



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE BIOLOGIA E QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

FERNANDO ALVES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LUBRIFICANTES
BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO ÓLEO DE MILHO**

CUITÉ – PB

2024

FERNANDO ALVES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LUBRIFICANTES
BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO ÓLEO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Licenciatura em Química da Universidade
Federal de Campina Grande, para a obtenção do grau
de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Oliveira Santos

CUITÉ – PB

2024

S586d Silva, Fernando Alves da.

Desenvolvimento e caracterização de lubrificantes biodegradáveis a partir do óleo de milho. / Fernando Alves da Silva. - Cuité, 2024.
67 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. José Carlos Oliveira Santos".

Referências.

1. Petrologia. 2. Biolubrificantes. 3. Biomassa. 4. Epoxidação - petróleo. 5. Óleo de milho. 6. Sustentabilidade. 7. Centro de Educação e Saúde. I. Santos, José Carlos Oliveira. II. Título.

CDU 552(043)

FERNANDO ALVES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE LUBRIFICANTES
BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO ÓLEO DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal de Campina Grande, para a obtenção do grau de Licenciado em Química.

Aprovado em 14 de maio de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JOSE CARLOS OLIVEIRA SANTOS
Data: 24/05/2024 09:50:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Carlos Oliveira Santos (Orientador) UFCG/CES/UABQ

Documento assinado digitalmente
 JOANA MARIA DE FARIAS BARROS
Data: 24/05/2024 12:12:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Joana Maria de Farias Barros (Examinadora) UFCG/CES/UABQ

Documento assinado digitalmente
 RAYANE DE OLIVEIRA SILVA
Data: 24/05/2024 18:19:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Rayane de Oliveira Silva (Examinadora) UFCG/CES/UABQ

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar ao longo dessa trajetória acadêmica, me fortalecendo em momentos que cheguei a duvidar de minha capacidade, me proporcionando força e discernimento para continuar essa jornada.

À minha família, em especial a minha mãe, Francisca Alves, que esteve próximo de mim no decorrer desta conquista, me apoiando incondicionalmente, além, é claro, por todo o amor e dedicação que está me ofertou ao longo de minha vida. A vocês, todo o meu carinho e admiração.

Aos meus amigos, pertencentes ao grupo da chacota (Liliane Gomes, Camila Oliveira, Jennyfer Caroline, Lidiane Araújo e Leandro Malaquias), que enfrentaram comigo, os desafios e os triunfos do ensino superior, tornando tudo mais leve e divertido, com uma pitadinha de fofoca, brigas e deboche. E, agradeço também, aos demais amigos e colegas que fiz ao longo desse percurso, repleto de bons e difíceis momentos. A todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos Oliveira Santos, por todo apoio, paciência, ensinamentos e conselhos prestados ao longo da minha formação acadêmica, bem como, da contribuição na construção desse trabalho. E a todas as pessoas que se envolveram na realização desse projeto. Muito obrigado!

Agradeço a professora Dra. Joana Maria Farias Barros e a professora Dra. Rayane de Oliveira Silva, por aceitarem compor a banca examinadora e pelas contribuições valiosas para esse trabalho, bem como, ao professor Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas, por todos os ensinamentos e ajuda prestada no decorrer desse projeto. Aos demais docentes do curso de química, bem como, os professores da educação básica, que tanto contribuíram com seus ensinamentos no decorrer da minha formação. Meu profundo agradecimento.

“Todo o homem recebe duas espécies de educação: a que lhe é dada pelos outros, e, muito mais importante, a que ele dá a si mesmo.”

(Edward Gibbon)

RESUMO

Os problemas ambientais gerados pelo petróleo e a possibilidade de seu esgotamento, fez nos últimos anos, com que inúmeras pesquisas fossem desenvolvidas em busca de alternativas viáveis a sua substituição e a de seus derivados, como os óleos lubrificantes minerais. Com isso, os lubrificantes biodegradáveis, vêm ganhando cada vez mais destaque, frente aos lubrificantes à base de petróleo, por possuírem alta biodegradabilidade e menor ecotoxicidade. Uma das metodologias utilizadas para produzi-los, é a transesterificação seguida da epoxidação do óleo de milho refinado, com a finalidade de melhorar as características lubrificantes desse óleo. O milho é a cultura mais produzida no planeta, além de ser cultivado em larga escala em todas as regiões do Brasil. Diante do exposto, o referido estudo, objetivou a síntese e caracterização de biolubrificantes, utilizando como matéria-prima o óleo de milho comercial. A reação de transesterificação, empregou dois álcoois diferentes e utilizou como catalisador o hidróxido de potássio. Na sequência, os produtos obtidos na transesterificação foram epoxidados utilizando o ácido peracético comercial 15%. Os materiais obtidos no processo foram caracterizados através de suas propriedades físico-químicas. Com base nos resultados, observou-se que os ésteres metílicos (96%) e etílicos (84%), obtiveram bons percentuais de conversão, bem como, os epóxidos metílicos (93%) e etílicos (97%). Ademais, os produtos epoxidados apresentaram diminuição dos índices de iodo e viscosidade cinemática a 40 °C, destacando eficiência no processo empregado. Em função dos resultados obtidos, o óleo de milho apresenta potencial para produção de lubrificantes biodegradáveis, contribuindo assim, para diminuição do uso de materiais fósseis na produção de lubrificantes.

Palavras-Chave: Biolubrificantes; Biomassa; Epoxidação; Óleo de milho; Sustentabilidade.

ABSTRACT

In recent years, the environmental problems generated by oil and the possibility of its depletion have led to numerous research projects in search of viable alternatives to replace it and its derivatives, such as mineral lubricating oils. As a result, biodegradable lubricants have been gaining more and more prominence in relation to petroleum-based lubricants, as they are highly biodegradable and less ecotoxic. One of the methods used to produce them is transesterification followed by epoxidation of corn oil, with the aim of improving its lubricating characteristics. Corn is the most widely produced crop on the planet and is also grown on a large scale in all regions of Brazil. In view of the above, the aim of this work was to synthesize and characterize biolubricants using commercial corn oil as a raw material. The transesterification reaction used two different alcohols and potassium hydroxide as a catalyst. The transesterification products were then epoxidized with 15% commercial peracetic acid. The materials obtained in the process were characterized through their physical and chemical properties. Based on the results, it was observed that the methyl (96%) and ethyl (84%) esters obtained good conversion percentages, as did the methyl (93%) and ethyl (97%) epoxides. Furthermore, the epoxidized products showed a reduction in iodine levels and kinematic viscosity at 40 °C, highlighting the efficiency of the process used. Based on the results obtained, corn oil has the potential to be used in the production of biodegradable lubricants, thus helping to reduce the use of fossil materials in the production of lubricants.

Keywords: Biolubricants; Biomass; Epoxidation; Corn oil; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura química dos óleos minerais.	20
Figura 2 - Estrutura química de um triglicerídeo.	24
Figura 3 - Estrutura anatômica do grão de milho.	26
Figura 4 – Estrutura química dos ácidos graxos que compõe o óleo de milho.	27
Figura 5 - Proposta mecanística da reação de transesterificação de triglicerídeos, utilizando uma base de Brønsted.	28
Figura 6 - Etapas reacionais envolvidas na transesterificação de triacilglicerídeos.	29
Figura 7 - Proposta mecanística da reação de epoxidação empregando o ácido peracético. ..	30
Figura 8 - Processo de obtenção de ésteres metílicos do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.	32
Figura 9 - Processo de obtenção de ésteres etílicos do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.	32
Figura 10 - Processo de obtenção de epóxido metílico a partir de ésteres do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.	33
Figura 11 - Processo de obtenção de epóxido etílico a partir de ésteres do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.	34
Figura 12 - Amostra dos produtos obtidos, que foram analisados.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos principais ácidos graxos presentes em óleos vegetais.	24
Tabela 2 – Resultados da análise do aspecto referente aos produtos.....	43
Tabela 3 – Resultados da análise da umidade e voláteis referente aos produtos.....	44
Tabela 4 - Resultados da análise do teor de cinzas referente aos produtos.	45
Tabela 5 - Resultados da análise da densidade referente aos produtos.....	46
Tabela 6 - Resultados da análise do índice de acidez referente aos produtos.....	47
Tabela 7 - Resultados da análise do índice de iodo referente aos produtos.....	49
Tabela 8 - Resultados da análise do teor de sabão referente aos produtos.	50
Tabela 9 - Resultados da análise do índice de saponificação referente aos produtos.....	51
Tabela 10 - Resultados da análise do índice de peróxido referente aos produtos.....	52
Tabela 11 - Resultados da análise da viscosidade cinemática a 40 °C referente aos produtos.	54
Tabela 12 - Resultados da análise do índice de hidroxila referente aos produtos.	55
Tabela 13 - Resultados da análise do oxigênio oxirano referente aos produtos.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AcGs	Ácidos Graxos
AGL	Ácido Graxo Livre
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
cm ⁻¹	Centímetros a menos 1
°C	Graus Celsius
EUA	Estados Unidos da América
g	Gramas
HCl	Ácido Clorídrico
KI	Iodeto de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
M	Molar
meq	Miliequivalente
mg	Miligramas
mL	Mililitro
m ³	Metro Cúbico
N	Normal
nº	Número
Na ₂ S ₂ O ₃	Tiosulfato de Sódio
OLUC	Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados
%	Porcentagem

TAG	Triacilglicerol
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
US\$	<i>United States Dollar</i>
v/v	Volume/Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
4 REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1 Energia e Meio Ambiente.....	18
4.2 Lubrificantes	20
4.3 Biolubrificantes.....	22
4.4 Óleos Vegetais.....	23
4.5 Milho	25
4.6 Reações Químicas para Produção de Biolubrificantes	28
5 METODOLOGIA.....	31
5.1 Local da pesquisa.....	31
5.2 Materiais.....	31
5.3 Procedimento de extração dos Biodiesel e dos Biolubrificantes	31
5.3.1 Transesterificação	31
5.3.2 Epoxidação	33
5.4 Caracterização Físico-Química	34
5.4.1 Índice de Acidez (AOCS Cd3d-63).....	35
5.4.2 Índice de Iodo (AOCS Cd 1-25).....	35
5.4.3 Teor de Sabão (AOCS Cc 17-95)	36
5.4.4 Índice de Saponificação (AOCS Cd 3b-76)	36
5.4.5 Índice de Peróxido (AOCS Cd 8-53).....	37
5.4.6 Densidade Relativa	37
5.4.7 Teor de Cinzas	37
5.4.8 Teor de Umidade e Voláteis (AOCS Da-2a-48).....	38
5.4.9 Viscosidade Dinâmica	38
5.4.10 Índice de Hidroxila (AOCS Cd 13-60).....	39
5.4.11 Oxigênio Oxirano (AOCS Cd 9-57).....	39
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 Transesterificação	41

6.2 Epoxidação	42
6.3 Caracterização Físico-Química	42
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade contemporânea, a questão energética é fundamental para a manutenção da qualidade de vida no planeta Terra. O termo matriz energética, está relacionado com as fontes capazes de gerar energia por meio de processos de transformações (Filho; Santos, 2022).

Das fontes de energia não-renováveis existentes, ou seja, combustíveis fósseis finitos, o petróleo é sem dúvida o mais utilizado dentre estes, visto que, esse combustível fóssil possui alta variabilidade de aplicação, tornando-o um pilar da economia no mundo. Está matéria-prima compõe a matriz energética de uma diversidade de produtos, tais como plásticos, cosméticos e itens automotivos (Delgado; Filgueiras, 2022).

Diante deste cenário, justifica-se o aumento na demanda por produtos derivados do petróleo, bem como, a elevada exploração das jazidas, implicando no provável esgotamento das reservas existentes. Além disso, a variação climática em decorrência das emissões dos gases de efeito estufa evidencia uma séria crise ambiental que resulta diretamente em mudanças na temperatura e nas precipitações (Chen *et al.*, 2021). Diante disso, uma transição energética se torna cada vez mais inevitável, posto que, esses combustíveis fósseis são os principais causadores do aquecimento global e, acabam favorecendo a ocorrência de problemas como chuva ácida, desertificações, enchentes e etc.

Outra problemática que vem ganhando destaque, é o descarte inadequado de insumos de origem fóssil, como os produtos utilizados na indústria automotiva. Dentre eles, destaca-se os fluídos e óleos lubrificantes, os quais são aplicados em motores, engrenagens, turbinas, compressores e ferramentas pneumáticas (Singh *et al.*, 2019).

Os lubrificantes são hidrocarbonetos, que dependendo da sua composição química e do processo de refino do petróleo, podem ser classificados como parafínicos, naftênicos e aromáticos. Estas substâncias, podem ser empregadas em maquinários com a finalidade de reduzir o atrito e o desgaste entre estes, atuando como uma película protetora entre superfícies metálicas em movimento. Estes compostos podem ser de origem natural, mineral ou sintética. A maior parte dos lubrificantes advém de óleos minerais, muito em decorrência do baixo custo de obtenção. Entretanto, estes tipos de lubrificantes são mais poluentes e tóxicos ao meio ambiente (Almeida *et al.*, 2023).

Alternativamente, o desenvolvimento de lubrificantes de origem natural vem sendo cada vez mais implementado, uma vez que esses biolubrificantes são obtidos de fontes renováveis e

biodegradáveis. Os óleos vegetais, por exemplo, são constantemente empregados na síntese de biolubrificantes, não só por apresentarem cadeias carbônicas longas, semelhante ao lubrificante mineral, mas também por possuírem alto potencial biodegradável e baixa ecotoxicidade. Alguns óleos vegetais, como o de milho, contém ácidos graxos de diferentes tipos, tornando-se uma matéria-prima desejável para diferentes aplicações na indústria (Silva, 2022).

O óleo de milho desempenha um papel importante na produção agrícola nacional, sendo destinado, principalmente, na fabricação de rações e alimentos para o consumo humano. Este detém, o segundo maior cultivo no Brasil, ficando atrás apenas da soja. Deste modo, por possuir bons índices de produção e aplicações em diversos setores industriais, o óleo de milho revela-se uma alternativa em potencial na síntese de biolubrificantes. Entretanto, por mais que os óleos de base vegetal sejam uma opção viável por apresentarem uma elevada lubricidade, alto ponto de fulgor, além de possuírem menores perdas evaporativas, se comparado ao óleo mineral, estes óleos vegetais dispõem de uma execução empobrecida em baixas temperaturas e uma baixa estabilidade oxidativa, em detrimento dos ácidos graxos insaturados presentes em sua composição. Portanto, alterações na estrutura química desses óleos devem ser realizadas para obtenção de derivados mais estáveis, que possuam, além de características físico-químicas adequadas, uma elevada biodegradabilidade, pois este, se concentra como um dos principais fatores que impulsionam sua aplicação nesse setor (Ijaz Malik *et al.*, 2023).

Com base no exposto, o presente projeto de pesquisa, visando contribuir para o cenário da química verde, perante as crises ambientais, teve como propósito a síntese, por meio das reações de transesterificação e epoxidação, de lubrificantes metílicos e etílicos biodegradáveis a partir do óleo de milho comercial, ambos sendo caracterizados mediante análises físico-químicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Obter biolubrificantes a partir do óleo de milho, por meio das reações de transesterificação metílica e etílica, seguido da reação de epoxidação dos diferentes ésteres.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir os ésteres metílicos e etílicos por meio da reação de transesterificação do óleo de milho;
- Epoxidar os ésteres metílicos e etílicos provenientes do óleo de milho utilizando o ácido peracético;
- Caracterizar por análises físico-químicas o óleo de milho, os ésteres metílicos e etílicos (biodiesel) e os epóxidos de ésteres metílicos e etílicos (biolubrificante).

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Energia e Meio Ambiente

Desde os primórdios, os recursos naturais se consolidaram como a base da sobrevivência dos seres humanos na Terra. Com o passar do tempo, a procura incessante por esses recursos se intensificou, permitindo que a humanidade se organizasse, ocasionando assim, o surgimento das primeiras civilizações (Mendes; Sylla, 2019).

Nesse sentido, o “progresso das civilizações” implicou na crescente devastação da fauna e flora no decorrer do tempo. Desta forma, o esgotamento dos recursos naturais do planeta Terra é provocado pelo aumento gradativo da exploração humana, bem como, pela mudança da era geológica do Holoceno para o Antropoceno (Coltro; Borinelli, 2020). O antropoceno é conhecido como a era do impacto do homem na Terra. Por sua vez, o antropoceno teve início no final do século XVIII, por causa dos efeitos globais resultantes de atividades humanas que surgiram a partir da Revolução Industrial. Nesse período houve um aumento consistente nos níveis de gases causadores do efeito estufa (Albuquerque; Souza, 2022). Essa revolução, marcou o surgimento da indústria e gerou grandes transformações no planeta.

Segundo historiadores, a revolução industrial possui três fases. A primeira fase é caracterizada pelas intensas mudanças no setor produtivo, em especial, a introdução de maquinários movidos por energia a vapor nos processos de produção e a substituição da utilização do carvão vegetal pelo carvão mineral. A segunda fase iniciou-se no século XIX e teve como destaque o petróleo, tornando este a principal fonte energética do mundo e, marcando assim, a expansão da revolução industrial. Nesse período, a indústria se expandiu pelo mundo e as ascensões tecnológicas permitiram o uso de energia elétrica e de motores à combustão. Já a terceira fase, teve início na segunda metade do século XX, obtendo destaque no desenvolvimento científico e tecnológico, permitindo o crescimento das indústrias petroquímicas, além dos avanços nos meios de transportes e em áreas de estudo, como a medicina (Pasquini, 2020).

