
Figura 13. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o BL100 macaúba e BL100 palmiste.....	55
Figura 14. Ponto de congelamento do QAV BL5, QAV BL10 e QAV BL20 de macaúba ou palmiste.....	55
Figura 15. Ponto de congelamento em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve..	56
Figura 16. Ponto de fulgor em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve	57
Figura 17. Poder calorífico das misturas contendo 5, 10 e 20% de biodiesel leve, biodiesel leve puro e QAV-1	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características comuns entre querosenes de aviação.....	20
Tabela 2. Características consideradas para o QAV.....	21
Tabela 3. Teor de óleo e umidade a partir da extração do óleo da macaúba.....	35
Tabela 4. Teor de óleo e umidade a partir da extração do óleo do fruto dendê.....	37
Tabela 5. Perfil FAME dos biodieseis, biodieseis leves e resíduos dos óleos de macaúba e palmiste.....	45
Tabela 6. A temperatura de destilação do QAV-1 e misturas com o biodiesel leve de macaúba (QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20, e BL100)	50
Tabela 7. A temperatura de destilação do QAV-1 e misturas com o biodiesel leve de palmiste (QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20, e BL100)	50
Tabela 8. Propriedades comuns do QAV-1, biodiesel leve da macaúba e do palmiste	59
Tabela 9. Propriedades das misturas com 5, 10 e 20 vol% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste com QAV-1	60

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRABA	Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação
AFQRJOS	(sigla em inglês) Requisitos de qualidade de combustível de aviação para sistemas operados em conjunto para o QAV-1 (Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems)
ANP	Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustível
ASTM	(sigla em inglês) Sociedade americana para testes e materiais (American Society for Testing and Materials)
AtJ	(sigla em inglês) Álcool para combustível de aviação (The alcohol-to-jet)
Bio-GtL	(sigla em inglês) Biogás para líquido (The biogas-to-liquid)
BL	Biodiesel leve
BIT	(sigla em inglês) Biomassa para líquido (The biomass-to-liquid)
CNG2020	(sigla em inglês) Crescimento neutro em carbono a partir de 2020 (Carbon-Neutral Growth by 2020)
DSHC	(sigla em inglês) Fermentação direta de açúcares para hidrocarbonetos (The direct sugar to hydrocarbons)
EN	(sigla em inglês) Norma Europeia (European Standard)
FAEs	(sigla em inglês) Ésteres de ácidos graxos (Fatty Acid Esters)
FAME	(sigla em inglês) Éster metílico de ácidos graxos (Fatty Acid Methyl Ester)
FT	Fischer-Tropsch
GEE	Gases de Efeito Estufa
HDCJ	(sigla em inglês) Celulósico despolimerizado hidrotratado para combustível de aviação (Hydrotreated depolymerized cellulosic jet)
HEFA	(sigla em inglês) Éster e ácidos graxos hidroprocessados (Hydrotreated Ester and Fatty Acids)
HVO	(sigla em inglês) Óleo vegetal hidrotratado (Hidrotreated Vegetable Oil)
IATA	(sigla em inglês) Associação internacional de transporte aéreo (International Air Transport Association)
JET A	(sigla em inglês) Querosene de aviação (Aviation Turbine Fuel)
JET B	(sigla em inglês) Querosene de aviação (Wide-Cut Aviation Turbine Fuel)

JP-1	(sigla em inglês) Propelente a jato (Jet Propellant #1)
M	Macaúba
NBR	Norma Brasileira
P	Palmiste
QAV	Querosene de Aviação
QAV B-X	Querosene de Aviação Alternativo
SIP	(sigla em inglês) Isoparafinas sintetizadas (Synthetic Isoparaffins)
SPK	(sigla em inglês) Querosene parafínico sintetizado (Synthetic Paraffinic Kerosene)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Querosene	19
2.1.1	Querosene de aviação	19
2.1.2	Exigência de qualidade do QAV	21
2.2	Questões ambientais do setor aéreo	23
2.2.1	Acordo de Paris	25
2.3	Combustíveis renováveis do setor aéreo	26
2.3.1	Bioquerosene	26
2.3.2	Exigências de qualidade para o bioquerosene	29
2.4	Cenário brasileiro.....	31
2.5	Matérias-primas para a produção de bioquerosene.....	32
2.5.1	Óleo de macaúba (<i>Acrocomia aculeata</i>)	33
2.5.2	Óleo de palmiste (<i>Elaeis guineenses</i>).....	36
2.5.3	Potencial mundial da produção do óleo da macaúba e do palmiste	37
3	JUSTIFICATIVA	40
4	OBJETIVOS	40
4.1	Objetivos específicos	40
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
5.1	Cromatografia	41
5.2	Misturas	42
5.3	Conteúdo de água.....	42
5.4	Massa específica a 20 °C.....	42
5.5	Destilação.....	42
5.6	Análise térmica - Termogravimetria (TGA)	43
5.7	Análise térmica - Calorimetria (DSC)	43
5.8	Ponto de congelamento	43
5.9	Ponto de fulgor.....	43
5.10	Poder calorífico	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45

6.1	Caracterização do biodiesel leve.....	45
6.2	Conteúdo de água.....	47
6.3	Massa específica a 20 °C.....	48
6.4	Investigação experimental da propriedade de destilação.....	49
6.5	Caracterização térmica por TGA	52
6.6	Caracterização térmica por DSC.....	53
6.7	Ponto de congelamento	55
6.8	Ponto de fulgor.....	57
6.9	Poder calorífico.....	58
6.10	Resultado geral	59
7	Conclusão	61

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda pelo transporte aéreo e as consequências relacionadas à modificação da composição dos gases da atmosfera terrestre trazem oportunidades à busca de fontes alternativas não convencionais de combustíveis para a aviação, na estratégia do alcance da sustentabilidade ambiental.¹ Embora o combustível fóssil seja a energia que move o mundo moderno, sua exploração e sua queima tornam-se cada vez mais ameaçadora à vida no planeta. A procura por fontes energéticas alternativas mais limpas e plenamente renováveis são ainda uma promessa para um futuro melhor para a humanidade, no ambiente natural.²

Fatores relacionados à atual circunstância econômica expandem o setor aéreo, devido à crescente demanda mundial por energia.³ Em decorrência simultânea da desaceleração do crescimento da China e da consequente queda dos preços das principais *commodities*, observa-se volatilidade dos mercados, com alguma sinalização de alteração da taxa básica de juros nos Estados Unidos.⁴ Todos esses movimentos da economia global ocorrem no tempo em que países em desenvolvimento acenam com maior demanda energética, em resposta ao crescimento populacional e à expansão da produção industrial.⁵ Embora haja baixa atividade econômica, o setor de transporte aéreo supera os desafios das ondas do baixo dinamismo econômico e se destaca pelo rápido crescimento, comparativamente a outros meios de transporte, de passageiros e de carga.¹

Diante do crescente consumo de combustíveis fósseis, sobretudo pelo setor aéreo, sobressaem-se questões ambientais inquietantes. A principal fonte energética provém do querosene mineral para a aviação, cuja queima sustenta 2,5% do total de emissões de gases

¹ ZHANG, C. *et al.* Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 54, p. 120–138, 2016.

² DOMINKOVIĆ, D. F. *et al.* The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 82, p. 1823–1838, 2017.

³ EXXONMOBIL. **The Outlook for Energy: A View to 2040**, [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2018.

⁴ JAYARAMANA; IBRAHIM, D. N.; GUATC, C. L. Managerial optimism to overcome economic recession in the world. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, [s.l.], v. 24, p. 33–48, 2011. Work paper submitted to 7th International Strategic Management Conference Managerial, 2011.

⁵ DE LA TORRE, M. J. *et al.* Organosolv lignin for biofuel. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 45, p. 58–63, 2013.

antropogênicos emitidos para a atmosfera, contabilizado em 820 tCO₂/ano.^{6,7,8} É uma razão suficientemente forte para motivar a busca por combustíveis renováveis, no esforço de minimizar o uso contínuo e a dependência de derivados do petróleo e, assim, a redução das emissões de gases, sobretudo os que promovem o efeito estufa atmosférico.

O consumo de combustíveis aéreos, ligado a questões ambientais, contudo, incentivam a busca por combustíveis derivados de fontes alternativas para comporem o quadro energético empregado no setor. Os combustíveis alternativos para a aviação, regulamentados ou ainda sob pesquisa, são derivados de fontes renováveis obtidos pelas conversões de lipídios, bioquímica ou termoquímica. Utiliza-se, portanto, matérias-primas como o óleo de cozinha usado, plantas oleaginosas, sebo, resíduo sólido urbano, amidos, plantas com açúcar, gás de exaustão, CO, CO/H₂, algas e lignocelulose.⁹ Ambientalmente correto, surgem portanto diferentes rotas e matérias primas na produção de combustível para a aviação, chamados de bioquerosenes.

O bioquerosene, nome dado ao combustível alternativo de aviação advindo da biomassa, de composição química semelhante ao querosene fóssil, podem ser obtidos por meio dos processos (i) de transesterificação; (ii) termoquímico, (iii) de craqueamento catalítico; (iv) de gaseificação e síntese catalítica e (v) bioquímico, por leveduras ou bactérias modificadas, que metabolizam açúcares e produzem hidrocarbonetos¹⁰. Seus componentes químicos baseiam-se substancialmente em hidrocarbonetos derivados de ésteres de ácidos graxos de cadeia molecular curta.

No processo químico, utilizando óleos vegetais ou gorduras animais, obtém-se o bioquerosene parafínico sintético (SPK, sigla para *synthetic paraffinic kerosene*), que, por desoxigenação e hidroprocessamento, leva ao SPK-HEFA (SPK-*hydroprocessed esters and fatty acids*), regulamentado pela ANP 63¹¹ e ASTM D7566¹², empregada internacionalmente.

⁶ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2016**. Paris, 2016. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEB_W>. Acesso em: 01 ago. 2018.

⁷ ADITIYA, H. B. *et al.* Second generation bioethanol production: A critical review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 66, p. 631–653, 2016.

⁸ INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aviation's Contribution to Climate Change**, [s.l.], 2010.

⁹ NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. **Biokerosene**, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.

¹⁰ BAROUTIAN, S. *et al.* Blended aviation biofuel from esterified Jatropha curcas and waste vegetable oils. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, [s.l.], v. 44, n. 6, p. 911–916, 2013.

¹¹ AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP Nº 63, de 5.12.2014 – DOU 8.12.2014. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2014.

¹² ASTM D7566 – 18, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–16, 2018.

Das opções de desenvolvimento e produção, os bioquerosenes baseados em ésteres (ou ácidos graxos) hidroprocessados (HEFA) têm sido, até agora, os únicos considerados pela indústria de combustíveis alternativos renováveis para aviação⁹; os ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME) de cadeias moleculares mais curtas (biodieseis leves), não processados, ou suas misturas com o querosene mineral, são uma proposta ainda de importância potencial, para desenvolvimento e produção em escala industrial de biocombustíveis para aeronaves^{16,20}.

Em um estudo, Wardle (2003) reporta a viabilidade técnica do biodiesel adicionado em baixas concentrações na composição de misturas com o querosene mineral¹³. O biodiesel, um dos biocombustíveis mais utilizados mundialmente no setor de transporte, compondo a mistura de diesel¹⁴, apresenta características semelhantes a faixa da moléculas de carbono presente no querosene fóssil, quando obtido de fonte oleaginosa rica em ácidos graxos de cadeia molecular curta, entre 8 a 14 carbonos¹⁵.

O biodiesel leve, integralmente ou em mistura no querosene fóssil, é uma alternativa viável, se atendidas às recomendações técnicas da ANP para os combustíveis de aeronaves. O biodiesel leve, mistura de ésteres, usualmente metílicos, de ácidos graxos de cadeia molecular relativamente curta (C8 a C14), embora tenha natureza química essencialmente diferente da mistura parafínica do querosene de aviação alternativo, pode ser imaginado, e efetivamente usado, como combustível para motores.

O biodiesel leve, composto por ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME) de cadeia curta, pode ser obtido *via* reação de transesterificação de óleos ricos em ésteres de ácidos graxos (FAEs) com um álcool simples, metanol ou etanol, posteriormente concentrado *via* destilação

¹³ WARDLE, D. A. Global sale of green air travel supported using biodiesel, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 7, n. 1, p. 1–64, 2003.

¹⁴ SERRANO-RUIZ, J. C.; RAMOS-FERNÁNDEZ, E. V.; SEPÚLVEDA-ESCRIBANO, A. From biodiesel and bioethanol to liquid hydrocarbon fuels: new hydrotreating and advanced microbial technologies, **Energy & Environmental Science**, v. 5, p. 5638–52, 2012.

¹⁵ 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.

fracionada sob pressão a vácuo^{16,17,18,19}, destilação molecular²⁰, filtração em carvão ativado²¹ e filtração por membrana 0,05µm²², para obtenção de um combustível aéreo de composição química ideal para uso em turbinas.

Em contexto histórico, é destacável o voo com um avião turboélice Embraer modelo Bandeirante, em 23 de outubro (Dia do Aviador) de 1984, da cidade de São José dos Campos SP até Brasília DF, em que o combustível usado foi somente um biodiesel leve, quimicamente derivado de óleo de algumas palmáceas, incluindo do babaçu (*Attalea speciosa* Mart²³, mas também *Orbignya phalerata* e *O. martiana*). Quem concebeu a ideia e produziu o biodiesel leve, para o avião, foi o engenheiro químico Expedito José de Sá Parente. Na entrevista que concedeu à Agência Brasil, em 2005, Parente²⁴ esclarece:

Primeiro, nós fizemos ensaios em turbinas estacionadas, em bancada. Depois de muitos testes, nós decidimos fazer o teste num voo. Usamos um Bandeirante, da Embraer, que saiu de São José dos Campos no dia 23 de outubro de 1984. Era o Dia do Aviador. E voou até Brasília. Eu quis ir nesse avião, mas me foi negado o acesso, porque eu não era militar. Eles fizeram questão de voar só com o prosene, sem uma gota de combustível de petróleo. O tanque estava cheio de querosene vegetal. E isso foi fantástico, porque lá em cima não tem acostamento, não!

Os biodieseis (FAME) leves não foram ainda oficialmente normatizados como combustíveis para uso diretamente em aeronaves. Entretanto, os biocombustíveis tipo FAME leves destinados a motores de avião e obtidos *via* transesterificação de bio-óleos ou biogorduras

¹⁶ 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.

¹⁷ LLAMAS, A. *et al.* Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene, **Fuel**, v. 102, p. 483–490, 2012.

¹⁸ 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.

¹⁹ 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**, [s.l.], 2018.

²⁰ 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.

²¹ DAMASCENO, S. M. *et al.* Selective adsorption of fatty acid methyl esters onto a commercial molecular sieve or activated charcoal prepared from the *Acrocomia aculeata* cake remaining from press-extracting the fruit kernel oil, **AIMS ENERGY**, v. 6, n. September, p. 801–809, 2018.

²² BAROUTIAN *et al.* Blended aviation biofuel from esterified *Jatropha curcas* and waste vegetable oils, **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 44, n. 6, p. 911–916, 2013.

²³ CAVALLARI, M. M.; TOLEDO, M. M. What is the name of the babassu? A note on the confusing use of scientific names for this important palm tree. **Rodriguésia**, [s.l.], v. 67, n. 2, p. 533–538, 2016.

²⁴ BARDAWIL, O. Especial 2 – Inventor brasileiro do biodiesel também criou vaca mecânica e bioquerosene para aviões. **Agência Brasil**, [s.l.], p. 8–11, 2005.

e concentrados por destilação ou filtração são tecnologicamente muito interessantes, dos pontos de vista da produção e do uso, em mistura com o querosene mineral em motores.¹³ De testes realizados com combustível alternativo de aviação, os derivados de biodiesel de ésteres leves têm sido bem documentados⁹⁻¹⁵ e sustentam sua adequabilidade, na mistura ao querosene fóssil de aviação.

Há documentação sobre a produção de biocombustíveis de aviação experimentais, obtidos de querosene fóssil em mistura com FAMES derivados do óleo de macaúba (*Acrocomia aculeata*)¹⁶, pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)^{16,22}, babaçu (*Orbignya phalerata* e *O. martiana*)^{20,16,18}, palmiste (*Elaeis guineensis*)^{16,17}, coco (*Cocos nucifera*)¹⁷ e camelina (*Camelina sativa*)¹⁸. Destacam-se, de fato, óleos de relativamente alta proporção em teores de ácidos graxos com comprimento da cadeia carbônica na faixa dos componentes parafínicos do querosene mineral,¹⁷ entre 8 e 16 átomos de carbono. As misturas assim obtidas são ambientalmente favoráveis, sobretudo na condição atual da crescente demanda de combustíveis para o transporte aéreo.

Eis, pois, os propósitos do presente trabalho: caracterizar os parâmetros técnicos que sustentam a adequabilidade dos ésteres metílicos de ácidos graxos de cadeias moleculares relativamente curtas, ou, em expressão mais simples, biodieseis leves na formação de misturas combustíveis com o querosene fóssil, para motores de aeronaves. Os ésteres metílicos a aqui considerar são os obtidos dos óleos das amêndoas dos frutos da macaúba (*Acrocomia aculeata*) e do palmiste (*Elaeis guineenses*), dos quais os biodieseis leves em apreço são os concentrados por destilação fracionada sob pressão atmosférica, procedimento inédito, da mistura bruta de ésteres do biodiesel convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Querosene

O querosene derivado do petróleo, utilizado em pequenas escalas em meados do século XVIII, empregado para fins de iluminação, passou após um século a ser explorado como combustível para motores.²⁵ Quimicamente o querosene é uma mistura de aromáticos e alcanos (hidrocarbonetos saturados) com comprimento de cadeia entre 10 a 18 carbonos⁹.

Com os primeiros relatos datados da época da Segunda Guerra Mundial, os primeiros motores a reação foram desenvolvidos para receber o querosene semelhante ao utilizado na iluminação, em razão da disponibilidade e do custo e, em parte, por apresentar menor possibilidade de fogo ou explosão.²⁵

O primeiro combustível para turbina era constituído da mesma fração de destilação da faixa do querosene de uso comum e de ponto de congelamento máximo especificado em -60°C, nomeado JP-1.²⁵ Atualmente, o querosene de aviação diferencia-se do querosene comum, por parâmetros mais amplos de qualidade, com controle mais rigoroso de suas propriedades.²⁶

2.1.1 Querosene de aviação

Obtido a partir da destilação direta do petróleo a pressão atmosférica, o combustível querosene de aviação, nomeado pela sigla QAV, utiliza-se em helicópteros e aviões com motores à turbina, como jato-puro, turboélices ou turbofans.

O querosene de aviação é um líquido claro, transparente e inflamável, em que os hidrocarbonetos que o constituem são compostos de baixa densidade, de uma fase não solúvel em água, retirado tipicamente na faixa de destilação entre a gasolina e o diesel empregado em veículos terrestres, situado na faixa entre 150 a 270 °C. Químico-estruturalmente, seus compostos orgânicos classificam-se como parafínicos e aromáticos²⁷ e os principais aditivos adicionados a ele são os inibidores de corrosão, biocidas, antioxidantes, antiestáticos, inibidores de formação de gelo e desativadores de metal.⁸⁵

²⁵ MAURICE, L. Q. *et al.* Advanced aviation fuels: A look ahead via a historical perspective. **Fuel**, [s.l.], v. 80, n. 5, p. 747–756, 2001.

