



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNA ARAÚJO DE SOUSA

**ÓLEO DA SEMENTE DE MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*): EXTRAÇÃO,
OBTENÇÃO DE BIODIESEL E CARACTERIZAÇÃO DA CONVERSÃO E
VISCOSIDADE CINEMÁTICA**

FORTALEZA

2023

BRUNA ARAÚJO DE SOUSA

ÓLEO DA SEMENTE DE MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*): EXTRAÇÃO,
OBTENÇÃO DE BIODIESEL E CARACTERIZAÇÃO DA CONVERSÃO E VISCOSIDADE
CINEMÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da Área de concentração: Processos, Equipamentos e sistemas para Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios.

Coorientador: Prof. Dr. Tássio Lessa Nascimento.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará

Sistema de Biblioteca

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S696Ó Sousa, Bruna Araújo de Sousa.
Óleo a Semente Ded Macaúba (*Acrocomia Aculeata*): Extração, Obtenção de Biodiesel e Caracterização da Conversão e Viscosidade Cinemática. / Bruna Araújo de Sousa – 2023.
93 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profª. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios.
Coorientação: Prof. Dr. Tássio Lessa Nascimento.

1. Biodiesel. 2. Macaúba. 3. Refino. 4. Viscosidade Cinemática. I. Título.

CDD 620.1

BRUNA ARAÚJO DE SOUSA

ÓLEO DA SEMENTE DE MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULEATA*): EXTRAÇÃO,
OBTENÇÃO DE BIODIESEL E CARACTERIZAÇÃO DA CONVERSÃO E
VISCOSIDADE CINEMÁTICA.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da Área de concentração: Processos, Equipamentos e sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em: 12/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Tássio Lessa Nascimento (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

Prof.^a Dra. Francisca Diva Lima Almeida
Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE)

Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Maria Valdeilza e Valdianor
Sousa.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Tássio Lessa Nascimento e Prof.Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna e Profa. Dra. Ada Amelia Sanders Lopes pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha família pelo apoio incondicional durante todo o percurso no mestrado.

Aos meus amigos que me apoiaram mesmo quando eu dizia que não conseguiria finalizar me deram forças para continuar estando sempre ali por perto.

Ao grupo Grintqui (Grupo de Inovações e Especialidades Químicas) que me auxiliaram e deram suporte para a pesquisa realizada no trabalho.

Gostaria de agradecer ao professor Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna, do grupo de Grupo de Pesquisa em Separações por Adsorção (GPSA) por disponibilizar os equipamentos e auxílio de todos os envolvidos, em especial a integrantes do grupo Marieta e Silva por toda a ajuda durante os experimentos.

RESUMO

A oleaginosa Macaúba (*Acrocomia aculeata*) vêm sendo apresentada como matéria-prima para produção de biodiesel devido sua composição de ácidos graxos na amêndoa e na polpa, quando voltado especificamente para a amêndoa, a composição de ácidos graxos saturados é de 60%, como por exemplo o ácido láurico (C12:0), ácido mirístico (C14:0) e ácido palmítico (C16:0), especialmente ácidos graxos de cadeia curta, como o ácido láurico, podem indicar um maior rendimento no processo de conversão a biodiesel. No trabalho foram avaliadas as características da extração do óleo da amêndoa, em sistema Soxhlet, utilizando-se o hexano como solvente. O rendimento do processo de extração foi de 60,29%, o óleo apresentou Índice de Acidez (IA) de 7,49 mg NaOH/g de óleo. Após a extração, o óleo foi submetido ao processo de pré-tratamento/refino, composto por degomagem, neutralização e secagem. Com o óleo refinado, produziu-se o biodiesel via transesterificação básica com uso do metanol na presença do catalisador hidróxido de potássio (KOH), a reação ocorreu sob agitação constante, a 60 °C, a concentração do catalisador foi de 1,5% da massa do óleo, e a concentração do metanol foi calculada de acordo com a acidez do óleo no qual foi de 0,134 mg NaOH/g. Para avaliação da conversão em biodiesel utilizou-se Cromatografia Gasosa (CG) e Ressonância Magnética de Protóns ¹H. Por CG obteve-se uma conversão de 80,27% em teor de ésteres metílicos (*Fatty Acid Methyl Esters* = FAME), já para o cálculo de conversão com o RMN ¹H foi obtido 89,68%. As viscosidades cinemáticas e dinâmicas para o óleo bruto foram medidas seguindo a metodologia ASTM D2270, apresentando os valores para viscosidade cinemática de 60,248; 27,728 e 6,314 mm²/s, nas temperaturas de 20 °C, 40 °C e 100 °C, respectivamente. Para o biodiesel produzido do óleo pós-refino, a viscosidade cinemática, dinâmica e densidade foram medidas com variação de temperatura de 20 °C a 100 °C para avaliar o comportamento do biodiesel, obtendo-se a viscosidade cinemática de 3,900 (20 °C); 2,527 (40 °C) e 1,221 mm²/s (100 °C). Os valores de viscosidade cinemática encontrados para as misturas B15 e B20 foram de 2,743 e 2,705 mm²/s, respectivamente. Foi realizado a análise inicial em reômetro para a avaliação do coeficiente de atrito (CoF), o biodiesel de macaúba apresentou CoF baixo, obtendo coeficiente de atrito médio de 0,0521. Os resultados no estudo descrevem que o biodiesel de macaúba, necessita de refino, caso seja

visado para produção de biodiesel com características em conformidade com a resolução ANP vigente, para as suas misturas com o diesel ou substituição total, tendo como base os parâmetros similares ao diesel fóssil, utilizado como padrão para determinar a usabilidade do biodiesel como mistura ou substituição total.

Palavras-chave: biodiesel; macaúba; refino; viscosidade cinemática.

ABSTRACT

The oilseed Macaúba (*Acrocomia aculeata*) has been presented as a raw material for the production of biodiesel due to its composition of fatty acids in the almond and pulp, when specifically focused on the almond, the composition of saturated fatty acids is 60%, as per For example, lauric acid (C12:0), myristic acid (C14:0) and palmitic acid (C16:0), especially short-chain fatty acids, such as lauric acid, can indicate a higher yield in the biodiesel conversion process. In the work, the characteristics of almond oil extraction were evaluated in a Soxhlet system, using hexane as a solvent. The yield of the extraction process was 60.29%, the oil had an Acid Index (AI) of 7.49 mg NaOH/g of oil. After extraction, the oil was subjected to the pre-treatment/refining process, consisting of degumming, neutralization and drying. With the refined oil, biodiesel was produced via basic transesterification using methanol in the presence of the catalyst potassium hydroxide (KOH), the reaction took place under constant stirring, at 60 °C, the catalyst concentration was 1.5% of the oil mass, and the methanol concentration was calculated according to the acidity of the oil, which was 0.134 mg NaOH/g. To evaluate the conversion into biodiesel, Gas Chromatography (GC) and ¹H Proton Magnetic Resonance were used. By GC, a conversion of 80.27% in methyl ester content (Fatty Acid Methyl Esters = FAME) was obtained, while for the conversion calculation with ¹H NMR, 89.68% was obtained. The kinematic and dynamic viscosities for crude oil were measured following the ASTM D2270 methodology, presenting values for kinematic viscosity of 60.248; 27.728 and 6.314 mm²/s, at temperatures of 20 °C, 40 °C and 100 °C, respectively. For biodiesel produced from post-refining oil, the kinematic viscosity, dynamics and density were measured with a temperature variation of 20 °C to 100 °C to evaluate the behavior of the biodiesel, obtaining a kinematic viscosity of 3,900 (20 °C); 2.527 (40 °C) and 1.221 mm²/s (100 °C). The kinematic viscosity values found for mixtures B15 and B20 were 2.743 and 2.705 mm²/s, respectively. The initial analysis was carried out using a rheometer to evaluate the coefficient of friction (CoF). Macaúba biodiesel showed a low CoF, obtaining an average coefficient of friction of 0.0521. The results in the study describe that macaúba biodiesel requires refining, if it is intended for the production of biodiesel with characteristics in accordance with the current ANP resolution, for its mixtures with diesel or total replacement, based on parameters similar to those fossil diesel, used as a standard to determine the usability of biodiesel as a blend or total replacement.

Keywords: biodiesel; macauba; refining; kinematic viscosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Quatro classes de hidrocarbonetos no processo de destilação de Petróleo	19
Figura 2	– Palmeira e Fruto de Macaúba.....	24
Figura 3	– Processamento de separação dos constituintes do fruto de Macaúba para obtenção de óleo.....	26
Figura 4	– Processamento da degomagem com água em óleos vegetais.....	29
Figura 5	– Reação de Transesterificação de óleos.....	32
Figura 6	– Objetivos usuais da tribologia em função das condições desejadas e exemplos	40
Figura 7	– Consumo de energia em um motor de combustão interna.....	41
Figura 8	– Curva de Stribeck modificada associada a componentes de motores automotivos.....	42
Figura 9	– Processo de Extração do óleo de Macaúba.....	47
Figura 10	– Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel de Macaúba.....	49
Figura 11	– Região entre 4,35 a 4,05 ppm dos espectros simulados de RMN ¹ H de triglicerídeos, diglicerídeos, monoglicerídeos e ésteres etílicos	52
Figura 12	– Tortas residuais obtidas do processo de Extração por solvente das amêndoas de Macaúba	
Figura 13	– Polpa de Macaúba descascada.....	58
Figura 14	– Torta Residual da polpa de macaúba após a extração	58
Figura 15	– Processo de degomagem com água modificado para o óleo da amêndoa de Macaúba.....	60
Figura 16	– FTIR para o Óleo da Amêndoa de Macaúba.....	61
Figura 17	– RMN ¹ H para o óleo da Amêndoa de Macaúba.....	63
Figura 18	– RMN ¹³ C para o Óleo da Amêndoa de Macaúba	63

Figura 19	– RMN ^1H para o Óleo da Polpa de Macaúba.....	65
Figura 20	– RMN ^{13}C para o Óleo da Polpa de Macaúba.....	65
Figura 21	– Biodiesel do Óleo de Macaúba pós-refino com a coloração amarelada.....	66
Figura 22	– RMN ^1H para o Biodiesel do Óleo da Amêndoa de Macaúba	69
Figura 23	– Curvas de temperatura para a densidade dos biodieseis (B100, B15 e B20) e diesel	72
Figura 24	– Curva de temperatura da viscosidade do Diesel (D100).....	72
Figura 25	– Curva de temperatura da viscosidade do Biodiesel de Macaúba (B100).....	73
Figura 26	– Curva de temperatura da viscosidade do Diesel e Biodiesel de Macaúba (B15)	73
Figura 27	– Curva de temperatura da viscosidade do Diesel e Biodiesel de Macaúba (B20)	74
Figura 28	– Análise do Coeficiente de Atrito, ao decorrer do tempo	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matéria-prima para a produção de biodiesel.	20
Tabela 2 - Composição de Ácidos Graxos (% área).....	24
Tabela 3 - Parâmetros do Ensaio em Reômetro.	52
Tabela 4 - Rendimento do processo de extração do óleo da amêndoa de Macaúba.....	53
Tabela 5 - Características do óleo bruto da Amêndoa de Macaúba.	55
Tabela 6 - Índices de Acidez para o Óleo de Macaúba pós-refino.....	58
Tabela 7 - Quantitativo de Ácidos Graxos presentes no BOR.	66
Tabela 8 - Viscosidades e Densidades para Biodiesel de Soja, Diesel Puro e suas misturas..	69
Tabela 9 - Valores de viscosidade e densidade para o óleo refinado da amêndoa de Macaúba.	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos Específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Matriz Energética Brasileira	17
3.1.1	<i>Diesel</i>	18
3.1.2	<i>Biodiesel</i>	19
3.1.2	<i>Misturas Diesel/Biodiesel</i>	21
3.2	Macaúba	22
3.3	Refino do Óleo Vegetal	25
3.3.1	<i>Degomagem</i>	26
3.3.2	<i>Degomagem com Água</i>	27
3.3.3	<i>Degomagem Ácida</i>	28
3.3.4	<i>Neutralização</i>	29
3.4	Principais rotas de síntese do Biodiesel	30
3.5	Caracterização Reologica	31
3.5.1	<i>Fluidos Newtonianos</i>	32
3.5.2	<i>Fluidos Não-Newtonianos</i>	33
3.5.2.1	<i>Viscoelásticos</i>	33
3.5.2.2	<i>Fluidos dependentes do tempo</i>	33
3.5.2.3	<i>Fluidos Independentes do tempo</i>	34
3.5.3	<i>Viscosidade</i>	35
3.5.3.1	<i>Importância da viscosidade e densidade em motores</i>	36
3.6	Caracterização Tribológica	38
3.6.1	<i>Lubrificação</i>	40
3.6.2	<i>Mecanismos de Desgaste</i>	42
3.6.3	Propriedades tribológicas dos biocombustíveis	42
4	METODOLOGIA	45
4.1	Extração do Óleo à produção do Biodiesel de Macaúba	45
4.1.1	<i>Extração do óleo de macaúba e pré-tratamento</i>	46
4.1.2	<i>Obtenção do Biodiesel a partir do óleo de Macaúba</i>	47

4.2	Caracterização Físico-Química.....	49
4.2.1	<i>FTIR.....</i>	49
4.2.2	<i>Viscosidade.....</i>	49
4.2.3	<i>Cromatografia gasosa.....</i>	50
4.2.4	<i>Ressonância Magnética Nuclear de Prótons.....</i>	50
4.2.5	<i>Índice de Acidez.....</i>	51
4.2.6	<i>Índice de Saponificação</i>	51
4.2.7	<i>Análise em Reômetro.....</i>	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	Extração e Rendimento do óleo da amêndoa e da polpa de macaúba.....	53
5.2	Extração do óleo da amêndoa de Macaúba.....	56
5.3	Refino do óleo da amêndoa de Macaúba.....	58
5.3.1	<i>Degomagem e Neutralização.....</i>	58
5.4	FTIR do Óleo da Amêndoa de Macaúba.....	59
5.5	RMN ¹H e RMN ¹³C.....	61
5.6	Obtenção do biodiesel da Amêndoa de Macaúba.....	65
5.7	Viscosidade e Densidade	68
5.8	Análise em Reômetro	74
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXO A – TABELA COM OS VALORES BRUTOS PARA DENSIDADE E VISCOSIDADE DO BODIESEL DE MACAÚBA, DIESEL, MISTURAS BX E B20.....	92

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Balanço Energético Nacional lançados no ano de 2022, com base no ano de 2021, a repartição da oferta interna de energia no Brasil foi cerca de 55,3% para uso de energias não-renováveis, e somente 44,7% para renováveis, apresentando um aumento em comparação com os outros anos, mas não representativos. Dentre as energias não renováveis, com maiores porcentagens, com 34,4%, temos o uso de petróleo e seus derivados, quando em comparação com o ano de 2017, no qual apresentou uma queda de 36,5%. No âmbito das energias renováveis, o país apresentou consumo de 16,4% de biomassa da cana, seguida de 11,0% da hidráulica, 8,7% de lenha e carvão vegetal e 8,7% de outras renováveis (Energia eólica, solar, biodiesel, lixo entre outras). Valendo destacar o aumento gradual do consumo de biodiesel, devido à legislação de incremento do biodiesel no diesel, sendo comercialmente mais utilizado o biodiesel obtido do óleo de soja.

O combustível fóssil é um grande poluidor da natureza, desde sua extração ao seu descarte, podendo ser causado por derramamentos que ocorrem na água e/ou solo (MOHAMMED *et al.*, 2023). O consumo de combustível, está principalmente ligado ao seus gases emitidos durante a queima, aos danos que podem ocasionar à saúde humana e significativo prejuízo ao meio ambiente. Outra vertente para as consequências provocadas por uso de combustíveis não-renováveis, está no fato que o consumo excede a produção, ou seja, o uso desses combustíveis estão conectados a conflitos entre países, corroborando para a conhecida “crise do petróleo” (XU *et al.*, 2022; TWIDELL *et al.*, 1986).

Devido a necessidade de encontrar outra fonte de combustível útil, a biomassa vêm sendo apresentada como um potencial brasileiro de matéria-prima renovável a ser utilizada como fonte de combustível terrestre e aéreo. A biomassa é uma fonte armazenada sob forma de energia química e uma fonte primária de energia, não fóssil, podendo ser de origem animal ou vegetal (ESCALANTE *et al.*, 2022). Visto esses fatores, o Brasil ganha destaque para o uso de energias renováveis, pois além de sua capacidade hídrica, apresenta elevado potencial para fontes de biomassa devido a sua extensa área territorial e clima favorável. A biomassa vegetal tem grande potencial devido às condições edafoclimáticas que favorecem a produção no país, e com característica de não competir com a agricultura tradicional, com isso o emprego e desenvolvimento de técnicas para a conversão dessas fontes em biocombustíveis vem sendo buscada (BORGES *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2022).

O biodiesel, é apontado como um representante para uma nova entrada dos bio-

combustíveis no mercado. O mesmo, pode ser produzido a partir de fontes biológicas renováveis, como por exemplo, óleos e gorduras vegetais, sendo considerado um combustível viável devido apresentar propriedades de alta densidade energética e compatibilidade com o diesel. Conhecido por ser um combustível biodegradável, possui menor toxicidade, perfis de baixa emissão de compostos poluentes, e por fim, maior lubrificidade aparente quando comparado com o diesel de petróleo (JUNG *et al.*, 2021; YASAR, 2020).

Visto os benefícios associados à produção e introdução do biodiesel na matriz energética, é passível de indagações por parte da população acerca dos possíveis efeitos de seu uso nos sistemas de cada motor. Grandes instituições que atuam nessas decisões acerca da matriz energética, como a Associação Nacional dos Fabricantes de Componentes Automotivos (ANFAVEA) e o Sindicato Nacional dos Fabricantes de Componentes Automotivos (SINDIPEÇAS), concordam com a adição de apenas 10% do biodiesel no diesel, alertando sobre a necessidade de desenvolvimento técnico de pesquisas, testes laboratoriais, ensaios dinamométricos e acompanhamento técnico de frotas afim da verificação dos efeitos prolongados das misturas do biodiesel consequentemente as suas matérias-primas.

Tendo em vista as justificativas para a produção de biodiesel, o Brasil, possui um solo fértil e com alta capacidade de produção para uma diversidade de matérias-primas vegetais. Uma das primeiras fontes para produção de biodiesel no país, foi a soja (*Glycine max*), entretanto entra como competitivo direto na produção de alimento, logo não seja socioeconomicamente viável (BORGES *et al.*, 2016). Dentre outras fontes de produção, a macaúba (*Acrocomia aculeata*), conhecida também como bocaúva, trata-se de uma palmeira perene, frutífera e com uma ampla distribuição geográfica. Dessa planta é possível a extração de óleos da polpa e amêndoa, tendo em sua composição química formada por ácidos graxos que se mostram uma fonte para a produção de biodiesel (BARBOSA *et al.* 2022; MAGALHÃES *et al.*, 2020; LIEB *et al.* 2019).

Semelhante ao dendê (*Elaeis guineensis*), é extraído óleo da amêndoa e da polpa do fruto da macaúba. Através da amêndoa se obtém um óleo fino e transparente com alto grau de saturação que representa cerca de 15% do total de óleo da planta, sendo rico em ácido graxo láurico e oleico. O óleo da polpa é de cor vermelho amarelado, com maior número de insaturações, com uma riqueza de ácidos oleico e palmítico (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Todavia, os óleos apresentam uma série de problemas ocasionados durante o processo industrial e de armazenamento, contendo ao fim uma grande perda do material necessitando

de processos de refino e melhorias na qualidade do óleo e do biodiesel produzido.

Por fim, esse trabalho tem como objetivo de contribuir para a pesquisa de um elemento natural nativo do Brasil, com o intuito de construir subsídios para o aproveitamento completo da macaúba, buscando a extração e refinamento do óleo extraído da amêndoa do fruto, e a produção de biodiesel do mesmo. Ademais, para buscar a adequação do biodiesel e suas respectivas misturas com o diesel-fóssil, o mesmo foi avaliado por meio de ensaios físico-químicos e tribológicos, almejando a conformidade com a legislação brasileira.

2 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo a extração e refino do óleo da amêndoa de macaúba (*Acrocomia aculeata*), produção via transesterificação do biodiesel a partir do óleo obtido da amêndoa e caracterização físico-química e tribológica do biodiesel e o óleo da amêndoa de macaúba.

2.1 Objetivos Específicos

1. Extração em sistema Soxhlet do óleo da amêndoa e da polpa de macaúba;
2. Refino do óleo da amêndoa de macaúba;
3. Produção do Biodiesel via transesterificação;
4. Caracterização físico-química do óleo da amêndoa de macaúba, buscando a elementos eficazes visando à produção do biodiesel;
5. Caracterização físico-química do biodiesel produzido;
6. Avaliação da Viscosidade de acordo com a ASTM D2270, do óleo , biodiesel e misturas biodiesel/diesel (BX) nas proporções de 15/85 e 20/80, para identificação da sua capacidade lubrificante;
7. Elaboração da curva de viscosidade e densidade para o biodiesel de Macaúba (B100) e as misturas BX (B15 e B20).
8. Análise inicial do Coeficiente de Fricção para o Biodiesel de Macaúba (B100).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Matriz Energética Brasileira

O consumo de fontes de energia atrelado com a capacidade de emitir partículas poluentes apresenta um descompasso com as necessidades ambientais, devido a isso, é possível observar relevantes transições energéticas em todo o mundo. Quando voltado para a América Latina, está ocorrendo uma mudança sociológica na busca da diminuição da utilização de combustíveis fósseis para o aumento das fontes renováveis, o processo ocorre de forma heterogênea, com alguns dos países presos aos combustíveis fósseis por vários motivos, em lenta mudança, e outros considerados em ponta nessa transição (UGARTECHE *et al.*, 2023). Segundo IEA (*International Energy Agency – 2022*), as indústrias e os consumidores estão expostos às ameaças reais de racionamento de energia com a redução da produção, e as ações políticas variam, mas na maioria incluem esforços para determinados investimentos em energia limpa, significando esse impulso nas energias renováveis no setor da energético mundial (IEA, 2022).

No cenário brasileiro, a transição energética é planejada desde de 2007 com a construção do Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), e posteriormente evoluindo para o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE) . O PNE avaliou que a demanda de energia tende a subir em torno de 2,15 vezes, devido a isso entra a construção das diretrizes estratégicas para acompanhar essa necessidade, mantendo a evolução da energia limpa, com enfoque na estruturação da energia eólica e solar presente, mas também no investimento em bioenergia e biotecnologia com a biomassa. Em solo brasileiro, o consumo de energia nos transportes apresenta-se em maior quantidade de consumo ao longo dos anos, segundo o Balanço Nacional Energético (BEN) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2022, esse setor entre 2012 a 2021 houve um aumento de 23% do uso de combustíveis renováveis, sendo entre essa porcentagem 5,2% para biodiesel e 17,4% de Etanol.

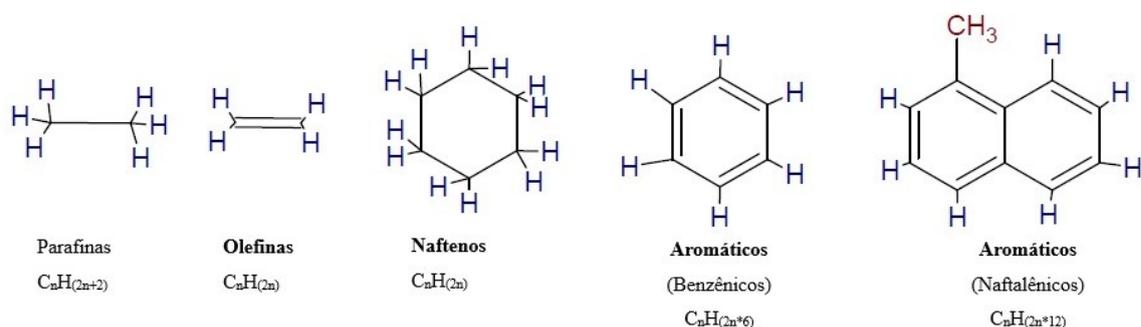
Os níveis de emissões de gases do efeito estufa, cujo os quais retém o calor da terra na atmosfera e contribuem para o aumento da temperatura média da superfície terrestre, vêm ampliando-se ao decorrer dos anos pós-revolução industrial (ANGELA, 2013). O Acordo de Paris de 2015, não estabeleceu uma redução de emissões aos países, entretanto optou em implementar uma política com metas e compromissos que estão dispostos a diminuir as emissões, principalmente no setor de transportes. Com essas diretrizes para a

transição energética, foi preciso encontrar meios de inovação e melhoramento para combustíveis alternativos, como por exemplo o biodiesel, e no âmbito brasileiro o aumento gradual da proporção em misturas com o diesel em motores Diesel.

3.1.1 Diesel

O óleo diesel é composto por uma complexa mistura de hidrocarbonetos não ramificados e saturados, compostos orgânicos constituídos por átomos de carbono e hidrogênio e, em menor quantidade, por substâncias contendo átomos de enxofre, nitrogênio, metais, oxigênio, entre outros. A obtenção do diesel ocorre do processo de destilação do petróleo, em temperaturas na faixa de 160 °C a 410 °C. Os hidrocarbonetos são classificados de acordo com a variabilidade no tamanho das moléculas (LAURO, 2006; SOUZA, 2008; AGUIAR, 2013). As quatro classes principais de hidrocarbonetos são as parafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos, apresentados na Figura 1. Além da composição básica obtida do processo de destilação do petróleo, há a adição de outros compostos para garantir as características esperadas para um combustível, como por exemplo anticorrosivos, antioxidantes, antiespumantes, desativadores de metais, detergentes, entre outros compostos (VIEIRA *et al.*, 2023; MOHAMMED *et al.*, 2023; KERKEL *et al.*, 2021).

Figura 1 - Quatro classes de hidrocarbonetos no processo de destilação de Petróleo.



Fonte: Adaptado Obert (1971).

O combustível diesel apresenta características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores de ciclo diesel (MARQUES NETO, 2003). Um óleo inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com o odor forte e característico (SILVA, 2006; MOHAMMED *et al.*, 2023). No Brasil,

de acordo com a Resolução ANP n°. 65/2011, os dieséis rodoviários são classificados em: (1) Óleo diesel tipo A: combustível advindo de processos de refino de petróleo, de matérias-primas petroquímicas ou autorizadas, sem adição de biodiesel; (2) Óleo diesel tipo B: mesmas características que o tipo A com a adição de biodiesel.

Aguiar (2013) e Cavalcanti (2013), propõem os requisitos para um bom combustível do ciclo diesel sendo estes:

- a. Permitir partida rápida;
- b. Aquecimento uniforme e suave aceleração;
- c. Queima completa com emissão tais como de CO_x, NO_x, SO_x e particulados;
- d. Não cristalizar ou solidificar a temperaturas maiores 0 °C;
- e. Não conter água e/ou sedimentos que possam provocar a interrupção do seu escoamento para os cilindros; e
- f. Evitar a diluição do óleo lubrificante e ajudar na lubrificação da câmara de combustão.

Em junho de 2022, segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a produção do diesel teve um aumento de 11,2%, cerca de 3,671 bilhões de litros, comparado em relação ao mesmo mês do ano de 2021. O Brasil é considerado um exportador desse combustível, e para conseguir manter esse crescente, vê-se o potencial agrícola brasileiro para incremento da produção de biodiesel como substituto.

3.1.2 Biodiesel

Segundo a Resolução ANP N° 920 04/2023 o biodiesel é um combustível composto por alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido pela reação de transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras (animal ou vegetal). O biodiesel é um conjunto variado de ésteres com diferentes estruturas químicas. Composta de 5 a 6 ésteres alquílicos de ácidos graxos principais, como o palmítico, esteárico, oleico, linoleico, láurico e linoleico . Um combustível produzido a partir de óleos vegetais, residuais e microrganismo, pode ser utilizado em qualquer tipo de motor a diesel, como por exemplo em caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e indústrias, geradores e locomotivas (MIYASAKI, 2021; TAMILSELVAN *et al*, 2017; KAMARAJ *et al.*, 2022; NAIR, 2022).