Todas essas conquistas, permitiram o desenvolvimento da humanidade, porém, à medida que a sociedade cresce, concomitantemente o meio ambiente se degrada, destruindo assim, a base ecológica que sustenta a economia e a sobrevivência das espécies (Alves, 2020). Partindo

desse modelo de geração de energia e bem de consumo, é praticamente impossível gerar energia sem destruir o ecossistema.

A energia é um fator crucial para a sobrevivência da vida humana na Terra. Sendo produzida a partir de processos de transformações, está se concentra como uma das principais *commodities* de alto valor no mercado financeiro. Para sua geração, é preciso obter-se uma fonte primária que desempenhe esse papel. Atualmente, o petróleo e seus derivados, junto com o carvão mineral e o gás natural, compõe cerca de 81,1% da matriz energética mundial (EPE, 2023). Esses combustíveis fósseis, fazem parte do conjunto de fontes consideradas não-renováveis, ou seja, fontes passíveis de esgotamento. Dentre esses recursos naturais o petróleo é o que mais se destaca, muito em decorrência de sua variabilidade aplicacional, conquistando o posto de maior matriz energética global. Esse recurso, acaba influenciando diretamente as questões políticas no mundo, como a segurança de um estado, guerras e relações diplomáticas entre países (BEPI, 2020).

Os anos iniciais do século XXI foram determinados por preocupações de alcance global ligados ao abastecimento de energia e à elevada percepção dos impactos das mudanças climáticas iminentes. O mau gerenciamento desses recursos e os descartes inadequados de insumos derivados destes, resultaram em problemas sérios, não só para a natureza, mas também para os seres humanos (Felipe *et al.*, 2023). De acordo com os dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021), cerca de 7 milhões de pessoas morrem prematuramente todo ano em decorrência da poluição atmosférica, ademais, o relatório também reporta que 90% da população no mundo está sujeita a exposição de pelo menos um agente poluidor grave. Diante desses fatores, nota-se que o uso exagerado desses combustíveis fósseis, visando atender as necessidades energéticas no planeta, acabam ocasionando graves danos ao meio ambiente, dado que, a queima desses combustíveis gera gases poluentes na atmosfera, provocando assim, o efeito estufa.

Nesse contexto, a transição energética acaba sendo inevitável, muito por causa das crises ambientais e da alta dependência em um recurso considerado finito, além, é claro, do compromisso ambiental de redução das emissões de gases do efeito estufa, firmado por 198 países, desde os acordos instituídos em 2015, na conferência do clima em Paris, objetivando limitar o aumento da temperatura do planeta em 1,5°C até o final do século 21 (ONU, 2023). Mediante esses motivos, a procura por meios mais sustentáveis ao ecossistema amplificou-se, levando diversos setores industriais a buscarem alternativas menos nocivas ao meio ambiente

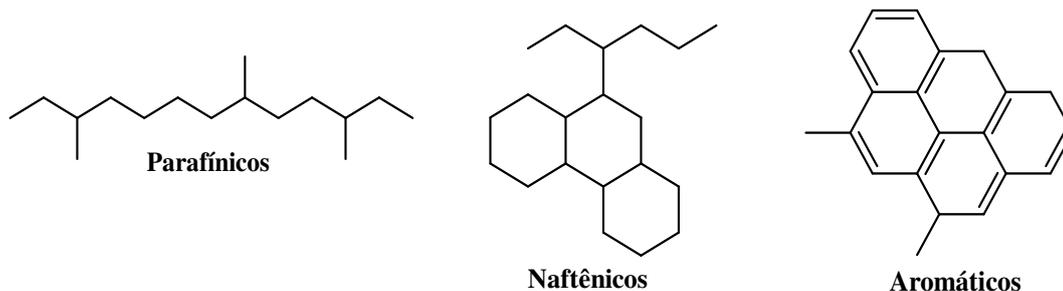
e com um viés mais biodegradável, visando substituir produtos de base mineral, como plásticos, diesel, óleos lubrificantes, entre outros.

4.2 Lubrificantes

Os óleos e graxas lubrificantes são produtos derivados do petróleo, utilizados largamente no setor industrial e automotivo. Estes, possuem a finalidade de reduzir, por meio de uma fina película protetora, o atrito e desgaste gerado por peças metálicas, atuando também na refrigeração e na limpeza das partes móveis, na transmissão de força mecânica, na vedação, na isolamento e proteção do conjunto ou de componentes específicos, e até a transferência de determinadas características físico-químicas a outros produtos (APROMAC, 2011; Almeida *et al.*, 2023).

A composição de um lubrificante é dada por óleo básico e aditivos. Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), um lubrificante pode ser definido como: “Produto acabado, pronto para aplicação específica, sob a forma de graxa ou óleo, formulado a partir de óleo básico ou de mistura de óleos básicos, podendo ou não conter aditivos, dependendo de sua aplicação.” A proporção varia conforme aplicação, mas para um lubrificante de motor automotivo observa-se, em geral, que 93% de sua composição é óleo básico e 7% aditivo. A Resolução ANP nº 804/2019 classifica os óleos básicos em 6 categorias (Grupo I, II, III, IV, V e VI). A categorização depende do teor de saturados, teor de enxofre e índice de viscosidade, mas também de outros fatores particulares à estrutura química e origem do óleo. A base pode ser mineral, sintético ou vegetal. A maioria é de origem mineral, apresentando em sua composição hidrocarbonetos do tipo parafínicos, naftênicos, ou ainda em menor grau, aromáticos. Conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura química dos óleos minerais.



Fonte: autoria própria (2024).

Os parafínicos constituem-se de alcanos lineares ou ramificados, os naftênicos de cicloalcanos com cadeias laterais, e os aromáticos formados, principalmente, por alquil benzenos (PETROBRAS, 2021). A composição química desses produtos depende do petróleo bruto que os originou e de seu processo de refino.

Os lubrificantes ocupam um cenário importante no mercado mundial. Segundo o *Fortune Business Insights* (2022a), o mercado global de lubrificantes alcançou o valor de US\$ 115,87 bilhões em 2021, e deve alcançar até 2029 cerca de US\$ 131,33 bilhões, uma taxa de crescimento anual composto de 2,3% durante o período de previsão. No Brasil, esse mercado superou as expectativas mais otimistas no ano de 2021, conquistando um percentual de 9,4% em vendas, se comparado ao ano de 2020, com um volume total de 1.477.351 m³, ficando historicamente atrás apenas dos anos de 2013 e 2014 (Portallubes, 2022a).

Diante disso, com a crescente atenção voltada para as questões ambientais, mediante a séria crise climática, o desenvolvimento de alternativas economicamente viáveis, além de sustentáveis se faz necessário, haja vista, o aumento do consumo de lubrificantes e descarte inadequado destes no meio ambiente, que acabam acarretando uma poluição severa, podendo atingir os lençóis freáticos e, quando queimados de forma errada, podem gerar emissões de óxidos metálicos, além de gases tóxicos, como dioxina e óxidos de enxofre (Almeida *et al.*, 2023).

Estima-se que pelo menos 50% de todo o lubrificante usado no mundo acabe no meio ambiente, seja por evaporação, derramamentos ou acidentes. Deste percentual, mais de 95% são óleos minerais ou sintéticos não degradáveis (Matos, 2022). De acordo com a Resolução CONAMA nº 362/2005 (BRASIL, 2005) e com a Portaria ANP nº 125/99 (BRASIL, 1999), óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) é o óleo lubrificante que por meio de seu uso normal ou por motivos de contaminação, tornou-se inadequado à sua finalidade original. Além disso, Willing (2001), relata que 1 (um) litro de OLUC tem a capacidade de contaminar mais de 1 milhão de litros de água, ou seja, proporcionalmente, seria necessário menos de uma gota de óleo lubrificante para contaminar 1 (um) litro de água.

Com base nisso, a procura massiva por fontes mais limpas e menos tóxicas cresceu significativamente, levando pesquisadores a investigarem e desenvolverem novas tecnologias para a produção de lubrificantes sintéticos biodegradáveis (biolubrificantes) (Matos, 2018). Os lubrificantes derivados de matérias-primas de base biológica e ecologicamente corretos são denominados de biolubrificantes.

4.3 Biolubrificantes

Biolubrificante é um lubrificante com potencial biodegradável, não tóxico aos seres humanos e ao meio ambiente. Estes materiais, possuem a mesma função que os lubrificantes minerais, mas com a vantagem de serem ambientalmente corretos e obtidos de fontes renováveis (Rios *et al.*, 2020). O conjunto dessas fontes, é denominado de biomassa. Segundo o Ministério de Minas e Energia, biomassa, do inglês *biomass*, é uma composição vegetal ou animal apta a gerar energia. Essas várias fontes, ao serem reaproveitadas recebem o selo 7 da Organização das Nações Unidas - ONU de Energia Acessível e Limpa, aos cidadãos, pois atende os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (Santos Júnior, 2022).

Segundo os dados do *Fortune Business Insights* (2022b), o mercado global de biolubrificantes foi avaliado em US\$ 2,92 bilhões em 2021. Além disto, esse mercado deve crescer de US\$ 3,08 bilhões em 2022 para US\$ 4,26 bilhões até 2029. No Brasil, mesmo não possuindo uma regulamentação específica para este tipo de lubrificante, o mercado possui uma avaliação de US\$ 206 milhões e 98% do uso do produto é realizado pelo setor industrial (Portallubes, 2022b). A utilização desses materiais é uma alternativa para reduzir os problemas derivados dos lubrificantes minerais, como: poluição do solo e contaminação de corpos hídricos, sendo a principal vantagem a rápida biodegradabilidade (Diaz *et al.*, 2017).

Biodegradabilidade é a capacidade que um material possui de ser degradado por microrganismos. Um lubrificante pode ser classificado como biodegradável se seu percentual de degradação em testes padrões excede determinado nível. No geral, o percentual de biodegradabilidade é influenciado pelo óleo base dos lubrificantes e depende da composição química do composto. De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), um lubrificante biodegradável é definido como: “Produto que, submetido aos testes específicos sofre a biodegradação final maior ou igual a 60% em até vinte e oito dias.” A partir disso, é perceptível que os lubrificantes que provêm de óleos vegetais são os que melhor atendem aos requisitos de biodegradabilidade (90-98%) (Monteiro *et al.*, 2019; Mobarak *et al.*, 2014).

Esses óleos lubrificantes biodegradáveis podem ser divididos em duas categorias: os óleos naturais e os óleos sintéticos. Os naturais, também conhecidos como ésteres naturais ou triacilgliceróis (TAG), são representados pelos óleos vegetais ou microbianos (comestíveis ou não), gorduras animais, ácidos graxos livres (AGL) e óleos residuais. Já os sintéticos,

compreendem as polialfaolefinas, ésteres sintéticos, polialquilenoglicóis, silicões, entre outros (Karmakar *et al.*, 2017; Matos, 2022).

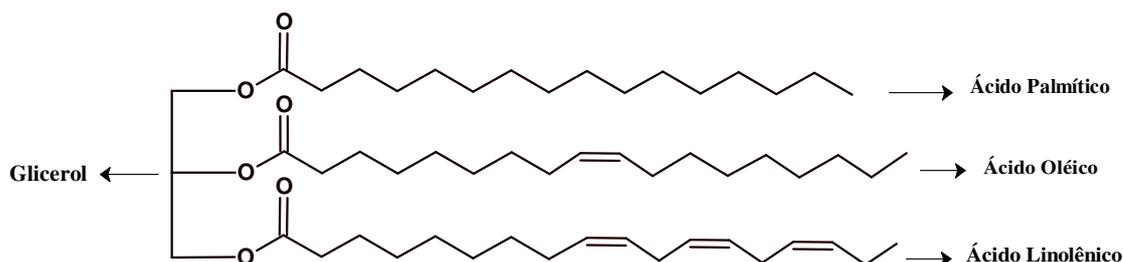
4.4 Óleos Vegetais

Os óleos e gorduras vegetais são derivados predominantemente de alguns frutos, sementes, nozes e grãos de cereais e, são usados com frequência na alimentação humana. Oriundos de plantas, estes estão conquistando cada vez mais seu espaço no mercado, pois como matéria-prima, carregam um grande potencial para substituição de óleos minerais. Segundo o USDA – *United States Department of Agriculture* (2021), cerca de 204 milhões de toneladas de óleo vegetal são produzidas por ano. De 2017 a 2020 a produção teve um aumento de 6%. O Brasil ocupa a sétima posição na produção de óleos vegetais, produzindo cerca de 9,85 milhões de toneladas anuais (Santos *et al.*, 2022).

As características de uma oleaginosa dependem muito da qualidade da matéria-prima e de todas as etapas envolvidas na sua obtenção. Com a resolução nº 481/2021 da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), a diferença entre óleos e gorduras está na forma física que apresentam à temperatura de 25°C. Os óleos são líquidos a 25°C, enquanto as gorduras são sólidas ou pastosas na mesma temperatura. As oleaginosas são caracterizadas pelo elevado teor de óleo, 35% em média. Além disso, por serem considerados bio bases, podem atuar em diversas aplicações tecnológicas. Ademais, características como disponibilidade, preço e originarem diretamente de fontes renováveis, tornam esses óleos um componente essencial para a química verde (Owuna *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2022).

A maioria das oleaginosas são constituídas principalmente por triglicerídeos (95-98%) e uma mistura complexa de outros componentes (2-5%). Quimicamente, esses triglicerídeos são ésteres. Esses ésteres possuem em sua estrutura, moléculas de glicerol unidas pelo grupo hidroxila que, por sua vez, estão interligadas a três grandes cadeias de diferentes moléculas de ácidos graxos, por meio de uma ligação de éster (Quinchia *et al.*, 2010; Reda; Carneiro, 2007; Matos, 2022), conforme mostra a Figura 2. Já os constituintes minoritários dessas bio bases, são frequentemente chamados de não glicerídeos, que em sua composição contém fosfatídeos (lecitinas, cefalinas, fosfatidil inositol); esteróis (estigmasterol); ceras (palmitato de cetila); hidrocarbonetos insolúveis (esqualeno); carotenóides; clorofila; tocoferóis (vitamina E); lactonas e metilcetonas (Reda; Carneiro, 2007).

Figura 2 - Estrutura química de um triglicerídeo.



Fonte: autoria própria (2024).

Esses tri-ésteres são constituídos por três moléculas de ácidos graxos, ressaltando assim, a importância deste em sua constituição. Quando três ácidos graxos iguais compõem o triacilglicerol, a substância é chamada triacilglicerol simples. Entretanto, há triacilglicerídeos compostos por ácidos graxos diferentes, contendo dois ou três componentes, tornando estes mais comuns que os triacilgliceróis simples. Portanto, nem todas as moléculas de triacilglicerol de uma única fonte são necessariamente idênticas, existem substâncias que são misturas de diferentes triacilgliceróis, como o azeite (Reda; Carneiro, 2007; Castro, 2014; Carvalho, 2017). A tabela 1, mostra os principais ácidos graxos presentes em óleos vegetais.

Tabela 1 – Composição dos principais ácidos graxos presentes em óleos vegetais.

Óleo vegetal	Palmítico (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	Estearico (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	Oléico (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	Linoléico (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	Linolênico (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)
Soja	5%	5%	27%	49%	10%
Girassol	7%	8%	35%	46%	0%

Fonte: Adaptado de Matos, 2018.

Os ácidos graxos (AcGs) diferem entre si no comprimento da cadeia de carbono e no número de ligações duplas. Geralmente, essas cadeias carbônicas podem não conter nenhuma, uma (cadeia insaturada), duas ou mais insaturações (cadeias poli-insaturadas). Fora isso, o tamanho da cadeia pode variar entre 6-22 átomos de carbono. O ácido graxo comumente encontrado na maioria dos óleos vegetais é o ácido oléico, com dezoito carbonos e uma ligação dupla (Badolato *et al.*, 1992; Reda; Carneiro, 2007; Salih *et al.*, 2011; Mannekote *et al.*, 2018).

O mercado de aplicação desses óleos depende de suas características físicas e de sua composição química. Essas bases vegetais, por meio dos triglicerídeos, tendem a ser mais polares que os óleos minerais e, por isso, possuem uma maior atração pela superfície metálica, acarretando a diminuição do atrito, que por consequência aumenta a vida útil do equipamento

(Santos *et al.*, 2020). Outro fator a ser considerado, é o potencial biodegradável dessas bio bases, tendo em vista, testes realizados diversas vezes que indicam que os óleos vegetais sofrem uma biodegradação superior a 60% num período de 28 dias (Aluyor *et al.*, 2009). Além dessas vantagens, esses óleos podem ser reestruturados por modificações químicas, comparando-se a hidrocarbonetos de cadeia longa, que se fazem presentes em óleos derivados do petróleo. Desse modo, vantagens como menor toxicidade, alta biodegradabilidade, elevada lubricidade, menores perdas evaporativas, além de um excelente ponto de inflamação, tornam os óleos de origem vegetal uma matéria-prima viável na produção de lubrificantes, que provoquem menos danos ao meio ambiente (Koh *et al.*, 2014; Mobarak *et al.*, 2014; Aravind *et al.*, 2015; Rios, 2020).