²⁶ FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados**. 1. ed. [s.l.]: LTC, 2012.

²⁷ PETROBRÁS. Querosene de Aviação. Informações Técnicas, p. 10, 2014.

Existem vários tipos de querosene; os tipos mais utilizados atualmente na aviação civil são o Jet A, Jet A-1 e Jet B. Na Tabela 1 estão dispostas algumas das suas características.

Tabela 1. Características comuns entre querosenes de aviação

CARACTERÍSTICA	Jet A ⁸⁵	Jet A-1 ⁸⁵	Jet B ²⁸
Aromáticos máx., % vol.	25	25	25
Viscosidade a -20 °C máx., mm ² s ⁻¹	8,0	8,0	-
Densidade 15 °C, kg m ⁻³	775 – 840	775 - 840	751-802
Ponto de congelamento máx., °C	-40	-47	-50
Calor de combustão min., MJ kg ⁻¹	42,8	42,8	42,8
Ponto de fulgor mín., °C	38	38	-
Existência de gomas máx., mg (100 mL) ⁻¹	7	7	-

Fonte: Adaptado das normas ASTM

Alguns dos parâmetros exigidos para cada tipo de combustível, recomendados pelas normas citadas acima, variam de acordo com a sua finalidade de aplicação. Tal como o combustível Jet B, utilizado principalmente em regiões de temperaturas extremamente baixas, devido seu menor ponto de congelamento, em que a temperatura máxima do ponto de congelamento pode ser acordada, entre fornecedor e comprador, de acordo com a necessidade de utilização. O Jet B é composto de uma mistura de querosene com um combustível alternativo derivado de fontes convencionais, incluindo petróleo bruto, condensados líquidos de gás natural, óleo pesado, óleo de xisto e areias betuminosas.²⁸

Ambos regulamentados pela norma internacional ASTM D1655, o combustível de aviação Jet A e o Jet A-1 possuem, em sua maioria, características semelhantes. O combustível Jet A pode ser encontrado no mercado americano e em aeroportos canadenses e difere-se do Jet A-1 principalmente pelo ponto máximo do ponto de congelamento, estipulado em -40 °C.⁸⁵

O Jet A-1 (no Brasil, QAV-1) é globalmente utilizado. Sua composição química principal baseia-se em compostos parafínicos, aromáticos, naftênicos e olefinas; em concentrações mais baixas, compostos de enxofre, oxigênio e nitrogênio. É obtido na faixa de destilação entre 130 a 300 °C e contém hidrocarbonetos com números de átomos de carbono entre 8 a 16. Apresenta forte poder de solvência, taxa lenta de evaporação e baixo ponto de

²⁸ASTM D6615 – 15A. Standard Specification for Jet B Wide-Cut Aviation Turbine Fuel 1, **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–10, 2015.

congelamento.²⁹ Em virtude da sua disponibilidade, tem sido utilizado na composição de misturas experimentais de combustíveis alternativos.

2.1.2 Exigência de qualidade do QAV

No propósito de satisfazer as recomendações de qualidade do querosene de aviação QAV-1, o combustível deve estar de acordo aos padrões contidos nas normas ANP 37⁸⁶ e ASTM D1655⁸⁵, de certificação para consumo final.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP regulamenta, desde dezembro de 1998, as especificações do QAV-1 produzido pelas refinarias brasileiras. São normas que se assemelham às dos padrões especificados pela ASTM.

A especificação brasileira está contida na Resolução ANP 37⁸⁶, das quais caracterizações físico-químicas do combustível são preconizadas pelas normas nacionais da NBR e da ABNT e da internacional ASTM, cujos parâmetros são compatíveis com a AFQRJOS (Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems for Jet A-1) - Requisitos de Qualidade de Combustível de Aviação para Sistemas Operados em Conjunto para o QAV-1.

Na tabela 2 estão dispostas as características analisadas juntamente com os aspectos considerados na certificação da qualidade final do combustível QAV-1. Do anexo 1 constam todas as especificações de qualidade para o mesmo, tal como seus respectivos métodos de análise.

Tabela 2. Características consideradas para o QAV

Característica	
APARÊNCIA	Aspecto
	Cor
	Partículas contaminantes
COMPOSIÇÃO	Acidez Total
	Aromáticos
	Aromáticos totais
	Enxofre total
	Enxofre mercaptídico
	Ensaio Doctor

²⁹ BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. **Processamento de Petróleo e Gás**. [s.l.]: Editora Ltc, 2011.

	Componentes na expedição da refinaria produtora Fração hidroprocessada Fração severamente hidroprocessada
VOLATILIDADE	Destilação Ponto de fulgor Massa específica a 20 °C
FLUIDEZ	Ponto de congelamento Viscosidade a -20 °C
COMBUSTÃO	Ponto calorífico inferior Ponto de fuligem Naftalenos
CORROSÃO	Corrosividade ao cobre
ESTABILIDADE	Estabilidade térmica a 260 °C Queda de pressão no filtro Depósito no tubo
CONTAMINANTES	Goma atual Índice de separação de água Com/sem dissipador de cargas estáticas
CONDUTIVIDADE	Condutividade elétrica
LUBRICIDADE	Lubricidade, BOCLE
ADITIVOS	Antioxidante Desativador de metal Dissipador de cargas estáticas Inibidor de formação de gelo Detector de vazamentos Melhorador da lubricidade

Fonte: Adaptado de ANP (2009)⁸⁶

As respectivas características apresentadas acima são referentes à adequação das normas para a comercialização final do combustível QAV-1, cujas especificações se assemelham às adotadas em outros países, permitindo o abastecimento em aeroportos brasileiros por aeronaves internacionais.³⁰ No anexo 1, segue o respectivo documento, disponibilizado pela ANP 37, contendo todas as informações das análises e seus respectivos métodos e parâmetros.

³⁰ CGEE. **Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios**, Brasília: [s.n.], 2010.

2.2 Questões ambientais do setor aéreo

Em razão de o querosene ser o principal combustível utilizado no transporte aéreo, questões ambientais tornam-se relevantes, na medida em que os gases emitidos na queima do combustível fóssil contribuem para o aquecimento global. Por conseguinte, a crescente demanda energética juntamente com fatores ambientais se entrelaça de maneira que a busca pela redução de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transporte impulsionam o desenvolvimento de biocombustíveis alternativos sustentáveis.³¹

Na combustão, diversos poluentes são liberados na atmosfera, como o monóxido e dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos gasosos, que diretamente contribuem no aumento da temperatura global. Segundo o ICAO (2010) a quantidade acumulativa de CO₂ resultará futuramente em um trilhão de toneladas emitidas na atmosfera, metade da quantidade já existente devido a emissão pela queima. Contudo, ainda que as emissões se cessem, os danos e aquecimento já ocasionados persistira por muitos milhares de anos.⁸

O setor da aviação mundialmente tem crescido nas últimas décadas, em média 5% ao ano.³² E as emissões de CO₂ referentes às ocasionadas pela aviação civil, contabilizam em uma média de crescimento de 3,6% ao ano, observados desde o ano de 1980 até os índices atuais.³³ Segundo a Organização Internacional de Aviação Civil (2010), espera-se a duplicação do tráfego aéreo mundial nos próximos 20 anos, por conseguinte, nas emissões de GEE.⁸ Valor alarmante, pois, como base de comparação, essa mesma taxa corresponde à aproximadamente o dobro da porcentagem do crescimento anual do consumo de energia mundial, chamando assim a atenção das autoridades regulamentadoras, internacionais e nacionais.

Da busca na redução de GEE, a aviação civil conta com três pontos no cumprimento de atenuação das emissões: (i) melhorar a eficiência do combustível em uma média de 1,5% anualmente até 2020; (ii) limitar as emissões, pelo crescimento neutro em carbono a partir de

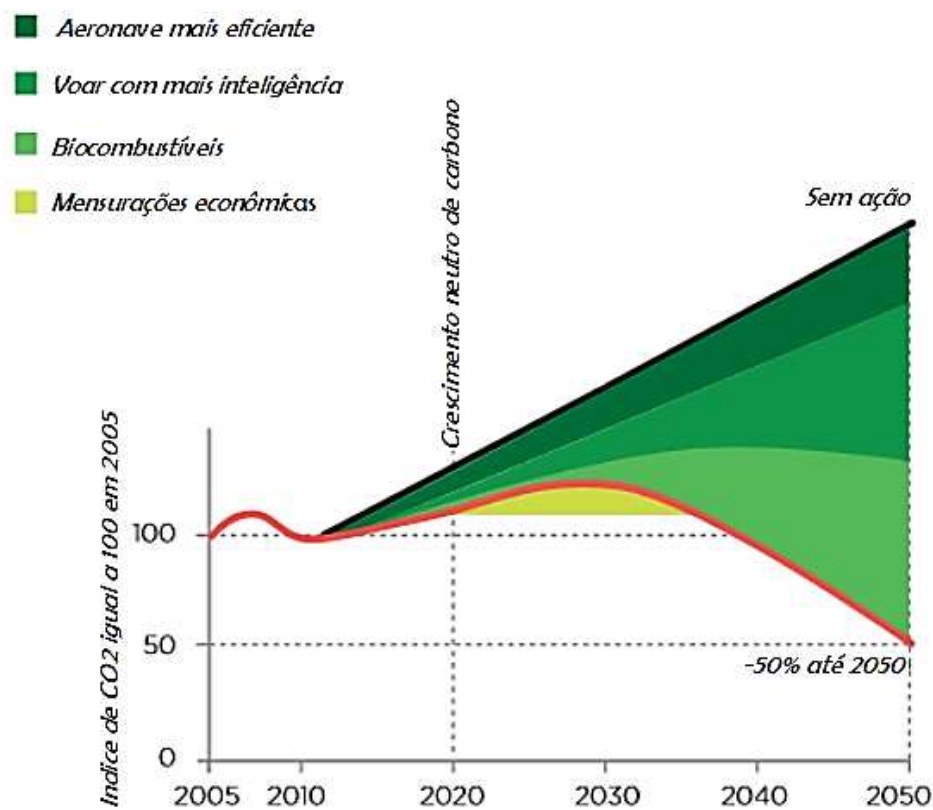
³¹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2015**, [s.l.], 2015.

³² ICAO DATA, **Facts and figures**, disponível em: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Facts-Figures_WorldEconomyData.aspx>, acesso em: 8 dez. 2018.

³³ SCHÄFER, A. W. *et al.* Costs of mitigating CO₂ emissions from passenger aircraft. **Nature Climate Change**, [s.l.] v. 6, n. 4, p. 412–417, 2016.

2020 (CNG2020); (iii) e reduzir as emissões pela metade até o ano de 2050, em comparação com 2005.³⁴

Da Figura 1 é possível observar, em uma linha do tempo, o índice de CO₂ liberado para a atmosfera pelo setor aeronáutico, tal como o monitoramento das emissões a longo prazo. O gráfico apresenta significativas ações aplicáveis ao setor aéreo, com o propósito de alcançar metas estipuladas de crescimento neutro até 2020 e de redução da emissão de GEE em 50% até 2050, tal como os meios utilizados na consecução dos objetivos. Segue disposta também a linha de crescimento de gases, se nenhuma ação mitigadora for tomada.



Fonte: Adaptado do IATA (2013)³⁵

Figura 1. Gráfico da projeção da emissão de CO₂ pelo setor aeronáutico

Embora a BP World Energy (2018) tenha reportado aumento de 1,6% das emissões de carbono referentes ao consumo de energia mundial, comparadas a um crescimento pequeno ou

³⁴ INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **IATA Annual Review 2017**, [s.l.], 2017.

³⁵ IATA; DLR; GEORGIA TECH. Technology Roadmap, in: **SpringerReference**, 4th. ed. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, p. 86.

quase nulo dos anos de 2014 a 2016,³⁶ por aeronaves mais eficientes, voos inteligentes e o desenvolvimento de biocombustíveis no setor aeronáutico, em 2050 as emissões de gases devem atingir no mínimo a metade do nível atual.

O desenvolvimento de combustíveis de aviação sustentável, advindo de matérias-primas renováveis ou recicláveis, é de suprema importância ao alcance dos objetivos referentes às emissões de gases na atmosfera, pois cada combustível de aviação sustentável pode fornecer redução de até 80% nas emissões de carbono ao longo de seu ciclo de vida.³⁴ Ao passo que os combustíveis de fontes renováveis contribuem com questões políticas e ambientais relacionados à redução de GEE, também fomenta a produção de combustíveis ecologicamente sustentáveis de grande importância para um investimento a longo prazo.

2.2.1 Acordo de Paris

Mediante notória necessidade de ações direcionadas a mitigação de GEE juntamente com a limitação do aumento da temperatura global, um acordo realizado em Paris, na 21ª Conferência das Partes (COP21), foi adotado um novo compromisso entre países com o objetivo principal de assegurar a capacidade destes ao enfrentar os impactos ocasionados pelas mudanças climáticas. Em um total de 195 países, os participantes da UNFCCC, incluindo o Brasil, tem como compromisso principal a redução de GEE na busca pelo desenvolvimento sustentável.³⁷

Empregando sua extensa experiência na produção e aplicação de biocombustíveis alternativos, iniciada nos anos de 1975 ao produzir etanol a partir da cana de açúcar mediante o programa PROÁLCOOL, e em 2005 na criação do avião agrícola pela Embraer, desenvolvido especialmente para operar com etanol hidratado³⁸, o Brasil se comprometeu, contudo, a reduzir futuras emissões de GEE e cooperar na busca pelo desenvolvimento sustentável.

Dividido em duas cruciais etapas, o Brasil almeja emitir 37% a menos de GEE até 2025, e em 2030, menos 43%, tendo como parâmetro as emissões registradas no ano de 2005. Na busca pela redução das emissões de gases liberados na atmosfera, o Brasil conta com o aumento

³⁶ BP. **BP Statistical Review of World Energy**, [s.l.: s.n.], 2018.

³⁷ BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **Acordo de Paris**, disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>, acesso em: 24 jul. 2018.

³⁸ GARBIN, R. B.; HENKES, J. A. A sustentabilidade na produção de biocombustíveis de aviação no Brasil, **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 67–104, 2018.

de 18% da utilização de bioenergia sustentável e participação de 45% em energias renováveis na sua matriz energética até o ano de 2030. E mais, deve contar com a restauração e reflorestamento de 12 milhões de hectares de florestas.³⁷

No decorrer do desenvolvimento sustentável, o Brasil propicia crescimento econômico, garantindo a preservação ambiental e o desenvolvimento social para as futuras gerações. Fatores que agregam no progresso dos combustíveis alternativos aéreos, visto que o consumo para esse setor aumenta mediante o avanço econômico.³⁹

2.3 Combustíveis renováveis do setor aéreo

2.3.1 Bioquerosene

O bioquerosene, de acordo com a Lei nº 12.490 de 16 de setembro de 2011, deriva-se da biomassa renovável que possa ser aplicável a turbinas, turbopropulsores aeronáuticos, ou em aplicação que seja possível a substituição de parte ou total o combustível de origem fóssil.⁴⁰

O bioquerosene pode ser produzido por diferentes tipos de biomassas. Os processos utilizados em sua obtenção variam conforme à variedade da matéria prima a ser processada.⁹ Os processos de conversão, podem ser, portanto: (i) mecânico, (ii) bioquímico, (iii) termoquímico, (iv) ou físico-químico. As rotas de conversão mais avançadas, se resumem em 6 caminhos⁴¹:

- (a) Éster e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA)
- (b) Fermentação direta de açúcares para hidrocarbonetos (DSHC)
- (c) Álcool para combustível de aviação (AtJ)
- (d) Biogás para líquido (Bio-GtL)
- (e) Biomassa para líquido (BIT)
- (f) Celulósico despolimerizado hidrotratado para combustível de aviação (HDCJ)

³⁹ ŠIMELYTĖ, A.; DUDZEVICIŪTĖ, G., Consumption of Renewable Energy and Economic Growth, *in: Proceedings of 5th International Scientific Conference Contemporary Issues in Business, Management and Education '2017*, [s.l.]: Vilnius Gediminas Technical University, 2017.

⁴⁰ PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – CASA CIVIL (Brasil), Lei 12.490 de 16 set. 2011.

⁴¹ NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion Routes from Biomass to Biokerosene, *in: NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. (Orgs.), Biokerosene*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 435–473.

As matérias-primas utilizadas para a produção de bioquerosene podem ser inúmeras. As fontes de biomassa incluem (i) subprodutos da silvicultura, como resíduos de floresta e processamento de madeira, florestas de rotação curta; (ii) agricultura, dado por resíduos de culturas, especialmente as de potencial energético, ou resíduos de animais; (iii) resíduos sólidos urbanos de origem orgânica, resíduos de jardim; (iv) resíduos industriais, como os resíduos do processamento de alimento, e sobras de madeira.^{9,42} No anexo 2 encontram-se, de maneira organizada e esquematizada, as matérias primas e seus respectivos processos utilizados na obtenção de combustível alternativo aéreo.

O bioquerosene tem recebido atenção considerável, por estudos acadêmicos e decisões políticas, em razão de notável potencial da redução de GEE.⁸ Segundo Kubičková (2010), quando adicionado ao querosene fóssil, nota-se considerável redução de gases emitidos para a atmosfera devido a uma baixa taxa de emissão na combustão.⁴³ Sendo documentado, a diminuição de gases atribuídos a combustíveis alternativos para jatos nas análises referentes às emissões de GEE de ciclo de vida específicas.^{44,45,46} Em 2013, um estudo obteve que a substituição de 1% em combustível alternativo adicionado aos 99% de querosene mineral, seriam capaz de reduzir de 0,76 a 0,81% nas emissões de CO₂.⁴⁷ Todavia, o bioquerosene produzido a partir da biomassa abre portas para abrandar valores de emissões e também suprir necessidades energéticas no setor da aviação.⁸

Llamas *et al.* (2012) evidenciou a possibilidade de misturas contendo querosene QAV-1 juntamente com *bioquerosene* (FAME), verificando, então, adequabilidade com a norma ASTM D1655 para algumas propriedades do combustível. O bioquerosene utilizado, obtido *via* transesterificação com metanol pelo método clássico de catálise básica homogênea, foi adicionado ao querosene fóssil nas proporções de 5, 10 e 20 vol% utilizando óleos de coco,

⁴² NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment, **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 5, n. 4, p. 367–385, 2015.

⁴³ KUBIČKOVÁ, I.; KUBIČKA, D. Utilization of Triglycerides and Related Feedstocks for Production of Clean Hydrocarbon Fuels and Petrochemicals: A Review. *in: Waste and Biomass Valorization*, [s.l.: s.n.], 2010, p. 293–308.

⁴⁴ SEBER, G. *et al.* Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 67, p. 108–118, 2014.

⁴⁵ STAPLES, M. D. *et al.* Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies. **Energy Environmental Science**, [s.l.], v. 7, n. 5, p. 1545–1554, 2014.

⁴⁶ SURESH, P., **Environmental and economic assessment of transportation fuels from municipal solid waste**, [s.l.], Massachusetts Institute of Technology, 2016.