Na perspectiva de aumentar o uso do biodiesel em motores para veículos comuns,

buscando o favorecimento dos aspectos ambientais e econômicos desde a produção à venda ao consumidor, as fontes para a produção do biodiesel é almejada utilização de fontes limpas e renováveis. As principais matérias-primas utilizadas atualmente no país são 80,79% de óleo de soja, 15,82% de gordura bovina e, em menor quantidade, óleos de algodão, fritura reutilizado, gordura de porco e óleo de frango (SOUZA *et al.*, 2016). Os óleos advindos de fontes não-comestíveis e que podem ser utilizados para a produção de biodiesel (PUNEET *et al.*, 2016), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Matéria-prima para a produção de biodiesel.

Óleos Comestíveis	Óleos não-comestíveis	Outras fontes
Óleo de semente de algodão	Óleo de pinhão manso	Microalgas
Óleo de coco	Karanja	<i>Spirulina platensis</i>
Óleo de girassol	Óleo de Mahua	Óleo de fritura
Óleo de canola	Neem	Gorduras animais
Óleo de soja	Óleo de eucalipto	Sebo de carne Bovina
Óleo de Rícino	Óleo de linhaça	Gordura de aves domésticas
Óleo da semente de mostarda	Semente de seringueira	Óleo de peixe
Óleo de amendoim	Polanga	Gordura de Frango

Fonte: Adaptado VERMA; SHARMA, (2016).

Há uma grande variedade nas possibilidades de fonte para a produção do biodiesel, todavia sua utilização ainda é baixa, isso deve-se às desvantagens relacionadas a qualidade do uso em motores e no armazenamento do mesmo. Como por exemplo pode-se citar o congelamento do biodiesel e suas respectivas misturas submetidos às baixas temperaturas ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) (BALAT, 2008; YAAKOB *et al.*, 2014). Outra linha que permanece sem muitos estudos, e que pode ser considerada uma desvantagem da utilização do biodiesel em motores a diesel, é a maior viscosidade em relação ao diesel mineral, que pode vir a causar problemas na injeção de combustíveis de motores. Ademais, os hidrocarbonetos no óleo diesel formam uma camada de depósitos dentro dos tanques, mangueiras, etc. Quando misturado o biodiesel no diesel corroboram para que esses depósitos sejam removidos, ocasionando entupimento nos filtros de combustíveis (WARDLE, 2003; RAJPOOT *et al.*, 2023).

3.1.3 *Misturas Diesel/Biodiesel*

O biodiesel é uma fonte de energia renovável que pode ser usada nos motores a diesel sem necessidade de transformações no motor. O biodiesel apresenta um ponto de inflamação mais alto quando comparado ao óleo diesel e com característica de menores emissões de gases estufas (SILVA *et al.*, 2020). Algumas das vantagens do biodiesel em relação ao diesel fóssil, nos quais são a sua disponibilidade de uso (quantidade produzida), baixa toxicidade, ser neutro de carbono e, ainda, ter a possibilidade de produção descentralizada aumentando as chances de mais estudos sobre sua viabilidade. Entretanto, algumas desvantagens como por exemplo alta densidade e viscosidade podem afetar o seu desempenho no motor a diesel, quando não modificado, especificamente a viscosidade pode influenciar na redução do desempenho e nos intervalos de manutenção da combustão do biodiesel nos motores (YAAKOB *et al.*, 2014; TAMILSELVAN *et al.*, 2017). As estratégias para combater as preocupações citadas anteriormente, inclui o pré-aquecimento do combustível ou uso de aditivos para melhorar as características de misturas diesel-biodiesel (ZANDIE *et al.*, 2022; HOANG *et al.*, 2018).

Com a publicação da Lei nº 11097/2005 e com a criação do programa nacional de produção e uso do biodiesel (PNPB) em 2004, a partir dessa data o biocombustível passou a ser um produto utilizado no Brasil e introduzido na matriz energética do país. A adição do biodiesel puro B100 ao óleo diesel passou a ser mandatória iniciando com 2% de percentual de adição. A partir de julho de 2008 aumentou para 3%; julho de 2009 para 4%, e assim sucessivamente.

O Conselho Nacional de Política energética em 2018, propôs a evolução da adição do biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final no Brasil, estabelecendo o aumento de 1% ao ano, prosseguindo com esse percentual mínimo até 2023, chegando ao percentual máximo de 15% (B15). Com o período pandêmico mundial, ocorrido entre os anos de 2020 a 2023, a evolução do aumento do percentual do biodiesel nas misturas BX esteve em fase estacionária. No ano de 2023, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), através da Resolução nº 16, estabeleceu que a partir de abril de 2023, o percentual de biodiesel no diesel será de 12%, aumentando 1% a cada ano, até 2026, no qual finaliza com 15% de biodiesel no diesel em misturas BX.

3.2 Macaúba

A oleaginosa Macaúba (*Acrocomia aculeata*) membro da família *arecaceae* é encontrada em abundância na natureza principalmente em países tropicais como o Brasil, Paraguai entre outros países da América Latina (SOUZA *et al.*, 2016). Conhecida também como Bocaíuva, coco de catarro, coco de espinho, no Brasil, a palmeira exerce um importante papel ecológico nas regiões de plantio, nos quais processos extrativistas e em casos ecológicos, serve como abrigo para uma diversidade de insetos, répteis e pássaros, além de oferecer suporte para orquídeas selvagens, e seus frutos servem de alimento para espécies animais silvestres (FARIAS, 2010; CARDOSO, 2017). Por ser uma palmeira, pode oferecer a oportunidade de obtenção de gorduras e óleos alternativos de fontes perenes, permitindo a combinação com outras culturas ou produção pecuária, bem como a recuperação de áreas degradadas.

Essa planta pode atingir de 10 a 16 m de altura e 30 a 45 cm de tamanho médio, coberto por espinhos escuros ou não, com 10 cm de comprimento cada, apresentando em torno de 20 a 30 folhas como pode ser visto na figura 2, e produz frutos oleaginosos em cachos que podem pesar mais de 25 kg em condições naturais. O fruto é esférico, composto de 25 a 60 mm de diâmetro com epicarpo liso e mesocarpo fibroso, de cor amarelada pela presença de carotenos ou branco (ausência), juntos o mesocarpo e o epicarpo representa aproximadamente 58% do fruto, o endocarpo é fortemente aderido ao mesocarpo (polpa), atuando no envolvimento da castanha (amêndoa) o que representa cerca de 42% do fruto (COPPEL *et al.*, 2018; CASTRO C. A. *et al.*, 2017). Sua polpa é amarela, rica em óleo e mucilagem, uma substância gelatinosa que reage com a água, aumentando o volume da polpa, presente em diversas plantas cuja função é de retenção de água, sendo também a parte comestível (COLOMBO, 2017).

Figura 2 - Palmeira e Fruto de Macaúba.



Fonte: Google imagens (2023).

Em termos quantitativos de extração de óleo, o óleo da polpa corresponde por 85% do teor total de óleo e o óleo da amêndoa pelos outros 15%, em média por fruto. O óleo da polpa pode conter até 74-81% de teor de ácidos graxos insaturados, sendo o ácido oleico (63-65%) seu principal constituinte, destacando-se na classificação de óleo vegetal “alto oleico”, como pode ser observado na tabela 2 (COPPEL *et al.*, 2018; CASTRO C. A. *et al.*, 2017; RÍO *et al.*, 2016). Outras características envolvendo o óleo da polpa da macaúba é sua alta estabilidade oxidativa devido à sua grande proporção de ácidos graxos monoinsaturados e de glicerídeos juntamente com altos e significativos níveis de carotenóides. Já o óleo obtido da amêndoa da macaúba, apresenta alto teor de ácido láurico (40,8%), sendo de alto valor na produção de cosméticos e biodiesel (OLIVEIRA *et al.*, 2017; RÍO *et al.*, 2016; FAVARO *et al.*, 2022).

Tabela 2 - Composição de Ácidos Graxos (% área)

Ácido Graxo	(% área) na polpa	(%área) na amêndoa
Cáprilico C8:0	-	6,2 ± 0,3
Cáprico C10:0	-	4,2 ± 0,3
Láurico C12:0	-	40,8 ± 1,1
Mirístico C14:0	2,56 ± 0,16	8,4 ± 0,6
Palmitico C16:0	13,60 ± 1,38	6,9 ± 0,5
Palmitoleico C16:1	2,68 ± 0,07	-
Esteárico C18:0	1,74 ± 0,16	2,4 ± 0,1
Oleico C18:1	68,76 ± 0,34	26,9 ± 1,2
Linoleico C18:2	9,03 ± 0,72	3,4 ± 0,3
Linolênico C18:3	0,84 ± 0,01	-

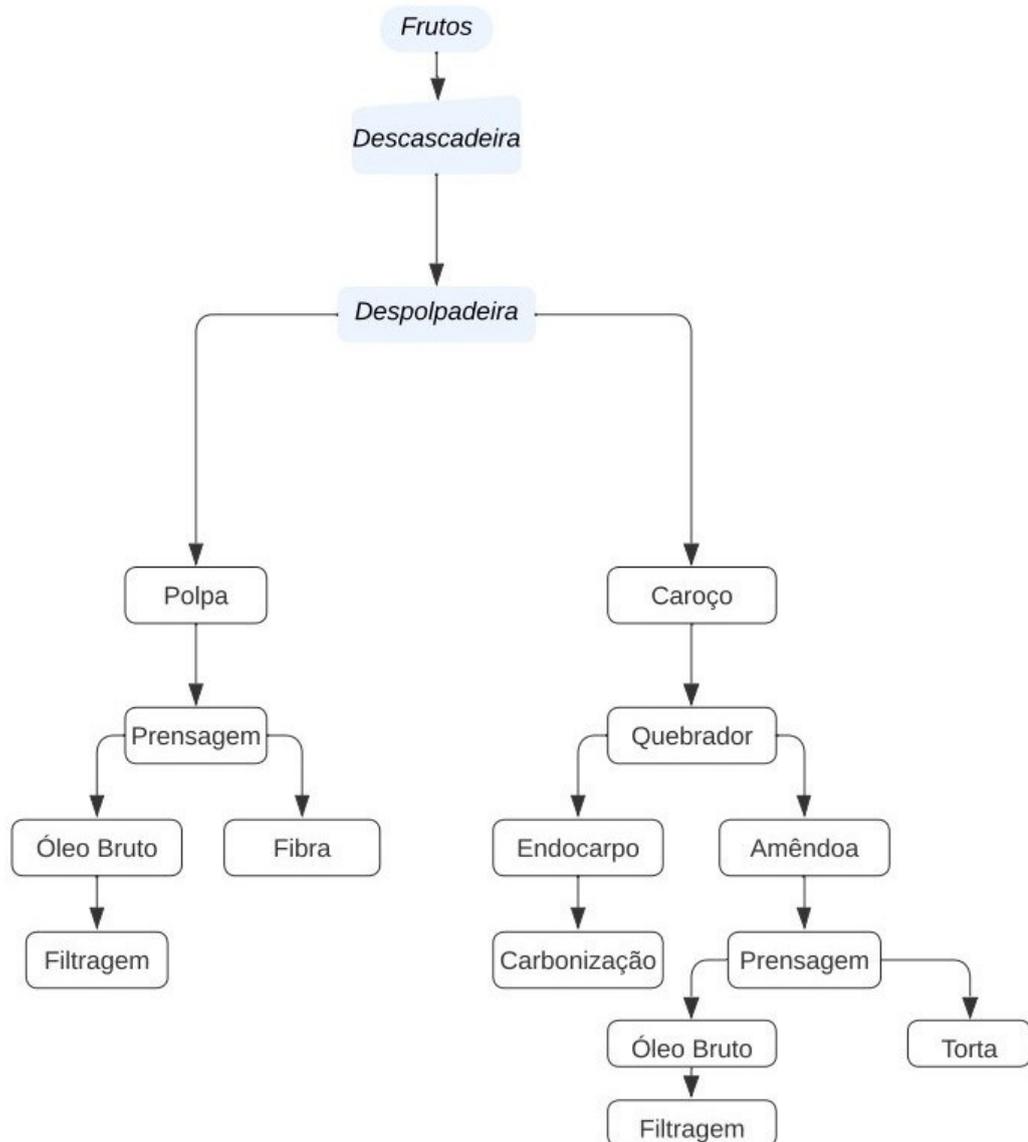
Fonte: Adaptado (FONSECA *et al.*, 2021; MAGALHÃES *et al.*, 2020).

A macaúba apresenta um potencial para produzir acima de 6200 kg de óleo vegetal por hectare ao ano, com um alto rendimento de obtenção de óleo. Tendo boas perspectivas para o melhoramento genético e domesticação da palmeira, espera-se que a produção ultrapasse 6500 kg de óleo por hectare ao ano. Como comparação ao dendezeiro, com produto óleo de dendê, produzindo cerca de 34% de todo o óleo comestível do mundo (RODRIGUES, 2010), o cultivo do dendê está restrito a regiões de clima tropical úmido, já a palma macaúba se adapta a diferentes ambientes incluindo ecossistemas subtropicais mais frios e semiáridos mais secos, o que poderia garantir safras e rendimentos ideais para a obtenção do óleo do fruto (RÍO *et al.*, 2016).

Embora tenha ocorrido inúmeros progressos para o estudo de macaúba, os esforços no território brasileiro têm maior concentração no bioma de cerrado, região central do país. Para um bom desenvolvimento em outras regiões, há a necessidade de estabelecimento de novas variedades em áreas não tradicionais, requerem estratégias de pesquisas voltadas para a seleção de genótipos que obtenham um bom desempenho agrônomo para todas as condições edafoclimáticas para a região selecionada (CARDOSO, 2017).

A principal forma de extração do óleo da polpa e da amêndoa de macaúba, é a prensa mecânica. Na figura 3, estão apresentadas as etapas do processamento de extração do óleo da amendoa e do fruto de macaúba. O fruto colhido manualmente, é enviado para o processo de descascamento e em seguida para a extração da polpa para extração do óleo, e para a retirada da amêndoa, o endocarpo é quebrado, separando a amêndoa para a extração do óleo. Ao fim dos procedimentos, os subprodutos obtidos serão o óleo da amêndoa e do fruto, massa de casca, e as tortas residuais (CARDOSO, 2017; RÍO *et al.*, 2016; FARIAS, 2010).

Figura 3 - Processamento de separação dos constituintes do fruto de Macaúba para obtenção de óleo.



Fonte: Autor.

3.3 Refino do Óleo Vegetal

O mercado agroindustrial de oleaginosas, estende-se desde a produção de óleos comestíveis a insumos industriais. Quando o comércio está ligado ao mercado alimentício, o consumo de óleos brutos, como por exemplo, o azeite de oliva, azeite de dendê e outros tipos de óleos, ocorre sem a necessidade do processo de refino. Entretanto, a maior parte da produção de óleos, visando atender especificações requeridas pelo consumidor e os órgãos regulamentários, necessitam de refino (TIRITAN., 2020; NUNES, 2013).

O processo de refino, tem como finalidade melhorar a aparência, o sabor e o odor

por meio da remoção de impurezas. Esses compostos indesejáveis necessitam ser removidos, para não interferirem nos compostos bioativos desejados a permanecerem no óleo como os tocoferóis, fitoesteróis, ácidos graxos essenciais e compostos fenólicos (SANTORI *et al.*, 2012, CHEW *et al.*, 2021). As substâncias a serem removidas são normalmente:

- a. Substâncias coloidais, proteínas, fosfolípidos;
- b. Ácidos graxos livres e seus sais oxidados;
- c. Corantes (clorofila, xantofila, carotenóides);
- d. Substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular;
- e. Substâncias inorgânicas;
- f. Umidade.

Os óleos vegetais, extraídos por prensagem ou solvente, apresentam certas quantidades variáveis de substâncias de naturezas diversas, tais como ácidos graxos livres, fosfolípidos, tocoferóis, fragmentos de proteínas, pigmentos, esteróis, ceras, vitaminas, materiais resinosos e mucilaginosos. Além das substâncias que alteram a cor, aroma e sabor, como tocoferóis e pigmentos, há as que são arrastadas mecanicamente, como gomas e mucilagens, resinas e proteínas e ceras, que influenciam diretamente na viscosidade e densidade dos líquidos (SANTORI *et al.*, 2012, CHEW *et al.*, 2021).

Na produção de biodiesel usando como matéria-prima os óleos vegetais, há a necessidade de refino, caso o óleo apresentar um teor elevado de ácidos graxos livres (AGL), que pode conferir um índice de acidez (IA) elevado e altas porcentagens de umidade (WEN *et al.*, 2023). Óleos com AGL e IA elevados, favorecem a produção de sabão na reação de transesterificação na produção de biodiesel (WEN *et al.*, 2023). Portanto, o refino pode ser definido com um conjunto de processos que visam tornar os óleos comestíveis e viáveis para a produção de biocombustíveis, podendo ser realizados por via química ou física, e algumas tecnologias verdes em algumas etapas do processo. A Instrução Normativa nº 49 (MAPA, 2006), estabelece o padrão para o refino dos óleos vegetais que inclui a degomagem, neutralização, clarificação e desodorização. Etapas que estão comentadas a seguir.

3.3.1 Degomagem

A degomagem ou remoção de mucilagem é a primeira do processo de refino.

Busca remover os fosfatos (fosfolípidos ou fosfatídeos), traços de íons metálicos, açúcares, fragmentos de proteínas, que são solúveis em óleo. Principalmente voltado para a retirada de fosfolípidos, moléculas nos quais podem atuar como pró-oxidantes e acelerar o estado de oxidação do óleo (ARLINDO, 2019; TIRITAN *et al.*, 2020). Os principais motivos para o uso do processo de degomagem do óleo bruto são:

- a. Facilitar o armazenamento e o transporte;
- b. Extração dos fosfatídeos, como um subproduto valioso;
- c. Facilitar a etapa subsequente de refino, para maiores rendimentos;
- d. Eliminar fosfolípidos e outros compostos indesejáveis.

Os fosfolípidos ou fosfatídeos são lipídios que possuem ésteres formados de glicerol, ácidos graxos, ácido fosfórico, entre outros grupos nitrogenados. São conhecidos como gomas ou borras, e são expressos em partes por milhão de fósforo. Essas moléculas normalmente encontradas em óleos de origem vegetal, são: fosfatidilcolina; fosfatidiletanolamina; fosfatidilinositol; fosfatidilserina e ácido fosfatídico (TIRITAN, 2020; ALMEIDA, 2021).

Segundo a natureza, existem dois tipos de fosfolípidos. O primeiro, chamado de Hidratáveis (HP), representando 90% dos fosfolípidos, e são removidos com adição de água. O segundo, os Não Hidratáveis (NHP), apresentando os sais de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe), não afetados pela água e tendem a ser mais lipossolúveis, se não retirados, podem ocasionar problemas de coloração marrom irreversível (CHEW *et al.*, 2021).

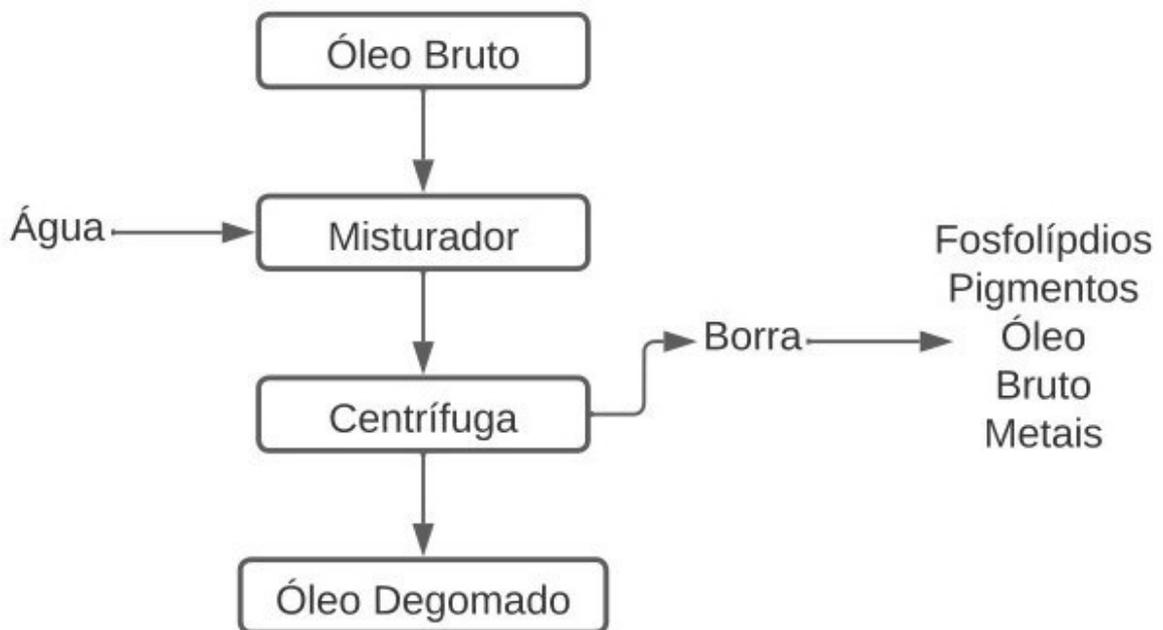
3.3.2 *Degomagem com Água*

Esse procedimento consiste em associar a afinidade dos fosfolípidos com a água. Quando hidratado, os fosfolípidos formam um sedimento sólido ou micelas, insolúveis que precipitam e podem ser retirados sob centrifugação. No óleo de soja, por exemplo, eventualmente ocorre a presença de 2-3% de fosfolípidos, e após a degomagem com água, o rendimento de fosfolípidos no óleo é de 0,30 - 0,80% (RANKE *et al.*, 2009). O procedimento completo está apresentado na Figura 4.

O método consiste na adição de 1-3% de água ao óleo pré-aquecido a 60-70 °C e agitação durante 20-30 minutos, com a formação das gomas que serão precipitadas por centrifugação a 5000 - 6000 rpm. Após esse procedimento, as gomas representam 50% em

massa de umidade, e são secas a vácuo, caso necessite a recuperação. Devido às características de alguns óleos, a porcentagem de adição de água é variável, como por exemplos, óleo de palma e colza é de 10% e 20%, respectivamente e já para sementes de Moringa oleífera por exemplo, é de 22,4% (RANKE *et al.*, 2009; SANCHEZ-MACHADO *et al.*, 2015).

Figura 4 - Procedimento para degomagem com água em óleos vegetais.



Fonte: Autor.

3.3.3 Degomagem Ácida

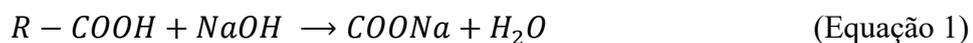
O procedimento de degomagem ácida, consiste na transformação de fosfolípidios não hidratáveis em fosfolípidios hidratáveis, por meio da solução de ácido fosfórico ou solução de ácido cítrico concentrado numa proporção de 0,1% a 0,4% (TIRITAN, 2020). Entretanto, o uso excessivo da solução de ácido fosfórico pode causar um aumento no teor de fósforo dos óleos tratados. Os fosfatídeos insolúveis, caracterizam-se em moléculas apolares à adição do ácido fosfórico, auxiliando na retirada após o processo de degomagem simplificado com água. A degomagem com água remove aproximadamente de 70% a 80% dos fosfatídeos, já o tratamento com ácido fosfórico permite a remoção de 90% (WEN *et al.*, 2023).

3.3.4 Neutralização

O óleo presente nas sementes das plantas, é formado para ser uma reserva de alimento disponível após a germinação da semente, enquanto não houver raiz e folhas formadas para a sua alimentação. O nível de acidez presente nos óleos é propiciado pelas enzimas presentes, que permanecem separados até que ocorra algum efeito externo como a quebra e/ou esmagamento e, considerado importante para fins de refino, por umidade elevada. Quando ocorre alguma alteração física, o óleo entra em contato com as enzimas, para a germinação. Devido a isso, quanto mais nova, armazenada e mais seca estiver a semente, maior nível de acidez livre do óleo (SOARES *et al.*, 2011).

As impurezas solúveis a serem eliminadas com os processos de neutralização, são os: ácidos graxos livres, fosfolípídeos (resíduos) e seus complexos metálicos, especialmente ferro, cálcio e magnésio. Obtendo a possibilidade de remoção parcial de pigmentos e esteróis. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e o Ministério de Agricultura Pecuária (MAPA, 2006), estabeleceu o limite máximo para os índices de acidez (IA) para os óleos comestíveis, de 0,3% e 0,2 mgKOH/g, respectivamente. No caso, óleos para produção de biodiesel, fundamentalmente, a presença de um alto teor de ácidos graxos livres, pode ocorrer a interação com o catalisador alcalino no processo de transesterificação, obtendo-se o processo de saponificação.

A neutralização ocorre adicionando uma quantidade estequiométrica de solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) para a formação de sabão de sódio e retirada total dos AGLs. A equação 1 apresenta o processo de neutralização dos ácidos graxos livres com álcali (WEI *et al.*, 2015).



Na indústria, a concentração da diluição é dada em graus Baume e varia de 10 a 24 °Bé. Escala criada pelo francês Antoine Baumé em 1768 para a medição de densidade de líquidos. Ademais, a concentração da adição do NaOH depende do tipo de óleo, nível de acidez, cor inicial e processo empregado (FARHOOSH *et al.*, 2009). Primordialmente, a adição de NaOH, deve ser o suficiente para garantir uma solução neutra, entretanto, estudos já relatados demonstram a necessidade de adição em excesso, para garantir a neutralização

completa, cerca de 5 a 25%. A seguir, serão apresentados dois dos principais processos de neutralização: o processo descontínuo e contínuo (LEE *et al.*, 2014).

No processo descontínuo, industrialmente o óleo é colocado em um reator com capacidade de 6 – 15 toneladas, sob agitação mecânica, com camisa de vapor indireto e aspersor para a adição da solução alcalina e água fervente para as lavagens (MORETTO *et al.*, 1998; KRALJI *et al.*, 2015). Em óleos de alto nível de acidez, a solução alcalina é mais concentrada, deve-se adicionar ao óleo em temperatura ambiente com intensa agitação, para aumentar o contato entre as fases. Já óleos com baixo nível de acidez, a solução alcalina é adicionada ao óleo aquecido entre 90-95 °C, sem agitação. Após 15-30 minutos, a mistura é aquecida a uma temperatura de 50-70 °C. Para ocorrer a quebra da emulsão, diminui-se a agitação. A mistura permanece em repouso por 2 horas, para ocorrer a decantação da borra (sabões), para posterior remoção (CHEW *et al.*, 2021). Com a retirada da “borra”, o óleo neutralizado é lavado 3 a 4 vezes com água na proporção de 10-20% do volume total. Após as lavagens, a água é removida por decantação.

O processo contínuo é mais rápido e uma pequena quantidade de óleo é perdido, mas há complexos aumentos de custos relacionados a essa planta a nível industrial. A solução mais utilizada é de soda cáustica (hidróxido de sódio) para completa neutralização de acordo com o nível de acidez do óleo, ocorre sob agitação e aquecimento a 65 – 90 °C. Após o procedimento de neutralização, a borra é separada por centrifugação. Para a finalização, o óleo neutralizado é submetido a uma ou duas lavagens com 10 a 20% de água aquecida a 80 – 90 °C e novamente centrifugados, para a remoção do sabão residual (ARLINDO, 2019).