Atualmente, existem diversos tipos de óleos no mercado, extraídos de variadas plantas. Por sua vez, o Brasil possui muitas espécies nativas e exóticas que produzem óleo em frutos e grãos, com diferentes potencialidades e adaptações naturais a distintas condições de clima e solo do País. Dentre as oleaginosas cultivadas, a soja é a que mais se destaca como a principal candidata a fonte de matéria-prima oleaginosa para a produção de biolubrificantes. Entretanto, por mais que esta, em curto prazo, seja a principal candidata a fonte de matéria-prima renovável para a produzir lubrificantes ecológicos, e considerando ainda que atualmente esta é a principal fonte na produção de biodiesel, é importante ressaltar, que não é estratégico para o país depender de uma única fonte de matéria-prima apenas, até porque ambos os setores industriais (alimentício e combustíveis) concorrerem entre si por esta fonte. Portanto, evidencia-se a necessidade de busca e desenvolvimento contínuo de outras oleaginosas que possuam maior adensamento energético e atendam a critérios relacionados à diversificação e a regionalização (EMBRAPA, 2015; EMBRAPA, 2021; CONAB, 2023).

4.5 Milho

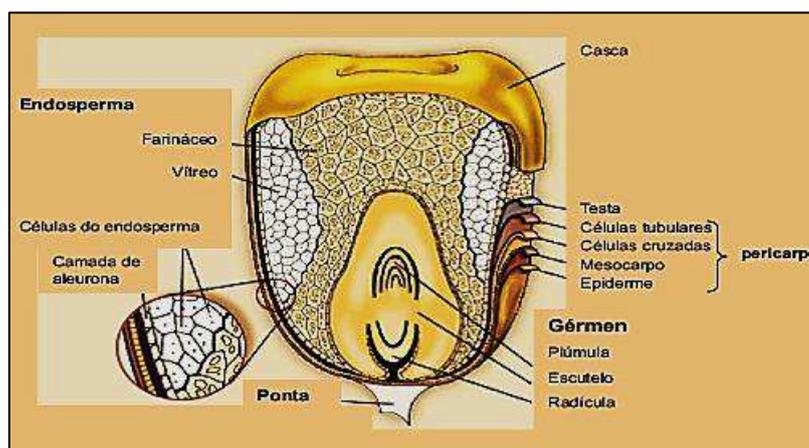
Comercializado como *commodity* agrícola em larga escala mundial, o grão de milho se consolida como o cereal mais plantado no mundo, desempenhando um papel estratégico na produção agrícola brasileira. Cultivado em todas as regiões do Brasil, este classifica-se como a segunda cultura mais cultivada no país, estando atrás apenas da soja (Coelho, 2021). Segundo dados do 12º levantamento do CONAB, a estimativa da produção agrícola brasileira de grãos de milho, alcançou na safra de 2022/2023 cerca de 131,9 milhões de toneladas de grãos, um

aumento de 16,6% se comparado a safra anterior de 2021/2022. Ademais, o Brasil exportou 56 milhões de toneladas de milho na safra 2022/2023, tornando-se o maior exportador desse grão no mundo, título que pertencia aos EUA até 2022 (CONAB, 2023).

Mesmo não sendo considerado uma espécie oleaginosa devido seu baixo teor de lipídeos, o milho se destaca nessa categoria por ser fonte de óleo e por sua importância no mercado dos óleos vegetais. Esse cereal altamente versátil, é considerado fonte de carboidratos (60% a 80%) e proteínas, e utilizado largamente no consumo humano, mas, principalmente, no animal (rações), além de ser base de produção de elementos espessantes, etanol, óleos, entre outros (Regitano-d'Arce; Vieira, 2015; Santos *et al.*, 2022).

O milho (espécie *Zea mays L.*) é uma planta que pertence à família das gramíneas, sendo provavelmente originário das Américas, mas especificamente da área central do México. Existem cerca de 150 espécies diferentes, variando entre tons de amarelo e branco, embora algumas variedades possam ser pretas ou vermelhas. Além disso, o peso médio do seu grão gira entorno de 250 a 300 mg. Este cereal é formado de aproximadamente 73% de amido, 10% de proteína, 5% de óleo e os 12% restantes, composto por fibra, vitaminas e minerais (Regitano-d'Arce; Vieira, 2015; Marinho, 2017; Serna-Saldivar, 2019; Bernardes, 2023). Sua estrutura básica é constituída pelo endosperma, o pericarpo e o gérmen, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Estrutura anatômica do grão de milho.



Fonte: Paes (2006).

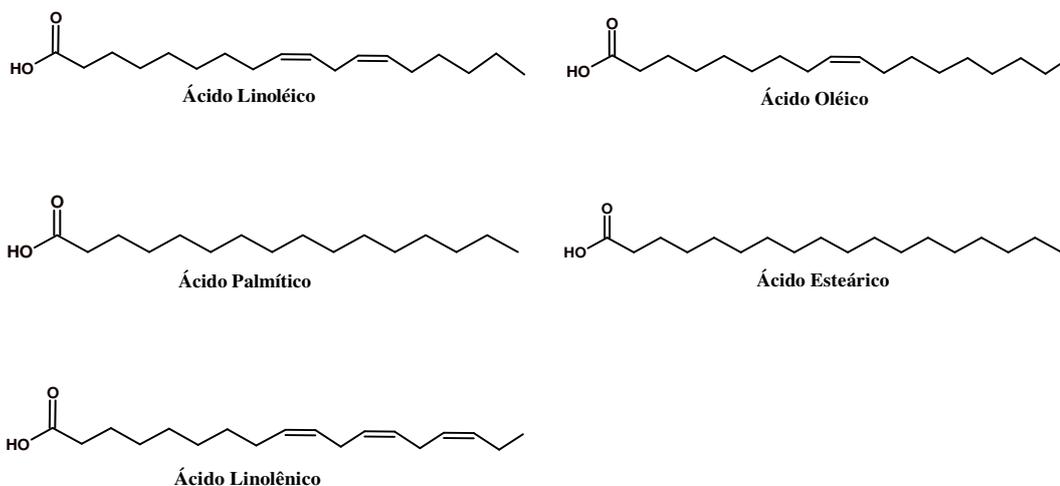
O endosperma corresponde à maior porção do grão, possuindo em sua composição basicamente amido, glúten e uma pequena porcentagem de gordura e outros componentes. O pericarpo é a camada mais externa, composta principalmente de celulose e hemicelulose e, por fim, o gérmen, compondo a parte vegetativa e fonte de óleo do milho (cerca de 82,6% do óleo

presente no grão), contendo também a informação genética para a propagação da planta de milho (Marinho, 2017; Serna-Saldivar, 2019; Bernardes, 2023).

O gérmen de milho é a parte do grão com elevada quantidade de óleo em sua composição e, conseqüentemente, a matéria-prima de todo o óleo de milho produzido e comercializado, o que justifica a denominação mais precisa e comumente utilizada de “óleo de gérmen de milho”. Para sua extração, é necessário processos industriais como pressão mecânica, extrusão ou uso de solventes orgânicos (Regitano-d’Arce; Vieira, 2015; Serna-Saldivar, 2019; Veronezi *et al.*, 2022; Bernardes, 2023).

O óleo de milho possui cor amarelo claro, odor e sabor suave característico. Apresentando uma composição química distinta de outros óleos vegetais, sendo considerado um óleo de alta qualidade, consistindo em triglicerídeos que apresentam ácidos graxos como linoléico (59,6%), oléico (25,4%), palmítico (10,9%), esteárico (2%) e linolênico (1,2%) (EMBRAPA, 2004; Regitano-d’Arce; Vieira, 2015), conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura química dos ácidos graxos que compõe o óleo de milho.



Fonte: autoria própria (2024).

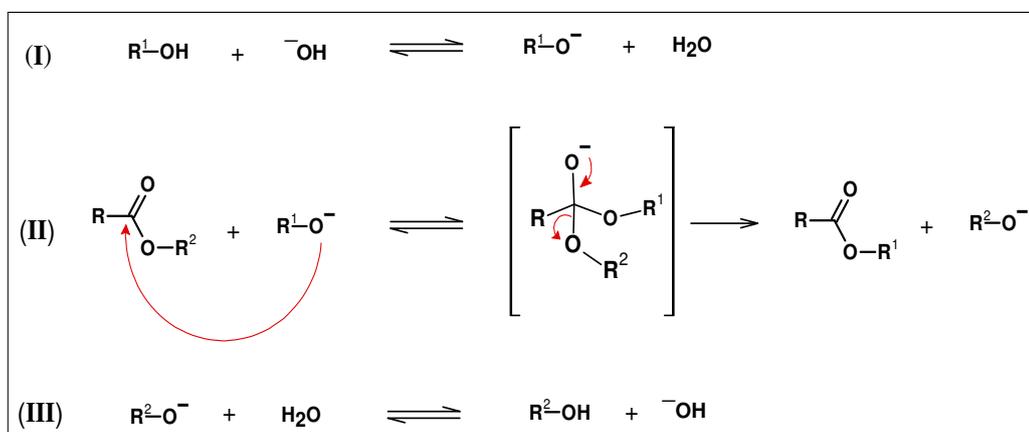
Contudo, o óleo de milho assim como outros óleos de base vegetal, apesar de sua eficiente capacidade de lubrificação e da alta biodegradabilidade, apresentam certas desvantagens, como por exemplo, sua instabilidade termo-oxidativa e hidrolítica, sua alta viscosidade e sua baixa compatibilidade com tintas e selantes (Ibrahim; Ashikin, 2013; Mobarak *et al.*, 2014; Sterpu *et al.*, 2016). Dessa maneira, tem-se que a utilização direta desses óleos não modificados como lubrificantes não é apropriado. Para serem viáveis a esse propósito, eles devem ser primeiramente modificados quimicamente (Karmakar *et al.*, 2017; Matos, 2022).

4.6 Reações Químicas para Produção de Biolubrificantes

Para modificação química e estrutural de óleos vegetais, uma variedade de reações químicas pode ser empregada, com a finalidade de obtenção de melhorias nas propriedades físico-químicas dos biolubrificantes. As rotas utilizadas para a modificação química dos óleos vegetais, são: transesterificação, hidrólise, formação de estolidas, epoxidação, abertura do anel e acetilação. Entre os processos de modificação química dos óleos vegetais, destaca-se a transesterificação e a epoxidação (Karmakar *et al.*, 2017; Owuna *et al.*, 2020; Rios, 2020).

A reação de transesterificação é amplamente utilizada para produzir lubrificantes biodegradáveis, pois permite um bom desempenho dos óleos vegetais como combustíveis, conferindo características similares ao óleo diesel obtido do petróleo. Por apresentar alto rendimento, esta reação pode ser realizada em meio ácido ou em meio básico (Bolina, 2020). Utilizada tanto para quebrar o triglicerídeo em ésteres metílicos/etílicos ou para aumentar a cadeia de ésteres metílicos/etílicos a partir da reação com álcoois de cadeias maiores. Preferencialmente, os álcoois que são utilizados para transesterificar um éster são os que possuem baixa massa molar, por exemplo, metanol, etanol, propanol e butanol (Owuna *et al.*, 2020; Ijaz Malik *et al.*, 2023). A Figura 5, demonstra a proposta mecanística dessa reação em meio básico, onde é possível observar, inicialmente, a formação do alcóxido, seguido dos ataques nucleofílicos do mesmo nas carbonilas dos acilglicerídeos, formando intermediários tetraédricos. E, por fim, a formação de um éster e outro alcóxido, o qual, após a desprotonação do ácido conjugado da base, formado na reação (I), regenera a base de partida (Meneghetti *et al.*, 2013).

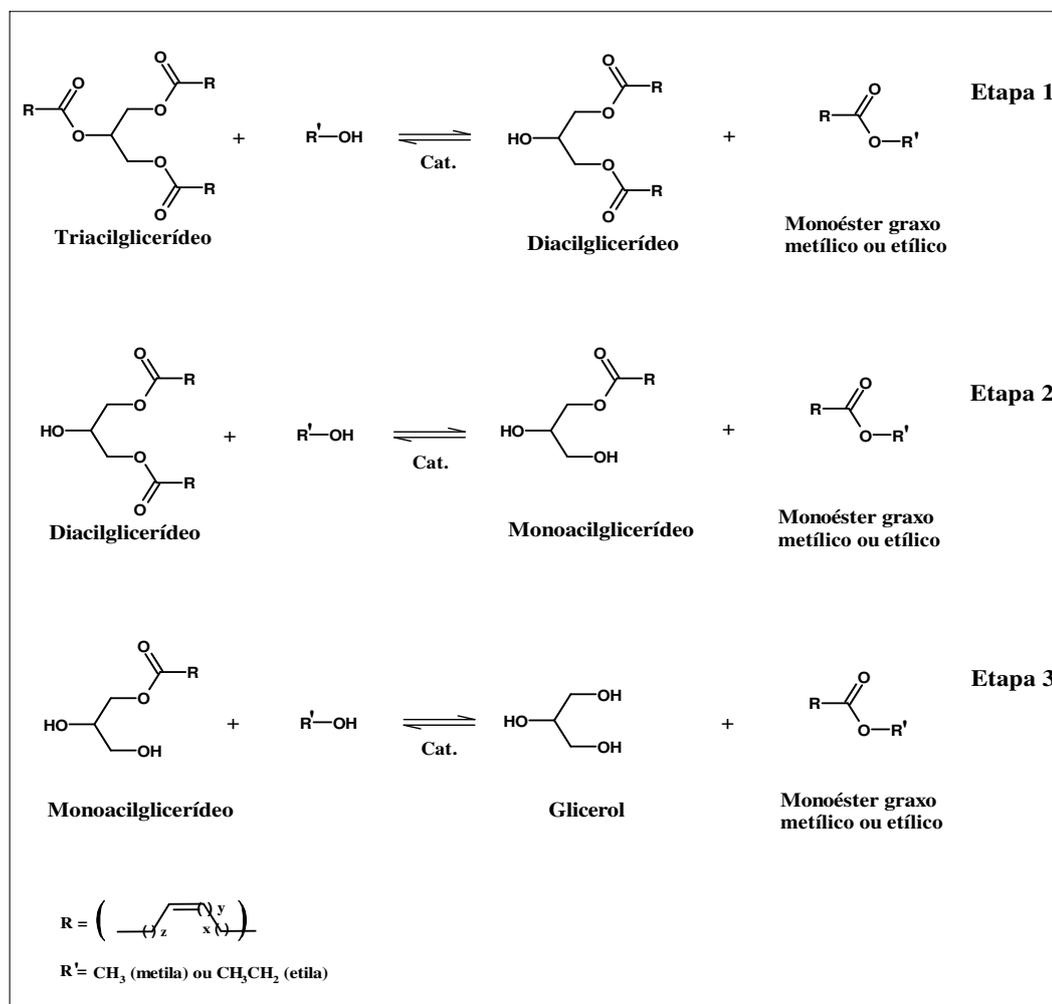
Figura 5 - Proposta mecanística da reação de transesterificação de triglicerídeos, utilizando uma base de Brønsted.



Fonte: adaptado de Meneghetti *et al.*, 2013.

Segundo Meneghetti *et al.*, (2013), esta reação ocorre em uma série de reações consecutivas (Figura 6), formando compostos intermediários (diacilglicerídeos e monoacilglicerídeos), considerando como a fase mais lenta, a conversão do monoacilglicerídeo.

Figura 6 - Etapas reacionais envolvidas na transesterificação de triacilglicerídeos.



Fonte: adaptado de Meneghetti *et al.*, 2013.

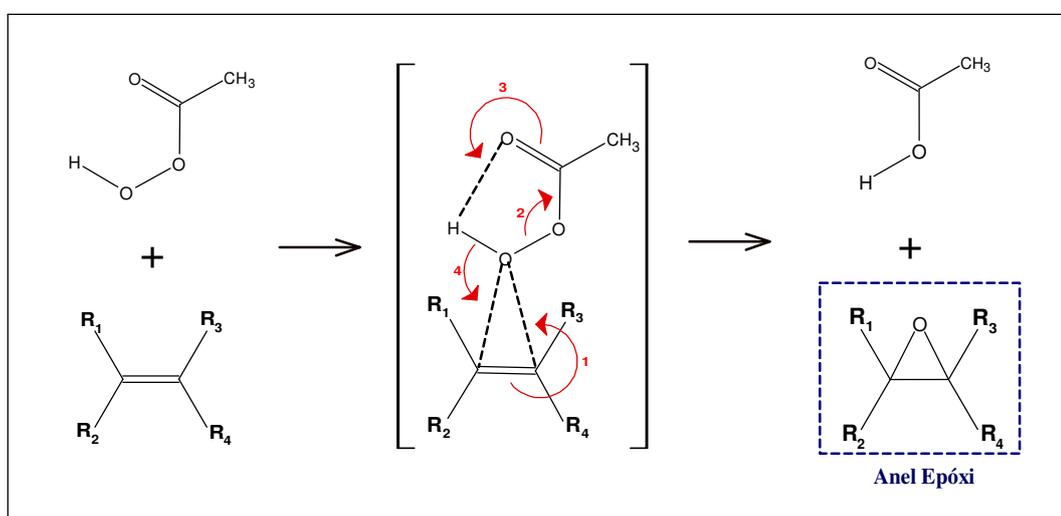
Por meio da transesterificação, os produtos produzidos por esta, apresentam melhor estabilidade oxidativa e menores pontos de fluidez. O índice de viscosidade, bem como o ponto de fulgor e combustão são mantidos elevados nos produtos dessas reações (Santos, 2011).