⁴⁷ HONG, T. D. *et al.* A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process - Experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s.l.], v. 74, p. 124–130, 2013.

palmiste, babaçu e camelina. O FAME da camelina foi misturado ao querosene fóssil sem prévia destilação e os FAMES de coco, palmiste e babaçu submetido à destilação fracionada a vácuo, tendo suas frações de baixo ponto de ebulição misturadas com dois tipos de querosene fóssil. Resultando em misturas interessantes nas proporções de volume acima de 10%.^{17,18}

Utilizando-se de combustível alternativo na busca pela substituição do querosene de aviação, Baroutian *et al.* (2013) analisou misturas de querosene fóssil com bioquerosene de ésteres metílicos de pinhão manso e óleos residuais, obtidos *via* esterificação/transesterificação, nas proporções de 10 e 20 vol%. De acordo com os resultados, obtiveram-se propriedades físico-químicas comparáveis com o combustível de aviação fóssil, com similaridade entre o combustível mineral e misturas com ésteres metílicos.²²

Na busca por biocombustíveis para a substituição do diesel e querosene de aviação, Silva (2015) utilizou o óleo de macaúba, óleo de amêndoa rico em ácido láurico e de baixa acidez, na síntese de biodiesel *via* transesterificação do FAME sobre catalisadores homogêneos utilizando metanol, etanol, isopropanol e isobutanol. Observando assim, viabilidade na substituição do biodiesel comercial convencional devido ganho de desempenho bem documentado, além da possibilidade de misturas, em baixa porcentagem (1%), ao querosene de aviação fóssil.⁴⁸

Um combustível alterativo para a aviação, utilizando óleos de pinhão-manso, babaçu e palmiste, obtidos *via* reação de transesterificação por catálise homogênea seguida da destilação a vácuo, foram adicionados ao QAV-1 em proporções de 5, 10 e 20 vol% na caracterização de potenciais combustíveis para o setor aéreo. As propriedades das misturas contendo 10 vol% apresentaram proximidade as características do querosene fóssil, mostrando-se uma interessante alternativa na substituição parcial do querosene fóssil.¹⁶

As características consideradas, variando de acordo com o interesse de cada autor, citados acima, investigam as propriedades obtidas das mistura de um combustível alternativo renovável advindo de FAMES, adicionado em várias proporções ao querosene mineral utilizado em aeronaves. Das variadas propriedades analisadas, se encontram a viscosidade cinemática, poder calorífico, densidade, ponto de fulgor, ponto de congelamento, lubricidade, ponto de turvação, ponto de fluidez, número de acidez, e conteúdo de água.

⁴⁸ SILVA, L. N.; CARDOSO, C. C.; PASA, V. M. D. Synthesis and characterization of esters from different alcohols using Macauba almond oil to substitute diesel oil and jet fuel, **Fuel**, v. 166, p. 453–460, 2015.

Por intermédio das pesquisas documentadas, observou-se inúmeras propriedades similares entre as misturas querosene:ésteres frente ao combustível aéreo mineral puro. A utilização de ésteres leves de cadeia curta, obtido do biodiesel (FAME), utilizados na mesma faixa de composição química do querosene para a aviação, *via* destilação a vácuo ou filtração do FAME, vantajosamente possui notável potencial de aplicação nos combustíveis aéreos por sua similaridade nas principais propriedades recomendadas pelas normas regulamentadoras de combustíveis aéreos; além do fato de algumas oleaginosas possuírem alta capacidade de produção, ao mesmo tempo que não competem com o setor alimentício, tal como o fruto da macaúba. E mais, a mistura querosene:ésteres contribui no alcance de combustíveis alternativos que auxiliam na redução de gases de efeito estufa emitidos na atmosfera por meio da sua propriedade renovável. Ainda que haja emissões ocasionadas pela exploração do querosene fóssil, na adição de combustível de aviação renovável advindas do FAME, mesmo que em baixas porcentagens, como 1 vol%, os benefícios são notáveis e vantajosos para o meio ambiente, e contudo, à vida.

2.3.2 Exigências de qualidade para o bioquerosene

Para a especificação dos querosenes de aviação alternativos, são adotadas as normas ASTM D7566¹² e ANP 63¹¹, que regulamentam o querosene alternativo: (i) SPK-HEFA, obtido pela hidrogenação e desoxigenação de ésteres de ácidos graxos e ácidos livres, com o objetivo de remover essencialmente o oxigênio; (ii) querosene alternativo SPK-FT, obtido da reação Fischer-Tropsch, usando catalisadores baseados em ferro ou cobalto, e (iii) querosene de aviação alternativo de isoparafinas sintéticas (SIP), a partir de açúcares fermentados hidroprocessados, produzido por hidroprocessamento e fracionamento do farneseno, derivado da fermentação de açúcares. As proporções máximas permitidas para a produção de misturas com QAV-1 são 50 vol%, para SPK-FT e para SPK-HEFA, e 10 vol%, para o SIP.^{11,12}

Segundo a Resolução da ANP 63¹¹, de 5 de dezembro de 2014 (DOU 8 de dezembro de 2014) adota-se a nomenclatura QAV B-X para o combustível composto de um único tipo de querosene de aviação alternativo, misturado ao querosene de aviação QAV-1, no qual o X representa a percentagem em volume de querosene de aviação alternativo na mistura.

Embora existam normas padrões para especificar os combustíveis de aviação alternativos tais como SPK-HEFA, SPK-FT e SIP, citados acima, os biodieseis leves (FAME) compostos de ésteres de cadeias moleculares relativamente curtas (C8 a C14), obtidos por

transesterificação e subsequente destilação ou filtração, não se aplica a qualquer norma existente, seja puro ou em misturas com o querosene de aviação fóssil disponível no mercado atual. As misturas de querosene de aviação com ésteres leves são caracterizadas conforme norma padrão direcionada aos querosenes de aviação QAV-1, dispostas nas normas ASTM D1655⁸⁵ e ANP 37⁸⁶.

Combustíveis alternativos devem ter características que atendam as recomendações técnicas oficiais para os combustíveis de aviação, como por qualquer mistura ao querosene mineral, devendo sem exigir modificação de adequação do motor da aeronave.⁴⁹ Algumas características relevantes são alto poder calorífico, estabilidade térmica, volatilidade adequada, baixo ponto de congelamento, estabilidade química, baixa corrosividade e não conter água em solução.^{50,51} De acordo com Gutiérrez (2018), características como o baixo ponto de congelamento e o poder calorífico (entalpia de combustão) são requisitos básicos para um combustível de aviação.⁵²

Propriedades cruciais relacionadas à operação segura da aeronave são o ponto de fulgor e o ponto de congelamento do combustível. O ponto de fulgor é criticamente importante, por ser a menor temperatura que o líquido produz vapores, cuja ignição espontânea se obtém por uma faísca⁵³, indicando o potencial para incêndio e explosão de um combustível.

O ponto de congelamento e a viscosidade influenciam a taxa de escoamento contínuo a baixa temperatura, pois voos em altas altitudes podem alcançar temperaturas relativamente muito baixas, de até algumas dezenas de graus Celsius abaixo de zero. Relaciona-se, assim, o ponto de congelamento à temperatura na qual se inicia a formação de cristais de parafinas do querosene, enquanto que a viscosidade reflete a medida da resistência do fluido no escoamento.²⁷

Dentre as principais características necessárias de um combustível aéreo nos padrões da normatização, está o poder calorífico. O poder calorífico relaciona-se ao desempenho da

⁴⁹ EUROPEAN EXPERT GROUP ON FUTURE TRANSPORT FUELS. **Future Transport Fuels**. [s.l.] p. 1–81, 2011.

⁵⁰ NYGREN, E.; ALEKLETT, K.; HÖÖK, M. Aviation fuel and future oil production scenarios. **Energy Policy**, [s.l.], v. 37, n. 10, p. 4003–4010, 2009.

⁵¹ MOHAMMAD, M. *et al.* Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 22, p. 121–132, 2013.

⁵² GUTIÉRREZ, J. *et al.* Biofuels from cardoon pyrolysis: Extraction and application of biokerosene/kerosene mixtures in a self-manufactured jet engine, **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v. 157, p. 246–256, 2018.

⁵³ HILEMAN, J. I.; STRATTON, R. W. Alternative jet fuel feasibility, **Transport Policy**, v. 34, p. 52–62, 2014.

aeronave, visto que seu rendimento depende primordialmente da disponibilidade de uma quantidade mínima de energia em forma de calor. Se a quantidade de energia é baixa, o consumo de combustível aumenta, conseqüentemente ocasiona uma redução na distância de voo.¹⁷

Pontos fundamentais para voos de aeronaves de longo alcance, com eficiência do combustível, relacionam-se à densidade energética e à energia específica, propriedades críticas do combustível para o desempenho do motor. A lubricidade e a proporção de compostos aromáticos podem determinar a necessidade de eventuais adequações do motor.⁵³

Requisitos técnicos relacionados às especificações de segurança e à qualidade dos combustíveis utilizados devem, portanto, focar no alto desempenho, sem comprometer a segurança das aeronaves.⁸⁵ O combustível de aviação alternativo composto em mistura do querosene fóssil com o biodiesel leve, por sua vez, deve atender rigorosas metas de desempenho energético tal como se enquadrar nas recomendações estipuladas pelas normas de qualidade, preservação mecânica do motor propulsor e baixas consequências ambientais, na exaustão dos gases da combustão. E mais, ser economicamente vantajoso, se comparado ao querosene fóssil, sem competir diretamente com a produção de alimentos.⁵⁴

2.4 Cenário brasileiro

A era dos combustíveis alternativos para a aviação, no Brasil, teve início nos anos 80. Por exemplo, o Núcleo de Fontes Não Convencionais de Energia - Universidade Federal do Ceará - coordenado pelo engenheiro químico Expedito José de Sá Parente, produziu o biodiesel de coco, dendê e babaçu misturados ao querosene de aviação convencional pela primeira vez em uma porcentagem de 10%/v. Resultando na concessão da Patente PI 8007957-1, da mistura combustível conhecida como PROSENE. O prosene foi utilizado pela aeronave que, em 1983, decolou de São José dos Campos a Brasília.^{55,56} De qualquer modo, de alguns dados analíticos, o prosene apresentava viscosidade, poder calorífico e vapor de pressão semelhantes ao QAV-1 mineral.

⁵⁴ BUCHSPIES, B.; KALTSCHMITT, M. Sustainability Aspects of Biokerosene. *in: Biokerosene*, [s.l.: s.n.], p. 325–373, 2017.

⁵⁵ SIMÕES, A. F. **O transporte aéreo brasileiro no contexto de mudanças climáticas globais: emissões de CO₂ e alternativas de mitigação**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

⁵⁶ GONÇALVES, F. R.; BORGES, L. E. P.; FRAGA, M. A. Combustíveis de aviação: Perspectivas e futuro, **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, [s.l.], v. 28, p. 15–23, 2011.

Com o objetivo de promover iniciativas públicas e privadas que buscassem o desenvolvimento e a certificação de biocombustíveis sustentáveis com níveis satisfatórios de segurança, tal como competitividade frente ao combustível de origem fóssil, em 2010 foi fundado a ABRABA, Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação, instituição formada pelas maiores companhias aéreas brasileiras.⁵⁷

Em outubro de 2013 foi utilizado pela primeira vez no Brasil o combustível SPK com padrões de qualidade referentes aos estabelecidos na Resolução ANP 20⁵⁸. Do aeroporto de São Paulo com destino ao de Brasília, Congonhas e Internacional Juscelino Kubitschek respectivamente, a aeronave da companhia Gol Linhas Aéreas levantou voo com combustível parafínico, produzido a partir de óleos vegetais ou gordura animal como matéria-prima, fonte de ácidos graxos. Embora outras companhias aéreas, como TAM, Azul e a própria Gol já houvessem levantado voo experimental com esse biocombustível, foi marcado pela primeira vez a ser realizado com passageiros na aeronave.⁵⁹

A busca por novas formulações de combustíveis alternativos para a aviação tem estimulado as alternativas tecnológicas e os testes em voos, com o intuito de se desenvolver materiais líquidos carburantes renováveis e sustentáveis. O propósito principal, no entanto, é o de mitigar o crescimento do uso de combustíveis fósseis.^{60,61}

2.5 Matérias-primas para a produção de bioquerosene

As principais fontes de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, com potencial para substituir o querosene de origem fóssil, são substancialmente as advindas de óleos vegetais e matérias açucaradas que no processo de produção obtém-se o bioquerosene, essencialmente as que não conflitam com o consumo alimentício.³⁰

⁵⁷ABRABA. **Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação**. Disponível em: <<http://www.abraba.com.br/pt-BR/Paginas/home.aspx>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

⁵⁸AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 20, de 24.6.2013. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 Jun. 2013 – RETIFICADO 17 Jul. 2013.

⁵⁹UBRABIO. **Bioquerosene no céu do Brasil: A Ubrabio faz parte do pioneirismo brasileiro na aviação sustentável**. Disponível em: <<https://ubrablo.com.br/?s=A+Ubrabio+faz+parte+do+pioneirismo+brasileiro+na+aviacao+sustentavel&cat=0>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

⁶⁰CREMONEZ, P. A. *et al.* Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 43, p. 1063–1072, 2015.

⁶¹FEROLDI, M. *et al.* Environmental, economic and social impact of aviation biofuel production in Brazil. **New Biotechnology**, v. 32, n. 2, p. 263–271, 2015.

As matérias primas obtidas dos óleos vegetais, que se destacam para a produção de bioquerosene, são, portanto as oleaginosas com grande potencial na produtividade de óleo de composição rica em ácido láurico (C12). As propriedades físicas, químicas e nutricionais dos óleos dependem do número de átomos de carbono e distribuição na moléculas do triacilglicerol que a compõem. Variando o perfil dos ácidos graxos com a variedade da oleaginosa e fatores de cultivo a qual foi submetido, como clima, solo e adubação.⁶² Alguns ácidos graxos frequentes na composição química dos óleos advindos das espécies palmáceas são: ácido caprílico (8:0), ácido cáprico (10:0), ácido láurico (12:0), ácido mirístico (14:0), ácido palmítico (16:0), ácido palmitoleico (16:1), ácido esteárico (18:0), ácido oleico (18:1), ácido vaccênico (18:1 cis11), ácido linoleico (18:2), ácido linolênico (18:3) e ácido araquídico (20:0).⁶³

2.5.1 Óleo de macaúba (*Acrocomia aculeata*)

A macaúba é uma palmeira com significativo potencial para a produtividade de óleo e não explorada para fins alimentícios, com capacidade de produção de 6,2 ton/ha. Nativa da América Central e Sul mostra-se uma interessante alternativa devido seu grande potencial na produção de biocombustíveis, principalmente para os usados na aviação.⁶⁴

A macaúba, taxonomicamente, tem como nome científico *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart,⁶⁵ descrita pela primeira vez em 1763 por Jacquin pelo basônimo *Cocos aculeatus* Jacq. Inserida em 1824 no gênero *Acrocomia* por Martius e caracterizada como *Acrocomia sclerocarpa*. Designada em 1845 por Loddiges, por motivos de sinonímia, *Acrocomia aculeata*.⁶⁶

Vantajosamente a macaúba 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

⁶² ARAÚJO, L. A. **Estudo Das Propriedades Físicas, Químicas e Termofísicas de Óleos Regionais e Suas Misturas**, 2008.

⁶³ MEYER, J. M. **Teor e composição de ácidos graxos de óleos de frutos de palmeiras nativas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2013.

⁶⁴ DE LANES, É. C. M.; DE ALMEIDA COSTA, P. M.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels, *Nature*, v. 511, n. 7507, p. 31, 2014.

⁶⁵ GRIN – GERMLASM RESOURCES INFORMATION NETWORK. **Taxonomia das plantas da GRIN**, disponível em: <<https://www.ars-grin.gov/>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

⁶⁶ COSTA, C. F. **Solos e outros fatores ambientais associados à diversidade fenotípica de macaubais no estado de São Paulo**, Instituto Agrônomo, Campinas, 2009.

conservar a qualidade por um período mais longo quando comparado a outras oleaginosas.⁶⁷ Abrangendo viabilidade econômica, em seu cultivo, em diferentes sistemas de produção.⁶⁸ De acordo com Biodieselbr (2012) após aproximadamente 5 anos do plantio, obtém-se o fruto, este capaz de produzir ao longo de 50 anos ou mais.⁶⁷

A macaúba se destaca frente a outras oleaginosas devido seu grande potencial na produção de óleo, capaz de produzir até seis vezes a mais que a soja.⁶⁹ Com pontos negativos ao apresentar característica rústicas em sua altura, podendo atingir até 20 metros, que dificulta a extração do fruto localizado em seu topo.⁷⁰

Da palmácea pode se aproveitar o palmito, muito consumido atualmente nas regiões de maior incidência. Dispostas isoladas ou em povoamentos naturais, encontra-se em Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Piauí e Ceará. Sendo também encontradas em alguns outros países, como Argentina, Colômbia, Venezuela, Bolívia, Costa Rica, Honduras, México, e Haiti.⁷⁰

O fruto da macaúba, principal matéria-prima na produção do óleo, tem coloração marrom-amarelado, esférico ou ligeiramente achatado, mede de 3,5 – 5,0 cm de diâmetro. Composta por casca, polpa, endocarpo e amêndoa, tem como característica uma amêndoa oleaginosa e polpa, amarela ou esbranquiçada, rica em óleo, fibra e mucilagem.⁶⁶

A polpa contém em sua composição 53% de ácido oleico e 19% de palmítico, enquanto a amêndoa possui 44% de ácido láurico e 26% oleico. Sendo a amêndoa responsável por 15% da totalidade do óleo extraída do fruto.⁷¹ O fruto da macaúba (Figura 2) possui em média em sua composição expressa em porcentagem, 38% mesocarpo (polpa), 34% endocarpo, 21% epicarpo (casca), e 7% amêndoa.⁷⁰

⁶⁷ BIODIESELBR. **Silvicultor apresenta projeto de plantio de macaúba em Tocantins**. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macauaba/silvicultor-projeto-plantio-macauaba-tocantins-060212.htm>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

⁶⁸ PORTAL DA MACAÚBA. **Macaúba: cultura, botânica, sistemas de cultivo, industrialização e produtos**. Disponível em: <<http://www.portalmacauaba.com.br/2015/05/macauaba-cultura-botanica-sistemas-de.html>>. Acesso em: 25 set. 2017.

⁶⁹ MELO, P. G. **Produção e caracterização de biodieseis obtidos a partir da oleaginosa macaúba (Acrocomia aculeata)**. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

⁷⁰ CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba. **Macaúba Acrocomia aculeata (Jacq.) Lood. ex. Mart.**, p. 35, 2011.

⁷¹ BHERING, L. Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel. **Embrapa Agroenergia**, [s.l.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24055/1/MACAUABA-MATERIA-PRIMA-NATIVA-COM-POTENCIAL-PARA-PRODUCAO-DE-BIODIESEL.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.



Fonte: Adaptado de APROBIO (2018)⁷²

Figura 2. Fruto da macaúba (*Acrocomia aculeata*)

O óleo da amêndoa da macaúba possui alto potencial para a produção de óleo visto a maior quantidade de óleo concentra-se nessa área, de 40 a 50%, enquanto a polpa apresenta apenas 27% do teor óleo extraído. Além do mais, a umidade na amêndoa apresenta-se em uma menor porcentagem. O teor de óleo e umidade contidos na amêndoa e na polpa encontram-se na tabela 3.