3.4 Principais rotas de síntese do Biodiesel

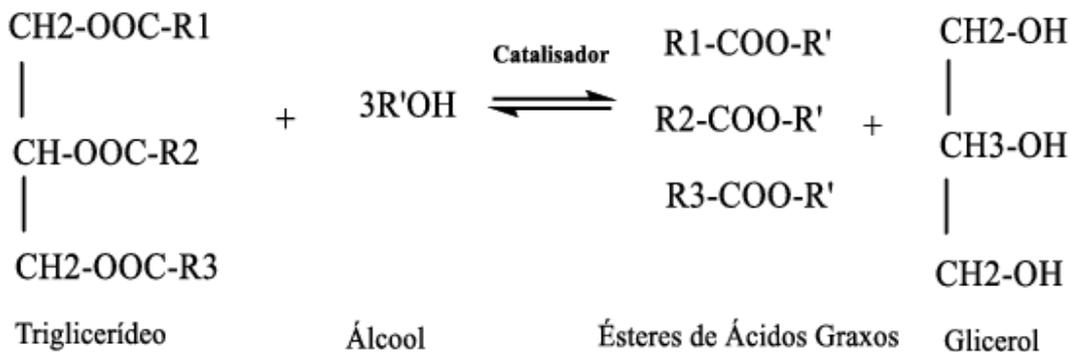
A obtenção do biodiesel pode ser realizada por meio da transesterificação (Figura 5) que é a mistura de metanol ou etanol, na presença de catalisadores homogêneos ou heterogêneos, que reagirá com uma molécula do éster (triglicerídeo), com a formação de ésteres alquílicos (biodiesel) através da troca de alcóxidos, obtendo ao fim da reação biodiesel e glicerol (SUAREZ, 2009; SILVA, 2011).

A reação de transesterificação catalítica homogênea, ocorre quando o catalisador permanece na mesma fase dos reagentes no decorrer da reação. Os catalisadores normalmente utilizados são de dois tipos, alcalinos e ácidos. Os alcalinos são ideais para óleos brutos com baixo teor de ácidos graxos livres, caso o óleo tenha uma quantidade elevada desses ácidos

favorece a reação de saponificação, formando sabão e interfere no processo de separação de fases (BARROS, 2017; ALVES, 2012). A catálise homogênea é o mais comum utilizado em escala industrial, pois seus catalisadores são mais ativos, contendo um menor tempo para a transesterificação e os catalisadores heterogêneos são mais úteis para óleos com maiores teores de ácidos graxos livres (UCHOA, 2017).

O oposto da catálise homogênea, na catálise heterogênea, no qual o catalisador poderá ser recuperado ao final do processo, proporcionando uma diminuição de gastos quanto a matéria-prima para a produção de biodiesel. Os catalisadores heterogêneos são utilizados diversas vezes sem a necessidade de purificação, ademais a sua viabilidade tanto em processos contínuos, como por exemplo, o de batelada. Nesse processo, é dispensável a etapa de lavagem com água e neutralização do biodiesel devido ao uso de catalisadores ácidos ou básicos, diminuindo o tempo necessário para produção do biodiesel (YAN *et al.*, 2010) (AZEVEDO, 2017).

Figura 5 - Reação de Transesterificação de óleos.



Fonte: Adaptado Silva (2011); Barros (2017).

3.5 Caracterização Reologica

A reologia surgiu no século XX com o principal objetivo de estudar as deformações e o escoamento dos materiais, como pode ser observado na própria etimologia da palavra originada do grego *rheos* (fluir) e *logos* (estudo). Logo, a reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dependente do tempo ou não sob a influência de tensões

aplicadas em materiais moles ou complexos, ou seja, estuda a relação entre a força (tensão) e a deformação de materiais (PEHAN *et al.*, 2009; DUNDU *et al.*, 2019).

As características reológicas de fluidos são passíveis de múltiplos fatores independentes e das interações entre esses múltiplos fatores (ZHAI, 2023). Com as determinações reológicas, é possível obter informações sobre a maneira de como um determinado material reage se sujeito a uma força de carácter mecânico. Em sumo, o comportamento resultante é reflexo das diferentes interações de vários componentes, advindos estes do processamento a que foi sujeito e da composição química do material (GAVINA, 2018; ALVES, 2004).

Como comentado anteriormente, as propriedades reológicas relacionam-se com as características de escoamento do fluido imposto a várias condições de fluxo. A aplicação de uma força tangencial a um corpo e a sua deformação são utilizadas para a classificação de um corpo tendo como base a relação entre as tensões de cisalhamento e a taxas de deformação dos fluidos, e classificá-los como será discutido nos tópicos subsequentes (GARNICA, 2020; MARCONDELLI, 2022).

3.5.1. Fluidos Newtonianos

Os fluidos newtonianos demonstram que quando submetidos a pressão e temperatura constante, apresentam uma certa resistência ao escoamento, linearmente dependente da taxa de cisalhamento (MARCONDELLI, 2022). Isaac Newton propôs uma lei para a viscosidade que afirma que ocorre uma relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente local de velocidade, sendo essa definida através de uma relação linear. O fluido apresenta uma viscosidade constante independente da taxa de deformação ou do tempo, podendo haver uma variação da viscosidade devido a alterações de temperatura e/ou pressão (GAVINA, 2018; MEZGER T., 2015; ALVES *et al.*, 2004..

A relação matemática da tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) para os fluidos newtonianos é representada pela Equação 2, conhecida também como a Lei de Newton da viscosidade.

$$\tau_{yx} = \mu \left(- \frac{dv_x}{dy} \right) \mu \dot{\gamma}_{yx} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde μ é a viscosidade do fluido, em cP = 10⁻²g/cm.s = 0,001kg/m.s = 10⁻³ N.s

3.5.2. Fluidos Não-Newtonianos

A maioria dos fluidos apresentam comportamento que não podem ser descritos pela Lei de Newton, tendo uma variação da viscosidade com a taxa de corte. Se opondo aos fluidos newtonianos, os não-newtonianos podem se deformar não linearmente com a taxa de cisalhamento, podendo ser dependentes do tempo (GARNICA, 2020; MARCONDELLI, 2022). A causa provável do comportamento não-newtoniano é resultante de suspensões coloidais de partículas com flexibilidade e formas diversas, podendo ser ligações temporárias e/ou estruturas internas mais ou menos complexas, resultando na formação de redes de diferentes graus de organização, como uma emulsão ou gel. Dentre esses tipos de fluidos há uma classificação de acordo com características do tipo de deformação e a dependência do tempo, podem ser viscoelásticos, fluxo dependentes ou independentes do tempo (GAVINA, 2018; ALVES, 2004; ZHAI *et al.*, 2023; DARVELL *et al.*, 2018) .

3.5.2.1. Viscoelásticos

Em 1835, Wilhelm Weber realizou experimentos conduzidos com os fios de seda, concluindo que o comportamento destes não era perfeitamente elástico, demonstrando características simultâneas de um sólido e de um líquido. Pode-se descrever os viscoelásticos, como uma combinação de um líquido viscoso com as de um sólido elástico, apresentando uma dependência da viscosidade em relação à taxa de deformação ou em relação ao tempo. Posteriormente, fluidos com esse comportamento foram denominados de viscoelásticos (CIDADE, 2005). Os fluidos com essas propriedades após a deformação, retornam parcialmente à sua forma original quando livres da tensão a qual foi aplicada.

3.5.2.2. Fluidos dependentes do tempo

Os fluidos que dependem da taxa de cisalhamento, do histórico de tensões e do tempo de aplicação podem ser divididos em dois grupos: tixotrópico e reopético.

Os fluidos tixotrópicos apresentam um decréscimo em η com o tempo, sob uma tensão cisalhante constante, ou seja, ocorre uma diminuição da viscosidade com o tempo de deformação, já a antitixotropia (reopético) apresenta o aumento da viscosidade com o tempo (PASSOS *et al.*, 2021; COSTA, 2017) . A ocorrência da tixotropia pode ser compreendido com base em microestruturas, que são fruto de forças de atração relativamente

fracas entre as moléculas do fluido, conseqüentemente a formação de estruturas geleificadas que formam redes de partículas no corpo do fluido. Após a quebra da estrutura molecular, sujeita pela tensão de corte, não se refaz do mesmo modo no qual existia anteriormente, sendo que em um espaço de tempo analisado está sendo sujeito a um decréscimo da existência das interações moleculares na estrutura do fluido. Posteriormente, ocorre uma menor resistência do fluido ao escoamento propiciado pelas partículas, e por conseguinte, a diminuição da viscosidade aparente com o tempo. A viscosidade aparente pode aumentar caso ocorra uma interrupção do cisalhamento, com a recomposição das partículas do fluido (FAIM, 2020; COSTA, 2001).

Nos fluidos Reopéticos, se opondo aos tixotrópicos, ocorre um aumento de sua viscosidade aparente com o tempo de deformação aplicada. O fenômeno, normalmente acontece de forma reversível, retomando a característica inicial do fluido com a viscosidade inicial após cessar a deformação aplicada (RAYMUNDO, 2001; COSTA *et al.*, 2001; ISO, 1989). Ademais, esse fenômeno menos comum que o anterior, ocorre quando o alinhamento das moléculas, resultante da aplicação da velocidade de deformação, proporciona a exposição de grupos que anteriormente não estavam em contato, e por consequência podem estabelecer ligações e/ou redes, que ao fim se observa o aumento da viscosidade aparente, por ocorrer um aumento da fricção interna entre as camadas de um fluido com o decorrer do tempo (GAVINA, 2018).

3.5.2.3. Fluidos Independentes do tempo

Os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação são considerados não-newtonianos. Muitos fluidos no cotidiano apresentam esse comportamento, como por exemplo, tinta e pasta dental (CINHA FILHO, 2015). Ao longo dos anos, diversas equações empíricas foram construídas para modelar as relações entre τ_{yx} e $d\mu/dy$ para esses fluidos, as relações podem ser representadas pelo modelo exponencial. A grande diferença entre os fluidos newtonianos, é que enquanto os fluidos newtonianos o μ é constante, o η depende a taxa de cisalhamento, a grande maioria dos fluidos não-newtonianos tem a viscosidade aparente relativamente elevada (MARCONDELLI, 2022; DIAS, 2017).

O modelo de Bingham ou também conhecido Plástico de Bingham, são fluidos que após vencerem a tensão de cedência, apresentam um comportamento linear entre a tensão

de corte, τ , e a taxa de corte, γ (COELHO, 2022). Já quando o fluido demonstra um comportamento em que a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de corte, são nomeados fluidos reofluidificantes ou pseudoplásticos, cotidianamente esse comportamento pode ser observado em molhos para saladas e maioneses. Nos pseudoplásticos, quando estão em repouso, as moléculas, que se apresentam como um arranjo de cadeias longas, se orientam e mantêm uma ordem regular, conseqüentemente influenciando no comportamento da viscosidade, com isso o fluido demonstra-se um fluido mais viscoso, com uma alta resistência ao escoamento, até que ocorra uma força atuante sobre ele.

Vale ressaltar que os pseudoplásticos, algumas vezes, podem apresentar dois tipos de comportamento, o primeiro quando não possuem uma tensão inicial de escoamento podendo ter uma viscosidade constante em deformações muito altas ou muito baixas, no caso de baixas taxas de deformação, a viscosidade é chamada de viscosidade de cisalhamento zero (η_0) e já quando em alta taxa de deformação, a viscosidade se denomina-se viscosidade de cisalhamento infinito (η) (WILKES, 2006, THOMAS, 2001; GAVINA, 2018).

3.5.3 Viscosidade

A viscosidade de modo geral pode ser compreendida como a resistência do fluido a um escoamento de cisalhamento, ou seja, é dada pela relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação (GAVINA, 2018). Essa característica físico-química está correlacionada com o atrito interno nos fluidos, sendo este possibilitado pelas interações intermoleculares, e normalmente está correlacionada em função da temperatura. Quando um fluido é submetido a uma tensão, se fluir de maneira rápida, pode-se aferir que se trata de um fluido pouco viscoso, e caso o fluido que possui uma certa resistência ao escoamento, terá sua fluidez baixa, logo pode ser chamado de fluido altamente viscoso (IKE, 2019; ALVES, 2022; OCANHA, 2022).

Em termos de classificação podemos dividir a viscosidade de um fluido em viscosidade dinâmica e cinemática. Quando nos voltamos para a viscosidade cinemática, pode ser obtida pela divisão da viscosidade absoluta (dinâmica) de um fluido pela densidade da massa do próprio fluido. E a viscosidade dinâmica, pode ser definida como a força tangencial por unidade de área necessária para mover um plano horizontal em relação a outro plano (MEZGER T., 2015; OCANHA, 2022).

O fator constante em todos os cálculos é a constante de proporcionalidade, η ,

também conhecida como a viscosidade dinâmica ou Newtoniana, é caracterizada pela ausência de escorregamento, pelo atrito interno e pela resistência ao escoamento (IKE, 2019). A viscosidade dinâmica representa então, a força de atrito por unidade de área, entre dois planos no seio do fluido, que se deslocam com uma diferença de velocidade unitária, distância que é dada na unidade, expressa em $\text{Pa}^{-\text{s}}$ ou $\text{Nm}^{-2-\text{s}}$ (no sistema SI), mas também por P (Poise) pelo sistema CGS. Essa viscosidade é dependente apenas do temperatura e independente do tempo, do estado de deformação inicial e da taxa de deformação (OCANHA, 2022). Matematicamente, a viscosidade dinâmica pode ser expresso pela equação 3.

$$\tau = \eta * \gamma \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo, τ a tensão tangenciais em um escoamento laminar serão proporcionais à taxa de deformação (γ).

A viscosidade cinemática, pode ser compreendida como a influência da força gravitacional no movimento do fluido. A representação comum para tal é como ν (m^2/s), e é calculada através do quociente da viscosidade dinâmica (η) pela massa volumétrica (ρ) exposto na Equação 4.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{Equação 4})$$

3.5.3.1. Importância da viscosidade e densidade em motores

Os óleos e combustíveis utilizados em motores se deterioram com o passar do tempo, com isso vários métodos têm sido estudados para avaliar a degradação de tais substâncias. Leva-se em consideração como método atual de análises: a viscosidade, o índice de acidez, teor de umidade, sensores de ondas acústicas de superfície, capacitância e sensores de transmissão óptica, gravidade específica, métodos visuais e análise espectrométrica (NUR *et al.*, 2023; SAKAMOTO *et al.*, 2023). Quando voltado para a utilização do biodiesel em motores a diesel, os parâmetros de viscosidade e densidade influenciam na eficiência de tais materiais como combustíveis e vida útil do motor.

A grande variabilidade de fontes dos óleos (vegetal ou animal) para a produção do biodiesel, dificulta os testes de combustíveis em motores diesel, havendo a necessidade de

melhor compressão dessa variância em termos físico-químicos (RAMÍREZ-VERDUZCO, 2024). As flutuações relacionadas à viscosidade e densidade tem impacto considerável na eficiência operacional dos motores. Sendo que a viscosidade está ligada a fatores essenciais para motor, principalmente ao processo de ignição por compressão, quando o biocombustível é introduzido no cilindro, se funde com o ar para formar uma mistura uniforme CI (ASLAN, 2023; UNLU *et al.*, 2018; KUMBHAR *et al.*, 2022; AL DOORI *et al.*, 2021).

Exemplificando, a presença de um biocombustível com alta viscosidade nos motores (em comparação ao diesel) pode impedir o processo de atomização adequada durante a injeção, resultando em gotículas de combustível maiores que lutam para se misturar uniformemente com o ar circundante na câmara de combustão, diminuindo a eficiência do motor (ANH TUAN HOANG *et al.*, 2023; ROMANOV *et al.*, 2024). Compreende-se que caso a viscosidade seja alta, a ignição e a combustão da mistura ar-combustível tornam-se atrasadas e irregulares devido à mistura insuficiente e desigual, conseqüentemente leva ocorrer áreas de combustão incompleta ou ignição retardada, levando ao aumento de emissão de poluentes, como os hidrocarbonetos não-queimados e o material particulado acumulado (ASLAN, 2023; ROMANOV *et al.*, 2024; SAKAMOTO *et al.*, 2023).

A alta viscosidade está associada ao aumento do consumo de combustível, depósitos no motor, desgastes de injetores e bombas de combustível. Já quando ocorre a baixa viscosidade, pode causar vazamento e lubrificação insuficiente (SAEZ-BASTANTE *et al.*, 2016; ASLAN, 2023). O comprimento da cadeia interfere diretamente na viscosidade cinemática, quanto maior o tamanho da cadeia maior o valor para ν , além disso, a viscosidade é afetada por parâmetros como número de insaturações, peso molecular do ácido graxo, etc (YADAV *et al.*, 2017; FOLAYAN *et al.*, 2019). Para questões legais de uso do biodiesel como substituinte do diesel, o valor de viscosidade deve estar em uma faixa específica, determinada nacionalmente pela ANP nº 920 (2023) a viscosidade a 40° C, deve estar entre 3,0 a 5,0 mm²/s.

A densidade dos biodieseis produzidos a partir de qualquer matéria-prima apresentam densidade acima do que geralmente encontra-se para o combustível diesel. A situação pode ser explicada devido ao peso molecular do biodiesel e/ou glicerol residual no éster (GHAZALI *et al.*, 2015; CANAKCI *et al.*, 2008). Reconhece-se que a densidade dos biodieseis tendem a diminuir com o aumento da temperatura e elevar com o aumento da pressão. Os valores limites de densidade para o Biodiesel puro no Brasil segundo a ANP Nº

920 (2023) é de 850 a 900 Kg/m³ à 20° C. Em relação a características moleculares do biodiesel, a densidade aumenta com a diminuição da cadeia e aumento das ligações duplas, propriedade que afeta as características de atomização e combustão do combustível, e consequentemente da eficiência do motor e as emissões dos gases de escape (SUNDUS *et al.*, 2017; KRISHNASAMY *et al.*, 2021). Valores altos de densidade aumentam a temperatura da parede da câmara de combustão e causa um atraso na ignição (ignição mais curta), mas também essa propriedade está associada ao poder calorífico e ao número de cetano (NUR CAHYO *et al.*, 2023).

3.6 Caracterização Tribológica

O termo tribologia vêm do grego *Tribo* (esfregar) e *Logos* (estudo), de forma que sua tradução literal seria “Estudo do Atrito” ou ciência que estuda o atrito. Surgiu com a necessidade do entendimento sobre os mecanismos e fenômenos de desgaste em superfícies, considerando aspectos como lubrificação e atrito (MEZGER T., 2015). Fenômenos nos quais, ocorrem devido o contato entre as superfícies que deslizam por meio de uma ação mecânica, originando o atrito e o desgaste, que por consequência afetam a temperatura, o carregamento, entre outros aspectos (IKE, 2019).

Uma grande quantidade de energia e recursos financeiros é desperdiçada por causa desses fenômenos, devido isso, os estudos sobre as características tribológicas possibilitam a minimização e eliminação das perdas causadas pelo atrito e desgaste. O primeiro estudo sobre os impactos econômicos relacionados aos mecanismos tribológicos, as estimativas de reduções de gastos mediante o uso do conhecimento já existentes na época poderiam reduzir as perdas por desgastes em até 20% (JOST, 1996; SILVA *et al.*, 2020).

Estudos relevantes sobre tribologia, referem-se a encontrar o filme de material necessário para uma aplicação adequada, com capacidade de proteger os eventos sequencialmente relacionados ao atrito (BECKER E.P., 2004). Entretanto, haverá momentos em que se espera a redução do atrito e desgastes e há momentos em que o oposto é necessitado, almejando-se o aumento dos efeitos. Alguns exemplos do caso são demonstrados na Figura 6.

Figura 6 - Objetivos usuais da tribologia em função das condições desejadas e exemplos.



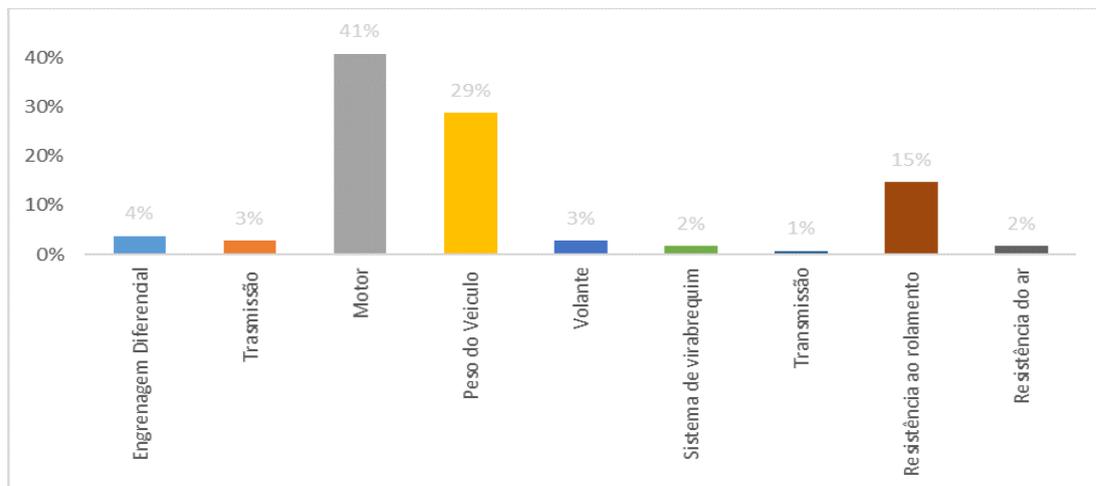
Fonte: Autor.

Quando voltado para desempenho tribológico em motores, os fenômenos podem interferir positivamente e negativamente no rendimento do combustível. Os benefícios do desempenho tribológico superior auxilia na economia de combustível, maior poder de frenagem, baixo consumo de óleo lubrificante, menores emissões de escapamento, maior durabilidade e maior vida útil do motor. Quando ocorre o oposto pode acontecer perdas significativas da energia, cerca de 48%, que será consumida em forma de perdas por atrito como demonstrado na Figura 7. (PENHALBEL,2017; FARIAS, 2016).

3.6.1 Lubrificação

A lubrificação desempenha um papel essencial na redução do atrito e dos danos provocados pelo desgaste. O lubrificante é inserido entre os dois corpos relativamente móveis, e o aumento da fricção significa que a lubrificação adequada não foi fornecida ou a película de lubrificação formada não é eficaz.

Figura 7 - Consumo de energia em um motor de combustão interna.



Fonte: Adaptado Farias *et al* (2016).

A película formada tem a capacidade de reduzir a resistência ao cisalhamento, diminuindo a resistência das asperezas da superfície de contato. Por mais que ocorra a formação de película, não garante que não haja contato das duas partes. Essa camada protetora forma um filme de espessura que pode variar de 1-100 μm , não pode ser visto a olho nu, mas caso seja mais espesso podem ser vistas. Embora não haja restrição quanto ao tipo de material necessário para formar um filme lubrificante, isso afeta a eficácia do mesmo (PENHALBEL, 2017; STACHOWIAK, 2013).

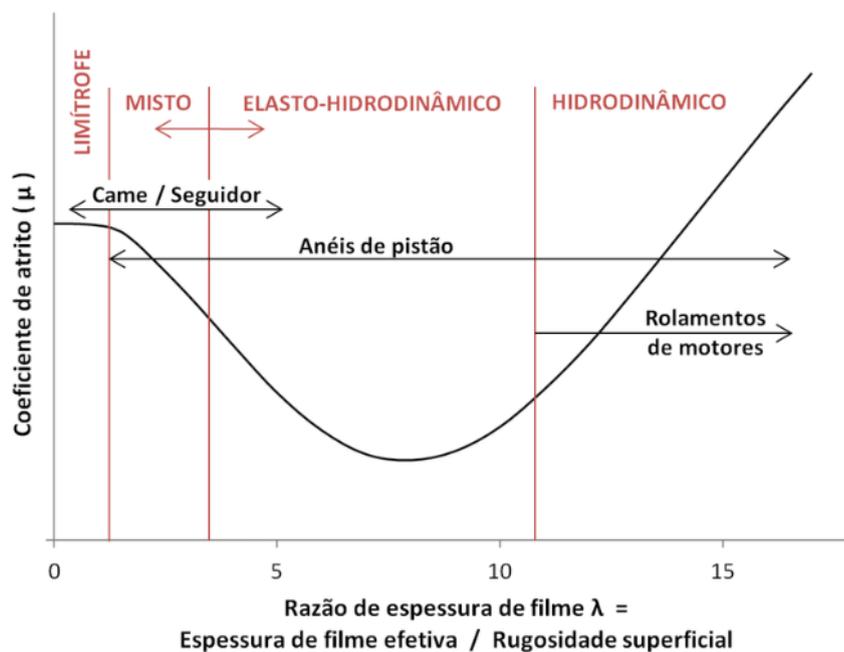
Os regimes de lubrificação são classificados de acordo com a espessura do filme formado. A classificação segue: < 1 ; lubrificação mista: $1 < 3$; lubrificação elastohidrodinâmica: $3 < 5$ e lubrificação hidrodinâmica: $5 < 100$ (STACHOWIAK *et al.*, 2013) (JUNIOR, 2014). A lubrificação hidrodinâmica ocorre quando as superfícies são relativamente deslizantes e estão completamente separadas por uma película de fluido. A elastohidrodinâmica é semelhante, no caso as duas superfícies relativas estão em movimento, nessa lubrificação a película é muito mais fina que a hidrodinâmica e a pressão exercida por

ela é também maior (SILVA, 2018).

A lubrificação Limítrofe proporciona um contato entre as superfícies interagindo de forma a criar uma monocamada lubrificante, com a viscosidade possuindo altas pressões de contato e baixa velocidade (STACHOWIAK *et al.*, 2013). Já a lubrificação mista, como o próprio nome sugere, é o conjunto de lubrificação de Limítrofe e hidrodinâmica, sabe-se que as asperezas dessas lubrificações conseguem entrar em contato uma com as outras, mesmo separadas por um filme lubrificante, podendo ser encontradas em engrenagens, rolamentos, entre outros (SILVA, 2018; PENHALBEL, 2017).

Para a compreensão dos regimes de lubrificação de forma didática, a Figura 8 apresenta o diagrama de Stribeck, em todos os regimes de lubrificação. O diagrama demonstra no eixo das coordenadas o coeficiente de atrito em relação aos parâmetros de viscosidade do fluido e no eixo das abscissas mostra a espessura do filme lubrificante. Na figura 8, foi associada a componentes dos motores automotivos, demonstrando as diferentes classificações dentro das constituintes dos motores (OBARA, 2018).

Figura 8 - Curva de Stribeck modificada associada a componentes de motores automotivos.



Fonte: Obara (2018).

3.6.2 *Mecanismos de Desgaste*

O desgaste, é caracterizado como a redução progressiva do material de um corpo sólido em consequência da ação mecânica, sendo gerado através do contato e atrito, entre o corpo sólido e outro corpo sólido, líquido ou gasoso. Segundo ASTM G40-01 (2001), o desgaste se dá devido à ação mecânica que resulta em perda progressiva do material. Ademais o movimento que é provocado pela ação mecânica pode ser classificado por diversos mecanismos de desgaste (SUNDUS *et al.*, 2017).

Um dos desgastes comuns é o adesivo, tem uma alta instabilidade do coeficiente de atrito, ocorrendo na ausência da camada protetora dos lubrificantes. Esse tipo de desgaste ocorre quando as superfícies lisas são atritadas com uma determinada força, compressão e cisalhamento, adquirindo a tendência de se aderir à outra, no qual é permitido devido a força de atração dos átomos existentes nas superfícies (MILANO *et al.*, 2022; JUNIOR, 2014). Outro desgaste é o abrasivo, ocorre em superfícies de durezas diferentes quando entram em contato, e conseqüentemente há a deposição de material na superfície com menor dureza. O abrasivo, pode ser dividido por quatro tipos: corte, fratura, fadiga e destacamento de grão (RAJPOOT *et al.*, 2023; SUNDUS *et al.*, 2017).