A epoxidação é uma das reações mais usadas na modificação de óleos vegetais para produção de biolubrificantes. As matérias graxas podem ser epoxidadas na forma de ésteres (principalmente ésteres metílicos), ácidos graxos ou triglicerídeos, formando epóxidos. A epoxidação consiste na reação de um composto insaturado com um perácido. Dependendo da força do ácido, o anel oxirânico pode ser aberto, tendo em vista, que o epóxido é mais reativo

que os ésteres por conta da tensão do anel (Wu *et al.*, 2000; Owuna *et al.*, 2020; Bolina, 2020; Ijaz Malik *et al.*, 2023).

As substâncias químicas responsáveis pela inserção do oxigênio numa ligação dupla carbono-carbono para originar um anel epóxi, são denominadas de reagentes epoxidantes. Dentre os reagentes mais utilizados, destacam-se o peróxido de hidrogênio que, em presença de um ácido carboxílico, se torna um perácido orgânico. Além do peróxido de hidrogênio, outros podem ser empregados no processo, como o ácido fórmico e peracético (Silva, 2019). A Figura 7, mostra a proposta mecanística dessa reação, utilizando o ácido peracético.

Figura 7 - Proposta mecanística da reação de epoxidação empregando o ácido peracético.



Fonte: adaptado de Lehen, 2011.

Esta reação, pode aumentar a viscosidade e melhorar as propriedades de baixa temperatura devido à natureza polar da estrutura, e diminuir o desgaste das peças quando estas são submetidas a ensaios tribológicos em tribômetro alternativo de alta frequência (Ijaz Malik *et al.*, 2023).

5 METODOLOGIA

5.1 Local da pesquisa

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Biocombustíveis e Química Ambiental (BIOAMBI) localizado no Centro de Educação e Saúde (CES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Cuité – PB.

5.2 Materiais

O óleo de milho foi adquirido no comércio local, na cidade de Cuité-PB. O óleo refinado não necessita de tratamento prévio antes das reações em que será submetido.

5.3 Procedimento de extração dos Biodieseis e dos Biolubrificantes

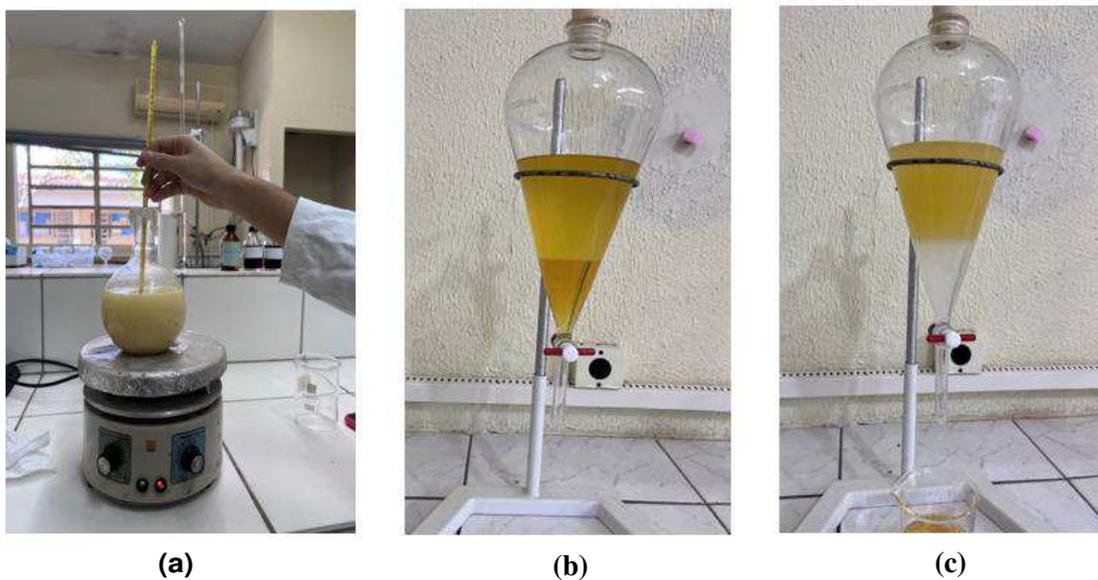
5.3.1 Transesterificação

Para obtenção dos ésteres metílicos e etílicos, inicialmente realizou-se um cálculo da massa molar do óleo de milho a partir do seu índice de saponificação. Com o conhecimento dessa massa foram calculadas as quantidades de álcool empregado na rota metílica e de catalisador (KOH) necessárias para a realização da reação. A reação de transesterificação foi realizada adotando-se uma razão molar óleo/álcool igual a 1:6 e 0,7% de catalisador (óleo/catalisador) (Pelanda, 2009), mantendo-se a temperatura em aproximadamente 45°C durante 1 hora, porque temperaturas superiores à temperatura de ebulição do álcool podem acelerar a saponificação dos glicerídeos pelo catalisador alcalino antes da completa alcoólise (Ferrari *et al.*, 2005). Para a rota etílica, utilizou-se o mesmo procedimento realizado com o metanol, descrito acima.

Após a reação de transesterificação, a mistura reacional foi transferida para um funil de separação permitindo a separação das fases: superior contendo o éster metílico e etílico e, inferior composta de glicerol, sabões, excesso de base e álcool. Após o tempo de espera, a fase inferior foi retirada e armazenada num recipiente próprio. Em seguida, realizou-se a lavagem do éster metílico e etílico (biodiesel) com água destilada e solução de ácido clorídrico 0,01 M. Foram realizadas três lavagens com água destilada (retirar da fase dos ésteres, resíduos de glicerol e sabões) e duas lavagens com solução de HCl 0,01 M (neutralizar os ésteres). Para

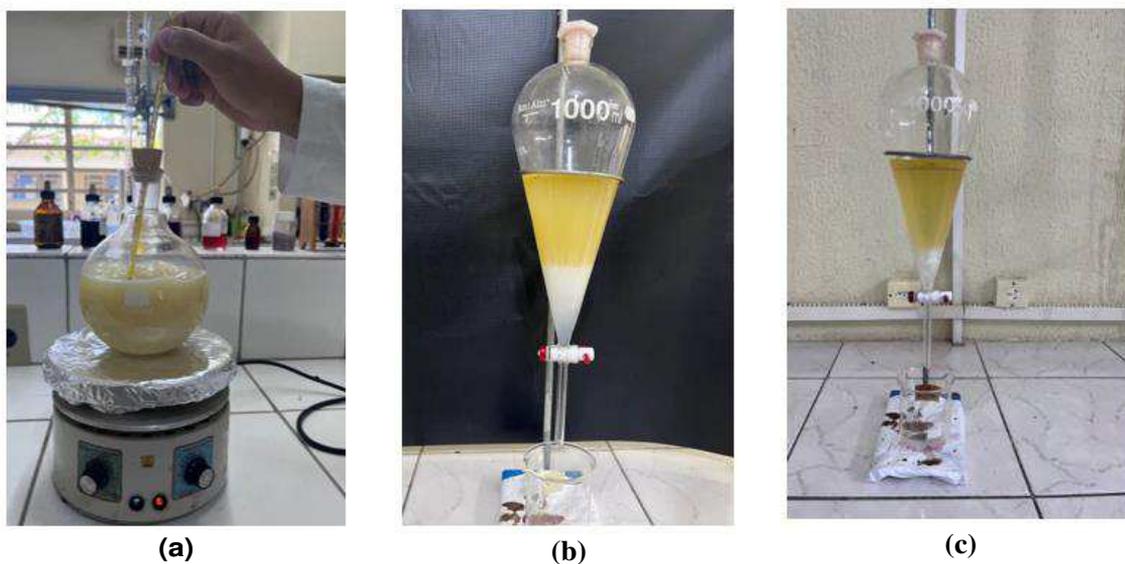
verificar a eficiência da lavagem ácida foi utilizada fenolftaleína. As Figuras 8 e 9, ilustram o processo de obtenção dos ésteres metílicos e etílicos.

Figura 8 - Processo de obtenção de ésteres metílicos do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 9 - Processo de obtenção de ésteres etílicos do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.



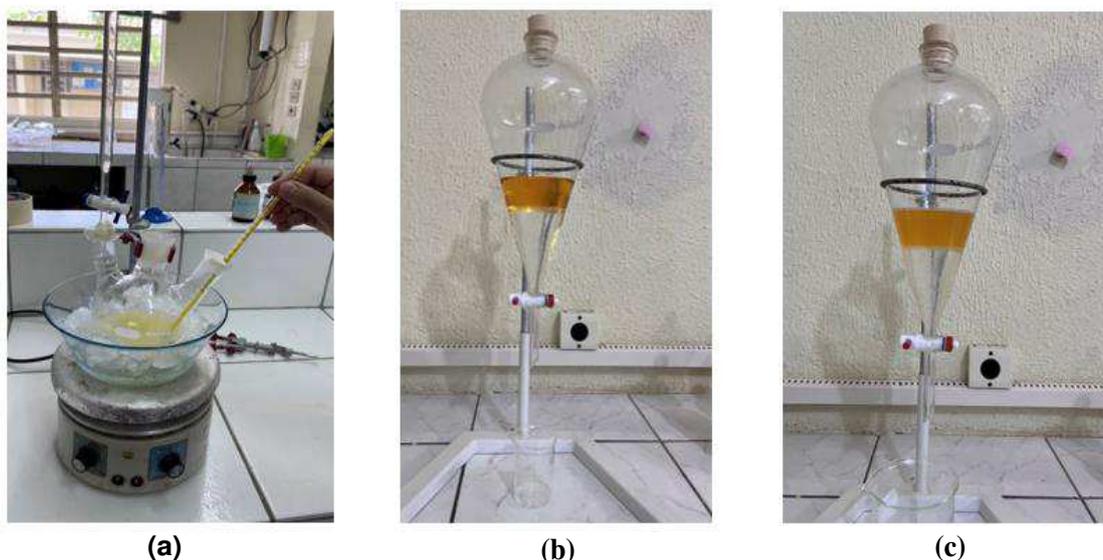
Fonte: dados da pesquisa, 2024.

5.3.2 Epoxidação

Num balão de fundo redondo de 250 mL, adicionou-se 100 g do éster metílico e etílico obtido do óleo de milho, e gota a gota, 140 mL de ácido peracético comercial 15%. A mistura ficou sobre agitação e aquecimento constante a 45°C por 1 hora. Como este procedimento é exotérmico, utilizou-se uma tigela com água e gelo, abaixo do balão de fundo redondo contendo a mistura reacional, com a finalidade de manter uma estabilidade da temperatura. A reação foi realizada utilizando a proporção molares de 1:1,1 éster/ácido peracético (Nunes *et al.*, 2008). Para a rota etílica, utilizou-se o mesmo procedimento realizado com o éster metílico, descrito acima.

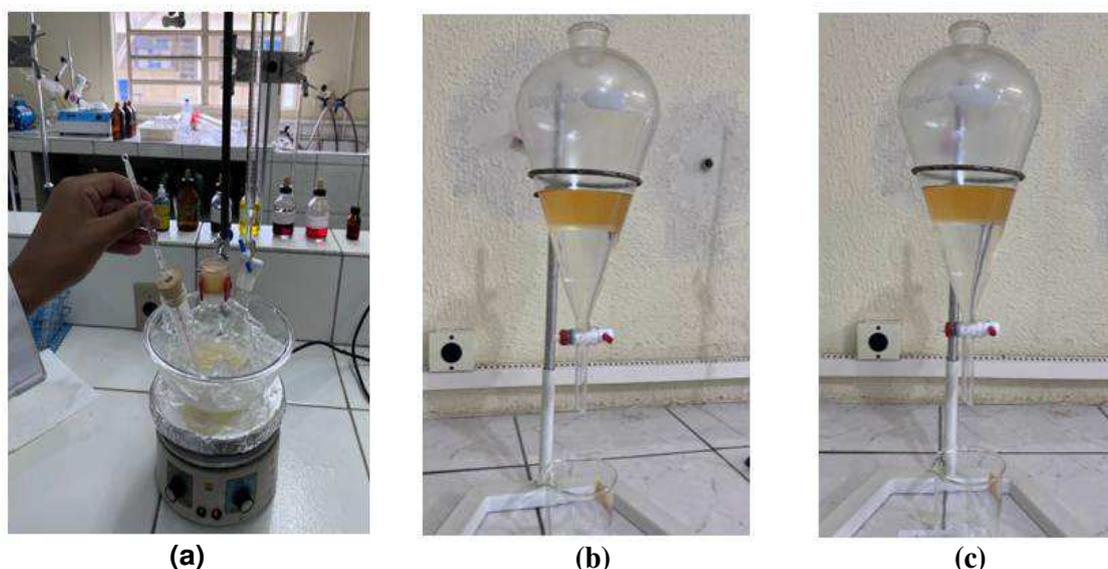
Após o término da reação, a mistura foi transferida para um funil de separação, onde se retirou-se a fase inferior, correspondente ao ácido acético, e a fase superior foi lavada duas vezes com 50 mL de bicarbonato de sódio 10% até o desprendimento total das bolhas devido à reação de neutralização. Com o processo de purificação completo, os epóxidos dos ésteres metílicos e etílicos do óleo de milho comercial foi armazenado em recipiente próprio (Nunes *et al.*, 2008). As Figuras 10 e 11, ilustram o processo de obtenção dos epóxidos metílicos e etílicos.

Figura 10 - Processo de obtenção de epóxido metílico a partir de ésteres do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 11 - Processo de obtenção de epóxido etílico a partir de ésteres do óleo de milho: (a) síntese; (b) decantação; (c) purificação.



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

5.4 Caracterização Físico-Química

O óleo de milho foi caracterizado mediante índice de acidez (AOCS Cd 3d-63), índice de iodo (AOCS Cd 1-25), índice de saponificação (AOCS Cd 3b-76), teor de sabão (AOCS Cc 17-95), índice de peróxido (AOCS Cd 8-53), densidade relativa, teor de cinzas, teor de umidade e voláteis (AOCS Da-2a-48) e viscosidade dinâmica. Os procedimentos adotados para caracterizar os ésteres metílicos e etílicos obtidos após a transesterificação, consistiu nos mesmos utilizados para caracterizar o óleo de milho. Os epóxidos de ésteres metílicos e etílicos de óleo de milho foram caracterizados por meio do índice de iodo (AOCS Cd 1-25), índice de peróxido (AOCS Cd 8-53), índice de hidroxila (AOCS Cd 13- 60) e oxigênio oxirano (AOCS D Cd 9-57), densidade relativa, teor de cinzas, viscosidade, teor de umidade e voláteis (AOCS Da-2a-48), índice de acidez (AOCS Cd 3d-63), índice de saponificação (AOCS Cd 3b-76) e teor de sabão (AOCS Cc 17-95). Todas as caracterizações realizadas, descritas anteriormente, basearam-se de acordo com as técnicas descritas por Wu *et al.*, (2000) e feitas em triplicatas.

5.4.1 Índice de Acidez (AOCS Cd3d-63)

Num erlenmeyer de 250 mL, foi pesado 10 g de amostra e adicionado 62 mL da mistura do solvente neutralizada (31 mL de tolueno + 31 mL de álcool isopropílico). Na sequência, a amostra foi dissolvida na mistura de solventes. Para facilitar esse processo, aqueceu-se um pouco a mistura. Depois, adicionou-se 2 a 3 gotas de indicador fenolftaleína e titulou-se com KOH 0,1 N até obter-se uma coloração rosa permanente durante 30 segundos. O mesmo procedimento fora repetido sem a presença de amostra para determinar o branco. O índice de acidez foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Índice de Acidez} = (A - B) \cdot N \cdot 56,1 / W$$

onde A: volume da solução de KOH 0,1 N utilizado na titulação da amostra (mL); B: volume da solução de KOH 0,1 N utilizado na titulação do branco (mL); N: normalidade da solução de KOH; W: massa da amostra (g).

5.4.2 Índice de Iodo (AOCS Cd 1-25)

Num erlenmeyer de 250 mL, pesou-se 0,25 g de amostra, depois adicionou-se 10 mL de clorofórmio e 25 mL de solução de Wijs (girando o erlenmeyer para manter maior contato com a amostra). Em seguida, o frasco foi armazenado num local escuro a temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 30 minutos. Após esse tempo, adicionou-se 10 mL de solução de iodeto de potássio 10%, 100 mL de água destilada e titulou-se com solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N, misturando vigorosamente. Quando a coloração marrom estava quase desaparecendo, adicionou-se 1 mL de solução indicadora de amido e titulando-se até o desaparecimento da coloração escura. O mesmo procedimento foi repetido sem a presença de amostra para determinar o branco. O índice de iodo foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Índice de Iodo} = 12,6 \cdot N \cdot (A - B) / W$$

onde: N: normalidade da solução de tiossulfato de sódio; A: volume da solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N utilizado na titulação do branco (mL); B: volume da solução de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N utilizado na titulação da amostra (mL); W: massa da amostra (g).