Tabela 3. Teor de óleo e umidade a partir da extração do óleo da macaúba

Matéria-prima	Material utilizado para extração de óleo	Teor de óleo (%)	Umidade (%)
Macaúba	Polpa	20-27	70-80
	Amêndoa	40-50	<10

Fonte: Embrapa Agroindústria de Alimentos (2018) *apud* EGEITEC (2018)⁷³

O óleo da amêndoa da macaúba é rico em ácido láurico e com alta concentração de ácidos graxos saturados, o que representa uma vantagem na utilização desses óleos para produção de biocombustível para a aviação, visto que o interesse está nas oleaginosas ricas em ácidos graxos de cadeia carbônica entre 8 e 16 carbonos. O interesse pela macaúba fomenta pesquisas no âmbito de questões desconhecidas da oleaginosa e também o desenvolvimento de novas tecnologias para fins de exploração sustentável.⁷² Embora a macaúba possua grande potencial para a produção de óleo, seu cultivo, extração e assuntos correlacionados a sua produção devem ser ainda abordados para o seu máximo aproveitamento.

⁷² APROBIO. **Os 20 Benefícios da Macaúba Para a Saúde**. Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/2018/03/05/os-20-beneficios-da-macauba-para-a-saude/>>. Acesso em: 6 maio 2018.

⁷³ ANTONIASSI, R.; FREITAS, S. C. **Processamento**. AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000gc8yujq302wx5ok01dx9lcx1g7v3u.html>. Acesso em: 3 set. 2018.

2.5.2 Óleo de palmiste (*Elaeis guineenses*)

O óleo de palmiste, obtido da amêndoa do fruto da palmeira de origem africana *Elaeis guineenses*, se destaca devido grande potencial para a produção de óleo, atingindo rendimentos de até 25 toneladas de cachos/ha dentro de um ciclo produtivo de 25 a 30 anos.⁷⁴ Tipicamente a produção do óleo, de palma e palmiste, tem produção de 4,0 a 4,5 ton/ha ao ano, podendo atingir 5,5 a 7,0 ton/ha, se em plantações bem gerenciadas.⁷⁵ Mostrando-se uma interessante possibilidade na produção de combustível aéreo por ser rico em ácido láurico (C12) e com alta concentração de ácidos graxos saturados.

O fruto da palmeira, representado na Figura 3, nomeado dendê, chegou no Brasil no século XVI e adaptou-se no litoral sul da Bahia. De cultura perene, seu desenvolvimento está vinculado a regiões tropicais de clima quente e úmido, com precipitação elevada e bem distribuída ao longo do ano. A palmeira produz cachos de frutos maduros durante todo o ano. Embora haja períodos de maior ou menor produtividade, o peso do cacho pode variar entre 10 a 20 kg, com quantidade de frutos acima de 1500 (Crepaldi, 2006 apud Marzullo, 2007).⁷⁶



Fonte: Seed Gallery (2012)⁷⁷

Figura 3. Fruto da palmeira (*Elaeis guineenses*)

⁷⁴ RODELLI, M. C. **Produção de biodiesel a partir de óleo de palma**, Trabalho de conclusão de curso, Campo Mourão: [s.n.], 2016.

⁷⁵ ZIMMER, Y. Competitiveness of rapeseed, soybeans and palm oil, **Journal of Oilseed Brassica**, v. 1, n. 2, p. 84–90, 2010.

⁷⁶ MARZULLO, R. C. M. **Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, Visando a Produção de Biodiesel**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

⁷⁷ SEED GALLERY. **Sementes de palmeira-de-óleo-africana (*Elaeis guineensis*)**. Disponível em: <<https://www.seeds-gallery.shop/pt/home/sementes-de-palmeira-de-oleo-africana-elaeis-guineensis.html>>. Acesso em: 2 ago. 2018.

Da fruta dendê é possível a extração de dois tipos de óleos: o óleo da palma, extraído da parte externa do fruto (polpa), nomeado mesocarpo, e o óleo de palmiste, obtido da amêndoa localizada no interior do fruto.⁷⁶ Internacionalmente nomeiam-se palm oil e palm kernel oil, respectivamente. Na tabela 4 encontram-se seus respectivos teores de óleo, e também sua umidade.

Tabela 4. Teor de óleo e umidade a partir da extração do óleo do fruto dendê

Matéria-prima	Material utilizado para extração de óleo	Teor de óleo (%)	Umidade (%)
Dendê	Polpa	25-27	70-80
	Amêndoa	40-50	<10

Fonte: Embrapa Agroindústria de Alimentos (2018) *apud* EGEITEC (2018)⁷³

Segundo colaboradores,^{78,79,80,81} o óleo de palmiste, extraído da amêndoa, possui grande potencial para a produção de biodiesel, tal como para o bioquerosene, por seu alto teor de óleo (40 - 50%), frente aos 20 - 22% obtidos na polpa. Além da vantagem da umidade da amêndoa ser menor quando comparada a umidade obtida na polpa, com valor abaixo de 10%.⁷³

2.5.3 Potencial mundial da produção do óleo da macaúba e do palmiste

A capacidade global da matéria prima explorada na produção de um combustível alternativo renovável, faz-se eminente visto que sua obtenção deve atingir grandes quantidades no abastecimento da demanda energética global, se comprovada sua adequabilidade em misturas com o querosene fóssil. Como base comparativa, de acordo com Zelt (2018), na substituição de 5% da demanda global em combustível aéreo mineral por derivados de matéria prima renovável, mais especificamente, pelos óleos vegetais hidrotratados, nomeado pela sigla internacional HVO (hydrotreated vegetable oil), equivaleria a 8% da demanda total dos óleos

⁷⁸ BARBOSA, D. M.; NAOE, L. K.; ZUNIGA, A. D. G. **Avaliar o teor de lipídios em sementes de soja cultivadas no Estado de Tocantins**, in: , Palmas-TO: In: 14º Jornada de Iniciação Científica da UNITINS, p. 32–37, 2007.

⁷⁹ ESPINDOLA, S. M. C. G. *et al.* **Avaliação do teor de óleos e da produtividade em linhagens de soja para cultivo no Cerrado**, in: IX Simpósio Nacional Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais. Brasília: Embrapa. CD-ROM 1, 2008.

⁸⁰ FEROLDI, M.; CREMONEZ, P.A.; ESTEVAM, A. Dendê: do cultivo da palma à produção de biodiesel. Revista Monografias Ambientais, **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - Universidade Federal de Santa Maria**, v. 13, n. 5, p. 3800–3808, 2014.

⁸¹ MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA; PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário Estatístico da Agroenergia 2010**, Brasília: [s.n.], 2010.

vegetais, calculado em no mínimo 10 milhões de toneladas ao ano.⁸² O que enfatiza aproximadamente, o potencial necessário de uma oleaginosa, na substituição de uma parcela em porcentagem do querosene fóssil por derivados de óleos vegetais.

Macaúba

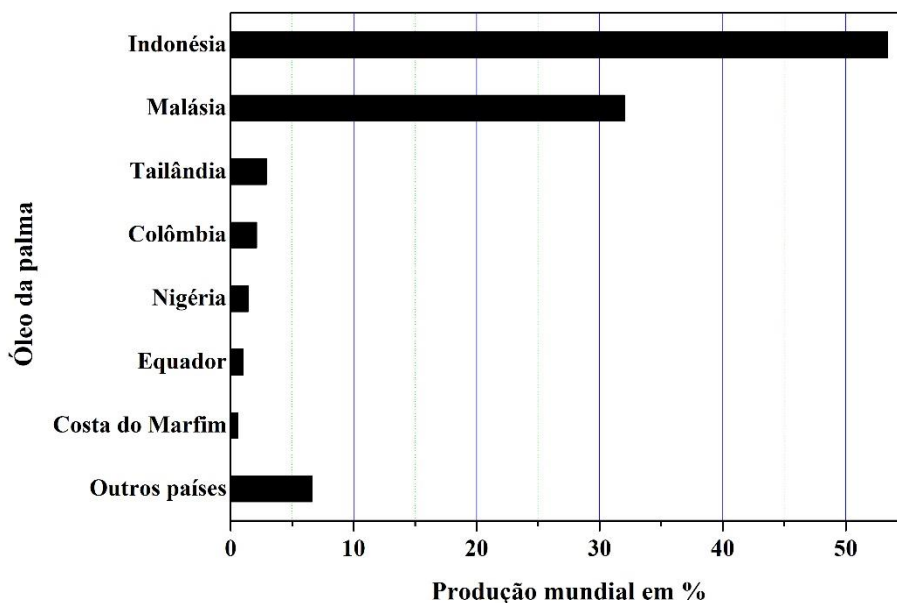
O potencial de produção mundial da macaúba, atualmente, não é concreto. Porém, a macaúba faz-se uma interessante matéria prima na obtenção de óleo vegetal para a produção de combustível renovável, propriamente dito, para a produção de biocombustíveis utilizados no setor aéreo, diante sua elevada capacidade de produção de óleo, calculada entre 1500 a 2000kg/ha ao ano.⁸² Entretanto, fatores econômicos, sociais e ambientais ainda fazem parte dos assuntos relacionados à sua produção.⁸²

Palmiste

Dentre as principais oleaginosas mais consumidas mundialmente, o óleo da palma é um dos óleos mais importantes no mercado global, destacando-se no crescimento dinâmico diante a produção e exportação. O óleo da palma, atualmente, é consumida e importada por mais de 150 países ao redor do mundo. No ano de 2015, foi contabilizado um total de 62,5 milhões em toneladas de óleo da palma produzidos pelos países contidos na Figura 4. Sendo consumidos mundialmente, relacionado ao mesmo ano da produção, um total de 61,1 milhões em toneladas de óleo, distribuídos em 15,1% na Índia, 11,9% na Indonésia, 11,8% nos Estados Unidos, 9,7% na China, 4,7% na Malásia, 4,1% no Paquistão, e 42,7% em outros países.⁸³

⁸² ZELT, T. “New” Oil Plants and Their Potential as Feedstock for Biokerosene Production, *in*: NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. (Orgs.), **Biokerosene**, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 277–301.

⁸³ MIELKE, T. World Markets for Vegetable Oils and Animal Fats, *in*: KALTSCHMITT, M.; NEULING, U. (Orgs.), **Biokerosene**, Hamburg, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 147–188.



Fonte: adaptado de Mielke (2018)⁸³

Figura 4. Produção mundial do óleo de palma

Na última década, a produção de óleo de palma teve um aumento de aproximadamente o dobro comparado a soja, contabilizando em 6,3% frente aos 3,8% da soja. Em 2015, a produção total de óleo de palma e palmiste foram de 6,3 e 5,9 milhões de toneladas, respectivamente. Para a produção de palmiste, o crescimento foi de 5,9%, datados de 2005 a 2015.⁸⁴ Segundo Mielke (2018), os últimos 10 anos foram caracterizados pela era dos biocombustíveis, relacionando se, então, ao elevado crescimento em produção e consumo das principais fontes de produção de etanol e biodiesel.

Contudo, o óleo de palmiste apresenta grande potencial para a produção de combustível renovável direcionado ao setor aéreo, tal como o óleo da macaúba, que embora não tenha sua produção total definida, mostra-se uma interessante oleaginosa na produção de combustíveis renováveis alternativos para o setor do transporte aéreo.

⁸⁴ OIL WORD. Data Bank and publications of ISTA Mielke GmbH, disponível em: <<https://www.oilworld.biz/>>, acesso em: 4 ago. 2018.

3 JUSTIFICATIVA

A busca por novos combustíveis renováveis, na resposta à crescente demanda energética e às questões da preservação ambiental, reafirma o interesse do desenvolvimento de combustíveis aéreos alternativos, sobretudo os derivados da biomassa, para comporem misturas com ou mesmo substituir integralmente os combustíveis fósseis.

4 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é o de caracterizar dois tipos de biodiesel leve separados por destilação fracionada sob pressão atmosférica, para confirmar a adequabilidade às especificações técnicas vigentes, e às suas potencialidades de uso como combustíveis de turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos, por mistura ao querosene mineral de aviação.

4.1 Objetivos específicos

Avaliar e identificar as propriedades de misturas de 5, 10 e 20 vol% de biodiesel (FAME) leve dos óleos de macaúba ou de palmiste em querosene de aviação QAV-1, nomeados pela sigla QAV BL e suas respectivas porcentagens. As propriedades dos biocombustíveis terão por base as características comuns entre o QAV-1 e o biodiesel leve puro de ambos os óleos, nomeados pela sigla BL100. As propriedades sob análise são: densidade, destilação sob influência da temperatura, análise térmica (termogravimetria e calorimetria diferencial), ponto de congelamento, ponto de fulgor e poder calorífico. Os valores encontrados serão comparados aos parâmetros de qualidade dispostos nas normas ASTM D1655⁸⁵ e ANP 37⁸⁶, que dispõem sobre as recomendações relativas aos combustíveis (na denominação internacional, Jet A ou Jet A-1; no Brasil, QAV-1) utilizados em turbinas de avião.

⁸⁵ ASTM D1655 – 16C. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–20, 2016.

⁸⁶ AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP N° 37, de 1.12.2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 dez. 2009.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O combustível de aviação alternativo utilizado neste experimento, cedido pelo Dr. Luíz Vitor Leonardi Harter da Universidade Federal de Uberlândia de Minas Gerais, foi obtido a partir da transesterificação dos óleos da amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeate*) e do palmiste (*Elaeis guineensis*), individualmente transesterificados com metanol *via* reação clássica sob catálise alcalina homogênea na produção do biodiesel (FAME), submetido à destilação para obtenção de frações enriquecidas em ésteres de cadeia molecular curta, variando de C8 a C14, nomeado biodiesel leve, para serem misturadas sem a adição de qualquer aditivo com o combustível de jato mineral convencional. Em resumo, os triacilgliceróis de ambas oleaginosas foram utilizados individualmente como matéria-prima para a produção de ésteres metílicos: 250 mL de biodiesel foram submetidos a destilação fracionada sob pressão atmosférica, sendo recuperados seis consecutivas frações de 25 ml cada, correspondente a 60% do volume inicial do biodiesel submetido à destilação. O biodiesel leve, portanto, é constituído das cinco primeiras frações recuperadas por meio da destilação fracionada, obtido na faixa de temperatura entre 110 a 224 °C para o destilado de macaúba, e de 110 a 213 °C para o de palmiste.

5.1 Cromatografia

Análises por cromatografia foram realizadas nas amostras do FAME inicial obtido *via* transesterificação, destilado total e resíduo de fundo na determinação do tamanho das cadeias carbônicas dos ésteres presentes nos biodiesel leve de macaúba ou palmiste, tal como sua respectiva porcentagem final obtida. As análises foram realizadas de acordo com a Norma Europeia EN 14103 por meio de cromatografia a gás HP7820A com detector por ionização de chamas, documentado na tabela 5. Na análise, foi utilizado a coluna HP INNOWAX 15m x 0,25mm x 0,25µm, sob gradiente de temperatura a 70 °C; aquecendo a 10 °C min⁻¹ até a temperatura final de 220 °C. O injetor utilizado foi o split 1/50 a 250 °C com detector a 260 °C, com volume de injeção de 1µL. O gás de arraste utilizado para esta análise foi o hidrogênio, com proporção de 3 mL min⁻¹.

5.2 Misturas

As amostras de misturas de biodiesel leve de macaúba ou palmiste nas porcentagens contendo 5, 10 e 20 vol% com querosene de aviação QAV-1 (QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20) foram preparadas de acordo com os procedimentos padrões volumétricos, utilizando-se o biodiesel leve adicionado ao querosene de aviação QAV-1. Para melhor distinção, as letras M e P designam biodiesel leve de macaúba e de palmiste, respectivamente.

Amostras de biodieseis leves, nomeados pela sigla BL100 M e BL100 P, fazem parte das misturas que não contém QAV-1 em sua composição.

Na tabela 9 estão dispostos os resultados das propriedades para todas as misturas de combustível com 5, 10 e 20 vol%, tal como os respectivos métodos para avaliação dos parâmetros e equipamentos utilizados.

5.3 Conteúdo de água

A análise do teor de umidade das misturas com biodiesel leve nas proporções de 5, 10 e 20 vol% adicionado ao querosene de aviação QAV-1, BL100 P e BL100 M, foram realizadas por meio do método de Karl Fischer, com determinação direta do conteúdo de água na gama de 10 a 25000 mg L⁻¹. Na Figura 5 foram dispostos os resultados obtidos.

5.4 Massa específica a 20 °C

Na determinação da massa específica, todas as misturas de combustíveis investigadas foram analisadas utilizando o método ASTM D1298 contida na Resolução brasileira ANP 37⁸⁶. Na investigação, as amostras foram resfriadas a temperatura de 20 °C e realizada a leitura *via* densímetro, nomeado picnômetro. Os resultados seguem organizados na Figura 6.

5.5 Destilação

As amostras de misturas QAV BL de 5, 10 e 20% em volume de macaúba e palmiste, BL100 P e BL100 M foram obtidas por meio do método ASTM D86, cujas análises foram submetidas à pressão atmosférica. Os resultados foram organizados nas tabelas 6 e 7, e demonstrado em formato de gráfico na Figura 7 *via* programa OriginPro 8.

5.6 Análise térmica - Termogravimetria (TGA)

As amostras das misturas de combustível e BL100 de ambas as matérias-primas, macaúba e palmiste, foram submetidas a análise termogravimétrica com analisador térmico DTG-60H no intuito de avaliar a relação de perda de massa no decorrer da variação de temperatura. As amostras foram analisadas iniciando-se na temperatura de 25 °C até 600 °C sob atmosfera inerte (N₂) e oxidativa (ar) sob fluxo de 50 mL min⁻¹, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. As curvas obtidas na análise de TGA foram determinadas nas Figuras 8 e 9, construído *via* programa OriginPro 8.

5.7 Análise térmica - Calorimetria (DSC)

As misturas e os biodieseis leves puros foram submetidos a análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) com o objetivo de determinar seus respectivos pontos de fusão. As amostras, utilizando propanona e nitrogênio líquido, foram submetidas ao resfriamento até a temperatura -60 °C, dado como ponto inicial da análise. Para obtenção dos resultados, a amostra foi aquecida a uma taxa de aquecimento de 5 °C por minuto até a temperatura de 10 °C, ponto final do experimento. Os gráficos referentes à análise DSC compõem as Figuras 10, 11 e 12, construídas no programa OriginPro 8.

5.8 Ponto de congelamento

Pelos gráficos de fluxo de calor em função da temperatura, contido na Figura 13 e 14, obtidos *via* análise térmica de Calorimetria (DSC), foi possível analisar o ponto de congelamento de cada amostra, abrangendo todas as misturas e biodieseis leves puros. Embora a leitura não seja designada pela norma que regulamenta os parâmetros de qualidade do combustível de aviação, é possível por meio desta, identificar os pontos de congelamento.

5.9 Ponto de fulgor

A análise experimental do ponto de fulgor, dispostos na Figura 15, foram aplicadas nas amostras de misturas de biodiesel leve com QAV-1, tal como para o BL100 P e BL100 M. O método utilizado neste experimento foi a D56, especificado por ambas normas ANP e ASTM. Para uma maior precisão dos resultados foram adotados os parâmetros de repetibilidade e

reprodutibilidade disposta no método utilizado. Segundo o método de teste D56 para amostras com ponto de fulgor abaixo de 60 °C, adotou-se $\pm 1,2$ °C na repetibilidade e $\pm 4,3$ °C para a reprodutibilidade.