O desgaste por corrosão é a consequência do resultado de uma reação química obtida através das interações entre os elementos, propiciado pela reação entre o material e o lubrificante ou o meio. Além disso, esse desgaste pode ser agravado por ocorrência da oxidação quando na presença de oxigênio atmosférico. O desgaste fadiga, ocorre devido ao contato de superfícies por deslizamento e rolamento apresentando uma falha na superfície. Podendo ser dividido ainda em três tipos: *Pitting* – criação de cavidades na superfície; *Spalling* – Retirada da superfície em formato de escamas; *Brinelling* – dano por deformação plástica (SUNDUS *et al.*, 2017; STACHOWIAK *et al.*, 2013).

3.6.3 *Propriedades tribológicas dos biocombustíveis*

O biodiesel e o bioetanol devido a sua renovabilidade e biodegradabilidade, como substituto total ou parcial do diesel, necessitam de estudos relacionados as suas características físico-químicas e mecânicas. Junto com essa crescente demanda por esses biocombustíveis, há a exigência de uma pesquisa profunda em termos de aspectos tribológicos (DANDU, 2019 ;SILVA, 2018). As vantagens do biodiesel em relação ao óleo

diesel, em relação ao atrito, desgastes e lubricidade são:

- a) Proteção contra arranhões em comparação com o hidrocarboneto do óleo diesel de petróleo;
- b) Os ésteres no biodiesel, estão agindo como surfactantes para superfícies metálicas;
- c) Há a formação de filme mais eficaz;
- d) O teor de oxigênio, CC, COH e COOH do biodiesel pode reduzir o atrito entre as superfícies metálicas; e
- e) A presença de ácidos graxos alifáticos (ácidos esteáricos) pode aumentar a propriedade de lubrificação devido ao desenvolvimento de películas lubrificantes.

A lubricidade dos biocombustíveis de motores de combustão interna é examinada por meio de seu caráter inerente, à lubricidade, como desgaste e atrito, e sua natureza corrosiva. O comportamento da lubrificação de qualquer biocombustível também pode ser avaliado monitorando seu efeito na contaminação e degradação do óleo lubrificante, havendo a necessidade de obter mais investigações tribológicas adequadas para adaptá-lo como combustível regular (DANDU, 2019 ;SUNDUS *et al.*, 2017). Os pontos desfavorecendo o biodiesel estudado até o momento, podem ser destacados (FAZAL *et al.*, 2014):

- a) A oxidação do biodiesel em aplicações a longo prazo causa degradação do combustível, baixa lubricidade, aumento na corrosão e degradação dos materiais;
- b) Absorção de umidade tem influência na taxa de desgaste;
- c) Entupimento do filtro;
- d) A natureza ácida do biodiesel aumenta a degradação dos metais; e
- e) A maior viscosidade associada ao biodiesel proporciona maior deposição no sistema de injeção de combustível.

No trabalho de investigação para compreender o mecanismo de desgaste e atrito nos combustíveis diesel e biodiesel, testando em motores a diesel e suas misturas com biodiesel, foi observado realizando o teste com quatro esferas por 1 hora com condições de carga 40 kg, variando a velocidade (FAZAL *et al.*, 2014). Os resultados demonstraram o menor desgaste a medida que a porcentagem de biodiesel aumentou na mistura, mas também

o coeficiente de atrito diminui com o aumento da proporção de biodiesel. Logo, dependendo de vários fatores e características do biodiesel a ser utilizado, as propriedades tribológicas tendem a ser alteradas de forma significativa (STACHOWIAK *et al.*, 2013; DANDU, 2019; SUNDUS *et al.*, 2017).

4 METODOLOGIA

4.1 Extração do Óleo à produção do Biodiesel de Macaúba

A seguir será apresentado os métodos para a extração do óleo de amêndoa e polpa de macaúba e sua caracterização e a produção inicial de biodiesel do óleo da amêndoa do fruto.

4.1.1 *Extração do óleo de Macaúba e pré-tratamento*

O fruto da Palmeira Macaúba recebido da Região do Cariri-CE, foi separado e descascado para a obtenção da amêndoa, endocarpo e mesocarpo. Em sequência, as amêndoas foram trituradas com o auxílio de um liquidificador, a fim de obter uma massa com grânulos pequenos e homogêneos. As amêndoas foram separadas em 3 lotes, devido ao tempo de armazenamento de cada fruto. A extração do óleo ocorreu em sistema Soxhlet, utilizando-se hexano como solvente (60 °C), por um período de 1 h, correspondendo a 6 - 7 ciclos e 30 g de semente triturada. Após a extração, o solvente foi recuperado em rotaevaporador e o óleo bruto foi armazenado. O fluxograma na Figura 9, demonstra todos os processos realizados na primeira etapa de extração do óleo de macaúba.

Na sequência iniciou-se o processo de purificação do óleo, iniciando-se com a degomagem para retirada de fosfolipídios. O procedimento seguiu utilizando 100 g de amostra de óleo sob aquecimento a 70 °C, e adicionando 50% da massa inicial do óleo de água destilada, pré-aquecida a 70 °C sob agitação constante por 10 min. Em seguida, o material foi transferido para um funil de separação a fim de obter a separação de duas fases, goma e óleo, totalizando 24 horas. A fase inferior foi retirada para descarte, mantendo a superior. A fase superior foi adicionado aproximadamente 5 g de sulfato de sódio anidro para a remoção de umidade residual e posteriormente, o agente secagem foi removido por filtração.

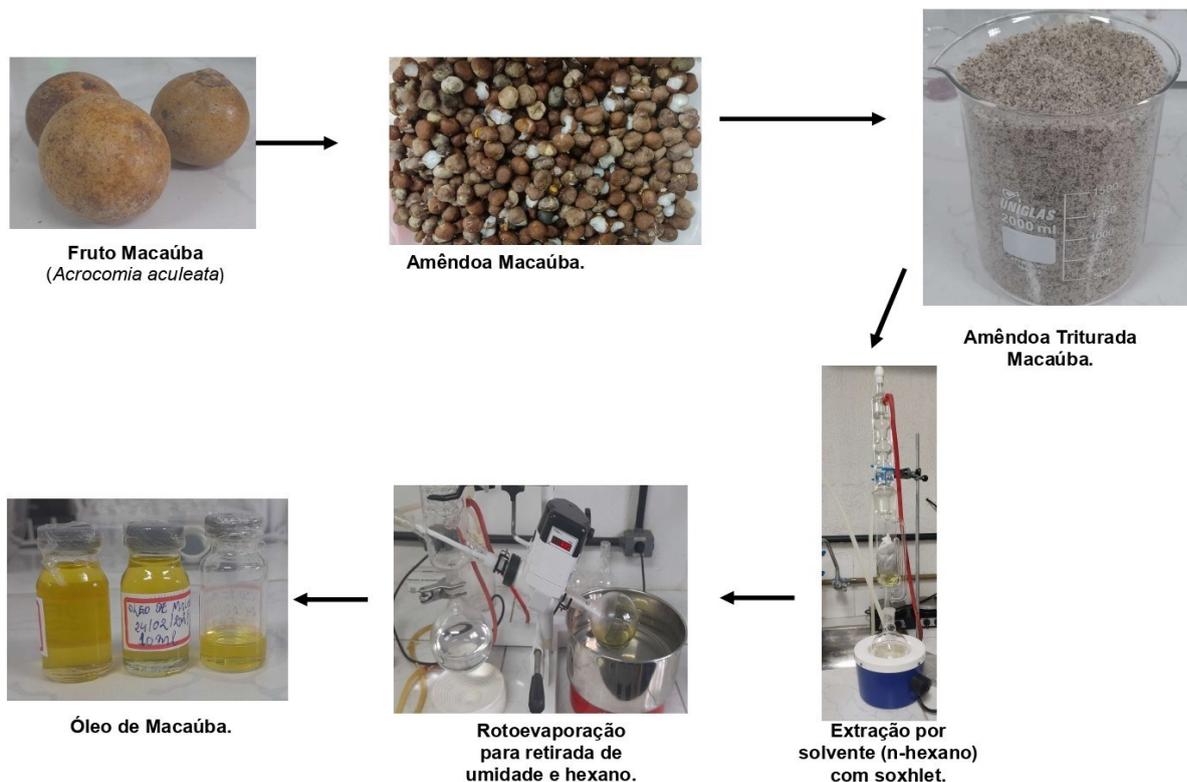
O óleo obtido após a degomagem apresentou acidez alta, e passou pela etapa de neutralização como etapa de pré-tratamento. Essa etapa seguiu a metodologia descrita por Pimenta (2010) com algumas modificações, para adequar as características ácidas do óleo de macaúba. Na neutralização, utilizou-se uma solução de NaOH na concentração de 0,01 mol/L e outra de 0,5 mol/L, o suficiente para neutralizar todos os ácidos graxos do óleo recém degomado, volume no qual utilizou-se na equação 5. Após o volume calculado, o óleo foi

submetido a agitação constante à temperatura ambiente, adicionou-se o volume de NaOH calculado, de maneira ao líquido entrar em contato com o óleo lentamente. Em seguida observou-se a formação de micelas, as mesmas correspondem a formação de sabão a partir da quantidade estequiométrica de AC livres, caso não ocorresse, adicionou-se mais 10% da solução de NaOH ao óleo, para garantir a formação completa do sabão. A mistura foi mantida em agitação por 20 min, após esse período, a agitação foi diminuída e aumentou-se a temperatura até 50 °C para ocorrer a quebra das micelas por 10 minutos.

$$NaOH (l) = \frac{M_{oleica} * IA}{M_{oleica} * C_{base}} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo, $M_{\text{Óleo}}$ a massa do óleo em gramas, o IA o índice de acidez em grama de NaOH. O M_{oleica} , a massa molar oleica e C_{base} a concentração molar da solução de NaOH em L.

Figura 9 - Processo de Extração do óleo de Macaúba



Fonte: Autor.

Posteriormente, a mistura foi deixada em repouso por 2 horas até ocorrer a separação do sabão ou de uma camada chamada de “borra”. Por fim, após a separação, ocorreu a remoção do óleo e lavagem de 3 a 4 vezes com água a 90 °C, utilizando sempre a porção de 20% de água em relação à quantidade de óleo inicial, logo em seguida o óleo foi mantido em funil de separação, por cerca de 30 minutos para cada etapa de lavagem. Ao fim do procedimento, foi medido o Índice de Acidez e e, armazenamento posteriormente, aqueles óleos que apresentaram um valor de acidez abaixo de 2,0 mg de NaOH/g.

Devido a sensibilidade do óleo de macaúba para altas concentrações de NaOH, o óleo foi submetido a adição da concentração de 0,01 mol/L, medido a variação de IA, caso a variação tenha sido maior que 1,0 mg NaOH/g, ocorreu a troca da solução de NaOH para mais concentrado de 0,5 mol/L. O procedimento repetiu-se até que o IA ficasse abaixo de 2,0 mg NaOH/g. Caso o IA não estivesse abaixo, foi necessária a repetição do processo com a adição de NaOH, em uma concentração máxima de 0,5 mol/L, já que devido a concentrações maiores ocorre perda de rendimento e produção exacerbada de sabão.

4.1.2 Obtenção do Biodiesel a partir do óleo de Macaúba

O óleo de Macaúba pré-tratado foi pesado para início do processo de produção de biodiesel. Para a transesterificação foi optado pela utilização da rota metílica, hidróxido de potássio (KOH) como catalisador e o álcool metílico (metanol) como agente de transesterificação. Para o cálculo da massa de catalisador e metanol utilizou-se das equações 3 e 4, respectivamente.

$$M_{cat} = (M_{\text{óleo}} * \% \frac{KOH}{100} + \frac{IA}{1000} * 1) / (Pureza \text{ do } KOH) \quad (\text{Equação 6})$$

$$M_{solv.} = 0,2 * M_{\text{óleo}} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo que o %KOH foi utilizado o valor de 1,5% da massa inicial do óleo; IA é o Índice de acidez do óleo, em mg KOH/g. M(solv.) é a massa do solvente, em gramas; Móleo é a massa do óleo, em gramas.

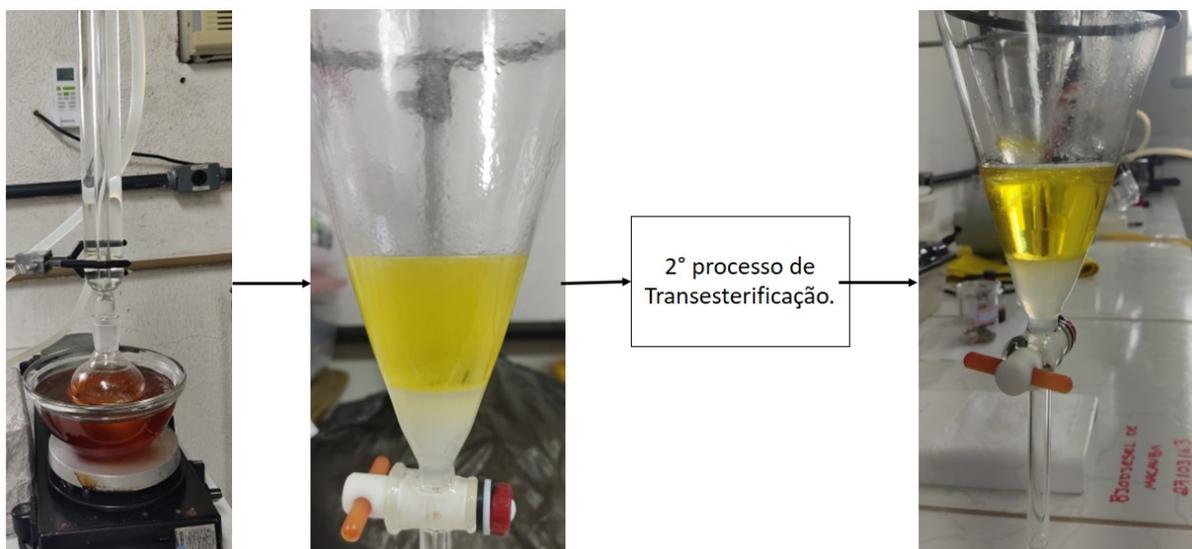
O óleo de macaúba foi adicionado em um balão de 500 mL e submetido a

temperatura de 55 e 60 °C em banho com glicerina. Quando alcançado a temperatura, foram adicionados o hidróxido de potássio (KOH) e o álcool metílico. A reação ocorreu sob sistema de refluxo por 1 hora para a primeira síntese, em agitação a temperatura constante. Após o período, a mistura reacional foi transferida para um funil de separação de 500 mL, e aguardado por o período de 30 min para a separação do biodiesel e a glicerina. Em seguida, a glicerina foi retirada e o biodiesel foi novamente pesado e repassado para realizar uma segunda síntese.

Para a segunda síntese as porcentagens do catalisador foram 0,5% e do agente de transesterificação foram 15%, ambos em relação à massa do biodiesel produzido com a primeira síntese. Os parâmetros operacionais de temperatura, tempo e rotação foram os mesmos relatados anteriormente da primeira síntese. Com o período de 1 hora finalizado da segunda síntese, a solução foi transferida novamente para um funil de separação, para a retirada da glicerina (por 24 horas).

Finalizado o período de separação dos produtos da reação de transesterificação, iniciou-se os procedimentos de lavagem do biodiesel, adicionado 15% de água destilada ao funil de separação, e aguardando a separação por cerca de 30 min após o tempo estipulado, a fase inferior foi retirada, e realizou-se a medição do pH da solução. As lavagens seguiram com a mesma porcentagem de água destilada e tempo de separação, até que a fase inferior estivesse com pH 7,0 como pode ser observado no fluxograma exposto na Figura 10).

Figura 10 - Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel de Macaúba



Fonte: Autor.

Por fim, houve a retirada de umidade com a adição de sulfato de sódio anidro ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), no qual foi mantido na estufa a $100\text{ }^\circ\text{C}$ por 60 min. A fase inferior foi retirada para descarte, mantendo a superior. A fase superior foi adicionado aproximadamente 5,0 g de sulfato de sódio anidro para a remoção da umidade residual e posteriormente, o agente de secagem foi removido por filtração. O Biodiesel foi pesado e armazenado, em frasco escuro e fora do alcance de interferências luminosas, para posterior caracterização.

4.2 Caracterização Físico-Química

A seguir será demonstrado a metodologia utilizada para a avaliação da qualidade do óleo e do biodiesel produzido de amêndoa macaúba.

4.2.1 FTIR

Os espectros de infravermelho foram realizados em espectrofotômetro *Shimadzu* FTIR 8300, as amostras foram trituradas com brometo de potássio (KBr) para obtenção de pastilhas. As bandas de absorção na região do infravermelho foram realizadas de 500 a 4000 cm^{-1} .

4.2.2 Viscosidade

O viscosímetro seguindo os princípios de Couette modificado, apresenta uma rotação com geometria cilíndrica, com um tubo exterior com cotação rápida e um rotor de medição interior com uma rotação mais lenta. A medição de torque é utilizada em viscosímetros que utilizam essa configuração. Tal configuração foi utilizada no estudo com o uso do viscosímetro da Anton Paar, o modelo SVM 3000. As amostras foram separadas com cerca de 15 mL para cada análise, nas temperaturas de $20\text{ }^\circ\text{C}$ a $100\text{ }^\circ\text{C}$. A determinação do Índice de Viscosidade para o óleo de Macaúba e o Biodiesel, foram baseadas no Método ASTM D2270, nos quais apresentam a tabela de determinação do IV de Dean e Calvis, sendo calculado pela equação 8.

$$V = \frac{L-U}{L-U} * 100 \quad (\text{Equação 8})$$

L: viscosidade a 40 °C de um óleo padrão de IV =0, tendo a mesma viscosidade a 100 °C do óleo em estudo; H: viscosidade a 40 °C de um óleo padrão de IV=100, tendo a mesma viscosidade a 100 °C do óleo em estudo; U: viscosidade a 40 °C do óleo em estudo.

As amostras a serem analisadas Diesel, Diesel + Biodiesel a 15%, Diesel + Biodiesel a 20% e Biodiesel.

4.2.3 Cromatografia gasosa

A caracterização do teor de éster (% massa, ABNT NBR 15764) foi realizada em um cromatógrafo da marca Varian modelo GC 450 e coluna CP-Wax 52 CB. Os parâmetros foram volume injetado de amostra de 1,0 µl, temperatura do injetor de 50 °C, temperatura do detector de 250 °C, programação do forno no início a 80 °C mantido por 2 min, taxa de aquecimento de 15 °C/min até 200 °C e 200 °C por 28 minutos. E por fim a vazão do gás de arraste (nitrogênio) de 1,0 mL/min.

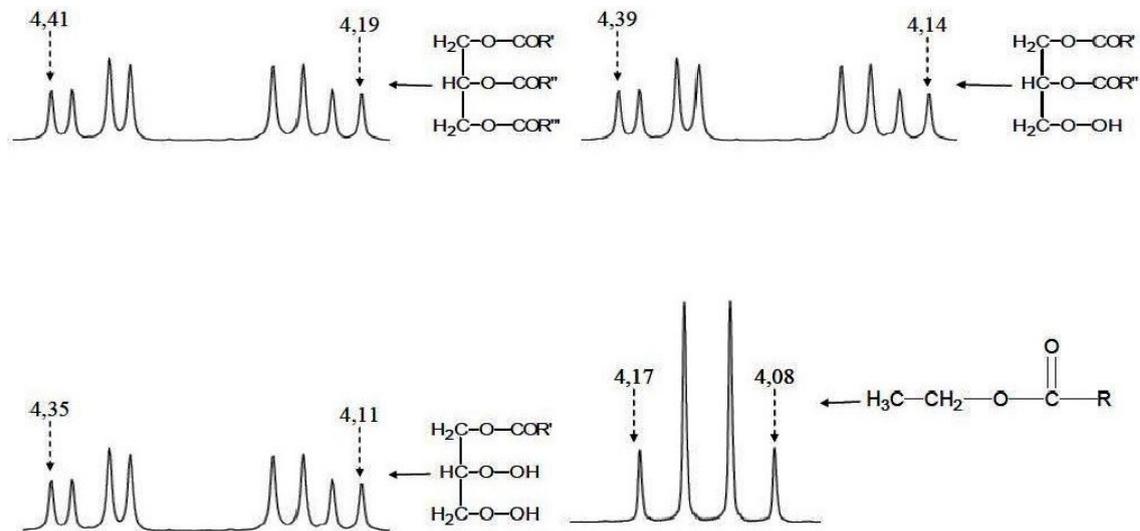
4.2.4 Ressonância Magnética Nuclear de Prótons

Para a avaliação da conversão em ésteres metílicos foi utilizada a Ressonância Magnética Nuclear de Próton (RMN ¹H e RMN ¹³C), espectrômetro Avance DRX 500MHz (Bruker) e clorofórmio deuterado (CDCl₃) como solvente. As regiões analisadas apresentadas na Figura 11. Avaliando a conversão em ésteres metílicos com o RMN ¹H, analisando os sinais correspondentes aos hidrogênios metoxílicos dos ésteres (-CO-O-CH₃) identificados na região de 3,7 ppm e aos prótons metilênicos α-carbonílicos (-CH₂-CO-O-) entre 2,2 – 2,4 ppm. A taxa de conversão é calculada por meio da equação 9 (GELBARD *et al.*, 1995; RODRIGUES *et al.*, 2018; MORGENSTERN *et al.*, 2006).

$$\text{Conversão (\%)} = 100 * \left(\frac{2 * A_{HME}}{3 * A_{PM\alpha-c}} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

No qual A_{HME} é a integral da área correspondente aos hidrogênios metoxílicos dos ésteres e A_{PM_{α-c}} é a integral da área dos prótons metilênicos α-carbonílicos.

Figura 11 - Região entre 4,35 a 4,05 ppm dos espectros simulados de RMN ¹H de triglicerídeos, diglicerídeos, monoglicerídeos e ésteres etílicos.



Fonte: Cárdenas (2013), Teixeira (2021).

4.2.5 Índice de Acidez

Para a determinação do índice de acidez foi utilizada a metodologia do manual de métodos físico-químicos do Instituto Adolfo Lutz (2008), para análise do índice de acidez (IA) de óleos e gorduras. Inicialmente pesou-se 2 g de cada amostra e em seguida, adicionou-se 25 mL da solução neutra de éter-etanol (2:1). Na sequência, acrescentou-se 2 gotas de fenolftaleína 1% e procedeu-se com a titulação com solução padrão de NaOH 0,01 mol/L até o aparecimento da cor rósea. O volume gasto foi anotado e o IA determinado pela Equação 10.

$$IA = \frac{28,2 * f_{NaOH} * V_A * M_{NaOH}}{m} \quad (\text{Equação 10})$$

Na qual f_{NaOH} é o fator da solução de NaOH, V_A é o volume gasto na titulação da amostra, 'm' é a massa da amostra e M_{NaOH} é a molaridade do NaOH.

4.2.6 Índice de Saponificação

Para esse parâmetro foi utilizada a metodologia do manual de métodos físico-químicos do Instituto Adolfo Lutz (2008), na qual pesou-se 4 g de cada amostra em um

erlenmeyer de 250 mL e posteriormente, adicionou-se 50 mL de uma solução alcoólica de KOH 4 %. Na sequência, o sistema, sob refluxo, foi aquecido por 1 hora. Após essa etapa, adicionou-se 1 mL do indicador fenolftaleína e titulou-se com uma solução de HCl 0,5 mol/L. Os volumes das titulações das amostras e do branco foram utilizados para o cálculo do índice de saponificação (IS) representado na Equação 11.

$$IS = \frac{28,5 * f_{HCl} * (V_b - V_a)}{m} \quad (\text{Equação 11})$$

Na qual m é a massa da amostra, V_b e V_a são os volumes gastos nas titulações do branco e da amostra, respectivamente, f_{HCl} é o fator de correção da solução de HCl e IS o índice de saponificação (mg KOH/g de óleo).

4.2.7 Análise em Reômetro

O biodiesel de macaúba foi submetido a análise no reômetro Discovery H-30 (*Discovery Hybrid Rheometer* – TA Instruments), utilizando do método de *Four Balls Tribology Geometr*. Os parâmetros utilizados estão expostos na Tabela 3, agariado de alguns trabalhos envolvendo análise de biodiesel (MARCONDELLI, 2022; FARIAS *et al.*, 2011; RUGGIERO *et al.*, 2017; YUSUF, *et al.*, 2010).

Tabela 3 - Parâmetros do Ensaio em Reômetro.

Parâmetro de Entrada	Valor
Velocidade	1200 rpm
Temperatura	75 °C
Tempo	3600 s
Força inicial aplicada	40 kg/Força

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir será explorado os resultados da pesquisa, para obtenção do óleo da amêndoa e Biodiesel do mesmo e análises iniciais do óleo extraído da polpa de macaúba. E as análises de qualidade do processo de refino do biodiesel produzido em comparação ao diesel fóssil.

5.1 Extração e Rendimento do óleo da amêndoa e da polpa de macaúba

O rendimento encontrado para extração das amêndoas foi de 60,29%, como apresentado na Tabela 4. O tempo escolhido para ocorrer a extração foi de 1 hora a 60 °C. O rendimento encontrado apresenta-se de acordo com os maiores valores de percentual de óleo extraído outros trabalhos sobre plantas do gênero *Acrocomia sp.*. No estudo realizado por (LIEB *et al.*, 2019), extração via solvente (hexano), obteve rendimento variando entre 25,1 e 56,1% de óleo por grama de amêndoa, outros trabalhos apresentaram valores de 48,64 a 57,70% (LIEB *et al.*, 2019) , 41,1% (COSTA, 2016) e 49,2% (BORA *et al.*, 2004) de óleo extraído do farelo de amêndoas de macaúba. Logo, os valores observados no processo de extração foram semelhantes ou superiores.

Tabela 4 - Rendimento do processo de extração do óleo da amêndoa de Macaúba.

	Amêndoa Triturada (g)	Óleo Extraído (mL)
	70	37,90
	105	69,00
	70	48,40
	35	15,70
	35	15,50
	70	67,80
	35	27,70
	58,64	22,80
	145,38	76,70
	55,90	46,70
	61,62	24,60
	64,62	24,10
	137,75	133,30
	47,40	48,70
	150,84	49,50
Total (g)	1141,84	
Total (mL)	-	321,8
Rendimento	-	60,29 %

Fonte: Autor.

No decorrer do processo de extração do óleo da amêndoa de macaúba, seguindo o mesmo procedimento para todas as extrações, foi obtido um óleo que em grande parte apresentou características visuais semelhantes (cor e turbidez). Entretanto, algumas extrações em pequenas proporções, o óleo apresentava características de cor e turbidez diferentes, como a coloração mais clara ou um tom alaranjado escuro para o óleo. O que pode ser explicado pela variabilidade de distribuição de nutrientes ao decorrer da planta e conseqüentemente em seus respectivos frutos (LIEB *et al.*, 2019).

Diferenças na coloração e rendimento podem ser explicadas pelo tempo entre a extração de uma amostra, pois os parâmetros de armazenamento pode interferir diretamente por se tratar de um material orgânico e ser passível de degradação. Outros fatores que poderiam influenciar na coloração, resquícios da polpa do fruto na amêndoa, com presença de caroteno, pigmento presente em grandes quantidades na polpa, ademais fatores como armazenamento podem influenciar em perda de óleo devido à processos oxidativos (BICALHO, 2011; LIEB *et al.*, 2019).

A figura 12 apresenta a diferenciação de coloração da torta residual obtida do processo de extração, os óleos que apresentaram maiores rendimentos obtiveram uma torta residual clara e sem aspecto de coloração que indicaria a presença de óleo, já outra torta residual, ao fim do processo foi obtido uma coloração amarelada, demonstrando a possível presença de óleo, necessitando de segunda extração para obtenção completa do óleo. Mesmo com as possíveis diferenciações nos extrativos dos óleos, os mesmos foram repassados para as próximas etapas do processamento, analisando suas características e refino.

Figura 12 - Tortas residuais obtidas do processo de Extração por solvente das amêndoas de Macaúba.