5.4.3 Teor de Sabão (AOCS Cc 17-95)

Num erlenmeyer de 250 mL, pesou-se 10 g de amostra, adicionando-se 0,25 mL de água deionizada, agitando vigorosamente. Em seguida, uma solução contendo 0,1 g do indicador bromofenol e 50 mL de acetona neutralizada foi preparada. Na sequência, foram adicionados no erlenmeyer contendo a amostra, 50 mL dessa solução recém preparada, pois na existência de sabão, ocorreria uma separação de fases e a camada superior teria uma coloração verde azulada. Então, titulou-se a mistura com uma solução de ácido clorídrico 0,01 N padronizada até a viragem da coloração verde azulada para o amarelo. O mesmo procedimento foi repetido sem a presença de amostra para determinar o branco. O teor de sabão foi calculado por meio da equação:

$$\text{Teor de Sabão} = (A - B) \cdot N \cdot 304,4 / W$$

onde: A: volume da solução de HCl usado na titulação da amostra (mL); B: volume da solução de HCl usado na titulação do branco (mL); N: normalidade da solução de HCl; W: massa da amostra (g).

5.4.4 Índice de Saponificação (AOCS Cd 3b-76)

Num erlenmeyer de 250 mL foram pesados 1,0 g da amostra e adicionou-se 25 mL de potassa alcoólica. Esse erlenmeyer foi conectado a um condensador de bolas e o conjunto foi aquecido suavemente durante 1 hora para que a amostra fosse completamente saponificada. Em seguida, foi adicionado ao erlenmeyer algumas gotas de fenolftaleína, titulando-se com solução de HCl 0,5 M até o desaparecimento da coloração rosa. O mesmo procedimento fora repetido sem a presença de amostra para determinar o branco. O índice de saponificação foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Índice de Saponificação} = (B - A) \cdot N \cdot 56,1 / W$$

onde: A: volume da solução de HCl 0,5 M utilizado na titulação da amostra (mL); B: volume da solução de HCl 0,5 M utilizado na titulação do branco (mL); N: normalidade da solução de HCl; W: massa da amostra (g). A partir do índice de saponificação, pode-se calcular a massa molar do óleo:

1 mol de triglicerídeo (óleo) + 3 KOH → 3 sabões + 1 glicerol

X—————3·(56,1 g·mol⁻¹)

1 g—————Índice de Saponificação

5.4.5 Índice de Peróxido (AOCS Cd 8-53)

Num erlenmeyer com tampa esmerilhada de 250 mL foram pesados 3 g da amostra, adicionando-se 30 mL de solução ácido acético:clorofórmio 3:2 (v/v), e misturados com leve agitação. Adicionou-se 0,5 mL de solução de KI 10% e deixou-se em repouso por 1 minuto. Adicionou-se 30 mL de água destilada e 0,5 mL de solução de amido 1%. Titulando com solução de tiosulfato de sódio 0,01 N com agitação constante até a cor azul desaparecer. O índice de peróxido foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Índice de Peróxido} = (A - B) \cdot N / W$$

onde: A: volume do tiosulfato utilizado na titulação da amostra (mL); B: volume do tiosulfato utilizado na titulação do branco (mL); N: normalidade da solução de Na₂S₂O₃; W: massa da amostra (g).

5.4.6 Densidade Relativa

Num picnômetro de 5mL previamente pesado, foi adicionado aproximadamente 5 mL de água destilada e pesou-se. Em seguida, adicionando-se aproximadamente 5 mL da amostra e pesou-se. O cálculo da densidade foi feito de acordo com a expressão:

$$d_x = m_x / m_{\text{água}}$$

onde: d_x: densidade relativa da amostra; m_x: massa da amostra (g); m_{água}: massa da água (g).

5.4.7 Teor de Cinzas

Com auxílio de uma estufa a 105°C ± 5°C, a cápsula de porcelana foi secada durante 1 hora. Após esse período, ela foi colocada no dessecador para esfriar. Então, na cápsula vazia e

pesada, adicionou-se aproximadamente 6 g de amostra. A placa com a amostra foi levada à mufla a $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 4 horas. Após esse período, colocou-se a mesma no dessecador para esfriar. Então, realizou-se a pesagem da cápsula com a amostra. O teor de cinzas foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\% \text{ Cinzas} = [(C - B) / A] \cdot 100$$

onde: A = massa da amostra; B = cápsula de porcelana + amostra após mufla; C = cápsula de porcelana + amostra antes da mufla.

5.4.8 Teor de Umidade e Voláteis (AOCS Da-2a-48)

Com auxílio de uma estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, a placa de Petri foi secada durante 1 hora. Após esse período, colocou-se a mesma no dessecador para esfriar. Então, a placa vazia foi pesada, e nela adicionou-se aproximadamente 6 g de amostra. A placa com a amostra foi levada à estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 1 hora. Após esse período, ela foi colocada no dessecador para esfriar. Então, pesou-se a placa com a amostra. O teor de umidade e voláteis foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\% \text{ Umidade e Voláteis} = [(C - B) / A] \cdot 100$$

onde: A = massa da amostra; B = Placa + amostra após estufa; C = Placa + amostra antes da estufa.

5.4.9 Viscosidade Dinâmica

Para determinar a viscosidade utilizou-se um viscosímetro Quimis modelo Q860M26. Esse equipamento dispõe de cinco rotores distintos entre si em relação ao diâmetro, sendo que para o óleo de milho utilizou-se o rotor nº 2 e para os ésteres e epóxidos metílicos e etílicos, o rotor nº 1. A viscosidade foi determinada a 40°C . O aquecimento da amostra foi promovido por meio de uma chapa de aquecimento, a temperatura será medida por um sensor que acompanha o produto.

5.4.10 Índice de Hidroxila (AOCS Cd 13-60)

Para a determinação do Índice de Hidroxila, pesou-se em um balão de fundo redondo de 250 mL, 10 g da amostra do epóxido de éster metílico de óleo de milho, adicionando 5 mL do reagente piridina/anidrido acético (3/1 volume) e colocando-os em um balão num banho-maria por 1 hora sobre refluxo. Após o aquecimento, foram adicionados 10 mL de água por meio do condensador para o balão e aqueceu-se em banho-maria com tempo adicional de 10 minutos em refluxo. Utilizando 25 mL de álcool butílico para lavagem interna do condensador e os lados do balão. Por fim, foi adicionado 1 mL de solução indicadora de fenolftaleína e titulado com potassa alcoólica 0,5 M até a coloração rosa. O mesmo procedimento foi realizado sem a presença do epóxido para se obter o branco. Paralelamente ao experimento anterior, pesou-se 9 g do epóxido num erlenmeyer para a determinação da acidez. Adicionando 10 mL de piridina e 1 mL de solução indicadora de fenolftaleína. A mistura foi titulada com potassa alcoólica 0,5 M até a coloração ficar rosa. Os mesmos procedimentos foram adotados para a análise do epóxido de éster etílico.

O índice de hidroxila foi determinado pela seguinte expressão:

$$\text{Índice de Hidroxila} = [B + (W \cdot A/C) - S] \cdot N \cdot 56,1 / W$$

onde: A: volume da solução de KOH necessária para titulação de acidez, em mL; B: volume da solução de KOH necessária para titular o branco, em mL; C: massa da amostra usada para a titulação da acidez, em g; S: volume da solução de KOH necessária para titular a amostra acetilada, em mL; W: massa da amostra usada para acetilação, em g; N: normalidade ou molaridade da potassa alcoólica.

5.4.11 Oxigênio Oxirano (AOCS Cd 9-57)

Na determinação do oxigênio oxirano, pesou-se 0,3-05 g da amostra do epóxido em um erlenmeyer de 250 mL, e então, adicionou-se 10 mL de ácido acético glacial sob agitação até total dissolução. Em seguida, foi adicionado 5 gotas do indicador violeta cristal (solução 0,1% em ácido acético glacial) e o sistema foi agitado. Por fim, a mistura foi titulada com uma solução de ácido bromídrico 0,1 M até que a solução passasse para coloração azul esverdeada permanente por 30 segundos. O volume gasto na titulação foi anotado. O cálculo do oxigênio oxirano foi realizado de acordo com a expressão:

$$OO\% = 4,3. V. M/W$$

onde: OO%: porcentagem do teor de epóxido, %; V: volume gasto na titulação em mL; M: molaridade da solução de ácido bromédrico; W: massa da amostra de epóxido em g.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Transesterificação

O método tradicionalmente utilizado para a obtenção de ésteres (biodiesel), consiste na reação entre óleos vegetais e álcool, na presença de um catalisador. Essa reação é denominada de transesterificação, liberando ésteres dos ácidos graxos correspondentes e obtendo como subproduto a glicerina, através da quebra da molécula dos triglicerídeos.

O referido trabalho, sintetizou dois biodieseis, por meio do método de transesterificação. Os procedimentos, denominados rota A e rota B, utilizaram dois álcoois diferentes, o metanol e o etanol anidro, ambos na presença de um catalisador básico, o hidróxido de potássio (KOH), e tendo como matéria prima o óleo de milho comercial.

O procedimento de obtenção de ésteres da rota A, que teve o emprego do metanol no processo, obteve um rendimento de 96%. Já a rota B, do etanol anidro, alcançou um rendimento de 84%. Os resultados demonstram que a síntese de ésteres metílicos e etílicos foi eficaz e viável. Como bem pontua Freedman *et. al.*, (1986), A transesterificação por catálise básica é a rota mais empregada mundialmente na produção de biodiesel, visto que, essa permite melhores rendimentos e uma rápida cinética da reação.

Se compararmos os produtos obtidos na síntese, é possível perceber que o éster metílico possui um rendimento maior que o etílico. Essa relação, deve-se ao fato de que a transesterificação emprega melhor álcoois com baixo peso molecular, como o metanol que possui cadeia curta. Outro fator importante, é que o álcool metílico apresenta maior polaridade e reatividade, com uma ótima redução no teor de água, tempo e temperaturas de reação reduzidas. Ademais, a separação do éster metílico do glicerol por decantação possui maior facilidade frente ao éster etílico, que possui um grupo CH_2 adicional em sua molécula em comparação ao metanol, emulsificando a mistura biodiesel-glicerol, requerendo um número maior de etapas no processo de separação (Freedman *et al.*, 1986).

Vale ressaltar, que o etanol sem água, ajuda na diminuição da formação de sabões durante a reação. A água é um agente que pode causar reações paralelas de saponificação, reduzindo a eficiência do processo. Além disso, no Brasil, o etanol é renovável, obtido da cana-de-açúcar, apresentando menor toxicidade que o metanol, tornando-o mais vantajoso ambientalmente falando.

6.2 Epoxidação

Na obtenção de lubrificantes biodegradáveis do óleo de milho comercial, foi utilizado o método de epoxidação dos ésteres obtidos na transesterificação. Segundo Gregório *et al.*, (2000), a reação de epoxidação é a formação de um éter cíclico de três membros mediante a reação de perácidos com olefinas. Esse anel é chamado de anel oxirânico ou mais usualmente de epóxido.

O processo reacional de epoxidação dos biodieseis metílicos e etílicos oriundos do óleo de milho, utilizou como reagente epoxidante o ácido peracético 15%. Os rendimentos desse procedimento atestaram ótimos percentuais. A rota A, do biolubrificante metílico, alcançou um rendimento de 93%. Na rota B, o rendimento do etílico foi de 97%.

Se compararmos os percentuais de rendimento dos biolubrificantes mencionados, é possível perceber que o epóxido etílico alcançou índices maiores que o metílico. Esse fator, pode estar relacionado com o número de anéis epóxi produzidos durante a reação ou com a degradação desses, mediante a presença do ácido acético que é um subproduto dessa reação.

6.3 Caracterização Físico-Química

As análises físico-químicas permitem o conhecimento da composição da matéria-prima e do produto acabado, atestando se o produto está apto para ser aplicado ou não, de acordo com os padrões legais.

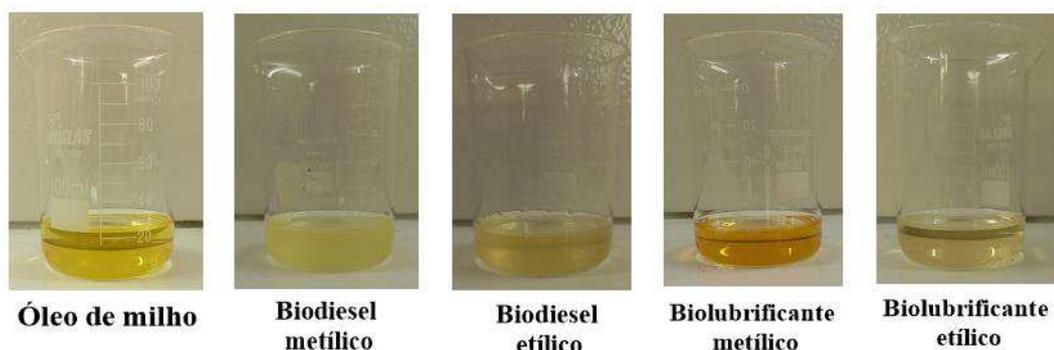
O óleo de milho comercial, bem como, os ésteres e epóxidos metílicos e etílicos, foram caracterizados após o processo de purificação, mediante suas propriedades físico-químicas. A maioria das análises foram baseadas nas normas da American Oil Chemists' Society (AOCS) e seus resultados comparados com os parâmetros legais legislados de cada produto. Vale pontuar, que a legislação não especifica parâmetros para os lubrificantes biodegradáveis.

Aspecto

O aspecto é um importante parâmetro que nos permite evidenciar preliminarmente se o produto obtido possui indícios de partículas sólidas visíveis, turbidez ou uma coloração estranha

indesejada. A Figura 12, representa os produtos dessa análise e a Tabela 2, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Figura 12 - Amostra dos produtos obtidos, que foram analisados.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2024.

Tabela 2 – Resultados da análise do aspecto referente aos produtos.

Produtos	Aspecto	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	Amarelo límpido	Límpido e isento de impurezas / ANVISA
Ésteres metílicos	Amarelo límpido	Límpido e isento de impurezas / ANP
Ésteres etílicos	Amarelo límpido	
Epóxido metílico	Amarelo alaranjado límpido	Nada consta
Epóxido etílico	Amarelo límpido	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Se analisar os dados descritos na tabela acima, referente ao aspecto da matéria-prima e dos biodieseis, podemos constatar que estes estão em conformidade com os padrões especificados por órgãos competentes, encontrando-se límpidos e com coloração característica, sem turbidez ou sedimentos.

Para os biolubrificantes, a legislação não informa nenhum padrão específico para esta análise. Contudo, os produtos obtidos da epoxidação, obtiveram coloração característica e limpidez. Ainda, se comparados com o óleo de milho e os ésteres, estes possuem tonalidades iguais ou semelhantes ao amarelo, estando livres de partículas sólidas visíveis, evidenciando ser um produto desejável.

Umidade e voláteis

A análise de umidade e voláteis, determina o teor de água que se faz presente na amostra, propiciando a formação de sabão (Marchetti, 2005). A Tabela 3, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 3 – Resultados da análise da umidade e voláteis referente aos produtos.

Produtos	Umidade e Voláteis (%)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,034	≤ 0,1 / ANVISA
Ésteres metílicos	0,307	0,02 / ANP
Ésteres etílicos	0,07	
Epóxido metílico	3,5	Nada consta
Epóxido etílico	1,0	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

De acordo com os resultados obtidos, listados acima, podemos constatar que o percentual de umidade e voláteis presentes no óleo de milho foi satisfatório, encontrando-se abaixo do estabelecido pela ANVISA. Esse fator é muito importante, pois a água presente na amostra pode desfavorecer a reação de transesterificação.

Para os ésteres metílicos e etílicos, podemos identificar que os valores referentes a análise, estão acima do especificado pela ANP, indicando que os processos de lavagem, deixaram resquícios de água e álcool nos produtos obtidos. Como bem pontua Costa (2017), de acordo com a eficiência do processo, a glicerina livre, álcool residual, resíduos de catalisadores, sabões, água e glicerídeos que não reagiram podem estar contidos no biodiesel. Além disso, o elevado teor de umidade e voláteis desses ésteres, pode contribuir para o aumento significativo do seu índice de saponificação.

Os epóxidos obtiveram percentuais superiores aos dos biodieseis e da matéria-prima, comprovando que o processo de purificação dos biolubrificantes não foi suficiente para remover a umidade presente nos produtos, contribuindo para o aumento desse parâmetro. Ademais, os epóxidos metílicos (3,5%) e etílicos (1,0%), encontram-se elevados se comparados com o trabalho de Santos (2011), que alcançou um teor de 0,1%.

A determinação do teor de umidade e voláteis em amostras de lubrificantes é de suma importância, pois o elevado teor de água pode ser prejudicial ao bom desempenho do mesmo. Conseqüentemente, diante dessa análise, espera-se que os biolubrificantes apresentem uma menor estabilidade oxidativa e um elevado índice de acidez e de saponificação (Starling, 2016).