5.10 Poder calorífico

Na determinação do poder calorífico das misturas QAV BL nas porcentagens de 5, 10 e 20 vol% de biodiesel leve, juntamente com as amostras de BL100 P e BL100 M, utilizou-se o método D4529 por meio do Resfriador de água Chiller IKA KV600, acoplado a calorímetro IKA C2000.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização do biodiesel leve

A caracterização dos óleos de macaúba e palmiste, obtidos por meio dos resultados anteriormente investigados pelo coorientador desta dissertação, Luiz Vitor Leonardi Harter, foram reportadas abaixo para uma maior compreensão químico-física dos biodieseis leves aqui utilizados. Os resultados obtidos por análise cromatográfica estão dispostos na Tabela 5, cujos perfis referem-se a porcentagem dos ésteres e suas respectivas cadeias carbônicas contidas nas amostras de biodiesel, biodiesel leve após destilação atmosférica, e resíduo da destilação. Os teores em porcentagem de ésteres foram classificados na Figura 5 de acordo com perfil químico da amostra.

Tabela 5. Perfil FAME dos biodieseis, biodieseis leves e resíduos dos óleos de macaúba e palmiste

Teor (%)	Biodiesel (Macaúba)	Biodiesel (Palmiste)	Biodiesel leve (Macaúba)	Biodiesel leve (Palmiste)	Resíduo (Macaúba)	Resíduo (Palmiste)
Caprilato de metila, C8:0						
Caprato de metila, C10:0	60,16	72,85	81,20	81,21	9,14	22,70
Laurato de metilo, C12:0						
Miristato de metilo, C14:0						
Palmitato de metilo, C16:0						
Estearato de metilo, C18:0	39,84	27,15	18,80	18,65	90,86	77,30
Oleato de metilo, C18:1						

As porcentagens dos ésteres em relação ao tamanho da cadeia carbônica, dispostos acima, mostram que houve uma concentração de átomos de carbono de cadeia curta, entre 8 a 14, após a destilação do biodiesel de ambas oleaginosas. Apresentando eficiência de 35% na concentração dos ésteres derivado da macaúba e 11,5% para o palmiste. Ao passo que os ésteres de cadeia curta se concentraram, os de cadeia longa reduziram, representando eficiência de 53% para a macaúba e 31% para o palmiste. Resultando assim em um perfil de resíduo satisfatório, com baixa concentração de ésteres leves e alto valor em ésteres de cadeia longa.

Devido à concentração de ésteres de cadeia curta por meio da destilação, o biodiesel leve apresenta-se apropriado para a produção de bioquerosene (FAME) advindas da macaúba ou palmiste já que os ésteres de cadeia longa, C16 a C18:1, não ultrapassam os 20 vol%. O tamanho da cadeia carbônica está relacionado a pontos críticos do querosene de aviação

alternativo devido sua interferência em propriedade como o ponto de congelamento, dos quais a porcentagem de ésteres leves são de suprema importância para baixos pontos de congelamento.

Com maior detalhamento, os teores em porcentagem de ésteres presentes em cada amostra (biodiesel, biodiesel leve e resíduo) foram organizados na figura abaixo.

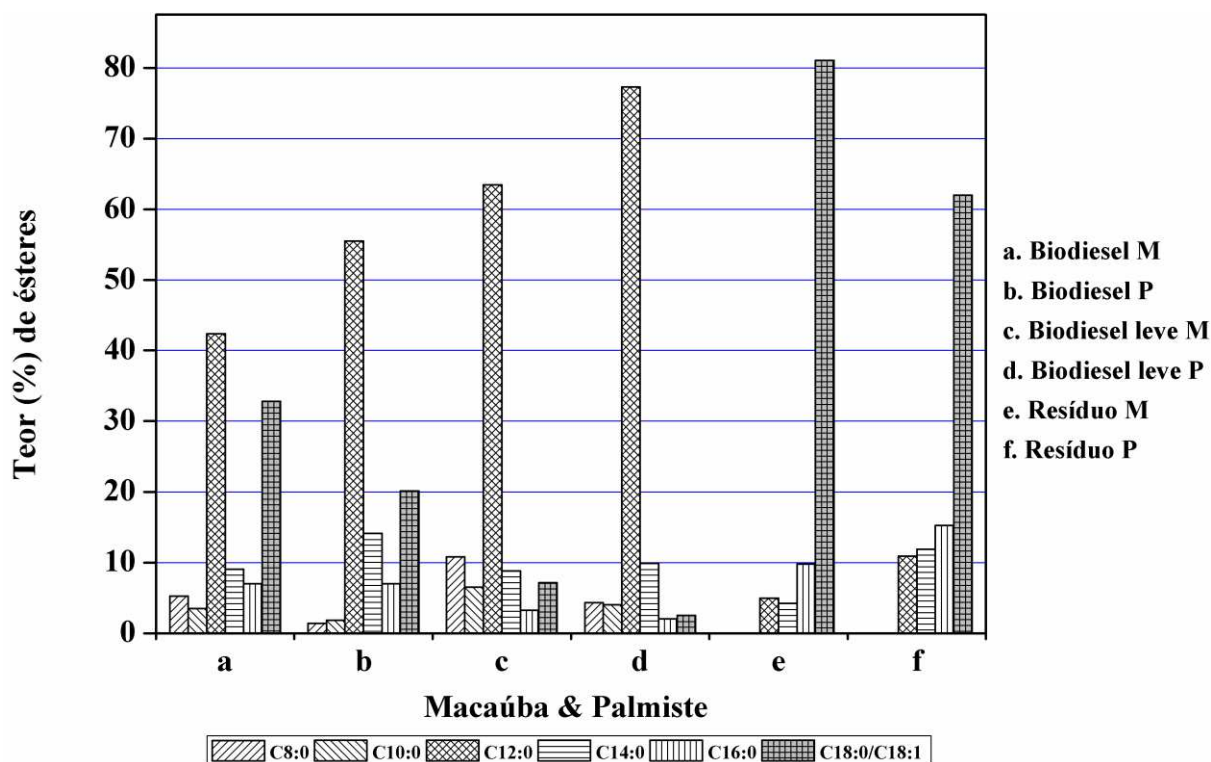


Figura 5. Porcentagem de ésteres no biodiesel, biodiesel leve e resíduo de macaúba e palmiste

Diante dos resultados obtidos, observou-se que a concentração dos ésteres leves, de cadeia molecular de interesse para o uso na aviação, pode ser obtido de forma eficiente *via* destilação fracionada sob pressão atmosférica, nas faixas de temperatura entre 110 a 224 °C para a macaúba, e de 110 a 213 °C para o palmiste. Resultando em teores elevados de ésteres de cadeia curta (C8 a C14).

Ao passo que os ésteres leves concentraram-se, o resíduo resultou em teores ricos em ésteres C18:0 e C18:1, podendo ser reutilizado ao retornar para o processo de produção do biodiesel, utilizado posteriormente como combustível terrestre.

6.2 Conteúdo de água

O teor de umidade presente no combustível de aviação, sob qualquer forma, é potencialmente perigoso se não monitorada. Embora os motores sejam capazes de inflamar uma mistura de combustível e água, o conteúdo de água presente, devem ser mantidos em níveis toleráveis, comumente estipulado abaixo de 90 partes por milhão por volume (ppm-v), se em uma operação normal, e 260 ppm-v para operações de modo emergencial.^{87,88} A água presente no combustível, quando submetida a baixas temperaturas, podem resultar na formação de gelo dentro do sistema de combustível da aeronave.⁸⁹

Na análise do conteúdo de água presente no combustível de aviação em mistura com o biodiesel leve de macaúba ou palmiste, obtido pelo método Karl Fisher, apresentou valores próximos ao do QAV-1 para as misturas contendo menores porcentagens de biodiesel leve.

O biodiesel leve misturado ao QAV-1 foi adicionado sem prévio processo de remoção de água presente em sua composição, obtendo como resultado, teores de umidade toleráveis apenas para as misturas contendo 5 vol% de biodiesel leve. Enquanto que o BL100 P e BL100 M estiveram longe dos valores recomendados, atingindo 1.075 mg kg^{-1} de umidade no biodiesel leve puro de macaúba.

Na Figura 6 pode-se observar os valores obtidos de acordo com a porcentagem em volume de biodiesel leve presente na mistura.

⁸⁷ SAE-INTERNATIONAL. **AIR790 considerations on ice formation in aircraft fuel systems**, [s.l.: s.n.], 2006.

⁸⁸ SAE-INTERNATIONAL. **ARP1401 aircraft fuel system and component icing test**, [s.l.: s.n.], 2007.

⁸⁹ BAENA-ZAMBRANA, S. *et al.* Behaviour of water in jet fuel - A literature review. **Progress in Aerospace Sciences**, [s.l.], v. 60, p. 35–44, 2013.

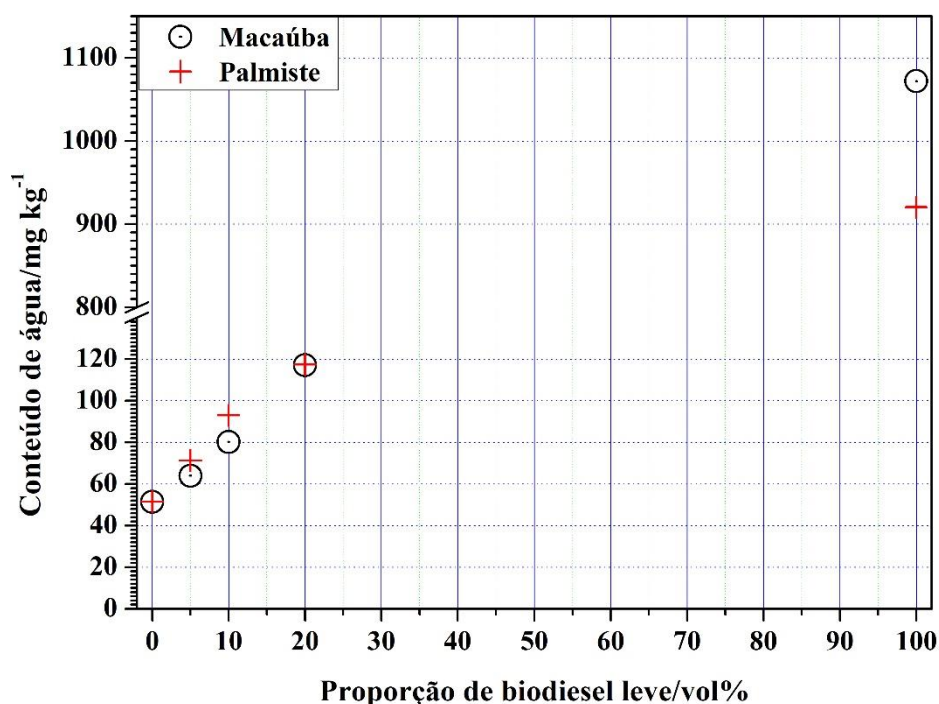


Figura 6. Conteúdo de água em relação à porcentagem em volume de biodiesel leve

Os valores obtidos para as misturas de QAV com 5 vol% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste, foram de 64,0 e 71,2 mg kg⁻¹ respectivamente; próximos aos 51,4 mg kg⁻¹ do QAV-1 puro, estando todos de acordo com os padrões das normas.

O conteúdo de água presente nas amostras de misturas de 10 e 20%, para ambas as matérias-primas, estiveram entre 80,2 e 117,4 mg kg⁻¹, valores acima dos recomendados pelas normas regulamentadoras. Por ventura, a adição de um processo de remoção da umidade do biodiesel leve de ambas as oleaginosas, auxiliaria em maiores teores de ésteres leves misturados ao querosene mineral, atendendo as recomendações para as misturas de 10 e 20 vol% de biodiesel leve.

6.3 Massa específica a 20 °C

A massa específica dos biocombustíveis para a aviação foi determinada a 20 °C. Segundo a ANP 37⁸⁶, a densidade deve estar entre 771,3 e 836,6 kg m⁻³, característica importante para calcular a quantidade de combustível necessária para o voo, o processo de combustão e outras aplicações. Na Figura 7 é possível observar que todas as misturas contendo

biodiesel leve nas porcentagens de 5, 10 e 20 vol% atenderam as recomendações exigidas pela norma.

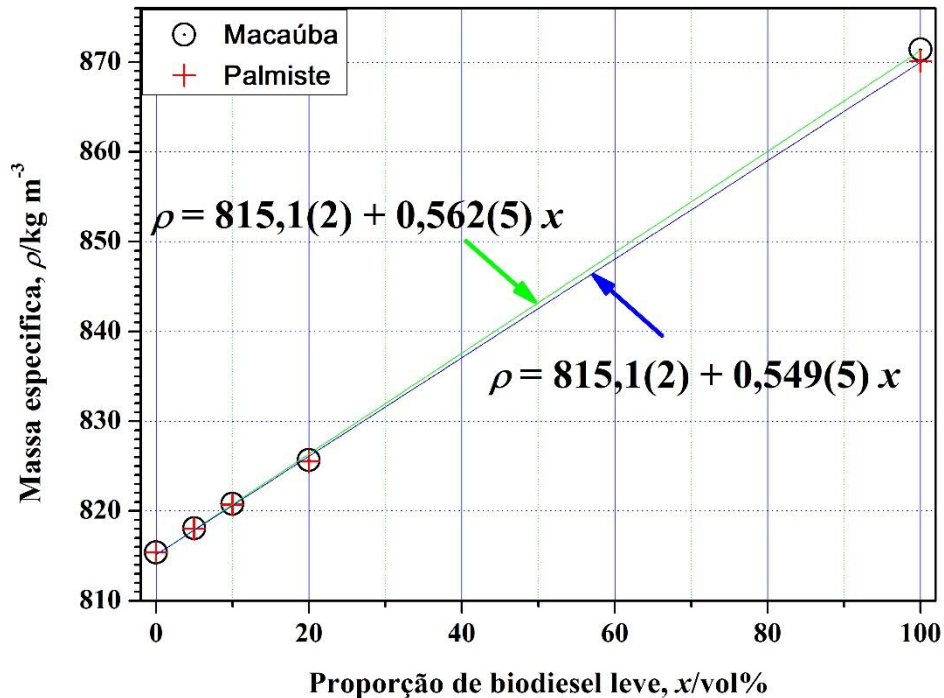


Figura 7. Massa específica em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve

A massa específica em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve apresentou propriedade aditiva, sendo possível observar que, misturas de até 38 vol% de biodiesel leve atenderiam as recomendações exigidas para o combustível de aviação.

6.4 Investigação experimental da propriedade de destilação

A investigação experimental da propriedade de destilação tem como finalidade analisar o equilíbrio líquido-vapor do combustível, na verificação das propriedades das misturas contendo querosene mineral e biodiesel leve em variadas porcentagens. Segundo a ASTM D1655⁸⁵ e ANP 37⁸⁶ os valores máximos de porcentagem em volume recuperado para os primeiros 10% devem estar em uma temperatura limite de 205 °C e máximo 300 °C no ponto final da ebulição.

As Tabelas 6 e 7 expõe a temperatura de destilação de acordo com a porcentagem de volume recuperado referente ao ponto inicial da destilação até o ponto final, distinguindo-se por matéria-prima.

Tabela 6. A temperatura de destilação do QAV-1 e misturas com o biodiesel leve de macaúba (QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20, e BL100)

% Vol. Rec.	Temperatura de Destilação (°C)				
	QAV-1	QAV BL5	QAV BL10	QAV BL20	BL100 M
0,5-P.I.	154	158	155	153	159
10	173	169	171	178	170
20	182	178	184	191	183
30	189	189	195	195	194
40	195	197	203	203	201
50	202	208	211	210	210
60	209	215	220	219	218
70	215	224	229	228	226
80	223	235	236	239	234
90	233	248	249	258	246
99,5-P.F.	245	259	261	289	259

Tabela 7. A temperatura de destilação do QAV-1 e misturas com o biodiesel leve de palmiste (QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20, e BL100)

% Vol. Rec.	Temperatura de Destilação (°C)				
	QAV-1	QAV BL5	QAV BL10	QAV BL20	BL100 P
0,5-P.I	154	152	150	156	P157
10	173	169	168	176	169
20	182	179	179	188	181
30	189	191	187	196	193
40	195	205	196	204	200
50	202	213	204	212	211
60	209	221	209	219	222
70	215	230	218	228	230
80	223	242	229	238	241
90	233	252	240	253	251
99,5-P.F.	245	263	252	290	258

Como é possível observar nas tabelas dispostas acima, os resultados da destilação para o querosene puro, biodiesel leve de macaúba e de palmiste, não excedem os valores estipulados por ambas as normas. Consecutivamente, os resultados das análises realizadas para as misturas de 5, 10 e 20 vol% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste com QAV-1 se enquadram nos valores máximos estipulados para essa característica. Sendo possível observar valores de destilação bem próximos ao obtido para o QAV-1.

Na Figura 8 foram traçadas as curvas obtidas na destilação em forma de gráfico para as amostras de QAV BL5, QAV BL10 e QAV BL20 de macaúba ou palmiste em relação ao

QAV-1, cujos valores em sua totalidade cumprem as temperaturas máximas para 10% e ponto final de ebulição referidas nas especificações ASTM e ANP.

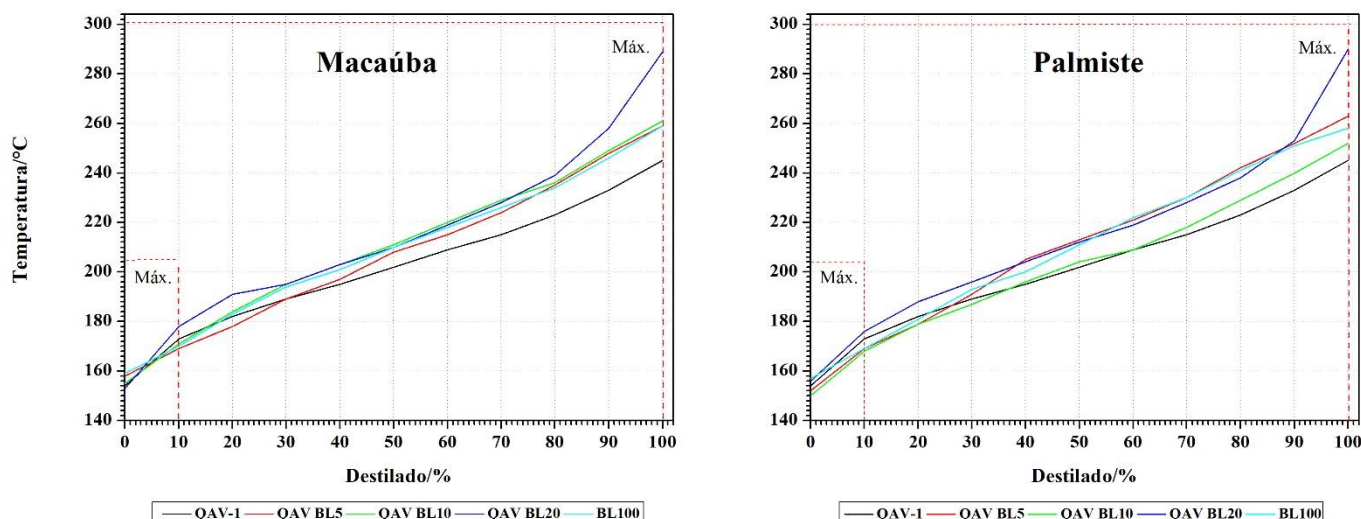


Figura 8. Análise da propriedade de destilação de acordo com a temperatura

Ainda, na figura acima, é possível observar que todas as amostras estiveram em conformidade com os limites máximos estipulados pela norma, satisfazendo as porcentagens estabelecidas por ambas as normas, ASTM e ANP.

