

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

MARCELA NUNES DE SOUZA

**POTENCIAL DO ÓLEO DE SOJA RESIDUAL COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A
PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

MACEIÓ
2023

MARCELA NUNES DE SOUZA

**POTENCIAL DO ÓLEO DE SOJA RESIDUAL COMO MATÉRIA-PRIMA PARA A
PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, Campus CECA, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Energia, orientado pela Profa. Dra. Amanda Santana Peiter.

MACEIÓ

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S729p Souza, Marcela Nunes de.

Potencial do óleo de soja residual como matéria-prima para a produção de de biodiesel. / Marcela Nunes de Souza. – 2023.

41f.: il.

Orientador(a): Amanda Santana Peiter.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Transesterificação. 2. Biomassa. 3. Combustível. I. Título.

CDU: 662.6

Folha de Aprovação

MARCELA NUNES DE SOUZA


Potencial do óleo de soja residual como matéria-prima para a produção de biodiesel

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de
Engenheiro de Energia pela
Universidade Federal de Alagoas.
Aprovado em 27 de junho de 2023.


Documento assinado digitalmente
 AMANDA SANTANA PEITER
Data: 11/07/2023 09:35:01-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Amanda Santana Peiter, CECA/UFAL (Orientadora)

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR
Data: 11/07/2023 10:47:57-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior, CECA/UFAL (1º Avaliador)

Documento assinado digitalmente
 JULIO INACIO HOLANDA TAVARES NETO
Data: 12/07/2023 10:45:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Julio Inacio Holanda Tavares Neto, CECA/UFAL (2º Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Querida professora Amanada, gostaria de expressar minha imensa gratidão por todo o apoio, orientação e dedicação que você ofereceu durante o processo de elaboração do meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Sua contribuição foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Gostaria também de estender minha gratidão à minha querida amiga de graduação, Joyce Emanuelle. Desde o início, você esteve ao meu lado, oferecendo apoio, compartilhando ideias e incentivando-me em momentos de dúvidas. Nossa parceria tornou essa jornada acadêmica muito mais prazerosa e significativa.

Além disso, não posso deixar de expressar minha profunda gratidão à minha família. Seu apoio incondicional, incentivo constante e compreensão ao longo dessa trajetória foram fundamentais para minha motivação e bem-estar. Sua presença e suporte emocional tornaram possível enfrentar os desafios e perseverar em direção ao sucesso.

Agradeço do fundo do coração aos meus pais e irmãs por acreditarem em mim e por serem uma fonte inesgotável de amor e apoio.

A todos vocês, minha professora orientadora, minha amiga de graduação e minha família, deixo minha eterna gratidão. Seu apoio, compreensão e incentivo foram essenciais para a minha jornada acadêmica e para a conclusão bem-sucedida deste TCC.

Com profunda gratidão,

Marcela Nunes de Souza.

RESUMO

Uma das medidas para minimizar os danos ambientais acometidos pela humanidade é a utilização de combustíveis que tenham a característica sustentável, como o biodiesel. A diversidade de matérias-primas no processo é uma grande vantagem, dentro das opções de insumos da produção do biodiesel, a reutilização do óleo residual tem um destaque por se tratar de um descarte correto, evitando a contaminação dos efluentes. O processo mais utilizado para produção de biodiesel é a reação de transesterificação de óleos ou gorduras animais com um álcool primário na presença de um catalisador. O presente trabalho explora a obtenção de biodiesel a partir do óleo residual, através do processo de transesterificação, usando o álcool etílico e metílico. Foi realizado um planejamento fatorial com dois níveis e três variáveis, resultando em 8 experimentos, para produzir biodiesel de soja por catálise homogênea. Os parâmetros fixos foram: razão molar óleo/álcool de 1/8, quantidade de catalisador de 1,5% da massa do óleo e tempo de reação de 60 min. As variáveis foram: tipo de álcool (metanol e etanol), tipo de catalisador (KOH e NaOH) e temperatura da reação (28 °C e 50 °C). Dos 8 experimentos realizados, 2 alcançaram rendimento superior a 96,5%, rendimento mínimo exigido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para a comercialização do biodiesel. O maior rendimento, 98,9%, foi encontrado na reação utilizando metanol como álcool, KOH como catalisador e temperatura de 50 °C. Foram realizadas também as análises físico-químicas de densidade, viscosidade e índice de acidez para o óleo residual e o biodiesel obtido. Os valores encontrados do biodiesel nas análises estão dentro dos valores aceitáveis pela ANP.

Palavras-chave: Transesterificação; Biomassa; Combustível.