Teor de cinzas

O teor de cinzas indica a quantidade de material inorgânico presente em uma amostra depois que toda a matéria orgânica é queimada. A Tabela 4, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 4 - Resultados da análise do teor de cinzas referente aos produtos.

Produtos	Cinzas (%)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,029	--- / ANVISA
Ésteres metílicos	0,02	0,02 / ANP
Ésteres etílicos	0,04	
Epóxido metílico	0,028	Nada consta
Epóxido etílico	0,09	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Com base nos dados acima, podemos observar que o teor de cinzas presente no óleo de milho foi baixo (0,029%), entretanto a ANVISA não especifica um valor mínimo para essa propriedade. Medeiros *et al.*, (2020), evidencia para esse parâmetro, analisando o óleo de coco extravirgem, um teor de 0,42%, mostrando ser superior ao encontrado nesse trabalho. Estudos mostram que quanto menor for o percentual de resíduos por incineração em óleos comestíveis comerciais, melhor será o produto, pois haverá menos impurezas presentes, especialmente quando se trata de produção de biodiesel e outros usos industriais.

No caso dos ésteres metílicos, estes apresentaram um teor de matéria inorgânica satisfatório, estando dentro do legislado pela ANP, porém, os ésteres etílicos demonstraram um aumento nesse teor, pontuando que há existência de impurezas presentes. Essas impurezas

presentes no biodiesel etílico, podem estar relacionadas com os resquícios do catalisador e dos processos de lavagem, que não foram completamente removidos do produto, por exemplo.

O biolubrificante metílico, obteve um percentual desejável, dentro da base de valores encontrados nessa análise para a matéria-prima e para o biodiesel de mesma rota, destacando a baixa concentração de minerais envolvidos. Já o biolubrificante etílico, resultou em um teor mais alto que os produtos anteriores analisados, pontuando que os processos de lavagem e decantação não foram suficientes para a remoção total do material inorgânico existente no bioproduto. Diante dos resultados obtidos por Macedo *et al.*, (2021) para os epóxidos de óleo residual (0,55%), podemos observar que os analisados nesse trabalho, encontram-se baixos. Para Cecchi (2003), os resíduos por incineração podem ser fragmentos de carbono, metais ou minerais provenientes do processo de combustão do material orgânico, mas não formam carvão.

Segundo Hansted (2016), esse teor não altera somente o potencial energético, mas influencia nos custos de produção. Altos valores desse parâmetro, podem reduzir a vida útil dos equipamentos e provocar corrosões.

Densidade

Em termos gerais, a densidade é expressa em gramas por centímetro cúbico, em uma relação de massa/volume, sendo útil na caracterização de substâncias e ao expressar a concentração de soluções (Moretto; Fett, 1998). A Tabela 5, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 5 - Resultados da análise da densidade referente aos produtos.

Produtos	Densidade (g/cm³)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,916	0,915 - 0,925 / ANVISA
Ésteres metílicos	0,859	0,850-0,900 / ANP
Ésteres etílicos	0,935	
Epóxido metílico	0,882	Nada consta
Epóxido etílico	0,959	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Diante dos dados analisados, o óleo de milho alcançou 0,916 g/cm³, destacando sua conformidade com o estabelecido pelo órgão supervisor. Este parâmetro está ligado, principalmente, com a massa das moléculas, sendo utilizado na identificação e no controle de qualidade de um produto, seu alto valor pode indicar restrições na utilização de determinados materiais como matéria-prima para a produção de biodiesel (Oliveira, *et al.*, 2012).

Os valores encontrados nesta análise para os ésteres, indica que o biodiesel com metanol está dentro do especificado na legislação. Já o biodiesel com etanol, demonstrou um aumento se comparado com o metílico, a matéria-prima e o estabelecido pela ANP. Esse fator pode estar relacionado à estrutura molecular dos alquil ésteres originados durante o processo reacional. Quanto maior for o comprimento da cadeia carbônica do alquil éster, maior tenderá ser a densidade deste. As impurezas presentes também influenciam para o aumento dessa propriedade.

Os epóxidos obtiveram índices altos, quando comparados com seus próprios ésteres que foram epoxidados. A principal razão para este aumento, deve-se ao fato da inserção do grupo epóxi na molécula, fornecendo assim, um grupamento polar. Caracterizando-se como um anel que possui em sua estrutura um átomo de oxigênio, capaz de aumentar as interações intermoleculares do tipo dipolo-dipolo, influenciando na razão massa/volume, inicialmente encontradas nas moléculas de ésteres. Essa propriedade fluidodinâmica influencia na viscosidade, na estabilidade e na toxicidade dos óleos (Rios, 2021).

Índice de acidez

Esse índice, evidencia o número de miligramas de hidróxido de potássio necessário para neutralizar 1 grama da amostra de ácidos livres. É utilizado para analisar óleos e vários produtos oriundos destes. A Tabela 6, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 6 - Resultados da análise do índice de acidez referente aos produtos.

Produtos	Índice de acidez (mg KOH/g óleo)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,220	≤ 0,6 / ANVISA

Ésteres metílicos	0,11	≤ 0,5 / ANP
Ésteres etílicos	0,47	
Epóxido metílico	1,497	Nada consta
Epóxido etílico	1,982	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

O óleo de milho apresentou resultados satisfatórios para essa análise, encontrando-se abaixo do padrão legislado pela ANVISA. Essa característica permite a verificação do estado de conservação do óleo, estando relacionado com a pureza, natureza, qualidade, tipo de processamento e condições de conservação (Costa *et. al.*, 2006 *apud* Pelanda, 2009). O material graxo com acidez inferior ou igual a 1 mg KOH/g pode ser usado para a produzir biodiesel sem necessidade de etapas de neutralização (Grangeiro *et al.*, 2016).

Os valores encontrados para os biodieseis comprovam sua conformidade com o órgão legislador, estando abaixo do estabelecido, indicando o bom estado de conservação da matéria-prima. Dentro desse viés, é válido ressaltar, que uma acidez elevada, além de dificultar a produção de biodiesel por meio dos processos de saponificação, afeta também, quando aplicado, a corrosão do motor ou deterioração do biocombustível.

As amostras epoxidadas, obtiveram índices elevados, quando comparados com os demais produtos analisados acima. Com base em outros estudos, o epóxido metílico obteve valor baixo quando relacionado ao trabalho de Farias (2023), que destacou um índice de 1,872 mg KOH/g óleo para o óleo de pinhão-manso, em contrapartida, o epóxido etílico se manteve próximo desse valor. Esse aumento pode estar relacionado com o teor de água ou ácidos graxos livres presente no biolubrificante, conferindo um caráter mais ácido ao epóxido. Um lubrificante com elevada acidez pode ocasionar desgaste corrosivo das superfícies metálicas na qual o produto será destinado (Starling, 2016).

Índice de iodo

Esse índice mede a insaturação de gorduras e óleos, sendo aplicável para óleos e gorduras que não contêm ligações duplas conjugadas. A Tabela 7, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 7 - Resultados da análise do índice de iodo referente aos produtos.

Produtos	Índice de iodo (g I₂/100g óleo)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	107	96 – 115 / ANVISA
Ésteres metílicos	87	Anotar / ANP
Ésteres etílicos	110	
Epóxido metílico	13,4	Nada consta
Epóxido etílico	30,0	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Os ácidos graxos que possui em sua constituição ligações duplas carbono-carbono reagem com o iodo, a fim de indicar o grau de sua insaturação, quanto maior a insaturação maior o índice. Os resultados descritos na tabela acima, demonstra que o óleo de milho se encontra dentro do aceitável, diante do padrão especificado pela ANVISA. Vale ressaltar, que a massa molar aproximada encontrada para a referido óleo de milho comprado em comércio local, foi de 886 g/mol, esse resultado destaca uma menor viscosidade do óleo o que facilita as reações de transesterificação. Além disso, um alto peso molecular indica uma alta presença de insaturações no meio (Pereira, *et al.*, 2023). As insaturações estão intrinsicamente ligadas a densidade do produto, dado que, cada dupla ligação do ácido graxo permite a absorção de dois átomos de halogênio, nesse caso, o iodo. A análise desse parâmetro serve como indicativo de tendencia à oxidação do produto. A oxidação está diretamente relacionada à acidez e à viscosidade dos óleos lubrificantes (Starling, 2016).

Os ésteres analisados acima, encontram-se superiores, evidenciando que a reação de transesterificação não conseguiu reduzir consideravelmente o número de insaturações. Ainda quando comparados com a matéria-prima, é possível constatar que houve redução do biodiesel metílico, porém o etílico obteve um leve aumento. Esses fatores, relacionados com o alto índice deste parâmetro, deve-se ao número de ácidos graxos poli-insaturados presentes na composição química do óleo vegetal. Essa propriedade físico-química é de suma importância e influencia extremamente a oxidação do combustível.

Com base nos dados, os biolubrificantes conseguiram um número de redução significativo, demonstrando uma eficiência do processo reacional quando relacionados aos seus ésteres, pontuando a provável formação de anéis oxiranos. Entretanto, trabalhos como o de

Santos (2011), pontuou valores menores ($10,2 \text{ mg I}_2 \cdot \text{g}^{-1}$) quando relacionados aos dessa referida pesquisa, enfatizando assim, que ainda há insaturações para reagir.

Teor de sabão

O referido teor, determina a quantidade de oleato de sódio que resulta da neutralização do catalisador alcalino com ácidos graxos e ésteres. A Tabela 8, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 8 - Resultados da análise do teor de sabão referente aos produtos.

Produtos	Teor de sabão (ppm de oleato de sódio)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,0	≤ 10 / ANVISA
Ésteres metílicos	2,55	----- / ANP
Ésteres etílicos	2,09	
Epóxido metílico	0,06	Nada consta
Epóxido etílico	0,37	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Segundo a ANVISA, o teor de sabão presente em óleos deve ser igual ou inferior a 10 ppm de oleato de sódio. Diante desse padrão, podemos observar que o óleo de milho analisado, obteve um valor igual a 0,0 (ppm de oleato de sódio), indicando a alcalinidade zero da amostra, portanto, estando em conformidade com o legislado.

Os ésteres apresentaram um valor alto quando relacionados a sua matéria-prima. Além disso, em suas análises, Santos (2011), descreve um teor de 0,17 ppm de oleato de sódio, sendo este, inferior ao encontrado nesse trabalho. Desse modo, valores altos para esse parâmetro, indica uma alcalinidade maior, muito provavelmente em decorrência de resíduos do catalisador básico. Vale ressaltar, que a ANP não dita um padrão para essa propriedade.

Os produtos epoxidados, alcançaram valores baixos quando comparados com os biodieseis analisados, constatando uma diminuição significativa, e, portanto, uma diminuição da alcalinidade, destacando que os processos de purificação conseguiram eliminar uma parte

do resíduo deixado do hidróxido de potássio. Essa análise é utilizada para controlar a remoção de ácidos graxos livres do sabão por neutralização.

A produção de sabão subtrai a conversão a ésteres e gera um maior consumo de catalisador, tornando mais difíceis as etapas posteriores de separação, recuperação e purificação do glicerol e dos ésteres obtidos. Os sabões formados também aumentam a viscosidade e a formação de géis e emulsões (Costa, 2017).

Índice de saponificação

Definido como a quantidade de álcali necessária para saponificar uma dada quantidade de amostra, esse índice é aplicável para óleos e gorduras, sendo inversamente proporcional ao peso molecular médio dos ácidos graxos dos glicerídeos. A Tabela 9, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 9 - Resultados da análise do índice de saponificação referente aos produtos.

Produtos	Índice de saponificação (mg KOH/g óleo)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	190	189 – 195 / ANVISA
Ésteres metílicos	269,7	----- / ANP
Ésteres etílicos	255,9	
Epóxido metílico	294,2	Nada consta
Epóxido etílico	258,7	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

O valor do índice de saponificação referente a matéria-prima, constata sua conformidade com o limite estabelecido pelo órgão responsável. O óleo, quando aquecido em solução aquosa, seja de soda cáustica ou potassa alcoólica, forma-se glicerol e uma mistura de sais alcalinos de ácidos graxos, conhecido popularmente como sabão (Moretti, 2007). Quanto menor for o peso molecular dos ácidos graxos maior será o seu índice de saponificação. Além disso, esse parâmetro pode ser utilizado para calcular a massa molar do óleo.

No caso dos ésteres, quando relacionado ao óleo de milho caracterizado, podemos observar um aumento considerável. Como a ANP não cita um limite para este teste, devido o fator de mudança para essa propriedade para diferentes matérias-primas utilizadas no preparo de biodiesel, foi, portanto, realizada uma comparação com outros estudos. Oliveira (2013), constatou em suas pesquisas, que o índice de matéria saponificável para o biodiesel do óleo de soja refinado fora de 194,8 mg KOH/g óleo, revelando assim, uma inferioridade com resultados das amostras de ésteres descritas na tabela acima. Os dados nos permitem aferir que houve uma redução de impurezas insaponificáveis durante o processo de transesterificação, quando comparado com o estudo de Oliveira (2013).

Os lubrificantes biodegradáveis obtidos do processo de epoxidação, obtiveram nessa análise, quando comparados aos ésteres e matéria-prima, um valor alto, demonstrando que os epóxidos tem menos impureza saponificável, além de que o índice de saponificação destes foi elevado porque precisou de uma quantidade de KOH a mais que os ésteres. Trabalhos como o de Cruz (2022), reportam um valor de 213 mg KOH/g óleo para essa análise, feita no epóxido de óleo de soja refinado, destacando uma diminuição desse parâmetro, quando comparado com os encontrados nessa pesquisa.

Índice de peróxido

O índice em questão, verifica o grau de oxidação do óleo, servindo de indício de que a deterioração do óleo, em relação ao sabor e odor, mediante sua estabilidade, está iniciando. A Tabela 10, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes da matéria-prima, dos ésteres e dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 10 - Resultados da análise do índice de peróxido referente aos produtos.

Produtos	Índice de peróxido (meq/Kg)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	0,009	≤ 10 / ANVISA
Ésteres metílicos	0,021	----- / ANP
Ésteres etílicos	0,029	
Epóxido metílico	0,017	Nada consta
Epóxido etílico	0,013	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Um dos principais meios de deterioração dos óleos consiste no processo de oxidação, por meio do oxigênio atmosférico que acaba sendo dissolvido no óleo, reagindo com seus constituintes (ácidos graxos insaturados), destacando que quanto maior o grau de insaturação, mais reativo com o oxigênio serão. Com base nos dados, o óleo de milho mostrou-se estar pouco susceptível a oxidação, evidenciando que no processo de extração, refino e armazenamento o óleo em questão, recebeu tratamento adequado, estando, portanto, abaixo do valor estabelecido pela ANVISA. O índice de peróxido é expresso em termos de miliequivalentes de peróxido por 1000g de amostra. É válido frisar, que quanto maior o grau de insaturação de um óleo, mais provável a formação de compostos de baixo peso molecular oriundos de sua degradação.

Esse parâmetro para a ANP, não parece ser importante na avaliação de um biodiesel, uma vez, que à mesma não infere um valor padrão para referida análise. Contudo, esta propriedade tem-se mostrado excelente na pesquisa, pois a reação de oxidação ocorre em sua presença, aumentando com o tempo (Silva, 2011). Os valores para esse teste, demonstra que os ésteres metílicos e etílicos, encontram-se baixos, em relação ao encontrado no trabalho de Medeiros *et al.*, (2020), onde o índice para o biodiesel de óleo extravirgem de coco de proporção 1:1, apontou um valor de 19,48 meq/Kg, ressaltando que os biodieseis do óleo de milho apresentam concentrações menores de peróxido, resultando em seu baixo potencial de deterioração.

Os biodieseis epoxidados, alcançaram valores menores que os ésteres, demonstrando uma diminuição do índice pós processo de abertura de anel oxirano. Tal parâmetro mostra a baixa propensão à deterioração dos epóxidos. Ainda quando comparados com outros estudos, como o de Cruz (2022), que evidência para epóxido do óleo de soja refinado, um índice de peróxido de 0,014 meq/Kg, constatamos que estes encontram-se com valores aproximados.

Viscosidade cinemática a 40°C

A viscosidade cinemática é a combinação da viscosidade dinâmica com a massa específica (Santos, 2011). A Tabela 11, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 11 - Resultados da análise da viscosidade cinemática a 40 °C referente aos produtos.

Produtos	Viscosidade Cinemática a 40°C (mm²/s)	Padrão especificado / órgão competente
Óleo de milho	33,64	----- / ANVISA
Ésteres metílicos	4,49	3,0 – 6,0 / ANP
Ésteres etílicos	5,03	
Epóxido metílico	9,26	Nada consta
Epóxido etílico	9,89	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024; BRASIL, 2021; BRASIL, 2006; BRASIL, 2014.

Diante dos resultados listados acima, podemos constatar que o óleo de milho obteve um valor alto (33,64 mm²/s), quando comparado com o trabalho de Teixeira (2021), que analisou o óleo da amêndoa da carnaúba e evidenciou um índice de 27.360 mm²/s para este parâmetro. O aumento da viscosidade, informa que o óleo é composto por ácidos graxos maiores, isso indica que as moléculas de triglicerídeos presentes na matéria-prima dificultam a fluidez (Breves, 2018). A ANVISA não determina um valor padrão para esta análise.