Fonte: Autor. 1: Resíduo da extração com maior densidade e presença de pigmentos. 2: Resíduo de extração sem coloração (esbranquiçada) e com menor densidade.

Tabela 5 - Características do óleo bruto da Amêndoa de Macaúba.

Óleo Bruto da Amêndoa	Valores Encontrados
Saponificação (KOH/g óleo)	565,44
Índice de Acidez (mg NaOH/g)	7,49
Densidade a 20 °C (k/m ³)	890,6
Viscosidade Cinemática a 40 °C (mm ² /s)	27,72

Fonte: Autor.

Na tabela 5 estão apresentados os valores médios para os óleos obtidos do processo de extração, nomeando de “Óleo bruto” o óleo sem os processos de refino. O índice de acidez (IA) é um dos fatores importantes para a avaliação da conservação da matéria (óleo). A amostra possui um índice de acidez de 7,49 mg NaOH/g, um valor considerado elevado de acordo com Albuquerque (2008), o qual descreve que os valores ideais para que a transesterificação seja eficiente, são valores abaixo de 2,0 mg NaOH/g. Já em comparação com os valores apresentados pela Instrução Normativa 49/2006 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), tendo como comparação os valores de IA para o óleo de soja (*Glycine max*) $\leq 10,0$ mg KOH/g. Já os valores encontrados para o óleo de amêndoas de macaúba em outros trabalhos como Costa (2016) e Boom (2022), nos quais apresentaram 1,9 e 10,91 mg KOH/g, respectivamente, demonstram uma grande variação dos valores de IA, sempre mantendo-se altos.

O alto valor para o índice de acidez pode estar relacionado aos métodos utilizados para a colheita de frutos, amadurecimento e armazenamento. O nível de acidez presente nos

óleos e gorduras brutas está inteiramente ligado a hidrólise enzimática que ocorre na semente ou no fruto em condições de alta umidade e temperatura. Para o caso de produção do biodiesel, o nível de acidez interfere na reação de transesterificação, devido a utilização de hidróxidos como catalisador, no qual, quando em contato com o material altamente acidificado, pode ocorrer as reações de saponificação, levando ao favorecimento da produção de sabão, e conseqüentemente, redução no rendimento de biodiesel por grama de óleo (JUNIOR, 2013; MAGALHÃES *et al.*, 2020).

A amostra de óleo da amêndoa, apresentou um índice de saponificação (IS) de 565,44 KOH/g óleo, calculado a partir da Equação 11. Quando voltamos para a literatura sobre o óleo de macaúba, os resultados apresentados por Magalhães *et al* (2020), com a extração por prensa obteve-se um valor de 233 mg KOH/g. Já Altagata *et al* (2004) apresentou valor de 230,4 mg KOH/g. O IS alto pode estar relacionado ao alto índice de ácidos graxos livres, como pode ser observado nos valores altos do índice de acidez presentes no óleo de macaúba. De acordo com o Del Río *et al* (2016) o óleo da amêndoa de macaúba apresenta 98,6% de triglicerídeo, componente essencial para a produção de sabão, logo quanto maior o índice de saponificação, maior a quantidade de triglicerídeos.

5.2 Extração do óleo da Polpa de Macaúba

Para extração do óleo da polpa de macaúba foi proposto seguir a mesma metodologia utilizada na extração do óleo da amêndoa, porém foi observado um rendimento muito baixo. Na Figura 13 está apresentada a polpa de macaúba *in natura* (A) e em B tem a polpa seca em estufa por 1 hora a 100 °C.

Após o processo de extração, observou-se que 30 g de cada polpa (seca e úmida) obteve rendimento, característica da torta e do óleo diferentes. Na Figura 14, pode-se observar essa diferenciação das tortas residuais, a figura D, corresponde a polpa seca, na qual ocorreu perda quase total da coloração alaranjada e pouca umidade aparente. Quanto a polpa A (úmida) obteve 8,4 mL de óleo extraído, com características visuais de um óleo denso, viscoso e laranja escuro.

Já para o óleo extraído da polpa seca (B), obteve um rendimento de cerca de 12,7 mL de óleo para 30 g de polpa, apresentando características de coloração amarelada, mais fluido e menos denso. Essa diferenciação entre os rendimentos e tortas residuais é explicado

pela quantidade de umidade presente no material inicial, que afeta o processo de extração por solvente.

Figura 13 - Polpa de Macaúba descascada.



Fonte: Autor. Imagem A: polpa úmica descascada de macaúba. Imagem B: polpa de macaúba seca em estufa por 1 hora a 90 – 100 °C.

Figura 14 - Torta Residual da polpa de macaúba após a extração.



Fonte: Autor. Imagem C: Torta da polpa úmica descascada de macaúba. Imagem D: Torta da polpa de macaúba seca em estufa por 1 hora a 90 – 100 °C.

5.3 Refino do óleo da amêndoa de Macaúba

Na busca para adequar o óleo para o aumento da eficiência na produção do biodiesel, as etapas de refino foram necessárias, a saber: Degomagem, Neutralização e Secagem.

5.3.1 Degomagem e Neutralização

O estudo levou em consideração a metodologia para o processo de degomagem contínua e descontínua, de acordo com a literatura (Pereira, 2010), sendo o mesmo necessitando de adaptações de acordo com as necessidades do óleo da amêndoa de macaúba. O procedimento inicia com a adição de 1 a 3% de água destilada ao óleo, pré-aquecido a 60 °C - 80 °C, sob agitação, por 20 a 30 minutos. Entretanto, essa metodologia apresentou falhas para o óleo de macaúba, com perda de óleo em decorrência da formação de gomas. Com esse fato, foi necessário o ajuste da metodologia, a fim de atingir as necessidades de alto rendimento e retirada dos fosfolípidos. A Figura 15 está apresentando o fluxograma das etapas do processo, o qual apresentou rendimento de 60,39% de obtenção de óleo.

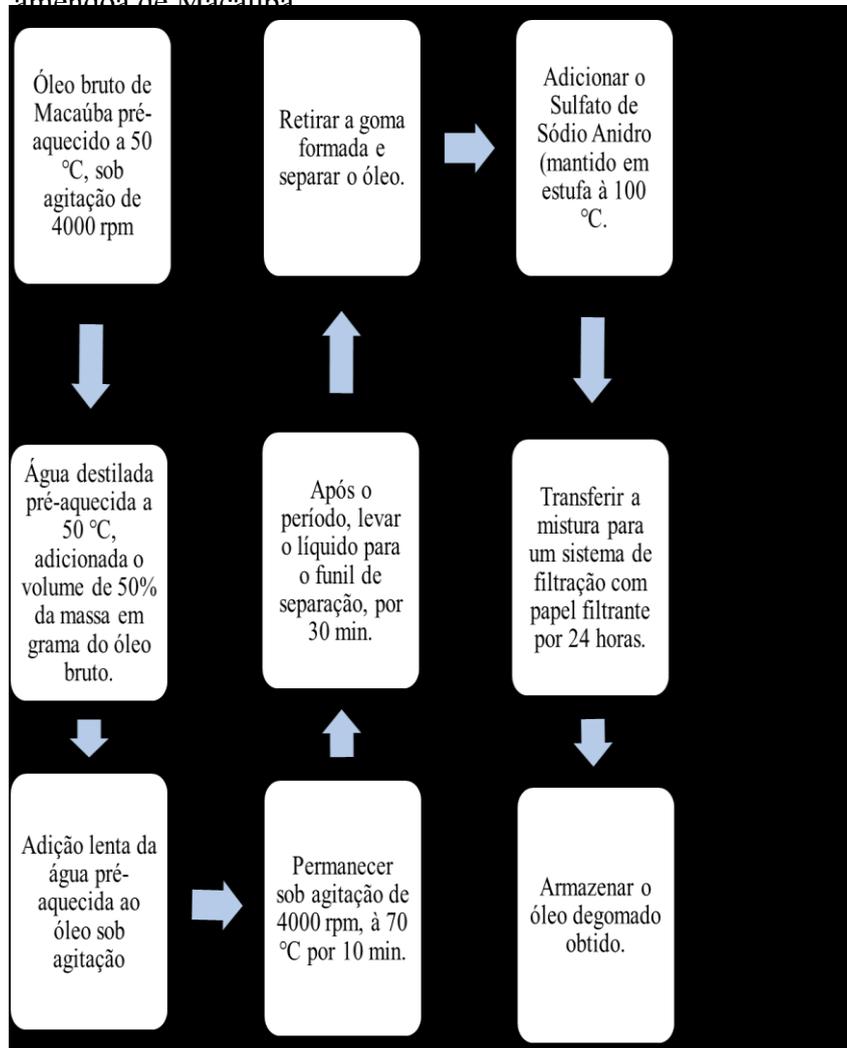
Após o processo de degomagem e neutralização o óleo bruto foi analisado quanto ao índice de acidez e apresentou valores altos, como apresentado na Tabela 6. Entretanto com os processos de refino realizados ocorreu uma diminuição dos valores, finalizando uma diminuição total de 95,26% do valor inicial de acidez, como pode ser observado na Tabela 6, no “Óleo pós-neutralização”, sendo este utilizado para a produção do biodiesel.

Tabela 6 - Índices de Acidez para o Óleo de Macaúba pós-refino.

Tipo de óleo	Índice de Acidez (mg NaOH/g)	% de redução do IA
Óleo Bruto	7,494	-
Óleo Pós-degomagem	2,826	62,32
Óleo pós-neutralização	0,134	95,26

Fonte: Autor

Figura 15 - Processo de degomagem com água modificado para o óleo da amêndoa de Macaúba

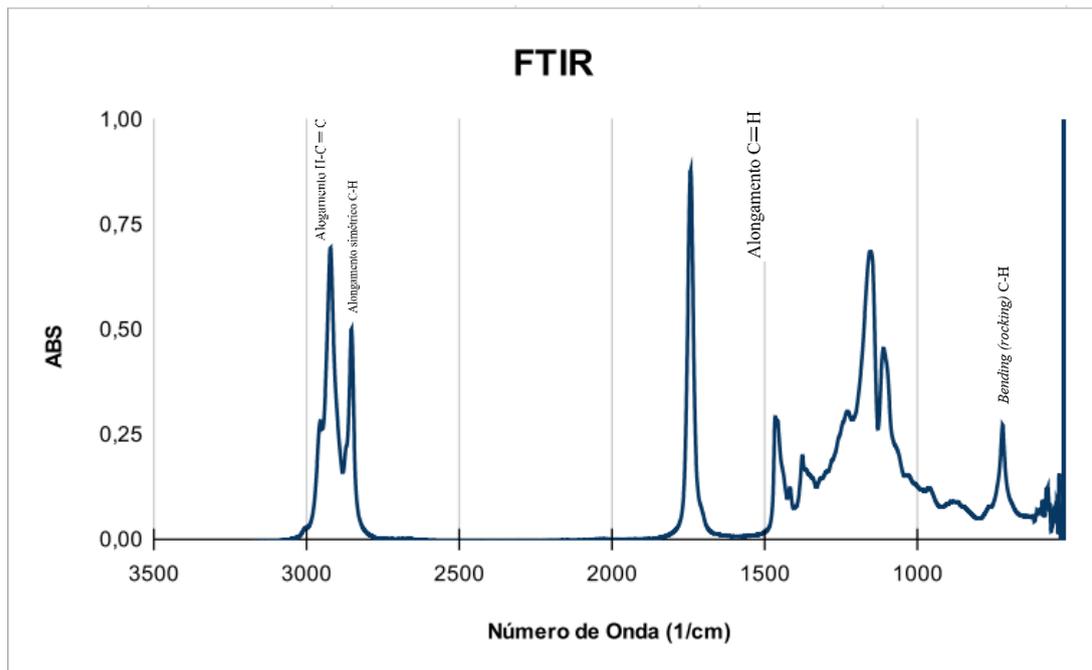


Fonte: Autor.

5.4 FTIR do Óleo da Amêndoa de Macaúba

Para o óleo bruto, foi realizada a análise de FTIR, obtendo o resultado apresentando na figura 16.

Figura 16 - FTIR para o Óleo da Amêndoa de Macaúba.



Fonte: Autor.

O óleo bruto de macaúba foi analisado em FTIR para confirmação das bandas características. O espectro na Figura 16, apresenta picos semelhantes a amostras de óleos vegetais comuns. Com presença de ácidos graxos saturados, quando comparado ao óleo da polpa, o qual apresenta uma maior quantidade de ácidos graxos insaturados (SILVERSTEIN; WEBSTER, 2005; ABDELMALIK, 2011; JASWIR *et al.*, 2003; YOSHIDA, 2003).

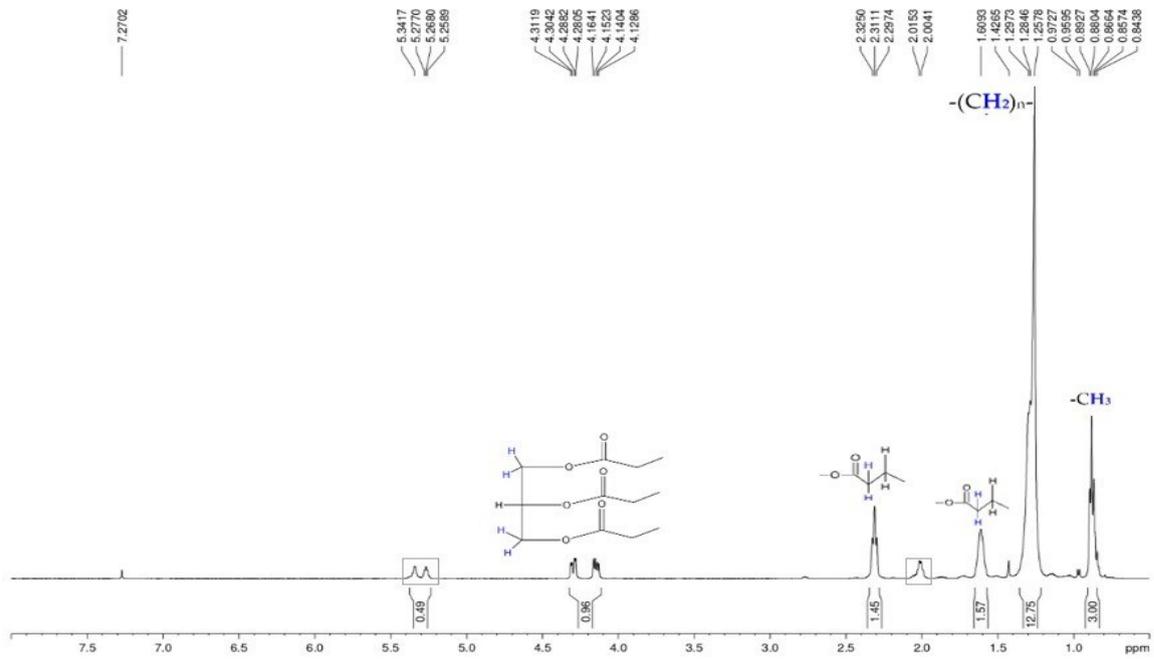
A banda presente em 1740 cm^{-1} é atribuída a vibração de estiramento do grupo éster carbonila nos triglicerídeos. As fortes bandas de absorção nas regiões de 2921 cm^{-1} e 2852 cm^{-1} , são proporcionadas pelo alongamento assimétrico e simétrico C-H alifático, respectivamente. A deformação em 1462 cm^{-1} é devido a deformações angulares no plano (tesoura) nos CH_2 da cadeia (BARBOSA A *et al.*, 2022; YE *et al.*, 2022). As bandas em 1115 e 1097 cm^{-1} é decorrente da vibração de estiramento da ligação éter triagliceróis e o tamanho do pico é inversamente proporcional de grupos acila saturados e grupos de ácido oleico, respectivamente. E por fim, a banda presente em 720 cm^{-1} é atribuída a $(\text{CH}_2)_n$ comuns em óleos vegetais, como por exemplo o de soja (LIMA, 2022; ZHANG *et al.*, 2022).

5.5 RMN ^1H e RMN ^{13}C

A técnica de Ressonância Magnética Nuclear de ^1H (RMN ^1H), se baseia nas transições de spins nucleares, onde o núcleo do hidrogênio sofre a ação de um campo magnético estático e depois a um segundo campo magnético oscilatório, tendo ao fim uma absorção da radiação causando a excitação de certos núcleos específicos, nos quais geram o espectro a ser analisado (TEIXEIRA, 2021). Esse método tem se tornado um dos principais instrumentos para avaliação de óleos vegetais e suas respectivas conversões em ésteres metílicos e etílicos. Nesse trabalho foi estudado os espectros de RMN para o óleo da amêndoa de macaúba e seu respectivo biodiesel, após o processo de refino, tendo como foco no RMN ^1H as regiões referentes aos hidrôgenios metoxílicos dos ésteres e aos prótons metilênicos α -carbonílicos (BREVES, 2018; GRABAUSKAS, 2013; MÁQUINA et al., 2020).

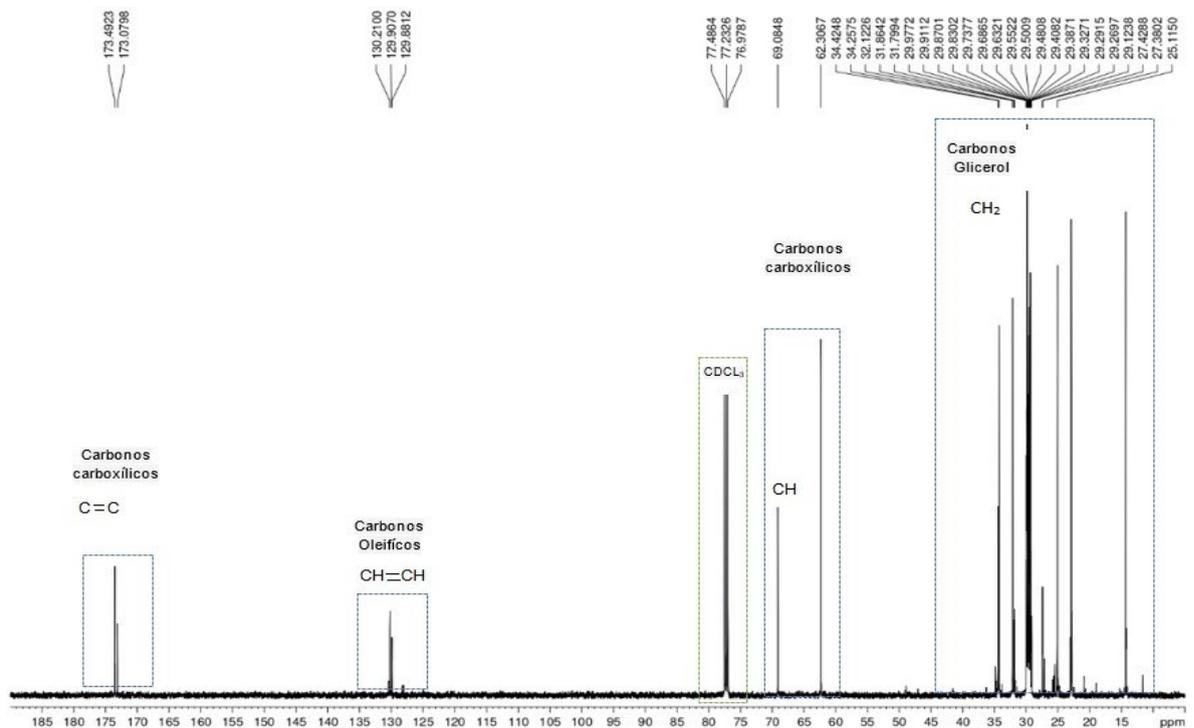
Para o óleo bruto da amêndoa foi realizada a análise de RMN para ^{13}C e ^1H , com os resultados apresentados nas figuras 17 e 18. De acordo com o espectro RMN ^1H , observa-se um deslocamento químico presente em 4,13-4,31 ppm, referente aos hidrogênios da sequência glicerídica. Como presença comum nos óleos vegetais, é observado no espectro os sinais dos prótons olefinicos na região entre 5,32-5,38 ppm (MÁQUINA et al., 2020; SANTOS, 2019). A região próximo a 2,3 ppm apresenta os sinais dos hidrogênios metilênicos $-\text{CH}_2-$ nos carbonos *alpha* à carbonila, dos hidrogênios metilênicos $-\text{CH}_2-\text{C}$ vizinhos aos carbonos insaturados de cadeia linear próximos a 2 ppm e dos hidrogênios $-\text{CH}_2-$ da cadeia linear em 1,3 ppm. E por fim, próximos a região de 0,9 ppm, correspondente aos hidrogênios de $\text{H}_3\text{C}-$ terminais das cadeias dos triglicerídeos (TEIXEIRA, 2021; CARDENAS, 2013).

Figura 17 - RMN ^1H para o óleo da Amêndoa de Macaúba



Fonte: Autor.

Figura 18 - RMN para ^{13}C do Óleo da Amêndoa de Macaúba.



Fonte: Autor.

O espectro de ^{13}C (Figuras 18 e 20), como confirmação dos componentes químicos do espectro de ^1H , mostrou a presença de quatro regiões distintas comuns em amostras de óleos vegetais (ALEXANDRI *et al.*, 2017). A faixa entre 14,27 à 34,40 ppm, corresponde aos carbonos alifáticos saturados, região 62,30-69,10 ppm comum do carbono de glicerol, de 128,10 a 130,41 ppm são os carbonos olefínicos e por último a região de 173,02-175,48 ppm, referente aos carbonos carboxílicos. De acordo com os resultados, além disso os sinais expostos dos carbonos olefínicos indicam a presença de pelo menos um ácido graxo insaturado, logo, os valores apresentados por Magalhães (2020), de cerca de 30,3% de ácidos graxos insaturados presentes no óleo da amêndoa de macaúba, podem ser comprovados (TEIXEIRA, 2021; CALDEIRA *et al.*, 2023).

A Figura 19 apresenta o espectro de RMN ^1H para o óleo da polpa de Macaúba. O espectro apresentou os sinais do hidrogênio dos grupos metilênicos $-\text{CH}_2$ dos carbonos α da carbonila, mas também os hidrogênios metilênicos $-\text{CH}_2-\text{C}=\text{C}-$ vizinhos dos carbonos insaturados da cadeia linear próximos a 2 ppm e dos hidrogênios de $-\text{CH}_2-$ da cadeia linear em 1,3 ppm (TEIXEIRA, 2021). Pode-se observar os sinais comuns para óleos vegetais (triacilglicerídeos), no intervalo de 4,0 a 4,4 ppm temos representados dois duplo-dubletes, que correspondem aos hidrogênios do grupo H_2C do glicerol, logo mais próximo a 5,3 ppm, demonstra a presença dos hidrogênios do grupo HC do glicerol e aos hidrogênios dos carbonos olefínicos dos triacilglicerídeos. Por último, vale destacar também, o tripleto próximo a 0,9 ppm correspondente aos hidrogênios de H_3C terminais das cadeias dos triacilglicerídeos (SILVA, 2009; MÁQUINA *et al.*, 2020).

Figura 19 - RMN para ^1H do o Óleo da Polpa de Macaúba

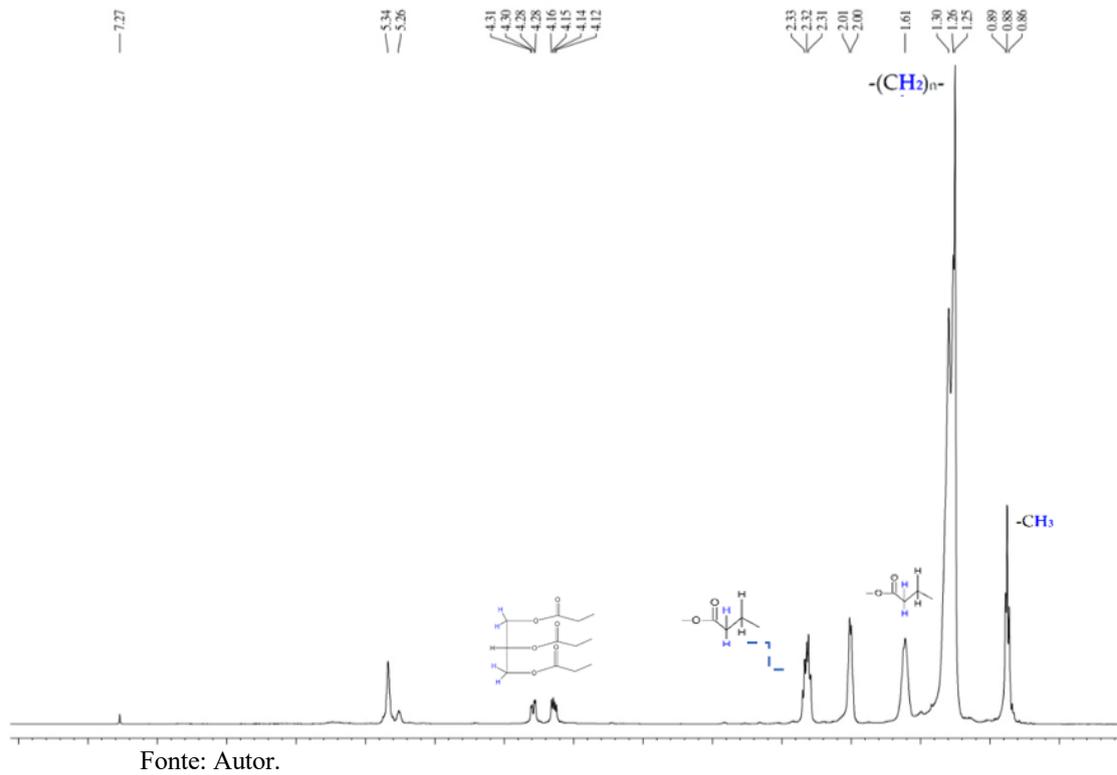
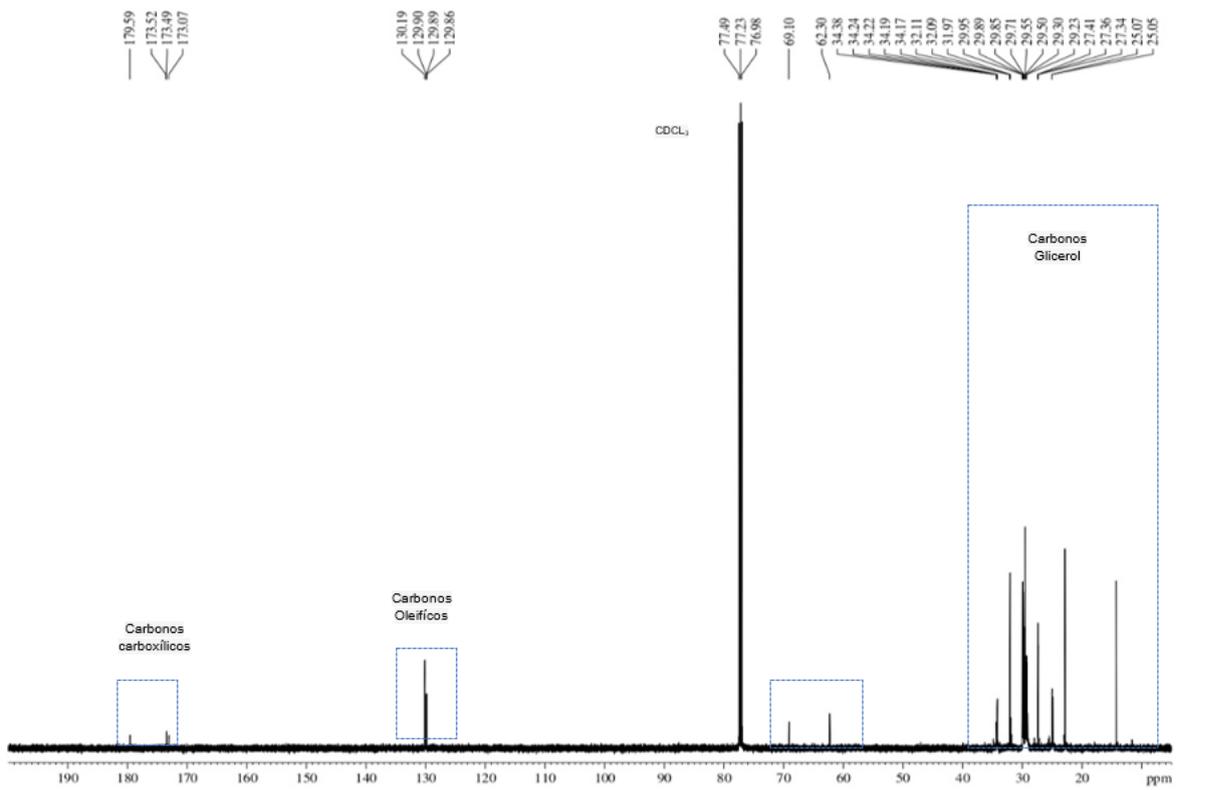