Nas mesmas recomendações, também faz-se necessário analisar os valores de resíduo obtido na destilação. Segundo a ASTM e ANP, os valores aceitos para essa propriedade são de no máximo 1,5 % de volume total destilado.

Os valores do resíduo para os biodieseis leves e misturas com o querosene mineral, QAV-1, organizados nas Tabelas 8 e 9, não estiveram dentro do máximo permitido. Entretanto, as porcentagens de resíduo obtido na investigação, dos quais não se enquadraram nos valores máximos definidos na regulamentação, seriam satisfatórios caso a eficiência da destilação do biodiesel inicial utilizado para a produção de biodiesel leve fosse otimizada. Com a melhora na eficiência do processo de destilação, obter-se-ia uma menor porcentagem de ésteres de cadeia longa, e assim consecutivamente, menor resíduo na respectiva destilação.

6.5 Caracterização térmica por TGA

Sob atmosfera de oxigênio e nitrogênio, misturas de 5, 10 e 20 vol% de biodiesel leve, BL100, adicionado ao querosene de aviação, juntamente com a análise do querosene de aviação QAV-1 puro, foram submetidas à análise térmica por TGA.

Na análise térmica das amostras das misturas contendo biodiesel leve de macaúba ou palmiste, pode-se observar o comportamento da perda de massa bem próximo aos valores obtidos para o QAV-1, resultando na temperatura final de evaporação em aproximadamente 135 °C. Devido a presença de ésteres de cadeia longa, tal como C16, C18 e C18:1, na composição do querosene de aviação alternativo a volatilidade reduziu para as misturas de maior porcentagem como QAV BL20M e QAV BL20P, na qual a temperatura final da evaporação se deu em aproximadamente 150 °C. Para as amostras de biodiesel leve de macaúba e de palmiste foi visível a redução na volatilidade devido à presença destes compostos menos voláteis, finalizando em temperatura próxima de 200 °C.

Na Figura 9 encontram-se as curvas de TGA das amostras de QAV-1, misturas de QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20 e biodiesel leve de ambos os óleos, macaúba e palmiste, submetido em atmosfera dinâmica de oxigênio.

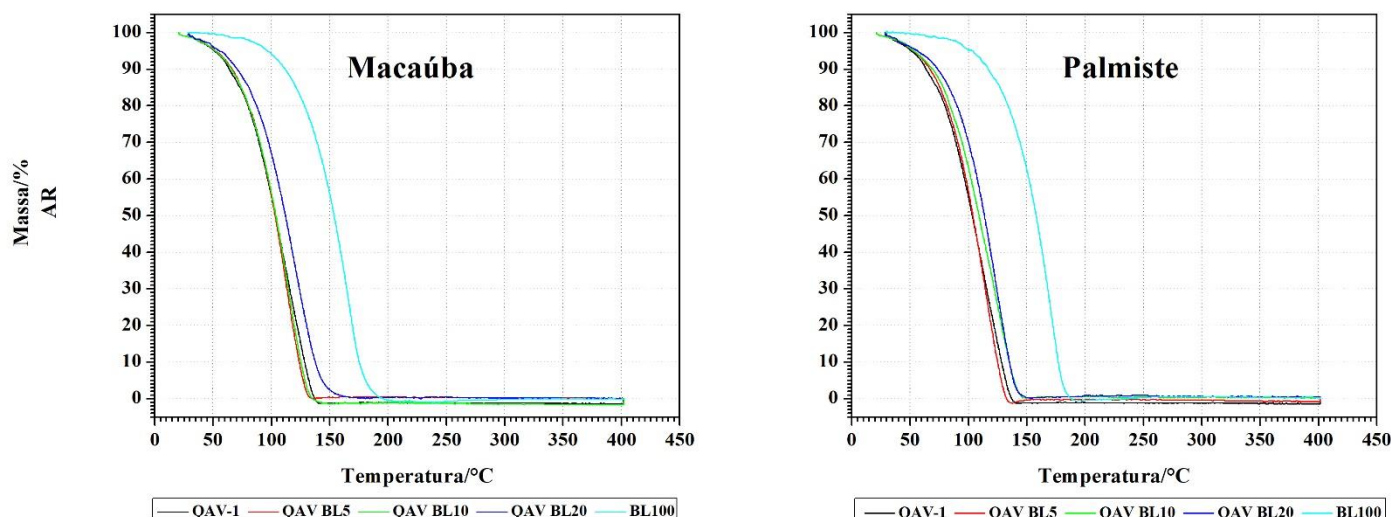


Figura 9. Curva TGA obtida sob atmosfera de oxigênio a 50 mL min⁻¹ e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹

Na Figura 10 encontram-se as curvas de TGA das amostras de QAV-1, misturas de QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20 e biodiesel leve de ambos os óleos, macaúba e palmiste, submetido em atmosfera dinâmica de nitrogênio.

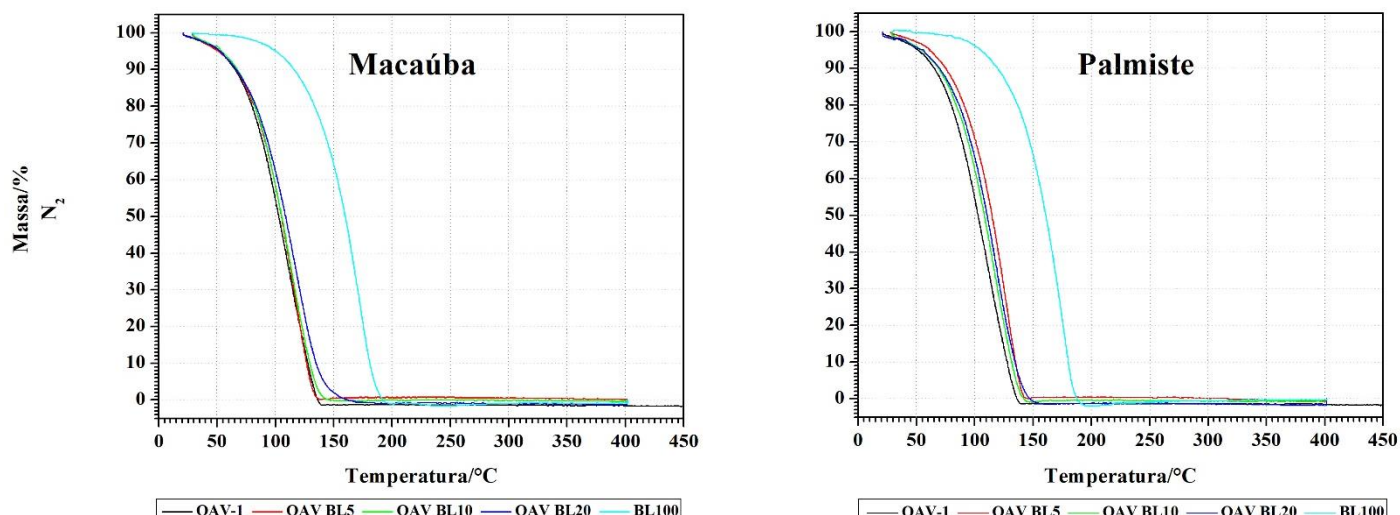


Figura 10. Curva TGA obtida sob atmosfera de nitrogênio a 50 mL min^{-1} e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}

Por meio dos resultados obtidos na curva de TGA é possível observar que em ambas as amostras de macaúba e palmiste, na totalidade de suas respectivas misturas e biodieseis leves BL100, submetidas a atmosfera de oxigênio e nitrogênio, não apresentaram significativas mudanças nos resultados. Em ambas as análises foi possível observar a evaporação do combustível, onde misturas de biodiesel leve com QAV-1 apresentaram características bem próximas aos resultados obtidos para o QAV-1 puro. Os resultados para os biodieseis leves de macaúba e palmiste apresentaram uma menor volatilidade devido sua maior densidade quando comparada com o querosene de aviação mineral, apresentando característica menos voláteis que os hidrocarbonetos constituintes do QAV-1.

6.6 Caracterização térmica por DSC

As amostras de biodieseis leves, querosene de aviação comum, e suas misturas foram submetidas a análise térmica por DSC. Os resultados obtidos permitiram avaliar variações entálpicas obtidas durante o processo de resfriamento. Através da análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi possível determinar seus respectivos pontos de fusão, dispostos nas seguintes Figuras 11, 12 e 13.

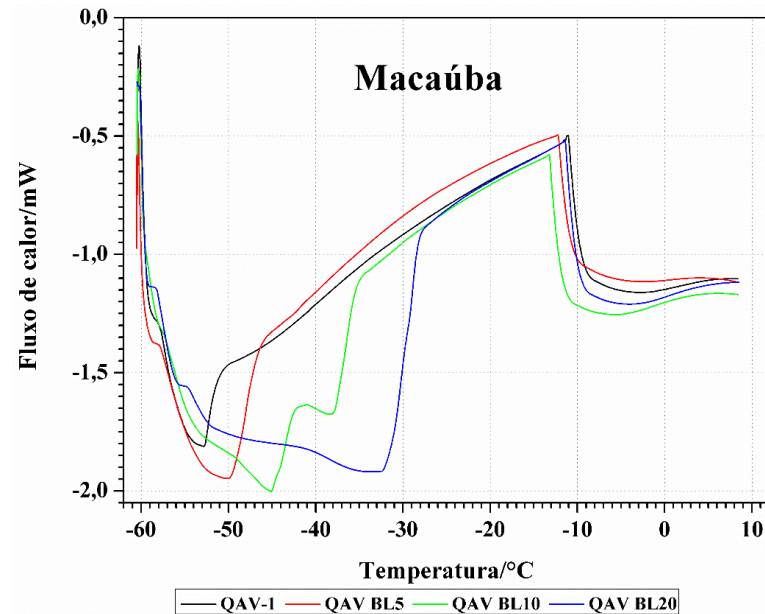


Figura 11. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o QAV-1 e misturas de macaúba QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20

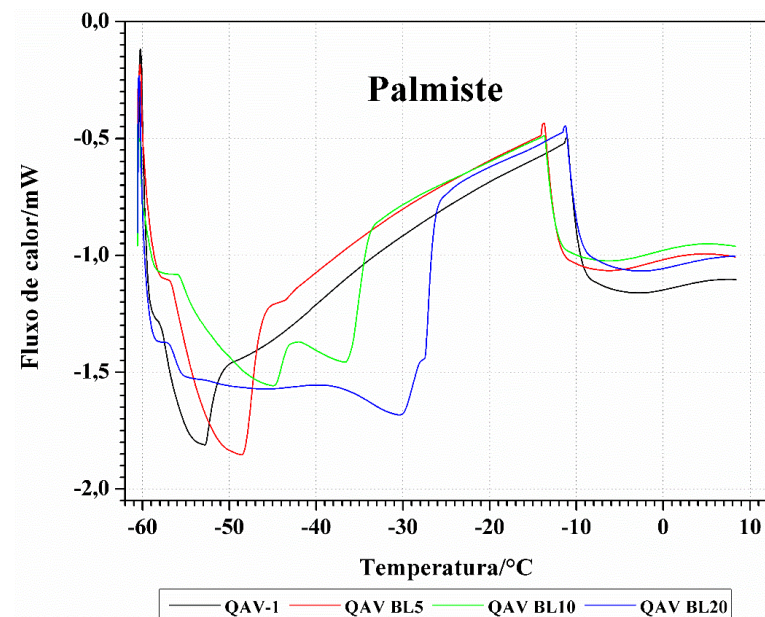


Figura 12. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o QAV-1 e misturas de palmiste QAV BL5, QAV BL10, QAV BL20

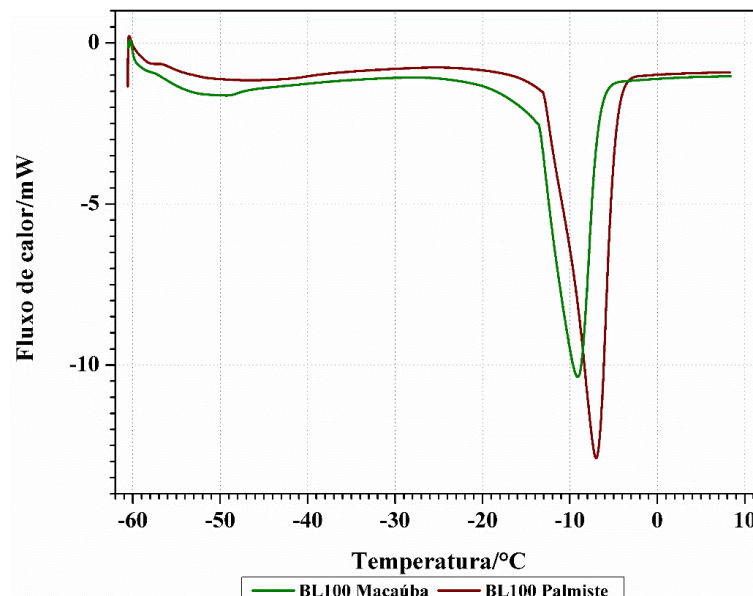


Figura 13. Curva de DSC a uma taxa aquecimento de 5 °C por minuto para o BL100 macaúba e BL100 palmiste

Na variação de temperatura devido à transição entálpica, observou-se a reação endotérmica. Na mudança de estado, identifica-se o ponto de fusão no pico da curva, identificando o término da fusão na base esquerda da curva após o pico principal da reação endotérmica.

6.7 Ponto de congelamento

Por meio da análise de DSC, pode-se determinar os respectivos pontos de congelamento a partir da temperatura final da fusão, identificados na imagem 14.

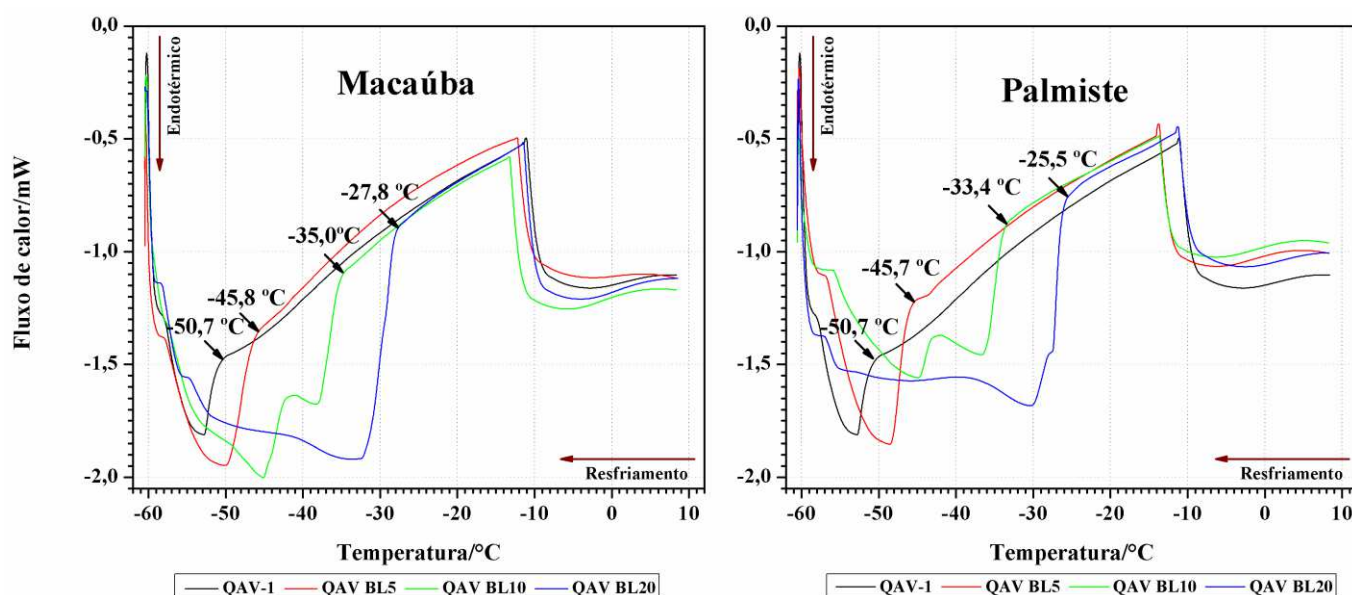


Figura 14. Ponto de congelamento do QAV BL5, QAV BL10 e QAV BL20 de macaúba ou palmiste

Organizando os pontos de congelamento na Figura 15, observa-se que apenas o querosene de aviação QAV-1 esteve dentro das recomendações técnicas. Resultando em valores próximos aos aceitos pelas normas apenas as misturas contendo 5 vol% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste.

As recomendações levadas em consideração nesse estudo foram, portanto, as normas ASTM D1655⁸⁵ e ANP 37⁸⁶, cujo ponto de congelamento é determinado em máximo -47 °C. Eventualmente, se levado em consideração as normas regulamentadoras dos combustíveis de aviação alternativo, especificada pela ASTM D7566 e ANP 63, as misturas contendo 5 vol% de ésteres leves atenderiam os requisitos para o ponto de congelamento, definido em -40 °C.

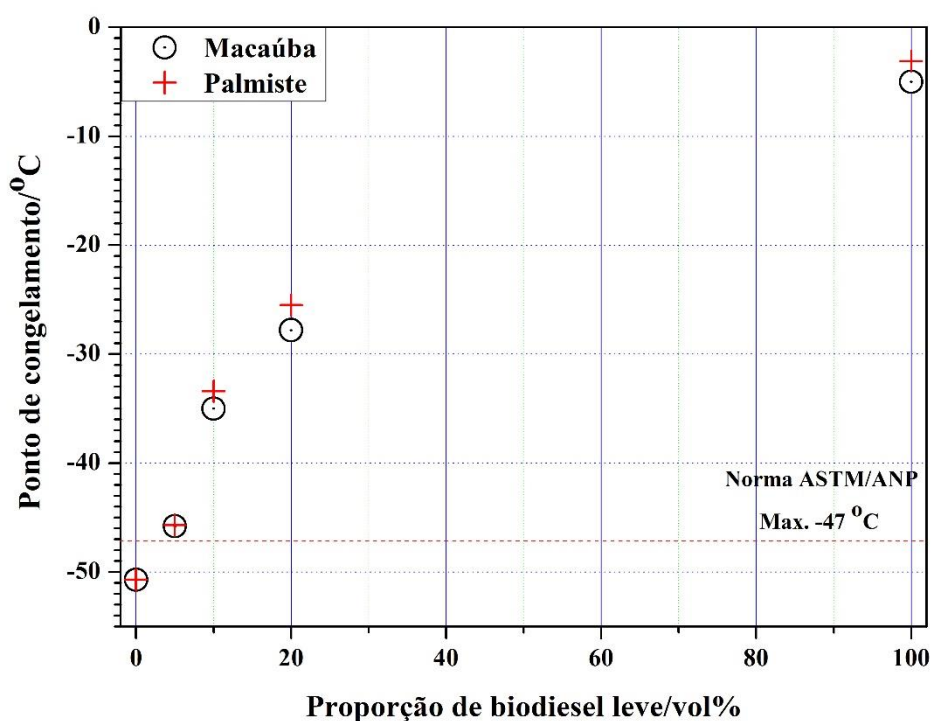


Figura 15. Ponto de congelamento em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve

Todas as misturas contendo 10 e 20 vol% de biodiesel leve, tal qual o biodiesel leve puro de ambas as oleaginosas BL100, não estiveram dentro do máximo permitido. Sendo os resultados do biodiesel leve puro (BL100) de macaúba ou palmiste os mais distantes da especificação, com pontos de congelamento em -3,1 °C e -5,0 °C, respectivamente.