Os biodieseis analisados alcançaram valores satisfatórios, quando relacionados aos padrões especificados pela ANP, indicando que estes encontram-se dentro do aceite pelo órgão. Vale pontuar, que estes obtiveram índices baixos quando comparados ao óleo de milho, sendo o principal motivo, a cadeia dos ésteres ser menor que a cadeia de triglicerídeos. Segundo Knothe *et al.*, (2006), valores altos podem gerar problemas na parte lubrificada do sistema de injeção do motor.

Uma das principais características de um lubrificante é a viscosidade cinemática, sendo de fundamental importância na lubrificação hidrodinâmica. Os biolubrificantes analisados, alcançaram valores elevados em relação aos ésteres do óleo de milho, atestando a conversão das ligações duplas em anéis oxiranos. Entretanto, este valor de viscosidade, também, pode estar ainda maior devido a presença das hidroxilas, oriundas da hidrólise dos anéis oxiranos, tendo em vista, que as ligações de hidrogênio originadas nas hidroxilas de moléculas diferentes desse composto, dificultam o escoamento do epóxido e aumentam a viscosidade (Santos, 2011). Vale ressaltar, que em seus estudos, Santos (2011) encontrou valores próximos aos descritos na análise desse parâmetro para o biolubrificante.

Índice de hidroxila

O índice de hidroxila indica a quantidade de hidroxilas que foram inseridas na molécula, sendo aplicável para óleos seus derivados. A Tabela 12, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 12 - Resultados da análise do índice de hidroxila referente aos produtos.

Produtos	Índice de hidroxila (mg KOH/ g óleo)	Padrão especificado / órgão competente
Epóxido metílico	15,11	Nada consta
Epóxido etílico	7,65	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024.

Com base nos resultados descritos na tabela 12, os produtos epoxidados sofreram processo de hidrólise do anel oxirano, sendo o epóxido metílico o mais hidrolisado. Em seus trabalhos, Santos (2011) descreve um índice de 19,1 mg KOH/g óleo, para o biolubrificante metílico do óleo de soja refinado, destacando assim, um valor superior ao dos lubrificantes biodegradáveis do óleo de milho, analisados nesse trabalho.

A presença de hidroxilas no biolubrificante, deve-se ao fato da alta concentração do ácido peracético utilizado no processo reacional de epoxidação. Soluções de ácido peracético com elevada concentração, tendem a gerar mais ácido acético, que é um dos produtos dessa reação. Ácido acético, força o processo de formação de hidrólise dos epóxidos, gerando compostos dihidroxilados (Santos, 2011).

Oxigênio oxirano

A referida propriedade, determina o percentual de oxigênio oxirano presente em amostras de óleos epoxidados. A Tabela 13, descreve os resultados desse parâmetro físico-químico analisado nos produtos, onde é possível observar algumas características pertinentes dos epóxidos, e chegar a algumas conclusões a respeito do processo.

Tabela 13 - Resultados da análise do oxigênio oxirano referente aos produtos.

Produtos	Oxigênio Oxirano (%)	Padrão especificado / órgão competente
-----------------	-----------------------------	---

Epóxido metílico	13,2	Nada consta
Epóxido etílico	10,8	

Fonte: Dados da Pesquisa, 2024.

A análise desse parâmetro, nos indica se houve ou não formação dos anéis oxiranos, mediante ligações, na qual o oxigênio insere-se nas insaturações formando os epóxidos. Os produtos sintetizados, obtiveram por meio deste teste, um percentual de 13,2% (epóxido metílico) e 10,8% (epóxido etílico). Segundo dados da literatura, o percentual de oxigênio oxirano não pode ser elevado. Contudo, este, também, deve ser superior 6,3% (Baltacioglu; Balkose, 1999). Com base nesses resultados, podemos constatar que os epóxidos etílicos obtiveram melhor conversão, frente aos metílicos, corroborando assim, para compreensão do alto rendimento do biolubrificante etílico, quando comparado ao metílico.

Desse modo, podemos aferir que, mesmo ocorrendo algumas reações de hidrólise, a reação de epoxidação foi eficaz e viável, obtendo, portanto, os produtos inicialmente almejados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste trabalho, foi possível atestar a viabilidade da metodologia empregada na obtenção de lubrificantes biodegradáveis, utilizando como matéria-prima o óleo de milho. Visto que, diante dos testes realizados, constatou-se o elevado índice de iodo, bem como, a elevada viscosidade cinemática a 40° C, do óleo de milho, demonstrando sua inadequação para fins lubrificantes, destacando assim, a necessidade de modificações químicas.

As etapas reacionais utilizadas, foram satisfatórias, tendo em vista, que a reação de transesterificação alcançou bons índices de conversão dos ésteres metílicos (96%) e etílicos (84%). Ademais, esta possibilitou melhorias nas características físico-químicas dos produtos, reduzindo a viscosidade cinemática dos biodieseis, possibilitando assim, melhorias na fluidez destes. Essa redução significativa, deve-se à saída da molécula de glicerol, que se faz presente no óleo de milho.

Contudo, os altos índices de iodo dos biodieseis, evidenciou que mais uma etapa reacional seria necessária. A reação de epoxidação, alcançou resultados satisfatórios. Seus rendimentos foram de 93% (epóxido metílico) e 97% (epóxido etílico). Além disso, esta reação contribuiu para a diminuição dos índices de iodo dos ésteres metílicos e etílicos, e para o aumento do índice de oxigênio oxirano. Vale ressaltar, que o leve aumento da viscosidade cinemática a 40 °C, deve-se ao fato da presença de moléculas de hidroxilas nos produtos epoxidados, bem como, da conversão de anéis oxiranos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Bruno Pinto de. As relações entre o homem e a natureza e a crise sócio-ambiental. Rio de Janeiro, RJ. Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), 2007. Disponível em: Microsoft Word - Bruno Pinto.doc (fiocruz.br) . Acesso em: 13 de fev. 2024.

ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino de; SOUZA, Thiago Gonçalves (Orgs.). **Introdução ao antropoceno**. 1.ed. Recife, PE: NUPEEA, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357186732_Introducao_ao_Antropoceno. Acesso em: 14 de fev. 2024.

ALMEIDA. K. F. B. et al. IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELO DESCARTE INCORRETO DE ÓLEO LUBRIFICANTE NAS OFICINAS MECÂNICAS. Revista FT, Edição 127, Out, 2023. Disponível em: IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELO DESCARTE INCORRETO DE ÓLEO LUBRIFICANTE NAS OFICINAS MECÂNICAS – ISSN 1678-0817 Qualis B2 (revistaft.com.br). Acesso em: 20 abr. 2024.

ALVES, José Eustáquio Diniz. Antropoceno: a era do colapso ambiental. **CEE- Centro de Estudos Estratégicos Fiocruz**. 16 janeiro 2020. Disponível em: <https://cee.fiocruz.br/?q=node/1106>. Acesso em: 13 de fev. 2024.

ALUYOR, Emmanuel O.; OBAHIAGBON, Kessington O.; ORI-JESU, Mudiakeoghene. Biodegradation of vegetable oils: A review. **Scientific Research and Essay**, vol.4 (6), p. 543-548, jun. de 2009. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/68F12CF17028>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

APROMAC - Associação de Proteção ao Meio Ambiente de Cianorte. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados - Guia Básico, 2ª Ed. Revisada set. de 2011, p. 64.** Disponível em: https://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos_lubrificantes/manuais/gestao_oleos_lubrificantes.pdf. Acesso em: 15 de jan. 2024.

ARAVIND, Amith; JOY, M.I.; NAIR, K. Prabhakaran. Lubricant properties of biodegradable rubber tree seed (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) oil. *Industrial Crops and Products*, [s.l.], v. 74, p.14-19, nov. de 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.014>. Acesso em: 21 de fev. 2024.

BADOLATO, Elza Schwarz Gastado; MAIO, Franca Durante de; TAVARES, Mário. Composição em ácidos graxos de óleos vegetais comestíveis comercializados no Estado de São Paulo. **Rev. Inst. Adolfo Lutz**, 52 (1/2): 51-62, 1992. Disponível em: http://www.ial.sp.gov.br/resources/insituto-adolfo-lutz/publicacoes/rial/90/rial_521-2_1992/729.pdf. Acesso em: 23 de jan. 2024.

BALTACIOGLU H; BALKOSE, D. “Effect of zinc stearate and/or epoxidized soybean oil on gelation and thermal stability on PVC-DOP plastigels”. *Jounal of Applied Polymery Science*. 74, 2488-2498, 1999. Acesso em: 7 abr. 2024.

BEPI. Boletim de economia e política internacional. Diretoria de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Brasília: ipea, Número 27 Maio | Ago. 2020. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/bepi27>. Acesso em: 20 abr. 2024.

BERNARDES, Victor Hugo Xavier. **ETANOL A PARTIR DO MILHO**: processo produtivo e questões ambientais, 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia– MG, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39691/1/EtanolPartirMilho.pdf>. Acesso em: 4 de jan. 2024.

BOLINA, Iara Camila de Almeida. **Preparação e caracterização de biocatalisadores heterogêneos para a produção de biolubrificante**, 2020. Tese (Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/35136/1/Tese_%20Iara%20Bolina.pdf. Acesso em: 6 de jan. 2024.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Resolução ANP n° 804/2019. Dispõe sobre os critérios para obtenção do registro de graxas e óleos lubrificantes e as responsabilidades e obrigações dos detentores de registro, produtores e importadores. **Diário Oficial da União**, p. 956-958, 2019. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-804-2019-dispoe-sobre-os-criterios-para-obtencao-do-registro-de-graxas-e-oleos-lubrificantes-e-as-responsabilidades-e-obrigacoes-dos-detentores-de-registro-produtores-e-importadores?origin=instituicao&q=804/2019>. Acesso em: 20 de jan. 2024.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Resolução ANP n° 125/1999. Regulamenta a atividade de recolhimento, coleta e destinação final do óleo lubrificante usado ou contaminado. **Diário Oficial da União**, p. 1-4, 1999. Disponível em: https://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos_lubrificantes/port_anp_revogadas/portaria_anp_125_99.pdf. Acesso em: 20 de jan. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC n° 481/2021. Dispõe sobre os requisitos sanitários para óleos e gorduras vegetais. **Ministério da Saúde**, 2021. Disponível em: [9b9ec090-dbb7-4e56-acfe-8186b6d5bc8a](https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/legislacao/resolucoes/resolucao-rdc-481-2021) (anvisa.gov.br). Acesso em: 3 de fev. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA n° 362/2005. Dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. **Diário Oficial da União**, p. 128-130, 2005. Disponível em: conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=457. Acesso em: 20 de jan. 2024.

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 p. Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Química, Brasília, 2018. Disponível em: [1](https://repositorio.unb.br/handle/10422/2018) (unb.br) Acesso em: 14 abr. 2024.

CARVALHO, Ana Carolina de Oliveira. **Características Físico-Químicas de Óleos Vegetais Comestíveis Puros e Adulterados**, 2017, 79 p. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, 2017. Disponível em: https://ead.uenf.br/moodle/pluginfile.php/5536/mod_resource/content/4/Monografia%20-%20Ana%20Carolina%20de%20Oliveira%20Carvalho-%20L%20Qui.pdf. Acesso em: 25 jan. 2024.

CASTRO, Heizir F. de. *Processos Químicos Industriais II: óleos e gorduras*. Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de Lorena – EEL, 2014. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/Apostila5Tecnologiadde0leos eGorduras.pdf>. Acesso em: 25 de jan. 2024.

CECCHI, H. M. **Fundamentos Teóricos e Práticos em análise de alimentos**. 2ª ed. rev. Campinas, SP. Editora da Unicamp, 2003. Disponível em: [FUNDAMENTOS TEORICOS E PRATICOS.indb \(editoraunicamp.com.br\)](https://www.editoraunicamp.com.br). Acesso em: 7 abr. 2024.

CHEN, Zheng; WU, Yong-Ping; FENG, Guo-Lin; QIAN, Zhong-Hua; SUN, Gui-Quan. Effects of global warming on pattern dynamics of vegetation: Wuwei in China as a case. **Applied Mathematics and Computation**, v. 390, p. 125666, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125666>. Acesso em: 12 fev. 2024.

COÊLHO, Jackson Dantas. **MILHO: produção e mercados**. Caderno Setorial ETENE, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste – ETENE, Banco do Nordeste, ano 6, nº 210, dez. de 2021. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1115/1/2021_CDS_210.pdf. Acesso em: 23 de jan. 2024.

COLTRO, Fábio Luiz Zanardi; BORINELLI, Benilson. Antropoceno e Capitaloceno: novas perspectivas, velhos combates. **Debates Interdisciplinares XI**, p. 157- 175, janeiro de 2020. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/14994/5/cap_07.pdf. Acesso em: 13 de fev. 2024.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 11 décimo primeiro levantamento, agosto 2023. Disponível em: [E-book_BoletimZdeZSafrasZ-Z11oZlevantamento.pdf](https://www.conab.gov.br). Acesso em: 7 de fev. 2024.

COSTA, Angela Oliveira da. **A Inserção do Biodiesel na Matriz Energética Nacional: Aspectos Socioeconômicos, Ambientais e Institucionais**. 2017. 248 p. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: [876286.pdf \(ufrj.br\)](https://repositorio.ufrj.br). Acesso em: 4 abr. 2024.

CRUZ, J. F. S. **QUÍMICA E SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE COMPARATIVA DA OBTENÇÃO DE LUBRIFICANTES BIODEGRADÁVEIS PELA EPOXIDAÇÃO DO ÓLEO DE SOJA COMERCIAL E USADO EM FRITURA**. 2022. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (monografia) - Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2022. Disponível em <https://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27404>. Acesso em: 14 fev. 2024.

DELGADO, Fernanda; FILGUEIRAS, Raquel. A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira. **Conjuntura Econômica** | Abril 2022. Disponível em: [04ce2022_fernanda_delgado.pdf \(fgv.br\)](https://www.fgv.br). Acesso em: 14 abr. 2024.

DIAZ, Paola Andrea Borda; KRONEMBERGER, Frederico de Araujo; HABERT, Alberto Claudio. A pervaporation-assisted bioreactor to enhance efficiency in the synthesis of a novel biolubricant based on the enzymatic transesterification of a castor oil based biodiesel. **Fuel**, [s.l.], v. 204, p.98-105, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.025>. Acesso em: 24 de jan. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **ÓLEO DE MILHO: aspectos químicos e ambientais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, dez. de 2004.

Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/489408/1/Oleomilho.pdf>. Acesso em: 4 de jan. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene** – oportunidades e desafios. Agroenergia, jun. de 2015. Disponível em: Artigo: Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios - Portal Embrapa. Acesso em: 27 de jan. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo.** Estudos socioeconômicos e ambientais, jun. de 2021. Disponível em: Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo - Portal Embrapa. Acesso em: 27 de jan. 2024.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. **ABCDEnergia**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 23 de dez. 2023.

EREDA, T. Epoxidação de óleos vegetais, visando a obtenção de lubrificantes industriais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2004.

FARIAS, Higor Henrique. **Epoxidação etílica do óleo de pinhão-mansão para obtenção de lubrificante biodegradável.** 2023. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, Cuité, 2023. Disponível em:
[http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/33942/1/HIGOR%20HENRIQUE%20FARIAS%20-%20TCC%20LICENCIATURA%20EM%20QU%
c3%8dMICA%20CES%202023.pdf](http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/33942/1/HIGOR%20HENRIQUE%20FARIAS%20-%20TCC%20LICENCIATURA%20EM%20QU%c3%8dMICA%20CES%202023.pdf). Acesso em: 11 abr. 2024.

FELIPE, A. S. *et al.* **Combustíveis Fósseis e os Impactos à Vida Marinha.** Atena Editora, Principais temas da pesquisa em Ciências Biológicas, Cap. 5. Mac. 2023. Disponível em: Artigo - Atena Editora. Acesso em: 3 de Fev. 2024.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, v.28, n.1, p.19-23, 2005.

FILHO, Victor Gaspar; SANTOS, Thauan. Transição da Segurança Energética: energias limpas, minerais críticos e novas dependências. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo. Vol. 25, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210179r1vu2022L4AO>. Acesso em: 6 jan. 2024.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Lubricants Market Size, Share and COVID-19 Impact Analysis, By Type (Automotive Oils, Industrial Oils (Hydraulic Oils, Industrial Gear Oils, Metal Working Fluids, Greases, and Others), Marine Oil, and Process Oils), By Grade (Mineral, Synthetic, and Semi-Synthetic), By Application (Automotive, Industrial, and Others), and Regional forecast, 2022-2029.** Junho de 2022a, p. 325. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lubricants-market-101771>. Acesso em: 15 de jan. 2024.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Bio Lubricants Market Size, Share and COVID-19 Impact Analysis, by Application (Hydraulic Fluids, Metalworking Fluids, Chainsaw Oils, Mold Release Agents, Two-Cycle Engine Oils, Gear Oils, Greases, and Others), by Enduse Industry (Automotive and Other Transportation, Metalworking, Mining, Forestry, Marine, Engines, and Others), and Regional forecast, 2022-2029.** Maio de 2022b, p. 271. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/bio-lubricants-market-104654>. Acesso em: 15 de jan. 2024.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H., 1986. Transesterification kinetics of soybean oil. **JAOCS** 63(10): 1375-1380. Acesso em: 18 abr. 2024.