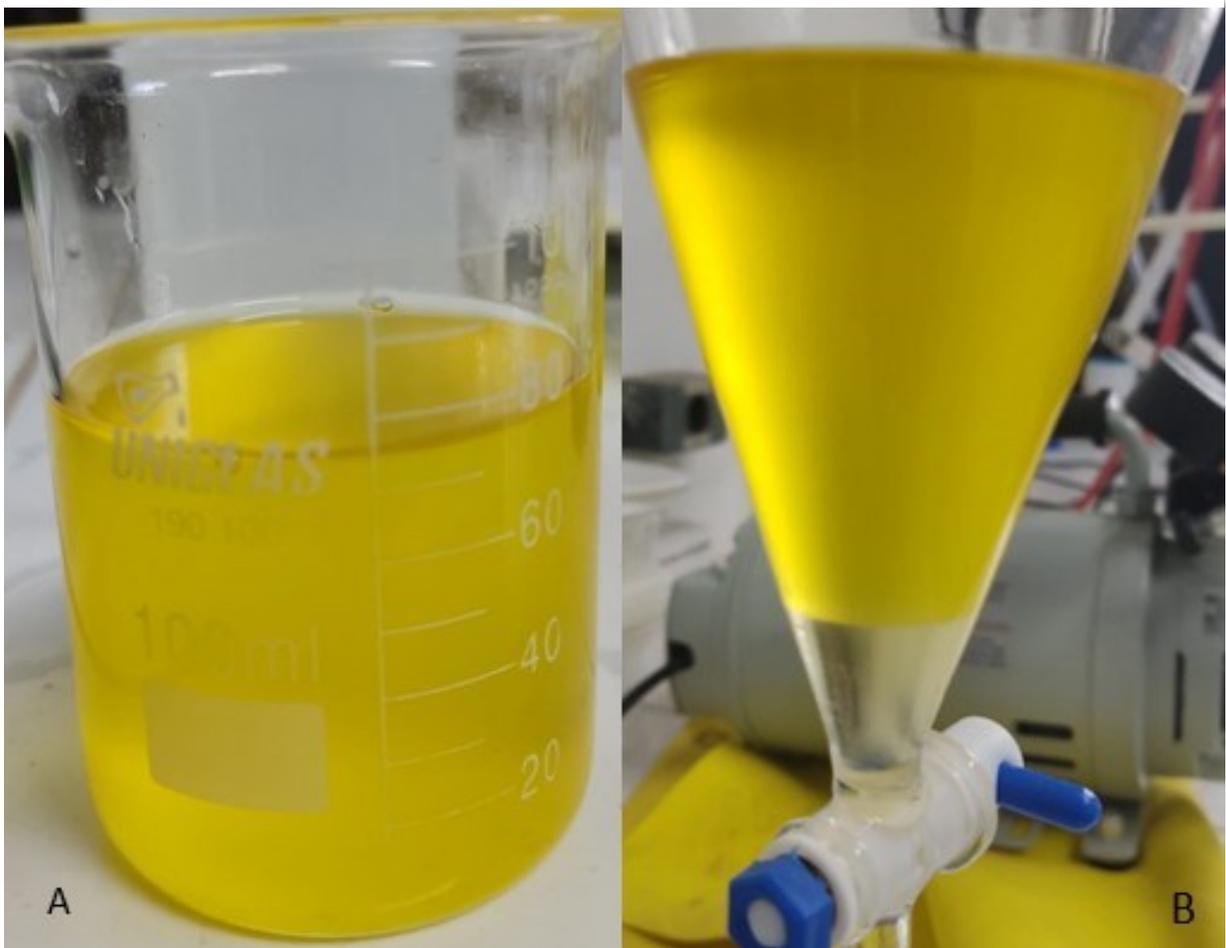
Figura 20 - RMN para ^{13}C do o Óleo da Polpa de Macaúba



5.6 Obtenção do biodiesel da Amêndoa de Macaúba

O biodiesel foi produzido utilizando-se duas amostras de óleo da semente de macaúba, sendo a primeira o óleo bruto (BOB) e a segunda o óleo refinado (BOR). A acidez dos óleos foram levadas em consideração para o processo de transesterificação, para o BOB o índice de Acidez foi de 7,49 mg NaOH/g e para o BOR foi de 0,134 mg KOH/g. Após o processo de transesterificação, o índice de acidez do biodiesel produzido com o BOR, foi de 0,332 mg NaOH/g, estando dentro dos padrões estabelecidos para biodiesel segundo a ANP Resolução N° 920/2023 com um limite máximo de 0,50 mg NaOH/g. O biodiesel apresentou odor e coloração semelhante ao do óleo de macaúba, entretanto, com viscosidade mais baixa (Figura 22).

Figura 211 - Biodiesel do Óleo de Macaúba pós-refino com a coloração amarelada.



Fonte: Autor A: Biodiesel. B: Biodiesel na parte superior + Glicerina formada na parte inferior do funil.

O teor de FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*), determinado por cromatografia

gasosa, foi de 74,44% para o BOB e 79,67% para o BOR, ambos apresentaram picos maiores em C12 (Ácido láurico). Os resultados corroboram com os dados da literatura, os quais apresentam maiores porcentagens de Ácido láurico (C:12) e Ácido Oleico (C18) nos óleos extraídos da amêndoa de macaúba (SILVA *et al.*, 2020; BOOM *et al.*, 2022; MICHELIN *et al.*, 2015).

A segunda amostra de BOR obteve 80,27% de conversão (FAME). Na Tabela 7 está apresentado o quantitativo em porcentagens dos ácidos graxos presentes na amostra de biodiesel produzido a partir do óleo refinado da amêndoa de macaúba.

Tabela 7 - Quantitativo de Ácidos Graxos presentes no BOR.

Ácido Graxo	Sigla	Quantitativo (%)
Caprilíco	C8:0	5,57
Decanóico	C10:0	4,36
Laúrico	C12:0	44,45
Mirístico	C14:0	11,87
Palmitoleíco	C16:0	8,32
Esteárico	C18:0	2,88
Oléico	C18:1	19,84
Linoleíco	C18:2	2,71

Fonte: Autor.

Como comentado anteriormente, em termos quantitativos, os ácidos graxos em maior, são os Ácido Láurico (C12:0) e Oléico (C18:1), tendo 44,45% e 19,84%, respectivamente. Resultado no qual está similar a maioria dos quantitativos presentes em outros trabalhos, como o Hater *et al* (2019), no qual apresentou 42,38% e 32,82% de ácido láurico e oleico, respectivamente.

Outro modo de acompanhar o processo de produção de biodiesel é o RMN ¹H no qual foi utilizado para comprovar os valores de taxa de conversão à biodiesel. Na Figura 23 tem o espectro da amostra de (BOR), no qual é possível identificar a ausência de sinal na região ~4,13 - 4,31 ppm e surgimento em ~3,66, referente aos hidrogênios do grupo -OCH₃, indicando que o processo de transesterificação foi efetivo. Ademais, é possível utilizar como parâmetro a intensidade do mutipeto centrado em ~5,32 - 5,38 ppm, que indica as insaturações nos quais permaneceram durante a reação de transesterificação do óleo, sendo então mais pronunciados nas amostras de óleos do que quando comparados com as amostras de biodiesel (CARVALHO, 2019; REDA, 2006, COLZATO, 2008). No espectro é possível

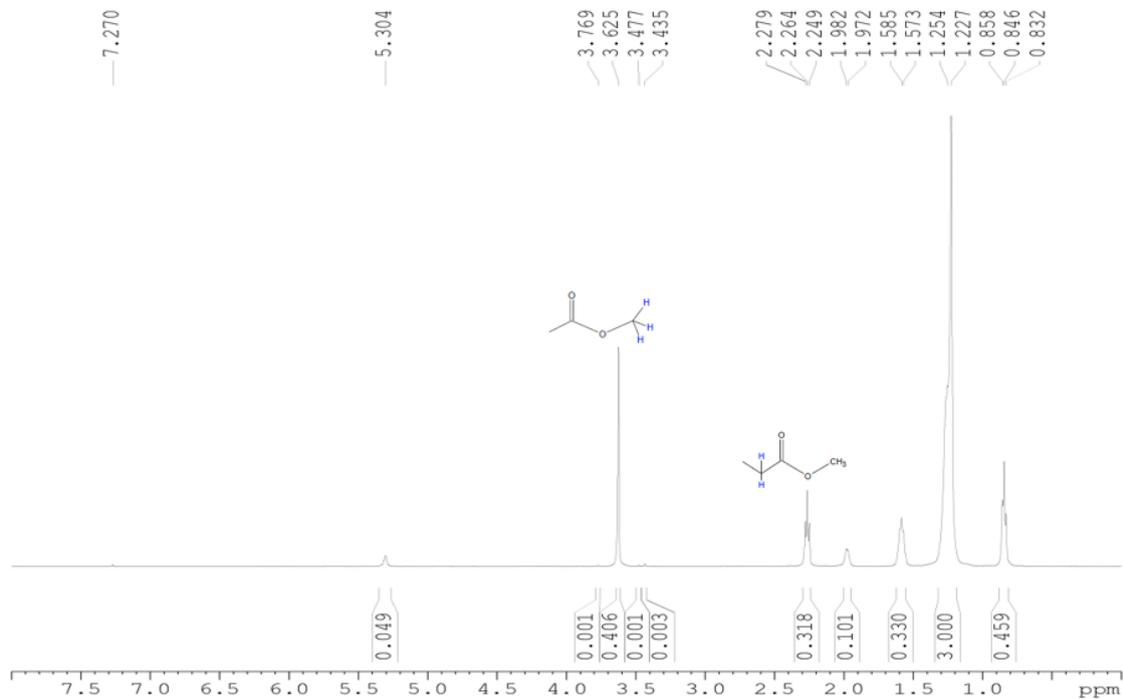
identificar mais um acontecimento probatório da conversão, que se trata da formação dos prótons metilênicos α -carbonílicos em $\sim 2,2 - 2,4$ ppm, adjacentes à carbonila (C=O).

Outra região essencial para a avaliação da conversão do óleo da amêndoa de macaúba em biodiesel, é a presença dos compostos considerados “impurezas” do biodiesel, e que devem ser evitados, como podemos citar a glicerina. A região entre $\sim 4,0 - 4,4$ ppm e $\sim 5,2 - 5,3$ ppm, pode-se calcular a concentração de glicerina livre no produto final (biodiesel), caso surja no espectro (RUSHEL, 2016; CARVALHO, 2019). Essa identificação auxilia a compreensão da necessidade de pós-tratamento do biodiesel dentro da cadeia produtiva, o que se espera, que não haja a necessidade, visando que foi adicionado essa etapa produtiva de refinamento no processo anterior a produção.

Com uso da Equação 8, foi possível calcular a taxa de conversão em ésteres metílicos, obtendo como resultado o valor de 89,68%. A Ressonância Magnética Nuclear é uma ferramenta analítica utilizada ao longo dos últimos anos para análises qualitativas e quantitativas de óleo em sementes. De acordo com Reda e Carneiro (2006) em conjunto com Constantino *et al* (2014), é possível calcular alguns parâmetros físico-químicos, como o índice de iodo, o peso molecular médio e o índice de saponificação para o óleo de milho, tanto em *in natura* quanto sob aquecimento, tendo ao fim cálculos dados mais rápidos acerca das propriedades físico-químicas, agrupados em um único método para o óleo. Já em Jesus *et al.* (2015) foi possível a avaliação o RMN entra como uma ferramenta analítica para a determinação da conversão do óleo de soja em ésteres etílicos.

O RMN também auxiliaria na detecção das alterações proporcionadas pela etapa de refino do óleo de macaúba, levando em consideração o alto grau de acidez, que favoreceria a formação de glicerina no processo de transesterificação (LOBO, 2009; COLZATO, 2008; SHIMAMOTO *et al.*, 2016). Resultados similares aos espectros apresentados nesse trabalho podem ser visualizados em Grabauskas (2023), no qual conseguiu uma conversão de cerca de 90% pelo método de transesterificação do óleo refinado da amêndoa de macaúba via catálise heterogênea (Nb/Na).

Figura 222 - RMN ^1H para o Biodiesel do Óleo da Amêndoa de Macaúba



Fonte: Autor.

5.7 Viscosidade e Densidade

De acordo com as normas e resoluções brasileiras ASTM e ANP, os métodos de análise para biodiesel e o diesel são os mesmos. A norma europeia EN ISO 3675 estabelece o valor de densidade entre 860 a 900 kg m^{-3} , já para os valores de viscosidade a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a norma EN 14214 estabelece o valor de $3,5$ a $5,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ e a norma ASTM D6751 e de $1,9$ a $6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$.

As análises de viscosidade e densidade seguiram os parâmetros da ASTM D445 e ASTM D2270. Inicialmente foi avaliado os valores de viscosidade e densidade para o biodiesel do óleo de soja e das misturas com o diesel puro nas proporções de 12%, 15%, 20% e 22%, em busca de estabelecer um parâmetro para a determinação das misturas e seus respectivos valores ideais, devido o biodiesel de soja ser majoritário na cadeia de produção desse biocombustível (Tabela 8), buscando compreender a porcentagem de diferenciação da viscosidade e densidade para com a mistura BX. Com os resultados pode-se observar que entre os valores de 12% para 15% não ocorreu uma grande variação, do mesmo modo para

os valores de 20% para 22%. A partir dos valores obtidos, foi estabelecido a análise da densidade e viscosidade para o biodiesel de óleo de Macaúba nas proporções de 15% e 20% de Biodiesel no Diesel Puro, ou seja, produção das misturas B15 e B20.

Os valores de viscosidade para os óleos obtidos de macaúba e seus respectivos biodieseis devido a natureza da matéria-prima ser um óleo vegetal, tende a obter valores de viscosidade mais altos proporcionados pelo tamanho das cadeias carbônicas e com o grau de saturação das mesmas, mas também por impurezas presentes nas misturas de composição que se encontra na matéria-prima (óleo vegetal), podendo influenciar durante a queima na câmara de combustão. Compreende-se que os sabões residuais, bem como glicerídeos não reagidos e produtos do processo de degradação oxidativa, podem corroborar para o aumento da viscosidade e densidade do biodiesel, devido a formação de partículas ou gomas no biodiesel (COLOMBO, 2017).

Tabela 8 - Viscosidades e Densidades para Biodiesel de Soja, Diesel Puro e suas misturas.

Material	20 °C		40 °C		100 °C	
	ρ (g/cm ³)	η (mm ² /s)	ρ (g/cm ³)	η (mm ² /s)	ρ (g/cm ³)	η (mm ² /s)
Diesel Puro	0,8483	4,1939	0,8343	2,6935	0,7913	1,1346
Diesel + Biodiesel (12%)	0,8525	4,4426	0,8383	2,8363	0,7953	1,1852
Diesel + Biodiesel (15%)	0,8533	4,4672	0,8391	2,8664	0,7961	1,1963
Diesel + Biodiesel (20%)	0,8553	4,4672	0,8411	2,9416	0,7982	1,226
Diesel + Biodiesel (22%)	0,8554	4,5989	0,842	2,9622	0,7988	1,2381
Biodiesel de Soja	0,8826	6,6837	0,8681	4,218	0,8244	1,7026

Fonte: Autor.

O óleo da amêndoa de macaúba refinado, obteve um valor para viscosidade cinemática e densidade a 40 °C de 27,722 mm²/s⁻¹ e 0,904 g/cm³ (Tabela 9), mas também todos os valores apresentados no Anexo A, ao fim do trabalho. Quando comparado com os estudos de Moura (2019) e Souza (2013), nos quais apresentaram valores de 54,78 mm²/s⁻¹ e 23,95 mm²/s⁻¹ para o óleo bruto, o óleo refinado obtido mostrou está na margem de valores encontrados para essa amêndoa. Além do mais, quando comparado com outras oleaginosas como Babaçu e Pinhão-Manso, que apresentaram a 40 °C viscosidades de 37,84 mm²/s⁻¹ e 33,03 mm²/s⁻¹, o óleo obtido ainda se mantém similar para os parâmetros analisados. Visto

isso, em termos de uso do óleo como possível produtor de biodiesel, valores mais baixos de viscosidade seriam ideais, e o mesmo valor pode variar de acordo com os estágios de maturação do fruto (HYPPOLITO *et al.*, 2021; MIYASAKI, 2021).

O trabalho de ADEKULE *et al.* (2020) demonstra a importância da densidade e viscosidade para o valor do biodiesel puro (B100). A viscosidade desejada para os biocombustíveis deve estar em valores baixos, pois caso ocorra o contrário, altas viscosidades poderiam afetar o funcionamento do sistema de injeção de combustível no motor de combustão interna.(ADEKUNLE *et al.*, 2020; BATTISTI, 2017).

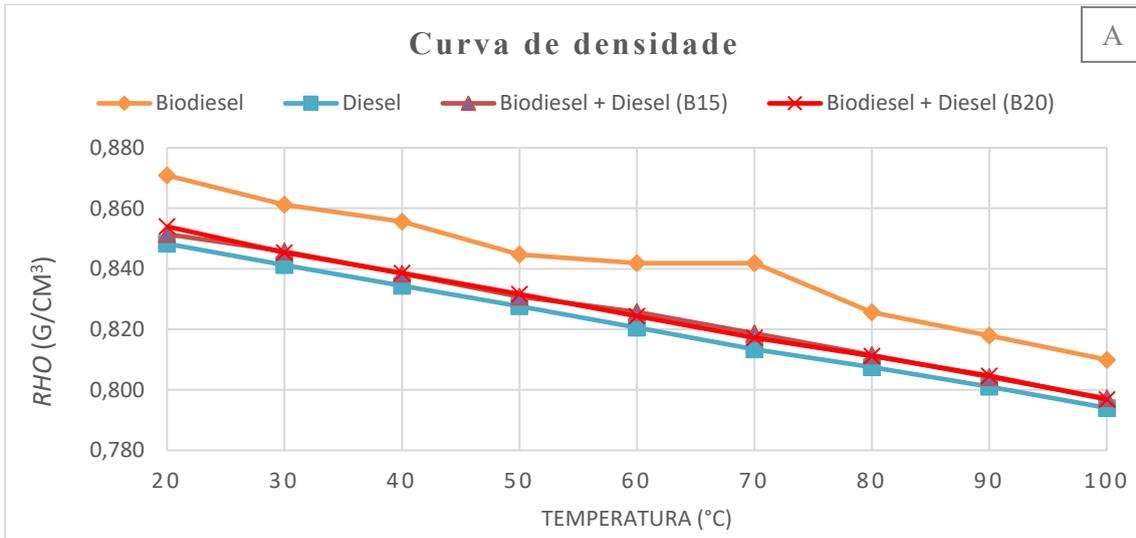
Tabela 9 - Valores de viscosidade e densidade para o óleo refinado da amêndoa de Macaúba.

Temperatura	<i>eta</i> (mPa.s)	<i>ny</i> (mm ² /s)	<i>rho</i> (g/cm ³)
20 °C	59,809	65,016	0,9199
40 °C	25,07	27,7228	0,9041
100 °C	5,314	6,164	0,859

Fonte: Autor. *eta*: viscosidade dinâmica; *ny*: viscosidade cinemática ;
rho: densidade.

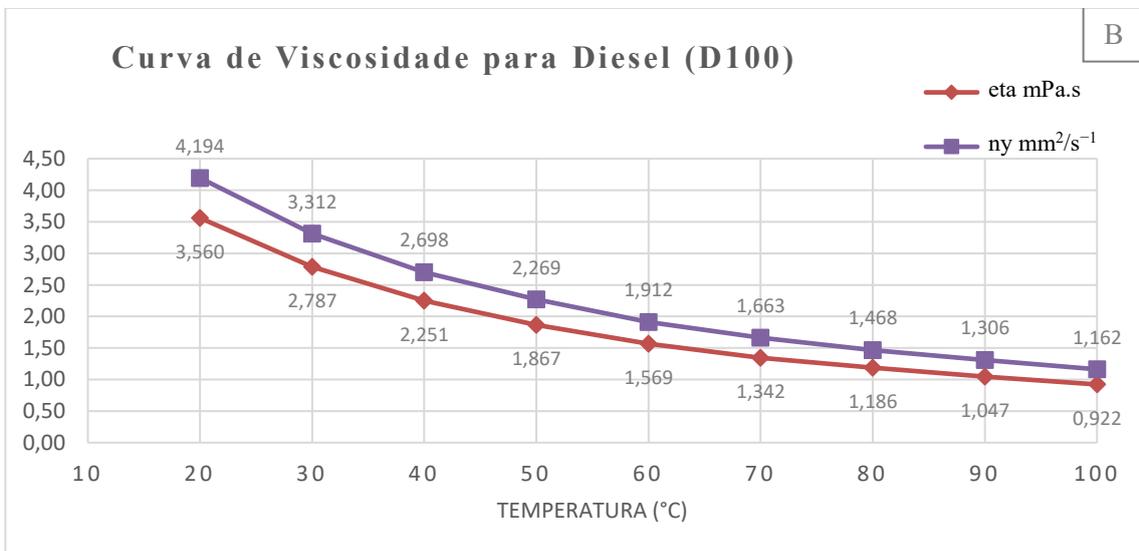
Com o processo de refino o óleo de macaúba apresentou ao fim o Índice de acidez de 0,134 mg NaOH/g, devido esse baixo índice, foi utilizado para a produção do biodiesel. Após a produção do biodiesel, a análise de viscosidade cinemática, dinâmica e densidade apresentada nas Figuras 24 a 28. O biodiesel apresentou decréscimos de acordo com o aumento da temperatura para todos os pontos de temperatura observados na análise. O biodiesel do óleo de macaúba apresentou densidade de 0,870 g/cm³ a 20 °C, com um desvio padrão de 0,0014, no qual está dentro dos limites de especificação para o biodiesel segundo a ANP 2023, com intervalo entre 0,850 a 0,900 g/cm³. Quando comparado a outros trabalhos com diferentes espécies de plantas (matéria-prima), o valor apresentado nesse estudo esteve próximos aos encontrados para o Babaçu e girassol, 0,871 g/cm³ e 0,863 g/cm³, respectivamente (OCANHA *et al.*, 2022; SCHAFFNER *et al.*, 2019). Já quando comparado ao biodiesel de soja, comumente utilizado e estudado, apresentando valores médios de 0,8685 g/cm³, o biodiesel de macaúba demonstra valor próximo (OCANHA *et al.*, 2022).

Figura 23- Curvas de temperatura para a densidade dos biodieseis (B100, B15 e B20) e diesel.



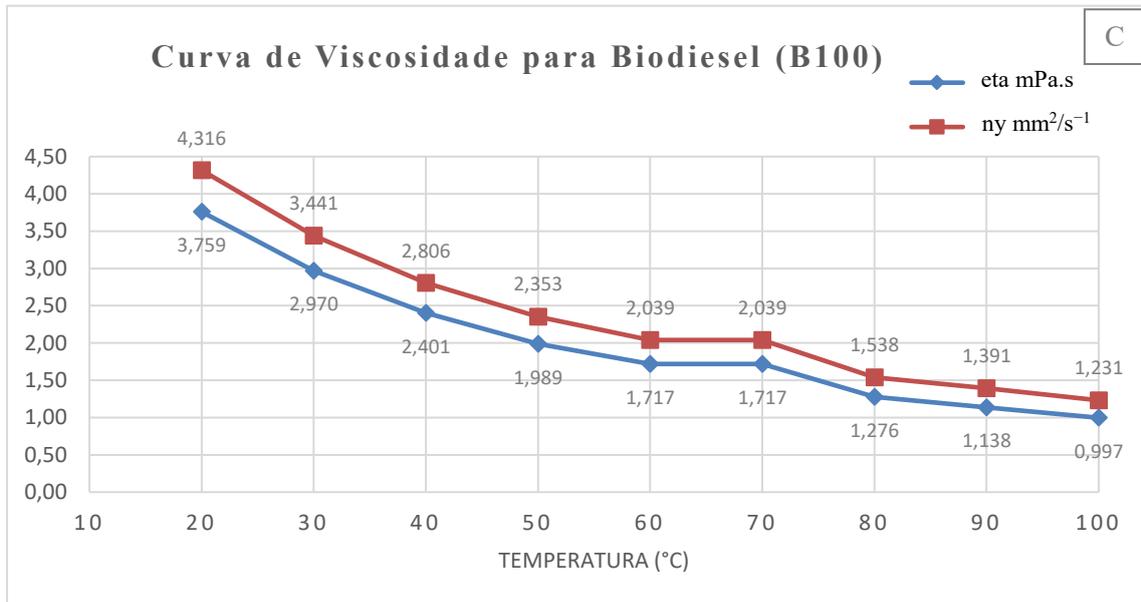
Fonte: Autor. Viscosidade Dinâmica - Eta (mPa.s); Viscosidade Cinemática - ν (mm^2/s).

Figura 24 - Curva de temperatura da viscosidade do Diesel (D100).



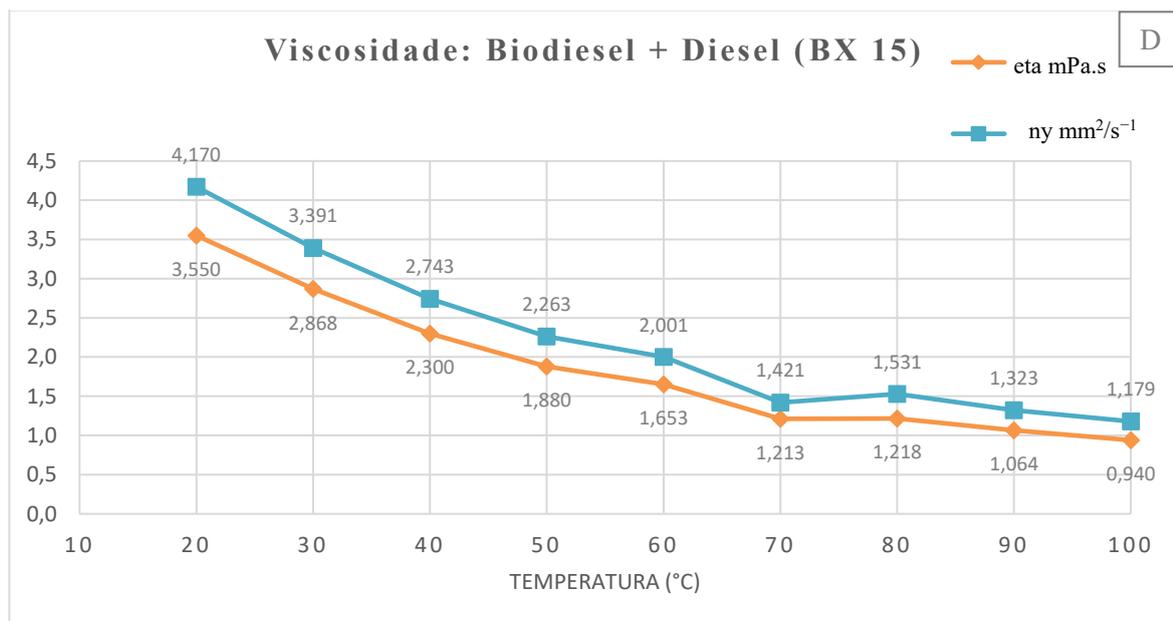
Fonte: Autor. Viscosidade Dinâmica - Eta (mPa.s); Viscosidade Cinemática - ν (mm^2/s).