Eventualmente, o melhoramento na eficiência da destilação poderia proporcionar maior eficiência na concentração de ésteres de cadeias curtas, C8 a C14, consecutivamente, reduzindo o ponto de congelamento. Ademais, os resultados fora das recomendações ASTM e ANP, mais próximo do valor mínimo exigido pela regulamentação, poderiam ser alcançados com o uso de

anticongelantes. Tendo em vista que, as misturas contendo 5 vol% de biodiesel leve de macaúba e palmiste em QAV-1 chegaram bem próximas aos valores obtidos para o querosene mineral.

6.8 Ponto de fulgor

A análise do ponto de fulgor, determinado em mínimo de 38 °C pela norma ASTM 1655 e ANP 37⁸⁶, apresentou valores satisfatórios para todas as amostras de querosene de aviação contendo 5, 10 e 20% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste, tal como para o biodiesel leve puro (BL100). Os valores foram dispostos de acordo com cada porcentagem de biodiesel leve presente no QAV-1, sendo de 0 a 20% a composição da Figura 16.

O valor mínimo e máximo obtido dentre todas as misturas, respeitando a repetibilidade que avalia a margem de erro, foram de 44,3 a 49,2 °C. Embora os valores obtidos não demonstre uma tendência, o ponto de fulgor se manteve em um pequeno intervalo de temperatura, mínima de 45,5 °C (QAV BL5P) e máxima de 48 °C (QAV BL10P e QAV BL10M).

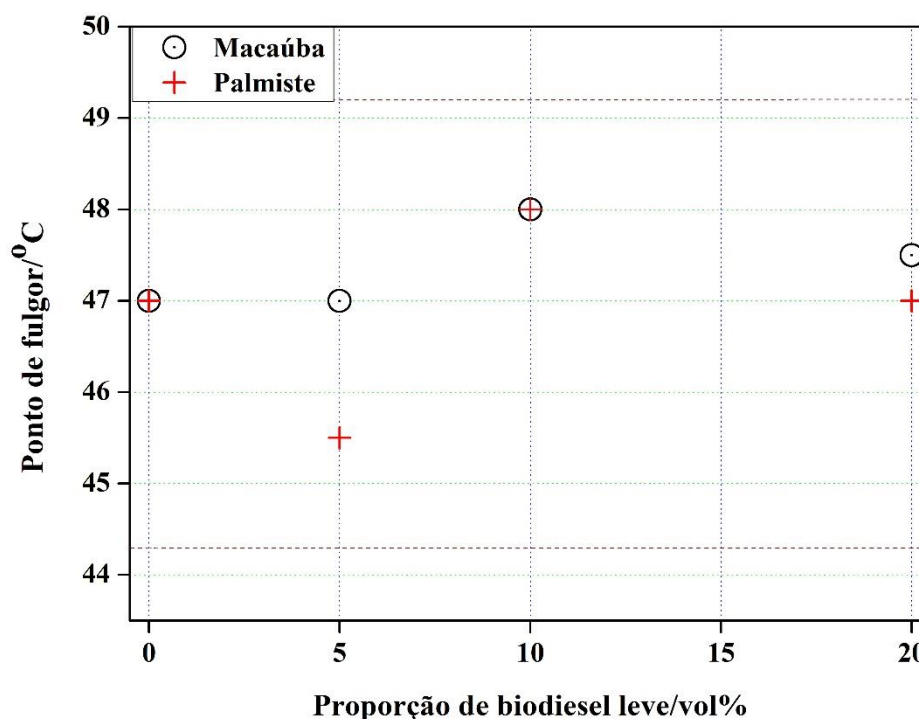


Figura 16. Ponto de fulgor em relação a porcentagem em volume de biodiesel leve

Llamas *et al.* (2012) na caracterização de misturas contendo QAV-1 e proporções de 5, 10 e 20% de destilado de biodiesel derivado de palmiste e coco,¹⁷ verificou pontos de fulgor próximos aos obtidos por esse trabalho.

6.9 Poder calorífico

Na determinação do poder calorífico do combustível de aviação contendo porcentagens de biodiesel leve de macaúba ou palmiste, observa-se que maior parte dos resultados foram satisfatórios, estando de acordo com a resolução brasileira ANP 37 e internacional ASTM D1655. Os valores das porcentagens em misturas, QAV-1 puro e biodiesel leve sem a adição de querosene mineral, estão dispostos nas Tabelas 8 e 9. Os mesmos valores foram pontuados e organizados na Figura 17.

Conforme é possível observar na imagem, disposta abaixo, os valores do poder calorífico para todas as misturas contendo 5 e 10 vol%, estiveram dentro do mínimo exigido por ambas as normas, ANP e ASTM, estipulado em $42,8 \text{ MJ kg}^{-1}$. Das misturas analisadas, apenas a mistura contendo 20 vol% de biodiesel leve de macaúba não se enquadrava no valor mínimo exigido.

Embora umas das misturas não tenham atingido o valor mínimo para o poder calorífico, observa-se que a maioria das misturas contendo biodiesel leve está bem próximas aos valores obtidos pelo QAV-1 puro, com valor do poder calorífico acima de $43,0 \text{ MJ kg}^{-1}$.

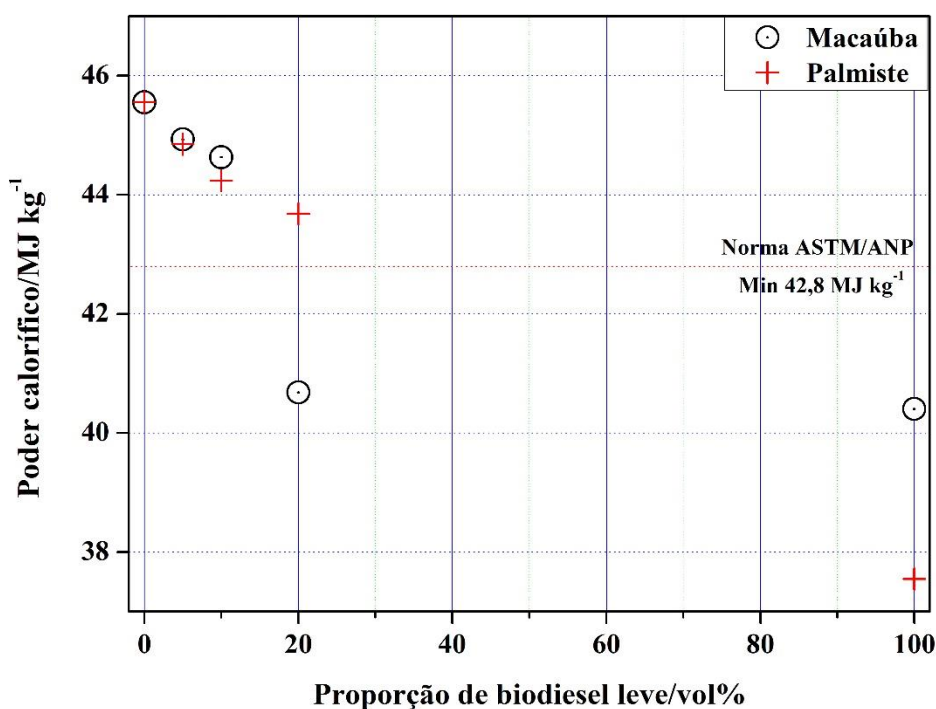


Figura 17. Poder calorífico das misturas contendo 5, 10 e 20% de biodiesel leve, biodiesel leve puro e QAV-1

A partir dos resultados, pode-se afirmar que a adição de biodiesel leve ao querosene fóssil QAV-1 com ambas as oleaginosas, macaúba ou palmiste, em um volume de até 10%, atendem a regulamentação.

6.10 Resultado geral

Após investigação das propriedades do querosene de aviação QAV-1, biodieseis leves, e suas respectivas misturas com 5, 10 e 20 vol%, os resultados obtidos foram organizados nas Tabelas 8 e 9, expondo os resultados de forma geral. As propriedades investigadas são demonstradas de acordo com suas respectivas porcentagens de misturas e tipo de matéria-prima, respeitando os parâmetros de qualidade recomendado pelas normas ANP 37 e ASTM D1655.

As propriedades comuns entre o QAV-1, BL100 M e BL100 P, encontram-se na Tabela 8. Os resultados para as misturas contendo QAV-1 e biodiesel leve em variadas porcentagens seguem na Tabela 9.

Da análise dos resultados dispostos na Tabela 8, pôde-se determinar similaridade entre o combustível de aviação fóssil (QAV-1) e o biodiesel leve puro de ambas as oleaginosas nas análises de investigação da temperatura de destilação e ponto de fulgor. Não se enquadrando nos parâmetros as propriedades do resíduo da destilação, ponto de congelamento e massa específica.

Tabela 8. Propriedades comuns do QAV-1, biodiesel leve da macaúba e do palmiste

Propriedade	ANP 37	QAV-1	BL100M	BL100P
Temperatura de destilação °C				
P.E. Inicial	Anotar	154	159	157
10% rec.	Máx. 205	173	170	169
50% rec.	Anotar	202	210	211
90% rec.	Anotar	233	246	251
P.E. Final	Max. 300	259	259	258
Resíduo da destilação, %	Máx. 1,5	1,8	2,4	2,4
Ponto de congelamento, °C	Máx. -47	-51	-4	-3
Massa específica 20 °C, kg m ⁻³	771,3-836,6	815,4	871,4	870,1
Ponto de fulgor, °C	Min. 38	47,0	47,0	46,5
Poder calorífico, MJ kg ⁻¹	Min. 42,8	45,5	40,4	37,5

Dos resultados obtidos para as misturas de querosene de aviação, tipo QAV-1, contendo biodiesel leve nas proporções de 5, 10 e 20 vol%, obteve-se que a maioria das propriedades verificadas, contendo baixa porcentagem de biodiesel leve (5%), apresentou similaridade com

o combustível de aviação fóssil (QAV-1) e estiveram dentro dos parâmetros contidos na resolução ANP 37 e ASTM D1655.

Tabela 9. Propriedades das misturas com 5, 10 e 20 vol% de biodiesel leve de macaúba ou palmiste com QAV-1

Propriedade	ANP 37	Macaúba			Palmiste			Método
		Biodiesel leve_5/ QAV-1_95	Biodiesel leve_10/ QAV-1_90	Biodiesel leve_20/ QAV-1_80	Biodiesel leve_5/ QAV-1_95	Biodiesel leve_10/ QAV-1_90	Biodiesel leve_20/ QAV-1_80	
Temperatura de destilação, °C								
P.E. Inicial	Anotar	158	155	153	152	150	156	D86
10% rec.	Max. 205	169	171	178	169	168	176	
50% rec.	Anotar	208	211	210	213	204	212	
90% rec.	Anotar	248	249	258	252	240	253	
P.E. Final	Max. 300	259	261	289	263	252	290	
Resíduo da destilação, %	Max. 1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
Ponto de congelamento, °C	Max. -47	-46	-35	-28	-44	-33	-26	
Massa específica a 20 °C, kg m ⁻³	771,3-836,6	818,1	820,8	825,7	818,0	820,7	825,5	D1298
Ponto de fulgor, °C	Min. 38	46,5	48,0	47,5	45,5	48,0	47,0	D56
Poder calorífico, MJ Kg ⁻¹	Min. 42,8	44,9	44,6	40,7	44,8	44,2	44,7	D4529

Na investigação da propriedade de destilação, todas as misturas aqui apresentadas, atenderam os padrões determinados pelo método. Sendo que tanto para o ponto inicial da destilação como para o final, os valores não apresentaram uma tendência no aumento em relação à proporção das misturas. Entretanto, o resíduo da destilação não se enquadrava às recomendações para essa propriedade, apenas aproximando-se do padrão especificado.

O ponto de congelamento, embora resultou em valores próximos aos obtidos para o querosene de aviação mineral para as misturas contendo baixas porcentagens de biodiesel leve (QAV BL5 de macaúba ou palmiste), nenhuma amostra de combustível aqui analisado, contendo biodiesel leve em qualquer porcentagem, atendeu aos padrões recomendados para essa propriedade. Entretanto, o ponto de congelamento é uma propriedade que pode ser solucionada com a adição de anticongelantes, se assim necessário.

Na investigação da densidade, os valores obtidos para a massa específica para cada mistura contendo biodiesel leve, verifica-se que todas as proporções de misturas atenderam a legislação, com exceção dos destilados contendo biodiesel leve puro. Sendo possível realizar misturas com até 38 vol%, respeitando os parâmetros mínimos exigidos.

O ponto de fulgor apresentou resultados condizentes com o padrão da legislação em todas as proporções adicionadas com biodieseis leves, de macaúba ou palmiste, apresentando similaridade aos valores obtidos para o querosene fóssil.

Na investigação do poder calorífico, os resultados foram satisfatórios pela maioria das amostras analisadas. As misturas contendo 5 e 10 vol% de biodiesel leve de ambas as oleaginosas, estiveram dentro dos padrões mínimos exigidos. Enquanto que, apenas a mistura contendo biodiesel leve de palmiste na proporção de 20 vol%, atendeu a regulamentação. Os biodieseis leves puros, BL100, estiveram fora do valor esperado para esta análise, não atendendo assim as exigências das normas ASTM ou ANP.

7 Conclusão

Os óleos vegetais da amêndoa da macaúba ou palmiste revelaram-se fontes de matéria-prima potencialmente importantes para a produção industrial de combustíveis renováveis para a aviação. Deste trabalho, provou-se experimentalmente a viabilidade de utilização de biodiesel leve obtido por meio da destilação fracionada sob pressão atmosférica, rico em ésteres leves de ácidos graxos, na composição de misturas com querosene fóssil de aviação QAV-1.

Os combustíveis de aviação de que trata o presente trabalho, constituídos de querosene do tipo QAV-1 (ou Jet A-1) e um concentrado de ésteres graxos de cadeia relativamente curta (C8 a C14), nas proporções de 5, 10 e 20 vol%, evidenciaram-se como líquidos carburantes de qualidade suficiente, na medida em que apresentam parâmetros físico-químicos enquadráveis nas normas de adequação do combustível para a aviação, especificamente, a ANP 37 e a ASTM D1655.

Os presentes resultados revelam ainda que os biodieseis leves das fontes de óleo usadas, ricas em ácido láurico (C12), quando adicionados ao querosene mineral, em proporção de até 5 vol%, produzem combustíveis virtualmente similares, nos padrões técnicos, ao querosene fóssil, particularmente ao teor de umidade, à densidade, ao comportamento na destilação e ao ponto de fulgor. Os resultados obtidos para o ponto de congelamento, embora não atendam estritamente as recomendações, ficaram bem próximos ao do querosene mineral, sendo possível enquadrar-se também para essa característica, como pelo uso de anticongelantes.

A adição do biodiesel leve ao querosene fóssil, em proporções adequadas, seria interessante ambientalmente e, diante de uma análise apropriada de custos de produção, também economicamente; os ésteres graxos utilizados nesse trabalho foram obtidos de um processo relativamente barato e conhecido, como a transesterificação e destilação atmosférica. O

biodiesel leve obtido por meio do processo de transesterificação e concentrado por destilação, além da menor complexidade em sua produção, contribuem com perspectivas referentes à emissão de poluentes na atmosfera, em razão da baixa emissão de GEE, e auxilia nas opções de fontes de exploração renováveis, minimizando a dependência do petróleo.

Referência

ABRABA. **Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação**. Disponível em: <<http://www.abraba.com.br/pt-BR/Paginas/home.aspx>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

ADITIYA, H. B.; MAHLIA, T. M.I.; CHONG, W. T.; *et al.* Second generation bioethanol production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 631–653, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.015>>.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP nº 20, de 24.6.2013. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 Jun. 2013 – RETIFICADO 17 Jul. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil), Resolução ANP Nº 63, de 5.12.2014 – DOU 8.12.2014. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/dezembro/ranp63-2014.xml>.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução ANP Nº 37, de 1.12.2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 dez. 2009.

ANTONIASSI, R.; FREITAS, S. C. **Processamento**. AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000gc8yujq302wx5ok01dx9lcx1g7v3u.html>. Acesso em: 3 set. 2018.

APROBIO. **Os 20 Benefícios da Macaúba Para a Saúde**. Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/2018/03/05/os-20-beneficios-da-macaua-para-a-saude/>>. Acesso em: 6 maio 2018.

ARAUJO, L. A. **Estudo Das Propriedades Físicas, Químicas e Termofísicas de Óleos Regionais e Suas Misturas**. 2008.

ASTM D1655 – 16C. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–20, 2016.

ASTM D6615 – 15A. Standard Specification for Jet B Wide-Cut Aviation Turbine Fuel 1. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–10, 2015.

ASTM D7566 – 18. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–16, 2018. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D7566.htm>>.

BAENA-ZAMBRANA, S.; REPETTO, S. L.; LAWSON, C. P.; *et al.* Behaviour of water in jet fuel - A literature review. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 60, p. 35–44, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.12.001>>.

BARBOSA, D. M.; NAOE, L. K.; ZUNIGA, A. D. G. **Avaliar o teor de lipídios em sementes de soja cultivadas no Estado de Tocantins**. Palmas-TO: In: 14º Jornada de Iniciação Científica da UNITINS, 2007.

BARDAWIL, O. Especial 2 – Inventor brasileiro do biodiesel também criou vaca mecânica e bioquerosene para aviões. **Agência Brasil**, p. 8–11, 2005. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2005-09-21/especial-2---inventor-brasileiro-do-biodiesel-tambem-criou-vaca-mecanica-e-bioquerosene-para-avioes>>.

BAROUTIAN, S.; AROUA, M. K.; RAMAN, A. A. A.; *et al.* Blended aviation biofuel from esterified *Jatropha curcas* and waste vegetable oils. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 44, n. 6, p. 911–916, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2013.02.007>>.

BHERING, Leonardo. **Macaúba: matéria-prima nativa com potencial para a produção de biodiesel**. [s.l.: s.n.], Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/24055/1/MACAUBA-MATERIA-PRIMA-NATIVA-COM-POTENCIAL-PARA-PRODUCAO-DE-BIODIESEL.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

BIODIESELBR. **Silvicultor apresenta projeto de plantio de macaúba em Tocantins**. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/macauaba/silvicultor-projeto-plantio-macauaba-tocantins-060212.htm>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

BP. **BP Statistical Review of World Energy**. [s.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 24 jul. 2018.

BRASIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – CASA CIVIL. Lei 12.490 de 16.09.2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112490.htm>.

BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. **Processamento de Petróleo e Gás**. [s.l.]: Editora Ltc, 2011.