ABSTRACT

One of the measures to minimize the environmental damages affected by humanity is the use of fuels that have a sustainable characteristic, such as biodiesel. The diversity of raw materials in the process is a great advantage, within the options of inputs for the production of biodiesel, the reuse of residual oil is highlighted because it is a correct disposal, avoiding contamination of effluents. The most used process for biodiesel production is the transesterification reaction of animal oils or fats with a primary alcohol in the presence of a catalyst. The present work explores the production of biodiesel with residual oil, through the transesterification process, using ethyl and methyl alcohol. A factorial design with two levels and three variables was carried out, resulting in 8 experiments, to produce soybean biodiesel by homogeneous catalysis. The fixed parameters were: oil/alcohol molar ratio of 1/8, amount of catalyst of 1.5% of the oil mass and reaction time of 60 min. The variables were: type of alcohol (methanol and ethanol), type of catalyst (KOH and NaOH) and reaction temperature (28 °C and 50 °C). Of the 8 experiments carried out, 2 reached a yield greater than 96.5%, the minimum yield required by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) for the commercialization of biodiesel. The highest yield, 99%, was found in the reaction using methanol as alcohol, KOH as catalyst and temperature of 50 °C. Physical-chemical analyzes of density, viscosity and acidity index were also carried out for the residual oil and the obtained biodiesel. The values found for biodiesel in the analyzes are within the values acceptable by the ANP.

Keywords: Transesterification; Biomass; Fuel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Mapa dos mandatos sobre a mistura de biocombustível global.	15
Figura 2 – Percentual das matérias-primas consumidas para produção de biodiesel.	16
Figura 3 – Produção de oleaginosa no Brasil.	17
Figura 4 – processo hidrolítico e oxidativo dos óleos usados em frituras.	18
Figura 5 – Efeito da adição de biodiesel nas emissões.	21
Figura 6 – pirólise de óleos e gorduras.	24
Figura 7 - Reação de Esterificação.	24
Figura 8- Reação de Transesterificação.	25
Figura 9 - Óleo na estufa.	29
Figura 10 - Controle térmico da amostra.	30
Figura 11 - separação do biodiesel com a glicerina	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades atribuídas ao biodiesel em comparação ao óleo diesel comercial.	13
Tabela 2 – Fatores da condução da fritura que influenciam nas alterações dos óleos.	19
Tabela 3 - Parâmetros fixos adotados nos ensaios.	32
Tabela 4 - Níveis do planejamento experimental	32
Tabela 5 - matriz de planejamento fatorial 2 ³	34
Tabela 6 - Efeitos dos fatores do PE	35
Tabela 7 - Valores dos índices de acidez do óleo e biodiesel	36
Tabela 8 - Resultado da viscosidade do óleo e biodiesel	36
Tabela 9 - Resultado da densidade do óleo e biodiesel	36

LISTA DE ABREVIACÕES

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CECA	Campus de Engenharias e ciências agrárias
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COVID-19	Coronavírus
HC	Hidrocarbonetos
KOH	Hidróxido de Potássio
MP	Materiais particulados
NAOH	Hidróxido de sódio
Nox	Óxido de nitrogênio
NAOH	Hidróxido de sódio
PE	Planejamento Experimental
REN 21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
RU	Restaurante Universitário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	BIODIESEL	12
2.2	BIODIESEL NO MUNDO E NO BRASIL	13
2.3	MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO BIODIESEL	15
2.3.1	ÓLEOS VEGETAIS	15
2.3.2	GORDURAS DE ANIMAIS	16
2.3.3	ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS	17
2.4	VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO BIODIESEL	18
2.4.1	COMBUSTIBILIDADE	18
2.4.2	IMPACTOS RELACIONADO AS EMISSÕES	20
2.4.3	COMPATIBILIDADE AO USO	21
2.4.4	COMPATIBILIDADE AO MANUSEIO	22
2.5	TECNOLOGIA PARA A PRODUÇÃO DO BIODIESEL	22
2.5.1	PIRÓLISE	22
2.5.2	ESTERIFICAÇÃO	23
2.5.3	TRANSESTERIFICAÇÃO	24
3	METODOLOGIA	27
3.1	COLETA DA AMOSTRA	27
3.2	PRÉ-TRATAMENTO	27
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL	28
3.3.1	ÍNDICE DE ACIDEZ	28
3.3.2	DENSIDADE	29
3.3.4	VISCOSIDADE CINEMÁTICA	30
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	30
3.5	REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	33
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO E BIODIESEL	34
4.3	VISCOSIDADE CINEMÁTICA DO ÓLEO E BIODIESEL	35
4.4	DENSIDADE DO ÓLEO E BIODIESEL	35
5	CONCLUSÃO	36
6.	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos provenientes do processo de fritura dos óleos e gorduras são altamente volumosos por se tratar de rejeitos de três grandes classes consumidoras, sendo elas, a residencial, comercial e industrial. Conforme os dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2022) o consumo de óleos com fins alimentícios no Brasil é na escala de 3 bilhões de litros por ano, e a estimativa do descarte incorreto do material é de mais de 700 milhões de litros.