Figura 25 - Curva de temperatura da viscosidade do Biodiesel de Macaúba (B100).



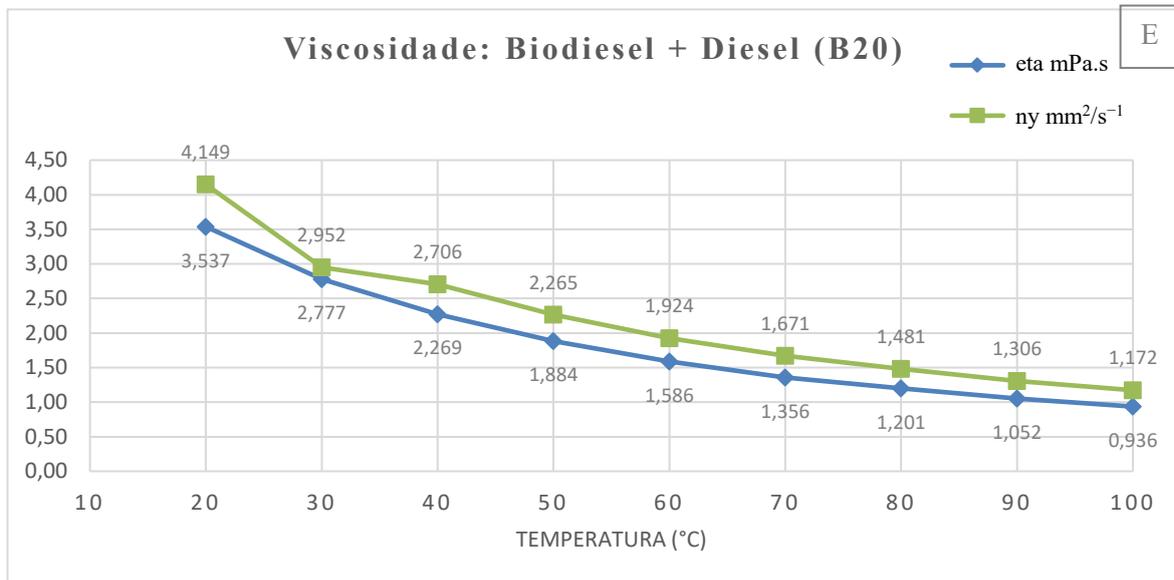
Fonte: Autor. Viscosidade Dinâmica - Eta (mPa.s); Viscosidade Cinemática - ny (mm²/s).

Figura 26 - Curva de temperatura da viscosidade do Diesel e Biodiesel de Macaúba (B15).



Fonte: Autor. Viscosidade Dinâmica - Eta (mPa.s); Viscosidade Cinemática - ny (mm²/s).

Figura 237 - Curva de temperatura da viscosidade do Diesel e Biodiesel de Macaúba (B20).



Fonte: Autor. Viscosidade Dinâmica - Eta (mPa.s); Viscosidade Cinemática - ny (mm²/s).

As curvas de densidade e viscosidade (Figura 23 a 27) para todos os biocombustíveis podem estabelecer o comportamento do líquido de acordo com as variações que podem ocorrer dentro de um motor. Em geral, as propriedades de densidade e viscosidade (cinemática e dinâmica) tendem a diminuir com o aumento da temperatura, o que pode ser comprovado com o estudo, no qual todas as curvas apresentaram queda em relação ao valor inicial. Além do mais, quando comparado a diminuição em termos de porcentagem para a primeira temperatura (20 °C) e a última (100 °C), observa-se uma queda na viscosidade cinemática (*ny*) de 27,70; 26,03; 28,28; e 28,25% para o Diesel, Biodiesel 100, Mistura B15 e Mistura B20, respectivamente. As porcentagens próximas demonstram mais informação a cerca da aplicabilidade por similaridade de viscosidade das misturas e do biodiesel de macaúba em relação ao diesel fóssil, ademais, é possível aferir uma pequena diferença entre a adição de mais biodiesel de macaúba na mistura BX em relação aos valores de densidade e viscosidade apresentadas no experimento.

O biodiesel obtido do refino do óleo de macaúba apresentou 2,806 mm²/s (desvio padrão de 0,185) de viscosidade a 40 °C, valor inferior ao encontrado na literatura de cerca de 5,65 mm²/s, podendo ser explicado pela boa conversão e parâmetros de qualidade alcançados durante o processo de refino do óleo. O Biodiesel de Soja, apresenta 4,218 mm²/s

a 40 °C, no trabalho em questão, na literatura no qual apresenta valores de 5,39 mm²/s. Entretanto, quando comparado os valores de viscosidade para o biodiesel de soja e o biodiesel de macaúba, pode-se observar que o de macaúba está com valores mais próximos aos apresentados para o diesel fóssil puro, no qual tem viscosidade a 40 °C de 2,69 mm²/s (BATTISTI, 2017; FARIAS, 2016; MILANO *et al.*, 2022).

5.8. Análise do desgaste em Reômetro

O Biodiesel produzido do óleo refinado de Macaúba, foi submetido a um ensaio inicial em reômetro para análise do coeficiente de fricção. A figura 28, apresenta o coeficiente de fricção *versus* o tempo. Na grande maioria dos óleos vegetais submetidos a transesterificação o coeficiente de fricção ou atrito (CoF) ao início do experimento tende a cair consideravelmente, até atingir um estado estacionário, no qual ocorre para o biodiesel de macaúba (REEVES, *et al.*, 2015).

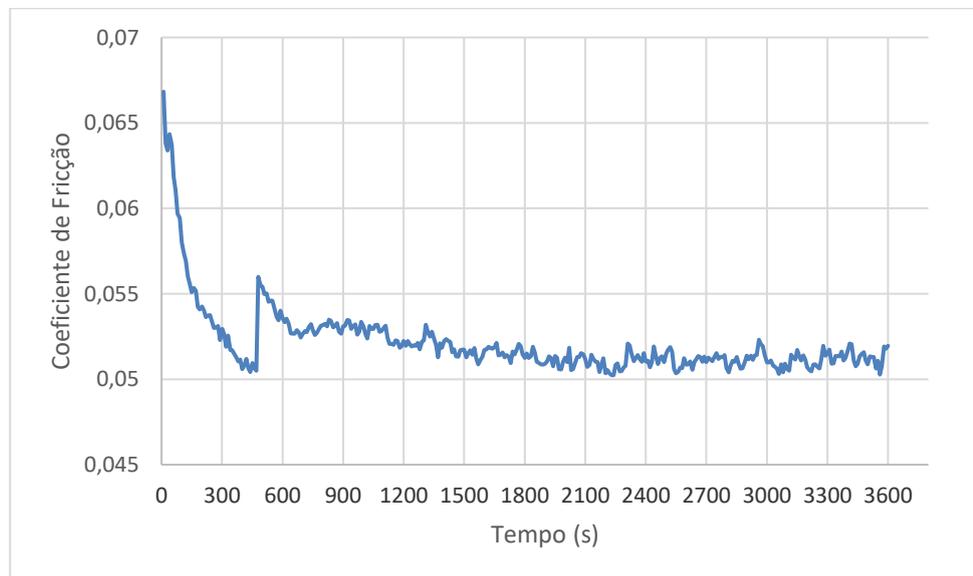
Compreende-se que menores valores de CoF, denotam uma boa lubrificação, sendo possível aferir, que caso tenha o valor de CoF baixo, como apresentado pelo o biodiesel de macaúba, foi formado uma película lubrificante ideal para evitar o desgaste entre as duas superfícies com o tempo. A eficiência do filme lubrificante do fluido interfere diretamente no coeficiente de atrito, logo quando não há espessura de filme suficiente para separar as superfícies antagônicas, o atrito aumenta e consequentemente o coeficiente aumenta (FARIAS *et al.*, 2011).

O biodiesel de macaúba apresentou o mesmo comportamento, com CoF médio de 0,05214 (Figura 25). Estudos realizados com óleo de colza hidrotratado, óleo de colza esterificado e óleo de *Jatropha c.* Apresentou valores médios para CoF entre 0,11 a 0,17 sendo este valores já abaixo para os encontrados na literatura para o óleo advindo do petróleo (RUGGIEIRO *et al.*, 2017). Ademais, outros estudos realizados com óleos vegetais de milho, cártamo, gergelim, amendoim, soja e oliva para a utilização como biolubrificante, apresentou CoF's abaixo de 0,4. Até o momento não foram encontrados dados comparativos na literatura para o biodiesel de macaúba. Os valores de CoF aferidos para o biodiesel de macaúba demonstram uma similariedade com os óleos, encontrando um pouco mais abaixo devido ao processo de refino e transesterificação que auxiliou a manter uma proporção entre os ácidos graxos saturados e insaturados, presentes do biodiesel, nos quais afeta diretamente nas

propriedades tribológicas (RUGGIEIRO *et al.*, 2017, KALIN *et al.* 2002, YUSUF *et al.* 2010).

Estudam apontam um forte correlação entre a composição química do material biológico e formação da camada lubrificante, influenciando diretamente nas propriedades tribológicas. Os ácidos graxos livres permitem a formação de uma monocamada (filme) na superfície que impede a interação metal-metal, e preserva a superfície à danos, além do mais ácidos graxos monoinsaturados, como por exemplo, o ácido oleico, que apresentam apenas uma ligação dupla, tem grande influência na estabilidade oxidativa, mas também na proporção de propriedades tribológicas superiores (KALIN *et al.* 2002; DULIAS *et al.* 2002; REEVES, C.J. *et al.* 2015). Levando tudo em consideração, compreende-se os valores encontrados para o biodiesel do óleo refinado de macaúba apresenta um CoF baixo, e uma viscosidade ideal, a porcentagem de ácido oleico presente possibilitado pelo o baixo Índice de Acidez, ocasionado uma boa qualidade de CoF (RUGGIEIRO *et al.*, 2017; YUSUF *et al.* 2010; ZHANG J. *et al.* 2008).

Figura 28 - Análise do Coeficiente de Atrito, ao decorrer do tempo.



Fonte: Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como enfoque a produção de biodiesel da amêndoa de macaúba, trabalhando os processos de extração, refino do óleo, produção e caracterização do biodiesel e óleo de macaúba. O desempenho do estudo foi baseado no processo de redução da acidez, saponificação, densidade e viscosidade e obtenção de biodiesel adequado as normas ANP nº 920/2023, ASTM D7042 e ASTM D445, para posterior utilização do biodiesel de macaúba em misturas BX (B15 e B20).

A amêndoa de macaúba, obteve rendimento de extração de óleo de 60,29%. Com esse trabalho foi possível compreender que os processos de refino já utilizados industrialmente e/ou na literatura necessitam serem modificados, devido às características apresentadas no óleo de macaúba, principalmente a sua sensibilidade a fortes choques de soluções básicas. O procedimento utilizado para o refino do óleo, apresentou eficácia em termos de qualidade e rendimento para melhoria das qualidades do óleo, visando a produção de biodiesel.

As análises de FTIR e RMN (^1H e ^{13}C) do óleo de macaúba e da polpa de macaúba, apresentaram características de outros óleos vegetais já utilizados para a produção de biodiesel, apresentando percentuais ideais de AC saturados. A produção de biodiesel ocorreu com rendimento de 74,44% para o óleo bruto e 89,68% para o biodiesel obtido do óleo refinado. Valores nos quais necessitam aumentar para alcançar padrões superiores a 96,5%, devido a isso, o procedimento de transesterificação necessita ser melhorado especificamente para a produção do biodiesel de macaúba visando o aumento da escala da produção.

O biodiesel obtido com o óleo da amêndoa de macaúba apresentou viscosidade e densidade dentro das faixas legislativas, estando de acordo com a ANP nº 920/2023 e quando comparado ao Diesel Fóssil puro, dados nos quais puderam ser utilizados sem alteração da viscosidade e densidade para as misturas BX. Foi observado nas análises, uma não alteração significativa com o decorrer do incremento do biodiesel no diesel fóssil, nas misturas B15 e B20. Tais análises poderão futuramente auxiliar nos procedimentos para previsão das possíveis alterações em termos de manutenção dos motores e o desempenho dos mesmos, utilizando o biodiesel de macaúba puro ou em mistura com diesel fóssil, previstos na legislação vigente.

Ademais, o estudo preliminar em reômetro do biodiesel, foi possível perceber variações nos valores e como trata-se de apenas uma análise não há como aferir

especificamente os valores, logo, espera-se que futuramente ocorra a continuação do trabalho para compreender melhor o comportamento do CoF do biodiesel do óleo da amêndoa de macaúba. Com os dados realizados será possível ter uma confirmação maior acerca da capacidade lubrificante do biodiesel obtido do óleo da amêndoa de macaúba como substituínte total ou parcial (misturas BX) do diesel fóssil, já identificados pelos valores de viscosidade e densidade obtidos no estudo.

REFERÊNCIAS

ABDELMALIK, A.A.; ABBOTT, A.P.; FOTHERGILL, J.C.; DODD, S.; HARRIS, R.C.. Synthesis of a base-stock for electrical insulating fluid based on palm kernel oil. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 532-536, mar. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.019>.

ADEKUNLE, Abolanle Saheed; OYEKUNLE, John Adekunle Oyedele; ODUWALE, Adelanke Ibukun; OWOOTOMO, Yetunde; OBISESAN, Olaoluwa Ruth; ELUGOKE, Saheed Eluwale; DURODOLA, Solomon Sunday; AKINTUNDE, Sanusi Babatunde; OLUWAFEMI, Oluwatobi S.. Biodiesel potential of used vegetable oils transesterified with biological catalysts. **Energy Reports**, [S.L.], v. 6, p. 2861-2871, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2020.10.019>.

AGUIAR, Rebeca Tibau. **Caracterização física, química e microbiológica do diesel, biodiesel e suas misturas durante a logística**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

ALEXANDRI, Eleni; AHMED, Raheel; SIDDIQUI, Hina; CHOUDHARY, Muhammad; TSIAFOULIS, Constantinos; GEROTHANASSIS, Ioannis. High Resolution NMR Spectroscopy as a Structural and Analytical Tool for Unsaturated Lipids in Solution. **Molecules**, [S.L.], v. 22, n. 10, p. 1663, 5 out. 2017. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules22101663>. Acesso em: 12 fev. 2023

ALVES, Alanderson Arthur Araújo. **Avaliação de métodos preditivos para o cálculo da viscosidade dinâmica de ésteres presentes no biodiesel**. 2022. 149 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

ALVES, Carine Tondo. **Transesterificação de Óleos e Gorduras Residuais via rotas metílica e etílica utilizando o catalisador Aluminato de Zinco, em presença ou não de CO₂ supercrítico**. 2012. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

ALVES, Gabriel de Camargo. **Caracterização morfo-agronômica de maciços naturais das palmeiras macaúba (*acrocomia aculeata (jacq) lodd. ex mart.*) e bocaiúva (*acrocomia totai mart.*)**. 2022. 62 f. Dissertação (Mestrado Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2022.

ASLAN, Volkan. Fuel characterization, engine performance characteristics and emissions analysis of different mustard seed biodiesel: an overview. **Journal Of Biotechnology**, [S.L.], v. 370, p. 12-30, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.05.006>.

ASTM INTERNATIONAL. **ABNT D445-14**: ASTM D445-14: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).. 1 ed. Estados Unidos, 2014. 13 p. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/84dd2004-96d1-4824-b843-9689e7ef9e4d/astm-d445-14>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4052**: ASTM D4052: Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter. 5 ed. 2016. 9 p. Disponível em: <https://www.astm.org/d4052-22.html>. Acesso em: 20 fev. 2023.

AZEVÊDO, Saulo Henrique Gomes de. **Produção de biodiesel em reator de fluxo contínuo a partir do óleo de algodão em condições supercríticas**. 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BARBOSA, Nathália; SANTOS, Larissa; SEGUCHI, Lucas; SILVA, Beatriz; CARVALHO, Thaís; WANDERLEY, Estácio; GIMENES, Rossano; SOARES, Melina; ARAUJO, Ana; SILVA, Flávio. Avaliação rápida da qualidade do óleo vegetal isolante de transformador por espectroscopia FTIR e quimiometria. **Química Nova**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 994-1003, 2022. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170914>.

BATTISTI, G.; SEABRA JÚNIOR, E.; DAL POZZO, D. M.; FERREIRA SANTOS, R. Comparação das características físico-químicas do biodiesel de citronela e eucalipto com o biodiesel da soja. **Acta Iguazu**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 173–180, 2017. DOI: 10.48075/actaiguaz.v6i5.18492. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/18492>. Acesso em: 05 nov. 2023.

BARROS, Thiago Rodrigo Barbosa. **Produção de Biodiesel a partir da transesterificação do óleo de soja utilizando o catalisador MoO₃/CeO₂/MCM-41**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

BECKER, Edward P.. Trends in tribological materials and engine technology. **Tribology International**, v. 37, n. 7, p. 569-575, jul. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2003.12.006>.

BOOM, Anne; FIGUEIRÓ, Fernanda; MELO, Edilailsa; SILVA, José. Análise comparativa da produção de biodiesel obtido a partir de diferentes oleaginosas. Enciclopédia Biosfera, [S.L.], v. 19, n. 41, p. 253-268, 30 set. 2022. **Centro Científico Conhecer**. DOI: http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2022c2.

BORA, P s. MACAIBA PALM: FATTY AND AMINO ACIDS COMPOSITION OF FRUITS. **Ciencia y Tecnologia Alimentaria**, Mexico, v. 4, n. 3, p. 158-162, jul. 2004.

BORGES, Ane Caroline Pereira et al. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, p. 23-36, mar. 2017.

BREVES, Rodolfo Andrade. **Modificação química dos óleos da polpa e da amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex Mart) para a obtenção de epóxidos**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

CALDEIRA, Vanessa Ferreira; CARVALHO, Ana Flávia Freitas de; ALENCAR FILHO, José Marcos Teixeira de; GUIMARÃES, Amanda Leite; REIS, Silvio Alan Gonçalves

Bomfim; ARAÚJO, Edigênia Cavalcante da Cruz. Chemistry and fatty acid profile of new fixed oils from two *Cenostigma* species: different promising raw material for use in cosmetic emulsions. **Industrial Crops And Products**, v. 196:16451, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116451>. Acesso em: 20 de jun. 2023

CAMPBELL, John. **The Mechanisms of Metallurgical Failure: the origin of fracture**. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020. 307 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02485-5>.

CÁRDENAS, Darlis Adriana Varón. **Produção de Biodiesel de Óleo de Macauba (*Acrocomia Aculeata*) Via Hidroesterificação**. 2005. 186 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química - Engenharia de Biocombustíveis e Petroquímica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Rj, 2005.

CARDOSO, J. H.; INSAURRIAGA, I. C.; GRINBERG, P. da S.; BERGMANN, N. T. Sistemas agroflorestais e conversão agroecológica: o desafio do redesenho dos sistemas de produção. - **Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/992691/sistemas-agroflorestais-e-conversao-agroecologica-o-desafio-do-redesenho-dos-sistemas-de-producao>. Acesso em: 05 maio. 2023.

CARVALHO, Geovane Chacon de. **Composição de ácidos graxos em óleos vegetais obtida por cromatografia gasosa e sua correlação com propriedades térmicas, reológicas, espectroscópicas e outras propriedades físico-químicas**. 2019. 144 f. Tese (Doutorado em Química (PPGQ)) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

CARVALHO, Sandra Helena Vieira de. **Estudo do Processo de Extração do óleo da Macaúba (*Acrocomia intumescens*)**. 2016. 85 f. Tese (Doutorado Engenharia Química) - Universidade Federal de Alagoas, Maracá, 2016.

CASTRO, Alberto Gomes de. **A química e a reologia no processamento dos alimentos**. Teresina: Instituto Piaget. Ciência e Técnica, 2004. 296 p. (pp. 37-61).

CASTRO, Alberto Gomes de; COVAS, José Antônio; DIOGO, Antônio Correia. **Noções básicas de reologia**. In: **A Reologia e as suas Aplicações Industriais**. Mamanguape: Instituto Piaget, 2001. 462 p., cap. 4 e 5.

CASTRO, Carla Aparecida de O.; RESENDE, Rafael T.; KUKI, Kacilda N.; CARNEIRO, Vinícius Q.; MARCATTI, Gustavo E.; CRUZ, Cosme Damião; MOTOIKE, Sérgio Y.. High-performance prediction of macauba fruit biomass for agricultural and industrial purposes using Artificial Neural Networks. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 108, p. 806-813, dez. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.031>.

CASTRO, Leonardo Mortagua de; PINTO, Natália Berne; CASTRO, Luciana Laitano Dias de; MOURA, Micaele Quintana de; MOTA, Tairan Ourique; MADRID, Isabel Martins; FREITAG, Rogério Antonio; BERNE, Maria Elisabeth Aires. **Atividade ovicida do óleo essencial e do extrato hidroalcoólico de *ocimum basilicum* sobre nematódeos gastrintestinais de ovinos**. Science And Animal Health, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 138-150, 6

nov. 2017. Universidade Federal de Pelotas. DOI: <http://dx.doi.org/10.15210/sah.v5i2.10726>.

CHEW, Sook Chin; ALI, M. Abbas. Recent advances in ultrasound technology applications of vegetable oil refining. **Trends In Food Science & Technology**, [s.l.], v. 116, p. 468-479, out. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.001>.

COELHO, Icaro. **Caracterização reológica de soluções de hidratos de tetrahidrofurano**. 2022. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

COLZATO, Marina. **Análise Comparativa dos Espectros de ¹H RMN de Óleos Comestíveis Oxidados**. São Carlos: Embrapa, 2008. 4 p. ISSN 1517-4786.

CONSTANTINO, André F.; LACERDA JUNIOR, Valdemar; SANTOS, Reginaldo B. dos; GRECO, Sandro J.; SILVA, Renzo C.; C. NETO, Álvaro; BARBOSA, Lúcio L.; CASTRO, Eustáquio V. R. de; FREITAS, Jair C. C.. Análise do teor e da qualidade dos lipídeos presentes em sementes de oleaginosas por RMN de baixo campo. **Química Nova**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 10-17, 2014. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422014000100003>.

COSTA, Camila Moreira; NACCACHE, Monica Feijó; VARGES Priscilla (2017). Caracterização reológica de fluidos complexos. **Revista Brasileira De Iniciação Científica**, 4(7), 3–28. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/999>. Acesso em: 15 de março de 2023.

CRUZ, Gabriel Passos da; ANDRADE, Walisson dos Anjos; SILVA, Larissa Alves da; CUNHA, Acto de Lima; SILVA, Gabriel Francisco da; SANTOS, Joao Paulo Lobo dos. Avaliação da utilização de microemulsões a base de óleo de Moringa Oleífera Lam saponificado como fase contínua de fluidos de perfuração: análise das propriedades reológicas. **Research, Society And Development**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 1-2, 12 abr. 2021. Research, Society and Development. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14188>.

CUNHA FILHO, Fernando Jose Vieira da. **Estudo Reológico de um fluido de perfuração à base n-parafina, utilizando argila modificada com tensoativo**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Nata, 2015.

DANDU, Madhu Sudan Reddy; NANTHAGOPAL, K.. Tribological aspects of biofuels – A review. **Fuel**, [s.l.], v. 258, dez. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116066>. Acesso em: 12 fev.2023.

DIAS, Jéssica Luíza Souza Pereira. **A utilização de equações de estado (EE) na predição de propriedades termodinâmicas de sistemas biocombustíveis**. 2017. 46 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

DULIAS, U; FANG, L; ZUM GAHR, K.-H. Effect of surface roughness of self-mated alumina on friction and wear in isooctane-lubricated reciprocating sliding contact. **Wear**,

[s.l.], v. 252, n. 3-4, p. 351-358, fev. 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00900-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00900-0).

ESCALANTE, Edwin Santiago Rios; RAMOS, Luth Silva; CORONADO, Christian J. Rodriguez; CARVALHO JÚNIOR, João Andrade de. Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production: focus in the brazilian context. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 153, jan. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111716>. Acesso em: 15 jun 2023.

FAIM, João Guilherme Prates. **Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração aquosos e olefinicos utilizando a atenuação de raios gama**. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2020.

FARHOOSH, Reza; EINAFSHAR, Soodabeh; SHARAYEI, Parvin. The effect of commercial refining steps on the rancidity measures of soybean and canola oils. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 115, n. 3, p. 933-938, ago. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.035>.

FARIAS, Aline Mendes; SANTANA, Jaciana Silva; OLIVEIRA FILHO, Manoel Fernandes; SANTANA, Janaina Silva; BARBOSA, Cleiton Rubens Formiga; MEDEIROS, João Telésforo Nóbrega. Os combustíveis verdes do brasil - avaliação da lubrificidade do biodiesel b5 e óleos de mamona e coco. **Holos**, [s.l.], v. 3, p. 3-17, 30 jun. 2011. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). DOI: <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2011.453>.

FARIAS, Joao Guilherme. **Análise de desgaste de um pistão de bomba de injeção a diesel combinado ensaio experimental e simulação por elementos finitos**. 2016. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FARIAS, Teddy Marques. **Biometria e processamento dos frutos da macaúba (Acrocomia spp) para a produção de óleos**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Mato Grosso, Belo Horizonte, 2010.

FAVARO, Simone Palma; SMIDT, Mario Amilcar; MIRANDA, Cesar Heraclides Behling; LEAL, Wesley Gabriel de Oliveira; CARVALHO, Felipe Brandão de Paiva; RIVALDI, Juan Daniel. Aqueous extraction to high yield and quality of macauba (Acrocomia aculeata) pulp oil. **Applied Food Research**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.afres.2022.100060>. Acesso em: 15 jun. 2023.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.s.M.A.; MASJUKI, H.H.. A critical review on the tribological compatibility of automotive materials in palm biodiesel. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 79, p. 180-186, mar. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.002>.

FERNÁNDEZ-COPPEL, Ignacio A.; BARBOSA-EVARISTO, Anderson; CORRÊA-GUIMARÃES, Adriana; MARTÍN-GIL, Jesús; NAVAS-GRACIA, Luis M.; MARTÍN-RAMOS, Pablo. Life cycle analysis of macauba palm cultivation: a promising crop for

biofuel production. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], v. 125, p. 556-566, dez. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.036>.

FONSECA, Jeniffer Viviany dos Santos; BATISTA, Jéssica Dayanne Ferreira; OLIVEIRA, Marcelly César de; DINIZ, Natasha Carolina Melo; LIMA, Marcos dos Santos; MADRUGA, Marta Suely; MAGNANI, Marciane; BORGES, Graciele da Silva Campelo. Low-fat and rich-fibers macauba (*Acrocomia spp.*) sauces: physical and oxidative stability, nutritional quality and sensory characteristics. **Food Bioscience**, [s.l.], v. 43, p. 101272, out. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101272>.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro (Rj): Ltc, 2010.

FRANKE, K.; STRIJOWSKI, U.; FLECK, G.; PUDEL, F.. Influence of chemical refining process and oil type on bound 3-chloro-1,2-propanediol contents in palm oil and rapeseed oil. *Lwt - Food Science And Technology*, [s.l.], v. 42, n. 10, p. 1751-1754, dez. 2009. DOI: [://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.021](http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.021).

GAVINA, Joana Inês Bastos. **Desenvolvimento e caracterização reológica de potenciais materiais de referência não newtonianos**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado de Química Tecnológica) - Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2018.

GELBARD, G.; BRÈS, O.; VARGAS, R. M.; VIELFAURE, F.; SCHUCHARDT, U. F.. 1H nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol. **Journal Of The American Oil Chemists' Society**, [s.l.], v. 72, n. 10, p. 1239-1241, out. 1995. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/bf02540998>.