FREEDMAN, B., PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L., 1984. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *J Am Oil Chem Soc* (1984). **JAOCS**. 61: 1638-1643. doi:10.1007/BF02541649. Acesso em: 18 abr. 2024.

GRANGEIRO, R. V. T.; PINHEIRO, R. L. S.; MENEZES, R. S. C. **Coleta seletiva de óleo de fritura para produção e uso de biodiesel no campus Recife da UFPE.** Educação ambiental na gestão de resíduos sólidos. Recife, p. 249-258, 2016. Acesso em: 15 abr. 2024.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAJI, F. M. **Caracterização Físico-Química da Biomassa de Leucaena leucocephala para Produção de Combustível Sólido.** Revista Virtual de Química Caracterização Físico-Química da Biomassa de Leucaena leucocephala para Produção de Combustível Sólido. v. XX, n. Xx, 2016.

IBRAHIM, A.; ASHIKIN, I. **A Study of Vegetable Oils as a Helical Gear Lubricant.** Prosiding Seminar Kebangsaan Aplikasi Sains dan Matematik, 2013 (SKASM2013), Batu Pahat, Johor, out. de 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/235646973.pdf>. Acesso em: 27 de jan. 2024.

IJAZ MALIK, M.A.; KALAM, M.A.; MUJTABA, M.A.; ALMOMANI, Fares. A review of recent advances in the synthesis of environmentally friendly, sustainable, and nontoxic bio-lubricants: Recommendations for the future implementations. **Environmental Technology & Innovation**, v. 32, p. 103366, nov. de 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103366>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

JUNIOR, José Geraldo Esteves Guedes. **Desenvolvimento e Otimização da Produção de Diésteres de Etileno Glicol (Biolubrificantes) por Hidroesterificação Enzimática do Óleo de Fritura.** 102 p. Mestrado (Mestre em Engenharia Química) - Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte - MG, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/39310/3/Disserta%20a7%20a3o%20Final%20Corrigido.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2024.

KARMAKAR G, GHOSH P, SHARMA BK. Chemically modifying vegetable oils to prepare green lubricants. **Lubricants**, v. 5, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/lubricants5040044>. Acesso em: 5 de fev. 2024.

KNOTHE, G. et al. **Manual de Biodiesel.** São Paulo: Blucher, 2006. 352 p. Disponível em: Manual de biodiesel - Editora Blucher. Acesso em: 28 fev. 2024.

LEHNEN, D. R. Epoxidação de Biodiesel na Ausência de Solvente. 2011. 27f. Monografia (Graduação em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em: Epoxidação de biodiesel na ausência de solvente (ufrgs.br). Acesso em: 3 abr. 2024.

LIMA, Anderson Eduardo Alcântara de. **Avaliação e Otimização do Processo de Recuperação de Óleos Lubrificantes Automotivos Usados**. 2016. 82 p. Tese (Doutorado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa – PB, 2016. Disponível em: file:///C:/Users/ferna/Downloads/Tese_Anderson_E_A_Lima.pdf. Acesso em: 18 de jan. 2024.

MACEDO, A. D. M. et al. Otimização do Processo de Síntese de Biolubrificantes por Epoxidação de Óleo Residual Oriundo de Restaurante Universitário. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.12, p.119743-119761, dec. 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41799/pdf>. Acesso em: 9 abr. 2024

MANNEKOTE, Jagadeesh K. et al. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 81, p. 1787-1801, jan. de 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.274>. Acesso em: 14 de fev. 2024.

MARQUES, João Paulo Cordeiro. **Produção de Ésteres Biolubrificantes de Alto Valor Agregado Utilizando Catalisadores Heterogêneos Sulfônicos**. 145 p. Tese (Doutorado em Química) - Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza - CE, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60070/3/2020_tese_jpcmarques.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

MATOS, P. R. R. **Biolubrificantes**. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/rp/biolubrificantes.pdf>. Acesso em: 20 de jan. 2024.

MATOS, Paulo Roberto Rodrigues de. **O ÓLEO DE MACAÚBA COMO MATÉRIAPRIMA BÁSICA DE UM BIOLUBRIFICANTE: um estudo teóricoexperimental**. 2018. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/31954/1/2018_PauloRobertoRodriguesdeMatos.pdf. Acesso em: 04 de mar. 2024.

MARINHO, Carolina Messias. **Extração de Óleo de Gérmen de Milho com o uso de Co₂ em Condições Supercríticas e Cossolventes**, 2017, 72 p. Mestrado (Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia – MG, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24584/1/Extra%C3%A7%C3%A3o%C3%93leoG%C3%A9rmen.pdf>. Acesso em: 23 de jan. 2024.

MEDEIROS, L. V. P. et al. Produção de biodiesel a partir do aproveitamento do óleo de coco obtido de material vegetal da região do Semiárido Potiguar. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v.6, n.9, p.68153-68172, sep. 2020. Disponível em: [View of Produção de biodiesel a partir do aproveitamento do óleo de coco obtido de material vegetal da região do Semiárido Potiguar / Biodiesel production from the use of coconut oil obtained from plant material from the Semiarid region of Potiguar \(brazilianjournals.com.br\)](https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41799/pdf). Acesso em: 10 abr. 2024.

MENDES, J. R.; SYLLA, B. J. *Tecnofilosofia líquida: Anders, Blumenberg e Sloterdijk*. Braga: Centro de Ética, Política e Sociedade, 2019. Disponível em: SciELO - Brasil - MENDES, J. R.; SYLLA, B. J. *Tecnofilosofia líquida*: Anders, Blumenberg e Sloterdijk. Braga: Centro de Ética, Política e Sociedade, 2019

líquida</i>: Anders, Blumenberg e Sloterdijk. Braga: Centro de Ética, Política e Sociedade, 2019. Acesso em: 19 abr. 2024.

MENEGHETTI, S. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. *Revista Virtual de Química*, v. 5, p. 1-11, 2013. Acesso em: 18 abr. 2024.

MOBARAK H.M., MOHAMAD E.N., MASJUKI H.H., KALAM M.A., AL MAHMUD K.A.H., HABIBULLAH M., ASHRAFUL A.M. The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 34-43, maio de 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.062>. Acesso em: 2 de fev. 2024.

MONTEIRO R.R.C., LIMA P.J.M., PINHEIRO B.B., FREIRE T.M., DUTRA L.M.U., FECHINE P.B. A., GONÇALVES L.R.B., SOUZA M.C.M., SANTOS J.C.S., FERNANDEZ-LAFUENTE, R. Immobilization of Lipase A from *Candida antarctica* onto Chitosan-Coated Magnetic Nanoparticles. **International Journal of Molecular Sciences**, 4018, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms20164018>. Acesso em: 20 de jan. 2024.

MORETTI, Tássia V. Desenvolvimento de Adesivo Poliuretano a Partir de Óleo de Mamona. 2007. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Química Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Acesso em: 13 abr. 2024.

MORETTO, E.; FETT, R. Definição de óleos e Gorduras tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos. São Paulo. Varela, 1998. Acesso em: 7 abr. 2024.

NUNES, M. R. D. S.; MARTINELLI, M.; PEDROSO, M. M. Epoxidação do óleo de mamona e derivados empregando o sistema catalítico V/TBHP. **Química nova**, v.31, n.4, p.818-821, 2008.

OLIVEIRA, Ana Flávia de. Síntese e caracterização de biolubrificantes obtidos através de modificações químicas no óleo de soja refinado. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Curitiba, 2013. Disponível em: [CT_PPGCTA_M_Oliveira, Ana Flávia de_2013.pdf](CT_PPGCTA_M_Oliveira,Ana%20Fl%C3%A1via%20de_2013.pdf) (utfpr.edu.br). Acesso em: 21 fev. 2014.

OLIVEIRA, D. S. et al. Obtenção do biodiesel através da transesterificação do óleo de Moringa Oleífera Lam. **HOLOS**, Ano 28, v. 1, 2012. Disponível em: (2) (PDF) Obtenção do Biodiesel através da transesterificação do óleo de Moringa oleífera Lam (researchgate.net). Acesso em: 7 abr. 2024.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Geneva: World Health Organization, 2021, p. 273. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Acesso em: 28 de jan. 2024.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Tratados e acordos: Acordo de Paris**. Dubai, Emirados Árabes Unidos (COP 28), 30 de novembro 2023. Disponível em: [Quais foram os resultados da COP28 ? | As Nações Unidas no Brasil](#). Acesso em: 26 de jan. 2024.

OWUNA, F. J. *et al.* Chemical modification of vegetable oils for the production of biolubricants using trimethylolpropane: A review. **Egyptian Journal of Petroleum**. Cairo, v. 29, n. 1, p. 75-82, março de 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.11.004>. Acesso em: 13 de fev. 2024.

PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. Embrapa Milho e Sorgo, Circular técnica, n. 75, p. 6, 2006. Disponível em: [Circ75.p65 \(embrapa.br\)](#). Acesso em: 03 de mar. 2024.

PASQUINI, Nilton Cesar. **AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL**. Disponível em: DOI: 10.47283/244670492020080129. Acesso em: 14 abr. 2024.

PELANDA, F. M. **Obtenção e caracterização de lubrificantes a partir de óleo de fritura e óleo de soja refinado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Química Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PEREIRA, F. L. A. et al. Avaliação do Óleo de Semente de Mabea Fistulifera Mart. (Canudo-De-Pito) para a Produção de Biodiesel. **Revista IFES Ciência**, ISSN 2359-4799. Volume 9/ Número 1/ Ano 2023–p. 01-12. Disponível em: Vista do Uma AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE SEMENTE DE Mabea fistulifera Mart. (CANUDO-DE-PITO) PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL (ifes.edu.br). Acesso em: 11 abr. 2024.

PETROBRAS. Óleos Básicos Lubrificantes - Informações Técnicas, dez de 2021, p. 1-9. Disponível em: [Manual de Oleos Basicos Lubrificantes 2021 \(1\).pdf](#). Acesso em: 14 de fev. 2024.

PORTALLUBES. **Mercado brasileiro de lubrificantes supera expectativas e fecha 2021 com 9,4% de alta**. Editora ONZE, fev. de 2022a. Disponível em: Mercado brasileiro de lubrificantes cresceu 9,4% - Lubes em Foco (portallubes.com.br). Acesso em: 20 de jan. 2024.

PORTALLUBES. **Mercado de biolubrificantes poderá crescer até 6% no Brasil até 2024**. Editora ONZE, out. de 2022b. Disponível em: Biolubrificantes podem crescer no Brasil até 2024 - Lubes em Foco (portallubes.com.br). Acesso em: 11 de fev. 2024.

QUINCHIA, L. A. *et al.* Viscosity modification of different vegetable oils with EVA copolymer for lubricant applications. **Industrial Crops and Products**. Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 607- 612, nov. de 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.011>. Acesso em: 8 fev. 2024.

RAMOS, L.P.; KOTHE, V.; CÉSAR-OLIVEIRA, M. A. F.; MUNIZ-WYPYCH, A. S.; NAKAGAKI, S.; KRIEGER, N.; WYPYCH, F.; CORDEIRO, C. S. Tecnologias de Produção de Biodiesel. **Revista Virtual Química**, v.9, n.1, p.317-369, 2017.

REDA, Seme Youssef; CARNEIRO, Paulo I. Borba. Óleos e gorduras: aplicações e implicações. **Revista Analytica**, p. 60-67, fevereiro/março 2007, nº27. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariadealimentos/disciplinas/files/2008/04/art07.pdf>. Acesso em: 25 de jan. 2024.

REGITANO-D'ARCE, Marisa Aparecida Bismara; VIEIRA, Thais Maria Ferreira de Souza. Considerado nobre pelo consumidor, óleo de milho alcança bons preços no mercado. Industrialização, visão agrícola nº13 jul./dez. de 2015. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Industrializacao-box1.pdf. Acesso em: 23 de jan. 2024.

RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. Síntese de éster metílico: uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. **Química Nova**, v.30, n.5, p.1374-1380, 2007.

RIOS, Ítalo Castro. **Síntese e Caracterização de Novas Moléculas Derivadas da Mistura de Ácidos Graxos do Óleo da Mamona (*Ricinus Communis L.*) para Aplicação em Biolubrificantes**. 2021. 120 p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60002/3/2021_tese_icrios.pdf. Acesso em: 2 jan. 2024.

RIOS, Ítalo C. *et al.* Chemical modification of castor oil fatty acids (*Ricinus communis*) for biolubricant applications: an alternative for Brazil's green market.: An alternative for Brazil's green market. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 145, p. 112000, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112000>. Acesso em: 19 de fev. 2024.

SALIH, Nadia; SALIMON, Jumat; YOUSIF, Emad. The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants. **Industrial Crops and Products**. Malaysia, v. 34, p. 1089-1096, julho de 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.025>. Acesso em: 8 fev. 2024.

SANTOS, A. C. *et al.* **Estudo prospectivo de óleos vegetais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439, fev. de 2022. Disponível em: -DOC41.pdf (embrapa.br). Acesso em: 27 de jan. 2024.

SANTOS, Eliziane Haluch dos. **Síntese e Caracterização de Biolubrificantes a Partir do Óleo de Soja Refinado**. 59 p. Trabalho de conclusão de curso (monografia) (Tecnóloga em Processos Ambientais) - Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba - PR, 2011. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/9611/2/CT_COPAM_2011_2_08.PDF. Acesso em: 5 fev. 2024.

SANTOS JUNIOR, Helio Cunegundes dos. **Características físico-químicas dos biocombustíveis e óleos vegetais derivados do cártamo, óleo de fritura e mamona**. 2022. 53 f.: il. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra - CCET, Instituto de Química. Curso de Química do Petróleo Bacharelado, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/51869/1/CaracteristicasFisicoQuimicasBiocombustiveis_SantosJunior_2022.pdf. Acesso em: 14 de fev. 2024.

SERNA-SALDIVAR, Sergio O. Corn. **Chemistry and Technology**, 2019 AACCI. Published by Elsevier Inc. in cooperation with AACC International. Disponível em: file:///C:/Users/ferna/Downloads/corn-chemistry-and-technology-third-edition-9780128119716-9780128118863-3053053063-0128119713_compress.pdf. Acesso em: 3 de fev. 2024.

SILVA, Paola Stradolini da. Modificação dos óleos de mamona e soja epoxidado para aplicação em Biolubrificantes. 2022. 33 f. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/264021>. Acesso em: 6 fev. 2024.

SILVA, Raquel Santos. Estudo da reação de epoxidação do óleo de tungue em reatores sonoquímicos. 2019. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/41779/3/2019_dis_rsilva.pdf. Acesso em: 3 abr. 2024.

SILVA, T. A. R. Biodiesel de Óleo residual: produção através da transesterificação por metanólise e etanolise básica, caracterização físico-química das condições reacionais. 2011. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: t.pdf (ufu.br). Acesso em: 12 abr. 2024.

SINGH, Yashvir; SHARMA, Abhishek; SINGLA, Amneesh. Non-edible vegetable oil-based feedstocks capable of bio-lubricant production for automotive sector applications—a review. **Environmental Science and Pollution Research**. Heidelberg, v. 26, n. 15, p. 14867-14882, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05000-9>. Acesso em: 8 fev. 2024.

STARLING, M. F. R. Desenvolvimento de biolubrificantes a partir dos óleos de pinhão-mansão, macaúba e mamona. 2016. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: Template - Documento Mestre (ufmg.br). Acesso em: 5 abr. 2024.

STERPU, A. E. *et al.* Lubricating Greases from Olive Oil, Corn Oil and Palm Oil. *Rev. Chim. (Bucharest)*, 67, n° 8, p. 1575-1582, 2016. Disponível em: <https://bch.ro/pdfRC/STERPU%208%2016.pdf>. Acesso em: 27 de jan. 2024.

TEIXEIRA, Maria Imaculada Gonçalves Silveira. **Avaliação de processos de obtenção de biolubrificantes derivados do óleo de carnaúba**. 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2021. Disponível em: 2021_tcc_migsteixeira.pdf (ufc.br). Acesso em: 2 de abr. 2024.

UNITED STATES. Department of Agriculture. **Oilseeds: world markets and trade**. [Washington, DC], 2021. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 18 de fev. 2024.

VERONEZI, C. M. *et al.* **ÓLEOS VEGETAIS: propriedades físico-químicas, bioativas e antioxidantes**. 1º Ed. Jardim do Seridó, RN: Agron Food Academy, 2022. Disponível em: <https://agronfoodacademy.com/oleos-vegetais-propriedades-fisico-quimicas-bioativas-e-antioxidantes/>. Acesso em: 23 de jan. 2024.

WILLING, A. Lubricants based on renewable resources - An environmentally compatible alternative to mineral oil products. **Chemosphere**, v. 43, n. 1, p. 89–98, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00328-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00328-3). Acesso em: 24 de jan. 2024.

WU, X.; ZHANG, X.; YANG, S.; CHEN, H.; WANG, D. The study of epoxidized rapeseed oil used as a potential biodegradable lubricant. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 77, n. 5, p. 561-563, 2000.

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. *Análises e Indicadores do Agronegócio*, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023. AIA-17-2023.pdf (agricultura.sp.gov.br). Acesso em: 18 de fev. 2024.