BUCHSPIES, B.; KALTSCHMITT, M. Sustainability Aspects of Biokerosene. *In: Biokerosene*. [s.l.: s.n.], 2017, p. 325–373.

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba. **Macaúba *Acrocomia aculeata*(Jacq.) Lood. ex. Mart.**, p. 35, 2011.

CAVALLARI, M. M.; TOLEDO, M. M. What is the name of the babassu? A note on the confusing use of scientific names for this important palm tree. **Rodriguésia**, v. 67, n. 2, p. 533–538, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-78602016000200533&lng=en>. Acesso em: 20 ago. 2018.

CGEE. **Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios**. Brasília: [s.n.], 2010. (Série Documentos Técnicos N° 08). Disponível em: <www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=6821>. Acesso em: 5 mai. 2018.

COSTA, C. F. **Solos e outros fatores ambientais associados à diversidade fenotípica de macaubais no estado de São Paulo**. Instituto Agrônomo, Campinas, 2009. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/dissertacoes/pb1215407_CARLA_FERNANDA_DA_COSTA.pdf>.

CREMONEZ, P. A.; FEROLDI, M.; DE ARAÚJO, A. V.; *et al.* Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1063–1072, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.097>>.

DAMASCENO, S. M.; FERRAZ, V.; NELSON, D. L.; *et al.* Selective adsorption of fatty acid methyl esters onto a commercial molecular sieve or activated charcoal prepared from the *Acrocomia aculeata* cake remaining from press-extracting the fruit kernel oil. **AIMS ENERGY**, v. 6, n. September, p. 801–809, 2018.

DE LA TORRE, M. J.; MORAL, A.; HERNÁNDEZ, M. D.; *et al.* Organosolv lignin for biofuel. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 58–63, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.002>>.

DE LANES, É. C. M.; DE ALMEIDA COSTA, P. M.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, v. 511, n. 7507, p. 31, 2014.

DE OLIVEIRA, V. F.; PARENTE, E. J.S.; CAVALCANTE, C. L.; *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.

DOMINKOVIĆ, D. F.; BAČEKOVIĆ, I.; PEDERSEN, A. S.; *et al.* The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1823–1838, 2017.

EN14214. Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. **European Standard**,

ESPINDOLA, S. M. C. G. CAVALCANTE, A. K.; GONÇALVES, D. A. R.; *et al.* Avaliação do teor de óleos e da produtividade em linhagens de soja para cultivo no Cerrado. *In*: [s.l.]: In: IX Simpósio Nacional Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais. Embrapa Brasília-DF. CD-ROM 1, 2008.

EUROPEAN EXPERT GROUP ON FUTURE TRANSPORT FUELS. **Future Transport Fuels**. [s.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/cts/doc/2011-01-25-future-transport-fuels-report.pdf>>.

EXXONMOBIL. **The Outlook for Energy: A View to 2040**. [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf>>.

FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados**. 1. ed. [s.l.]: LTC, 2012.

FEROLDI, M.; CREMONEZ, P.A.; ESTEVAM, A. Dendê: do cultivo da palma à produção de biodiesel. Revista Monografias Ambientais. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - Universidade Federal de Santa Maria**, v. 13, n. 5, p. 3800–3808, 2014.

FEROLDI, M.; OLIVEIRA, C. J.; CE, S.; *et al.* Environmental, economic and social impact of

aviation biofuel production in Brazil. **New Biotechnology**, v. 32, n. 2, p. 263–271, 2015.

GARBIN, Rafael Borne; HENKES, J. A. A sustentabilidade na produção de biocombustíveis de aviação no Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 67–104, 2018. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6201>.

GONÇALVES, F. R.; BORGES, L. E. P.; FRAGA, M. A. Combustíveis de aviação: Perspectivas e futuro. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 28, p. 15–23, 2011.

GRIN – GERMPLASM RESOURCES INFORMATION NETWORK. **Taxonomia das plantas da GRIN**. Disponível em: <<https://www.ars-grin.gov/>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

GUTIÉRREZ, J.; GALÁN, C.A.; SUÁREZ, R.; *et al.* Biofuels from cardoon pyrolysis: Extraction and application of biokerosene/kerosene mixtures in a self-manufactured jet engine. **Energy Conversion and Management**, v. 157, p. 246–256, 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890417311573>>.

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. X, n. 00, p. 1–6, 2018.

HILEMAN, J. I.; STRATTON, R. W. Alternative jet fuel feasibility. **Transport Policy**, v. 34, p. 52–62, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.018>>.

HONG, T. D.; SOERAWIDJAJA, T. H.; REKSOWARDOJO, I. K.; *et al.* A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process - Experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 74, p. 124–130, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2013.09.013>>.

IATA; DLR; GEORGIA TECH. Technology Roadmap. *In: SpringerReference*. 4th. ed. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, p. 86. Disponível em: <<https://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/technology-roadmap-2013.pdf>>.

ICAO DATA. **Facts and figures**. Disponível em: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Facts-Figures_WorldEconomyData.aspx>. Acesso em: 8 dez. 2018.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **IATA Annual Review 2017**. p. 68, 2017. Disponível em: <<http://www.iata.org/publications/Documents/iata-annual-review-2017.pdf>>.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aviation's Contribution to Climate Change**. [s.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/ENV_Report_2010.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2016**. [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExecutiveSummaryEnglish.pdf>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2015**. [s.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <www.iea.org/t&c>.

JAYARAMANA; IBRAHIMB, D. N.; GUATC, C. L. Managerial optimism to overcome economic recession in the world. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 24, p. 33–48, 2011.

KALTSCHMITT, M.; NEULING, U. **Biokerosene**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53065-8>>.

KUBIČKOVÁ, I.; KUBIČKA, D. Utilization of Triglycerides and Related Feedstocks for Production of Clean Hydrocarbon Fuels and Petrochemicals: A Review. *In: Waste and Biomass Valorization*. [s.l.: s.n.], 2010, p. 293–308.

LLAMAS, A.; AL-LAL, A. M.; HERNANDEZ, M.; *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.

LLAMAS, A.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M. J.; AL-LAL, A. M.; *et al.* Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene. **Fuel**, v. 102, p. 483–490, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.108>>.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA; PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário Estatístico da Agroenergia 2010**. Brasília: [s.n.], 2010.

MARZULLO, R. C. M. **Análise de Ecoeficiência dos Óleos Vegetais Oriundos da Soja e Palma, visando a Produção de Biodiesel**. Escola Politécnica da Universidade de São

Paulo, 2007.

MAURICE, L. Q.; LANDER, H.; EDWARDS, T.; *et al.* Advanced aviation fuels: A look ahead via a historical perspective. **Fuel**, v. 80, n. 5, p. 747–756, 2001.

MELO, P. G. **Produção e caracterização de biodieseis obtidos a partir da oleaginosa macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Universidade Federal de Uberlândia, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17363/1/d.pdf>>.

MEYER, J. M. **Teor e composição de ácidos graxos de óleos de frutos de palmeiras nativas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2013.

MIELKE, T. World Markets for Vegetable Oils and Animal Fats. *In*: KALTSCHMITT, Martin; NEULING, Ulf (Orgs.). **Biokerosene**. Hamburg, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 147–188.

MOHAMMAD, M.; KANDARAMATH HARI, T.; YAAKOB, Z.; *et al.* Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, n. X, p. 121–132, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.026>>.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 5, n. 4, p. 367–385, 2015.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes from biomass to biokerosene. *In*: NEULING, Ulf; KALTSCHMITT, Martin (Orgs.). **Biokerosene**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 435–473. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53065-8_18>.

NYGREN, E.; ALEKLETT, K.; HÖÖK, M. Aviation fuel and future oil production scenarios. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4003–4010, 2009.

OIL WORD. **Data Bank and publications of ISTA Mielke GmbH**. Disponível em: <<https://www.oilworld.biz/>>. Acesso em: 4 ago. 2018.

PETROBRÁS. Querosene de Aviação. Informações Técnicas. p. 10, 2014.

PORTAL DA MACAÚBA. **Macaúba: cultura, botânica, sistemas de cultivo, industrialização e produtos**. Disponível em:

<<http://www.portalmacauba.com.br/2015/05/macauba-cultura-botanica-sistemas-de.html>>.

RANUCCI, C. R.; ALVES, H. J.; MONTEIRO, M. 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.

RODELLI, M. C. **Produção de biodiesel a partir de óleo de palma**. Campo Mourão: [s.n.], 2016.

SAE-INTERNATIONAL. **AIR790 considerations on ice formation in aircraft fuel systems**. [s.l.: s.n.], 2006.

SAE-INTERNATIONAL. **ARP1401 aircraft fuel system and component icing test**. [s.l.: s.n.], 2007.

SCHÄFER, A. W.; EVANS, A. D.; REYNOLDS, T. G.; *et al.* Costs of mitigating CO₂ emissions from passenger aircraft. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 4, p. 412–417, 2016. Disponível em: <doi: doi:10.1038/nclimate2865>.

SEBER, G.; MALINA, R.; PEARLSON, M. N.; *et al.* Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 108–118, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953414002189>>.

SEED GALLERY. **Sementes de palmeira-de-óleo-africana (*Elaeis guineensis*)**. Disponível em: <<https://www.seeds-gallery.shop/pt/home/sementes-de-palmeira-de-oleo-africana-elaeis-guineensis.html>>. Acesso em: 2 ago. 2018.

SERRANO-RUIZ, J. C.; RAMOS-FERNÁNDEZ, E. V.; SEPÚLVEDA-ESCRIBANO, A. From biodiesel and bioethanol to liquid hydrocarbon fuels : new hydrotreating and advanced microbial technologies. **Energy & Environmental Science**, v. 5, p. 5638–52, 2012.

SILVA, L. N.; CARDOSO, C. C.; PASA, V. M. D. Synthesis and characterization of esters from different alcohols using Macauba almond oil to substitute diesel oil and jet fuel. **Fuel**, v. 166, p. 453–460, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.070>>.

ŠIMELYTĖ, A.; DUDZEVIČIŪTĖ, G. Consumption of Renewable Energy and Economic Growth. *In: Proceedings of 5th International Scientific Conference Contemporary Issues*

in **Business, Management and Education** '2017. [s.l.]: Vilnius Gediminas Technical University, 2017. Disponível em: <<http://cbme.vgtu.lt/index.php/verslas/2017/paper/view/48>>.

SIMÕES, A F. **O transporte aéreo brasileiro no contexto de mudanças climáticas globais: emissões de CO₂ e alternativas de mitigação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

STAPLES, M. D.; MALINA, R.; OLCAY, H.; *et al.* Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies. **Energy Environ. Sci.**, v. 7, n. 5, p. 1545–1554, 2014. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C3EE43655A>>.

SURESH, P. **Environmental and economic assessment of transportation fuels from municipal solid waste**. Massachusetts Institute of Technology, 2016.

UBRABIO - UNIÃO BRASILEIRA DO BIODIESEL E BIOQUEROSENE. **Bioquerosene no céu do Brasil: A Ubrabio faz parte do pioneirismo brasileiro na aviação sustentável**. Disponível em: <<https://ubrablo.com.br/?s=A+Ubrabio+faz+parte+do+pioneirismo+brasileiro+na+aviacao+sustentavel&cat=0>>. Acesso em: 6 ago. 2018.

WARDLE, D. A. Global sale of green air travel supported using biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 7, n. 1, p. 1–64, 2003.

ZELT, T. “New” Oil Plants and Their Potential as Feedstock for Biokerosene Production. In: NEULING, Ulf; KALTSCHMITT, Martin (Orgs.). **Biokerosene**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 277–301. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53065-8_13>.

ZHANG, C.; HUI, X.; LIN, Y.; *et al.* Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 120–138, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.056>>.

ZIMMER, Y. Competitiveness of rapeseed, soybeans and palm oil. **Journal of Oilseed Brassica**, v. 1, n. 2, p. 84–90, 2010.

ANEXO

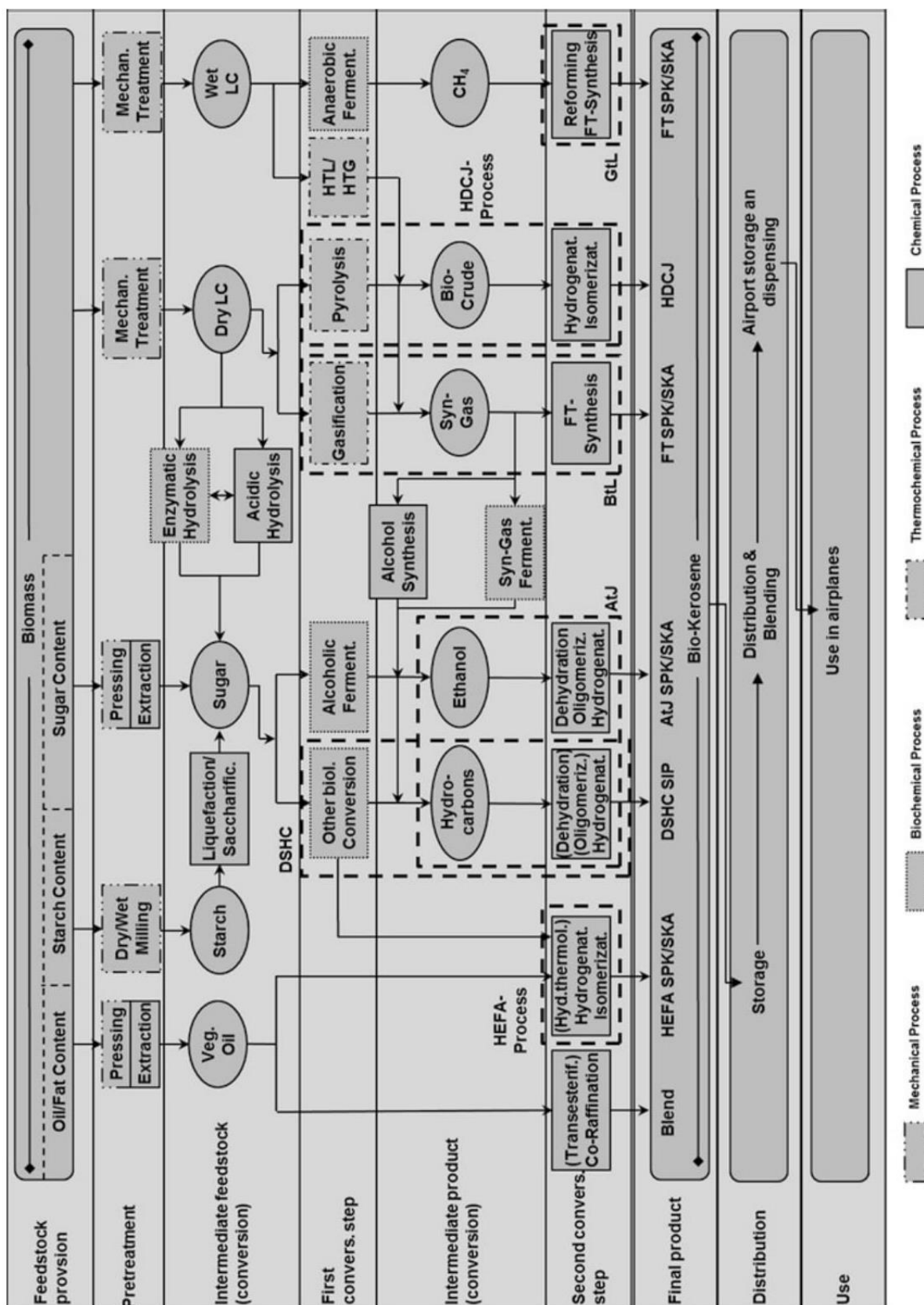
Anexo 1. Especificação do Querosene de Aviação QAV-1

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODOS	
			ABNT NBR	ASTM
APARÊNCIA				
Aspecto	-	claro, límpido e isento de água não dissolvida e material sólido à temperatura ambiente	Visual	Visual D4176 (Procedimento 1)
Cor (2)	-	Anotar	14921 -	D156 D6045
Partículas contaminantes, máx. (3)	mg/L	1,0	-	D5452
COMPOSIÇÃO				
Acidez total, máx. mg	KOH/g	0,015	-	D3242
Aromáticos, máx. ou	% volume	25,0	14932	D1319
Aromáticos totais, máx. (4)	% volume	26,5	-	D6379
Enxofre total, máx.	% massa	0,30	6563 - 14533 -	D1266 D2622 D4294 D5453
Enxofre mercaptídico, máx. ou,	% massa	0,0030	6298	D3227
Ensaio Doctor (5)	-	negativo	14642	D4952
Componentes na expedição da refinaria produtora (6)				
Fração hidroprocessada	% volume	anotar	-	-
Fração severamente hidroprocessada	% volume	anotar	-	-
VOLATILIDADE				
Destilação (7)	°C		9619	D86
P.I.E. (Ponto Inicial de Ebulição)		anotar		
10% vol. recuperados, máx.		205,0		
50% vol. recuperados		anotar		
90% vol. recuperados		anotar		
P.F.E. (Ponto Final de Ebulição), máx.		300,0		
Resíduo, máx.	% volume	1,5		
Perda, máx.	% volume	1,5		
Ponto de fulgor, mín.	°C	40,0 ou 38,0	7974 -	D56 D3828
Massa específica a 20°C (8)	kg/m3	771,3 - 836,6	7148 14065	D1298 D4052

FLUIDEZ				
Ponto de congelamento, máx.	°C	- 47	7975 - - -	D2386 (9) D5972 D7153 D7154
Viscosidade a -20°C, máx.	mm ² /s	8,0	10441	D445
COMBUSTÃO				
Poder calorífico inferior, mín.	MJ/kg	42,80	-	D4529 D3338 D4809
Ponto de fuligem, mín. ou Ponto de fuligem, mín. e Naftalenos, máx.	mm mm % volume	25,0 19,0 3,00	11909 -	D1322 D1840
CORROSÃO				
Corrosividade à prata, máx.		1	-	(10)
Corrosividade ao cobre (2h a 100°C), máx.		1	14359	D130
ESTABILIDADE				
Estabilidade térmica a 260°C (11)			-	D3241
queda de pressão no filtro, máx.	mm Hg	25,0	-	-
depósito no tubo (visual)	-	< 3 (não poderá ter depósito de cor anormal ou de pavão)	-	-
CONTAMINANTES				
Goma atual, máx. (12)	mg/100 mL	7	14525	D381
Índice de separação de água, MSEP (13)			-	D3948
com dissipador de cargas estáticas, mín.	-	70		
sem dissipador de cargas estáticas, mín.	-	85		
CONDUTIVIDADE				
Condutividade elétrica (14)	pS/m	50 - 600	-	D2624
LUBRICIDADE				
Lubricidade, BOCLE máx. (15)	mm	0,85	-	D5001
ADITIVOS (16)				
Antioxidante (17)	mg/L	17,0 - 24,0	-	-
Desativador de metal, máx. (18)	mg/L	5,7	-	-
Dissipador de cargas estáticas, máx. (19)	mg/L	5,0	-	-
Inibidor de formação de gelo (20)	% volume	0,10 - 0,15	-	-
Detector de vazamentos, máx. (21)	mg/kg	1,0	-	-
Melhorador da lubricidade		(22)	-	-

Fonte: ANP (2009)

Anexo 2. Fontes e processos utilizados na obtenção do bioquerosene



Fonte: Kaltschmitt & Neuling (2018) *apud* Kaltschmitt & Neuling (2015)