GRABAUSKAS, Daniel. . **Triagem de métodos de purificação de óleos com acidez elevada para a produção de biodiesel**. 2013. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química na Área de Processos Catalíticos e Biocatalíticos) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, Loren, 2013.

HARTER, Luiz; SANTOS, Douglas; FABRIS, José. DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA DO BODIESEL 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.], v. 42, n. 2, p. 143-148, dez. 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170320>.

HOANG, Anh Tuan. Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system. **Journal Of Marine Engineering & Technology**, [s.l.], v. 20, n. 5, p. 299-311, 12 out. 2018. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20464177.2018.1532734>.

HOANG, Anh Tuan; BALASUBRAMANIAN, Dhinesh; VENUGOPAL, Inbanaathan Papla; RAJENDRAN, Vigneswaran; NGUYEN, Dinh Tuyen; LAWRENCE, Krupakaran Radhakrishnan; NGUYEN, Xuan Phuong; KALAM, M.A.. A feasible and promising approach for diesel engine fuelled with a blend of biodiesel and low-viscosity Cinnamon oil: a comprehensive analysis of performance, combustion, and exergy. **Journal Of**

Cleaner Production, [s.l.], v. 401, n. , p. 0959-6526, maio 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136682>.

HYPPOLITO, Marcel Lúcio; SOUZA, Luan Alves de; SILVA, Ivênio Moreira da; SILVA, Flávio Castro da; LOPES, Laurênio Ferreira. Produção e caracterização das misturas do diesel com biodiesel de óleo de milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 14, n. 4, p. 1-16, 31 jul. 2021. Centro Universitario de Maringa. DOI: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n4e8872>.

IEA. **World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 20 jun. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1989:1978**: ISO 1989:1978. Surface active agents - Determination of flow properties using a rotational viscometer. 1 ed. Switzerland, 1978. 1 p. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/6723.html>. Acesso em: 23 ago. 2023.

JASWIR, Irwandi; MIRGHANI, Mohamed Elwathig Saeed; HASSAN, Torla Haji; SAID, Mohd Zaki Mohd. Determination of Lard in Mixture of Body Fats of Mutton and Cow by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Journal Of Oleo Science**, [s.l.], v. 52, n. 12, p. 633-638, 2003. Japan Oil Chemists' Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.5650/jos.52.633>.

JESUS, Maria dos Prazeres Menezes de; MELO, Lucas Natã de; SILVA, Jhosianna Patrícia Vilela da; CRISPIM, Alexandre Carmo; FIGUEIREDO, Isis Martins; BORTOLUZZI, Janaína Heberle; MENEGHETTI, Simoni Margareti Plentz. Evaluation of Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy for Determining the Yield of Fatty Acid Ethyl Esters Obtained by Transesterification. **Energy & Fuels**, [s.l.], v. 29, n. 11, p. 7343-7349, 2 nov. 2015. American Chemical Society (ACS). DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01636>.

JUNG, Sungyup; JUNG, Jong-Min; LEE, Kyun Ho; KWON, Eilhann E.. Biodiesels from non-catalytic transesterification of plant oils and their performances as aviation fuels. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 244, set. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114479>. Acesso em: 29 ago. 2023.

KALIN, Mitjan; JAHANMIR, Said; IVES, Lewis K. Effect of counterface roughness on abrasive wear of hydroxyapatite. **Wear**, [s.l.], v. 252, n. 9-10, p. 679-685, maio 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(02\)00028-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(02)00028-5).

KAMARAJ, Rajkumar; RAO, Yarrapragada K.s.s.; B, Balakrishna. Biodiesel blends: a comprehensive systematic review on various constraints. **Environmental Science And Pollution Research**, [s.l.], v. 29, n. 29, p. 43770-43785, 23 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-13316-8>.

KERKEL, Florian; BROCK, Damian; TOURAUD, Didier; KUNZ, Werner. Stabilisation of biofuels with hydrophilic, natural antioxidants solubilised by glycerol derivatives. **Fuel**, [s.l.], v. 284, p. 119055, jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119055>. Acesso em: 10 jun. 2023.

KERKEL, Florian; BROCK, Damian; TOURAUD, Didier; KUNZ, Werner. Stabilisation of biofuels with hydrophilic, natural antioxidants solubilised by glycerol derivatives. **Fuel**, [s.l.], v. 284, jan. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119055>. Acesso em: 22 jul. 2023.

KHATIB, Jamal M. **Sustainability of Construction Materials**. 2. ed. Sawston, Reino Unido: Woodhead Publishing, 2016. ISBN 978-0-08-100995-6.

KRALJI, Klara; KEVIN, Dubravka; BARIJ, Lidija; KOVAČEVI, Monika; OBRANOVI, Marko; JUREVI, Ivana. Changes in 4-vinylsyringol and other phenolics during rapeseed oil refining. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 187, p. 236-242, nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.039>.

LEE, Seung Yong; JUNG, Mun Yhung; YOON, Suk Hoo. Optimization of the refining process of camellia seed oil for edible purposes. **Food Science And Biotechnology**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 65-73, 29 dez. 2013. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10068-014-0009-4>.

LIEB, Veronika M.; SCHEX, Roland; ESQUIVEL, Patricia; JIMÉNEZ, Víctor M.; SCHMARR, H.-G.; CARLE, Reinhold; STEINGASS, Christof B.. Fatty acids and triacylglycerols in the mesocarp and kernel oils of maturing Costa Rican *Acrocomia aculeata* fruits. **Nfs Journal**, [s.l.], v. 14-15, p. 6-13, mar. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nfs.2019.02.002>.

LÔBO, Ivon Pinheiro. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, Salvador, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, jul. 2009.

MARQUES NETO, José Antonio. **Avaliação da utilização do atual diesel (combustível) comercial brasileiro (ano de referência 2003-2004) para motores com gerenciamento eletrônico de combustível de combustível e sistema de recirculação de gases de escape (EGR)**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guarantiguetá- Universidade Estadual Paulista, Guarantiguetá, 2003.

MAGALHÃES, Kassiana Teixeira; TAVARES, Talita de Sousa; NUNES, Cleiton Antônio. The chemical, thermal and textural characterization of fractions from Macauba kernel oil. **Food Research International**, [s.l.], v. 130, abr. 2020. DOI: : <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108925>. Acesso em: 29 ago. 2023.

MÁQUINA, Ademar; SITOÉ, Baltazar; FERREIRA, Maria; SANTOS, Douglas; BORGES NETO, Waldomiro. Regressão multivariada por opls e pls dos espectros de rnm de ¹H de misturas diesel/ biodiesel de mafurra para estimativa do teor de biodiesel. **Química Nova**, [s.l.], v. 43, n. 7, p. 863-869, jul. 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170559>.

MARCONDELLI, Leonardo Caetano. **Desenvolvimento de métodos para determinação de número de cetano e aditivo para número de cetano**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado Graduação em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MEZGER, Thomas G.. **Applied Rheology**. Brasil: Anton Paar, 2014.

MILANO, Jassinnee; SHAMSUDDIN, Abdul Halim; SILITONGA, A.s.; SEBAYANG, A.H.; SIREGAR, Munawar Alfansury; MASJUKI, H.H.; PULUNGAN, Muhammad Anhar; CHIA, Shir Reen; ZAMRI, M.F.M.A.. Tribological study on the biodiesel produced from waste cooking oil, waste cooking oil blend with Calophyllum inophyllum and its diesel blends on lubricant oil. **Energy Reports**, [s.l.], v. 8, p. 1578-1590, nov. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.059>.

MIYASAKI, F. V. **Determinação experimental da densidade e viscosidade de misturas BX a partir de biodiesel produzido do óleo de pinhão manso**. 2021. Dissertação (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2021.

MOHAMMED, Adem Siraj; ATNAW, Samson Mekbib; RAMAYA, Ancha Venkata; ALEMAYEHU, Getachew. A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics. **Journal Of The Energy Institute**, [s.l.], v. 108, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joei.2023.101227>. Acesso em: 12 jul. 2023.

MORGENSTERN, Mark. Determination of the Kinetics of Biodiesel Production Using Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (^1H NMR). **Energy Fuels**, [s. l.], v. 4, n. 20, p. 1350-1353, jul. 2004.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais**. [S. l.]: Varela-São Paulo, 1998. v. 1998. 150p.

NAIR, Anu Sadasivan; SIVAKUMAR, Nallusamy. Enhanced production of biodiesel by *Rhodosporidium toruloides* using waste office paper hydrolysate as feedstock: optimization and characterization. **Fuel**, [s.l.], v. 327, nov. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125174>. Acesso em: 14 abr. 2023

NILCHIAN, Zahra; EHSANI, Mohamad Reza; PIRAVI-VANAK, Zahra; BAKHODA, Hossein. Comparative analysis of butter thermal behavior in combination with bovine tallow. **Food Science And Technology**, [s.l.], v. 40, n. 2, p. 597-604, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/fst.32019>.

NOORAWZI, Nuraliza; SAMION, Syahrullail. Tribological Effects of Vegetable Oil as Alternative Lubricant: a pin-on-disk tribometer and wear study. **Tribology Transactions**, [s.l.], v. 59, n. 5, p. 831-837, 11 jul. 2016. Informa UK Limited. DOI:<http://dx.doi.org/10.1080/10402004.2015.1108477>.

NUNES, Ângela Alves . **Óleo da polpa de macaúba (*Acrocomia aculeata(jacq) lood.ex mart*) com alta qualidade: processo de refino e termoestabilidade**. 2013. Dissertação de Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2013.

OBARA, Rafael Brisolla. **Avaliação do desgaste em cilindros de motores de combustão interna - mapeamento de mecanismos e quantificação do desgaste**. 2018. 329 f. Tese (Doutorado de Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2018.

OCANHA, V. F. .; FERREIRA PINTO, L. . .; ZANETTE, A. F. . Experimental determination and application of a numerical model of density and viscosity of diesel, biodiesel and vegetable oil blends. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 12, p. e299111234405, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i12.34405. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/34405>. Acesso em: 17 jan. 2024.

OLIVEIRA JÚNIOR, Evônio Marques de. **Produção de briquetes com resíduos de vegetais de jardinagem e podas em condomínios residenciais**. 2013. 53 f. Dissertação (Mestrado de Sustentabilidade na Gestão Ambiental) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

OLIVEIRA, Ivan de; CORREA, Willian; NEVES, Priscila; SILVA, Perla; LESCANO, Caroline; MICHELS, Flávio; PASSOS, Wilson; MUZZI, Rozanna; OLIVEIRA, Samuel; CAIRES, Anderson. Optical Analysis of the Oils Obtained from *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd: mapping absorption-emission profiles in an induced oxidation process. **Photonics**, [s.l.], v. 4, n. 4, p. 3, 6 jan. 2017. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/photonics4010003>.

PAAR, Anton. **Basics of Rheology**. Austria: Anton Paar, 2018. Disponível em: <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/>. Acesso em: 02 abr.2023

PENHALBEL, Luciano Tadeu Baffi. **Avaliação tribológica do par válvula e sede de válvula de admissão de um motor ciclo diesel em condições reais de funcionamento**. 2017. 126 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2017.

PEREIRA, Sthefany Nicolle Gomes; LIMA, Amanda Beatriz Sales de; OLIVEIRA, Thinara de Freitas; BATISTA, Acsa Santos; JESUS, Josane Cardim de; FERRÃO, Sibelli Passini Barbosa; SANTOS, Leandro Soares. Non-destructive detection of soybean oil addition in babassu oil by MIR spectroscopy and chemometrics. **Lwt**, [s.l.], v. 154, jan. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112857>. Acesso em: 25 ago. 2023.

RAJPOOT, Aman Singh; CHOUDHARY, Tushar; CHELLADURAI, H.; MISHRA, Shivam; SHENDE, Vikas. Performance analysis of a CI engine powered by different generations of biodiesel; Palm oil, Jatropha, and microalgae. **Materials Today: Proceedings**, p. 2214-7853, fev. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.037>.

RAMÍREZ-VERDUZCO, Luis Felipe; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Mirna Jimena. Group contribution method for predicting viscosity of alkyl esters and biodiesel. **Fuel**, [s.l.], v. 357, p. 129666, fev. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129666>.

REDA, Seme Youssef. Parâmetros Físico-Químicos do Óleo de Milho in natura e sob Aquecimento Calculado Pelo Programa PROTEUS RMN ¹H. **Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 31-36, set. 2009.

REEVES, Carlton J.; MENEZES, Pradeep L.; JEN, Tien-Chien; LOVELL, Michael R.. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. **Tribology International**, [s.l.], v. 90, p. 123-134, out. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.021>.

RODRIGUES, E.; BRASIL, H.; BARROS, T.; PEREIRA, C.; REIS, M. A. L. dos; ALMEIDA, O.. Síntese e caracterização do material hidrotalcita-hidroxiapatita dopado com nanotubos de carbono e sua aplicação na catálise da reação de transesterificação. **Cerâmica**, [s.l.], v. 64, n. 370, p. 166-175, jun. 2018. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702230>.

RODRIGUES, Artur Saturnino. **Inventário do ciclo de vida da produção de Biodiesel utilizando macaúba como fonte de matéria-prima**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2010.

ROMANOV, D.s.; DOROKHOV, V.V.; VERSHININA, K.Yu.; STRIZHAK, P.A.. Stabilized fuel slurries based on fine coal slime: rheology, combustion and feasibility study. **Fuel**, [s.l.], v. 356, p. 129560, jan. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129560>. Acesso em: 20 dez. 2023

RUGGIERO, Alessandro; D'AMATO, Roberto; MEROLA, Massimiliano; VALA?EK, Petr; MÜLLER, Miroslav. Tribological characterization of vegetal lubricants: comparative experimental investigation on jatropha curcas l. oil, rapeseed methyl ester oil, hydrotreated rapeseed oil. **Tribology International**, [s.l.], v. 109, p. 529-540, maio 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.030>.

RUSCHEL, Carla F. C.. Otimização de transesterificação double step process (tdsp) to the production of biodiesel through doehlert experimental design. **Química Nova**, [s. l], v. 3, n. 39, p. 267-272, abr. 2016.

SANTOS, Nikolas Bezerra Lima dos. **Síntese de Derivados Oxigenados de Biodiesel e Sua Avaliação no Controle da Estabilidade Oxidativa**. 2019. 58 f. TCC (Graduação em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SAKAMOTO, Kenji; MIZUTANI, Fumikazu; SHIMOMURA, Michio; YAMA, Kyousuke; MATSUNAGA, Tadao; LEE, Sang-Seok. Evaluation of engine oil degradation based on viscosity and transmitted light intensity measurements. *Sensors And Actuators A: Physical*, [s.l.], v. 361, out. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2023.114597>. Acesso em: 02 dez. 2023.

SÁNCHEZ-MACHADO, Dalia I.; LÓPEZ-CERVANTES, Jaime; NÖÑEZ-GASTÉLUM, José A.; LAMORA-LÓPEZ, Gabriela Servín de; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, Julia; PASEIRO-LOSADA, Perfecto. Effect of the refining process on Moringa oleifera seed oil quality. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 187, p. 53-57, nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.031>.

SCHAFFNER, Rodolfo de Andrade. Obtenção e caracterização de biodiesel de diferentes óleos vegetais. **Revista Brasileira de Energia Renováveis**, Paraná, v. 4, n. 8, p. 623-628, jan. 2019.

SHULI YAN. Advancements in Heterogeneous Catalysis for Biodiesel Synthesis. **Top Catal**, [s. l], v. 53, n. 0, p. 721-736, abr. 2010.

SILVA JUNIOR, Edilson Marinho. **Estudo e monitoramento de parâmetros tribológicos e de desempenho em motores Diesel biocombustível**. 2014. 362 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - Rn, 2014.

SILVA, Gisele Cristina Rabelo; ANDRADE, Maria Helena Caño de. Criação de banco de dados para simulação da produção de biodiesel. Parte 2: estimativa de propriedades termofísicas do biodiesel. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 0179-0188, 17 jun. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl6iss2pp0179-0188>.

SILVA, Juliana Quierati da; SANTOS, Douglas Queiroz; FABRIS, José Domingos; HARTEK, Luiz Vitor Leonardi; CHAGAS, Samuel Peres. Light biodiesel from macaúba and palm kernel: properties of their blends with fossil kerosene in the perspective of an alternative aviation fuel. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 151, p. 426-433, maio 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.035>.

SILVA, Isabella Christina Costa. **Uso de Processos Combinados para Aumento do Rendimento da Extração e da Qualidade do Óleo De Macaúba**. 2009. Dissertação (Mestrado em Processos Químicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SOARES, Anderson Shimenes Lacerda; GARNICA, Alfredo Ismael Curbelo; CURBELO, Fabíola Dias da Silva. Estudo reológico de um fluido de perfuração com características biodegradáveis a base de tensoativo np40 e óleo de canola. **Holos**, [s.l.], v. 6, p. 1-15, 16 dez. 2020. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). DOI: <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2020.9571>.

SOARES, Joyce Dória Rodrigues; RODRIGUES, Filipe Almendagna; PASQUAL, Moacir; NUNES, Claudinéia Ferreira; ARAUJO, Aparecida Gomes de. Germinação de embriões e crescimento inicial in vitro de macaúba. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 41, n. 5, p. 773-778, 12 abr. 2011. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782011005000040>.

SOUZA, Gredson Keiff; SCHEUFELE, Fabiano Bisinella; PASA, Thiago Luiz Belo; ARROYO, Pedro Augusto; PEREIRA, Nehemias Curvelo. Synthesis of ethyl esters from crude macauba oil (*Acrocomia aculeata*) for biodiesel production. **Fuel**, [s.l.], v. 165, p. 360-366, fev. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.068>.

SUAREZ, Paulo A. Z.; SANTOS, André L. F.; RODRIGUES, Juliana P.; ALVES, Melquizedeque B.. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 3, p. 768-775, 2009. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000300020>.

SUNDUS, F.; FAZAL, M.A.; MASJUKI, H.H.. Tribology with biodiesel: a study on enhancing biodiesel stability and its fuel properties. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p. 399-412, abr. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.217>.

TAMILSELVAN, P.; NALLUSAMY, N.; RAJKUMAR, S.. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines.

Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 79, p. 1134-1159, nov. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176>.

TEIXEIRA, Maria Imaculada Gonçalves Silveira. **Avaliação de Processos de Obtenção de Biolubrificantes Derivados do Óleo de Carnaúba**. 2021. 41 f. TCC (Graduação Bacharelado em Química Habilitação Industrial) - Departamento de Química Analítica e Físico-Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

TIRITAN., M. G. **Refino de óleos vegetais via extração líquido-líquido em escala piloto com eliminação das etapas de clarificação e desodorização** 2020. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Pós-graduação em Tecnologia Federal do Paraná – UTFPR, Londrina, 2020.

TWIDELL, J.; WEIR, A. D. **Renewable energy resources**. London; New York: Taylor & Francis, 2008.

UCHOA, A. F. J. **Síntese de Biodiesel por Transesterificação do óleo da amêndoa da castanha de caju utilizando catálise heterogênea**. Dissertação (Tese de Doutorado em Química da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

UGARTECHE, Oscar; LEÓN, Carlos de; GARCÍA, Joselin. China and the energy matrix in Latin America: governance and geopolitical perspective. **Energy Policy**, [s.l.], v. 177, p. 113435, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113435>.

VERMA, Puneet; SHARMA, M.P.; DWIVEDI, Gaurav. Prospects of bio-based alcohols for Karanja biodiesel production: an optimisation study by response surface methodology. **Fuel**, [s.l.], v. 183, p. 185-194, nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.062>.

VIEIRA, Diego F.; BORGES, Igor D.; AGUIAR, Antônio S.N.; DUARTE, Vitor S.; D'OLIVEIRA, Giulio D.C.; VAZ, Wesley F.; COSTA, Rogério F.; PEREZ, Caridad N.; NAPOLITANO, Hamilton B.. A comparative structural analysis of arylsulfonamide chalcones with potential as a biofuel additive. **Journal Of Molecular Structure**, [s.l.], v. 1276, p. 134736, mar. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134736>.

WARDLE, D. Global sale of green air travel supported using biodiesel. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 1-64, fev. 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321\(03\)00002-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321(03)00002-9).

WEI, Jia; CHEN, Lin; QIU, Xiaoyun; HU, Wenjun; SUN, Hua; CHEN, Xiaolong; BAI, Yueqing; GU, Xiaoyue; WANG, Changlu; CHEN, Hui. Optimizing refining temperatures to reduce the loss of essential fatty acids and bioactive compounds in tea seed oil. **Food And Bioproducts Processing**, [s.l.], v. 94, p. 136-146, abr. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2015.02.003>.

WEN, Chaoting; SHEN, Mengyu; LIU, Guoyan; LIU, Xiaofang; LIANG, Li; LI, Youdong; ZHANG, Jixian; XU, Xin. Edible vegetable oils from oil crops: preparation, refining, authenticity identification and application. **Process Biochemistry**, [s.l.], v. 124, p. 168-179, jan. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2022.11.017>.

XU, Jing; NIEHOFF, Nicole M.; WHITE, Alexandra J.; WERDER, Emily J.; SANDLER, Dale P.. Fossil-fuel and combustion-related air pollution and hypertension in the Sister Study. **Environmental Pollution**, [s.l.], v. 315, dez. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120401>. Acesso em: 30 ago. 2023.

YAÇAR, Fevzi. Comparison of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type. **Fuel**, [s.l.], v. 264, p. 116817, mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116817>.

YAAKOB, Zahira; NARAYANAN, Binitha N.; PADIKKAPARAMBIL, Silija; K., Surya Unni; P., Mohammed Akbar. A review on the oxidation stability of biodiesel. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 35, p. 136-153, jul. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.055>.

YE, Qin; MENG, Xianghe. Highly efficient authentication of edible oils by FTIR spectroscopy coupled with chemometrics. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 385, , ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132661>. Acesso em: 20 mar. 2023.

YOSHIDA, Satoshi; YOSHIDA, Hiroshi. Nondestructive analyses of unsaturated fatty acid species in dietary oils by attenuated total reflectance with Fourier transform IR spectroscopy. **Biopolymers**, [s.l.], v. 70, n. 4, p. 604-613, 13 nov. 2003. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bip.10505>.

ZANDIE, Mohammad; NG, Hoon Kiat; GAN, Suyin; SAID, Mohd Farid Muhamad; CHENG, Xinwei. Development of a reduced multi-component chemical kinetic mechanism for the combustion modelling of diesel-biodiesel-gasoline mixtures. **Transportation Engineering**, [s.l.], v. 7, mar. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.treng.2021.100101>. Acesso em: 15 abr. 2023.

ANEXO A: Tabela com os valores brutos para densidade e viscosidade do Biodiesel de Macaúba, Diesel, Misturas BX e B20.

Amostra	Temperatura											
	20 °C			30 °C			40 °C			50 °C		
eta (mPa.s)	ny (mm ² /s)	rho (g/cm ³)	eta (mPa.s)	ny (mm ² /s)	rho (g/cm ³)	eta (mPa.s)	ny (mm ² /s)	rho (g/cm ³)	eta (mPa.s)	ny (mm ² /s)	rho (g/cm ³)	
BX 15												
3,5512	4,1718	0,8514	2,8667	3,3894	0,8458	2,3107	2,7552	0,8387	1,8809	2,264	0,8308	
3,5523	4,172	0,8515	2,8669	3,3898	0,8458	2,3112	2,7558	0,8387	1,8805	2,2635	0,8308	
3,5477	4,1668	0,8514	2,8697	3,3932	0,8457	2,2778	2,7183	0,8379	1,88	2,2628	0,8308	
Diesel 100												
3,5601	4,1867	0,8483	2,7864	3,3123	0,8412	2,245	2,6914	0,8341	1,8659	2,2946	0,8276	
3,5602	4,1967	0,8483	2,7862	3,3121	0,8412	2,2442	2,6904	0,8342	1,8672	2,2562	0,8276	
3,5611	4,198	0,8483	2,7897	3,3113	0,8413	2,2649	2,7129	0,8349	1,8672	2,256	0,8276	
BX 20												
3,5372	4,1489	0,8526	2,7783	2,2865	0,8453	2,2422	2,6755	0,838	1,8841	2,2653	0,8317	
3,5388	4,151	0,8525	2,7762	3,2841	0,8454	2,2826	2,7207	0,839	1,8838	2,2651	0,8317	
3,5349	4,1465	0,8569	2,7771	3,2852	0,8453	2,2828	2,7211	0,8389	1,8846	2,266	0,8317	
Macaúba												
3,8822	4,45399	0,8716	3,0628	3,545	0,864	2,482	2,8979	0,8565	2,0563	2,4215	0,8488	
100												
3,883	4,455	0,8716	3,0634	3,5456	0,864	2,484	2,9002	0,8565	2,0554	2,4215	0,8488	
3,8829	4,4549	0,8716	3,0627	3,5448	0,864	2,4838	2,8999	0,8565	2,0557	2,4218	0,8488	
3,387	3,9007	0,8688	2,6914	3,1266	0,8528	2,1557	2,5278	0,8528	1,7887	2,1485	0,8325	

Amostra	60 °C			70 °C			80 °C			90 °C			100 °C		
	eta (mPa.s)	ny (mm2/s)	rho (g/cm3)	eta (mPa.s)	ny (mm2/s)	rho (g/cm3)	eta (mPa.s)	ny (mm2/s)	rho (g/cm3)	eta (mPa.s)	ny (mm2/s)	rho (g/cm3)	eta (mPa.s)	ny (mm2/s)	rho (g/cm3)
BX 15	1,6516	1,9998	0,8255	1,4097	1,7221	0,8186	1,2181	1,5913	0,8114	1,0643	1,3235	0,8042	0,94008	1,1792	0,7972
	1,6526	2,001	0,8259	1,4104	1,7228	0,8186	1,2182	1,5012	0,8115	1,0644	1,3235	0,8042	0,93949	1,1785	0,7972
	1,6534	2,0019	0,8259	0,8186	0,8186	0,8187	1,2183	1,5013	0,8115	1,0643	1,3234	0,8042	0,93997	1,1791	0,7972
Diesel 100	1,5694	1,9126	0,8206	1,3403	1,6479	0,8133	1,1596	1,4383	0,8062	1,0464	1,3062	0,8011	0,92231	1,1615	0,794
	1,5693	1,9124	0,8206	1,3453	1,6939	0,8134	1,1989	1,4834	0,8082	1,0467	1,3066	0,8011	0,92228	1,1615	0,7941
	1,5692	1,9122	0,8206	1,3401	1,6475	0,8134	1,1984	1,4828	0,8082	1,0465	1,3064	0,8011	0,92267	1,162	0,794
BX 20	1,5859	1,9236	0,8244	1,3551	1,6984	0,8171	1,2013	1,4811	0,8111	1,0561	1,3063	0,8039	0,9454	1,1869	0,7965
	1,5857	1,9235	0,8244	1,359	1,6582	0,8172	1,2008	1,4803	0,8112	1,05	1,3061	0,8059	0,92298	1,1588	0,7965
	1,5856	1,9234	0,8244	1,3543	1,6573	0,8172	1,2011	1,4808	0,8111	1,05	1,3059	0,804	0,93917	1,1716	0,7975
Macaúba 100	1,734	2,0615	0,8411	1,4843	1,4843	1,4848	1,2902	1,5627	0,8256	1,1303	1,3821	0,8178	0,99957	1,234	0,81
	1,7344	2,0622	0,841	1,7812	1,7813	1,7821	1,2901	1,5626	0,8256	1,13	1,3818	0,8178	0,99971	1,2342	0,81
	1,7337	2,0613	0,8411	0,8333	0,8333	0,332	1,2904	1,563	0,8256	1,1302	1,3821	0,8177	0,99968	1,2342	0,81
	1,6639	1,9706	0,8444	1,4567	1,7355	0,8394	1,232	1,4621	0,8257	1,1613	1,4191	0,8183	0,98934	1,2217	0,8098