A incorporação dos óleos e gorduras no ambiente acarreta problemas financeiros e ambientais. Nas redes de esgotos, os custos financeiros são gerados através dos entupimentos nas tubulações, sendo assim, necessário intervenções de produtos químicos para desobstruir o sistema. Nos fluxos de água em canal natural, os transtornos são relacionados a asfixia da vida aquática em razão da dificuldade da transferência de oxigênio da atmosfera para a água, além da liberação do gás metano. No solo, os riscos de enchentes são ampliados por efeito da ação de impermeabilização que esse resíduo causa na superfície (MENDONÇA, 2007; SILVA, 2008).

Uma das alternativas de reaproveitamento dos óleos e gorduras residuais é o uso desses resíduos como matéria-prima na produção do biodiesel. O biodiesel apresenta pontos importantes quando comparado com o diesel de petróleo na redução das emissões de enxofre, anidrido carbônico, hidrocarbonetos não queimados, material não-particulado, gases causadores do efeito estufa, compostos sulfurados e aromáticos (D'ARCE, 2005).

Um dos pontos levantados como empecilho na dispersão do biodiesel são os custos na produção, dados apontam que cerca de 70 a 95% do custo da produção do biodiesel são relacionadas às matérias-primas. O biodiesel a partir de óleos residuais apresenta como solução na redução dos custos em razão da obtenção da matéria-prima ser feita de doação. Além disso, os resíduos do óleo não são uma opção para fins alimentícios, tornando mais um ponto favorável na sua utilização na produção do biodiesel (ENCINAR *et al.*, 2011).

Considerando o acima exposto, este trabalho se propõe avaliar o potencial do óleo residual oriundo do restaurante universitário do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIODIESEL

Com as crises energéticas e debates relacionados aos impactos ambientais em alta na década de 1970 a 1990, as buscas por combustíveis alternativos ao convencional foram ganhando cada vez mais espaço no cenário mundial. A primeira aparição do uso do biodiesel em um motor diesel para o público foi no ano de 1900 na exposição mundial de Paris. A proposta do engenheiro Rudolf Diesel foi de apresentar um motor mais eficiente na conversão do calor gerado na combustão em relação ao motor comercial da época. O óleo utilizado para a alimentação do motor foi o de amendoim, a escolha da oleaginosa se deu pela vasta disponibilidade da matéria-prima nas colônias africanas (KNOTHE, 2006; ORSI, 2021).

Segundo National Biodiesel Board (1998) a definição técnica de biodiesel é “um combustível composto por ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa derivados de óleos vegetais ou gorduras animais.” Por se tratar de um combustível a partir da biomassa, o biodiesel é caracterizado como biocombustível, ou seja, combustível oriundo de matéria orgânica que tem como papel principal atender as demandas do motor de ignição, e garantir uma redução significativa na emissão de gases poluentes (RAMOS *et al.*, 2003). A Tabela 1 apresenta algumas vantagens do biodiesel relacionadas a sua propriedade.

Tabela 1 - Propriedades atribuídas ao biodiesel em comparação ao óleo diesel comercial.

Características	Propriedades Complementares
Características químicas apropriadas	Livre de enxofre e compostos aromáticos, alto número de cetanos, ponto de combustão apropriado, excelente lubricidade e biodegradável
Menos poluente	Reduz sensivelmente as emissões de (a) partículas de carbono (fumaça), (b) monóxido de carbono, (c) óxidos sulfúricos e (d) hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
Reduz aquecimento global	O gás carbônico liberado é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela emissão na atmosfera
Regionalização	Pequenas e médias plantas para produção de biodiesel, podem ser implantadas em diferentes regiões do país, aproveitando a matéria prima disponível em cada local.

Fonte: Adaptado de Ramos, 1999.

A primeira característica descrita na Tabela 1 é relacionado as propriedades químicas do biodiesel, a ausência de óxidos de enxofre tem como benefício o impedimento de chuva ácida e problemas respiratórios; o alto índice de cetano indica a capacidade de um bom desempenho de ignição; o ponto de combustão adequado é relacionado a temperatura mínima exigida para o processo da queima; a lubricidade garante um aumento da vida útil do motor, e a biodegradação facilita a decomposição do fluido em situações de vazamento no solo. Na característica relacionada a menos poluente, esse benefício está interligado ao processo de combustão na liberação da metade do CO₂ e ausência de enxofre. Por fim, o desenvolvimento regional é ocasionado através da diversificação das matérias-primas de cada lugar (BALAT, M.; BALAT, H., 2010).

2.2 BIODIESEL NO MUNDO E NO BRASIL

Conforme os dados disponibilizados pelo Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21, 2022), os biocombustíveis, etanol e biodiesel, são detentores de 3,5% do abastecimento dos transportes mundiais. Após o período pandêmico da COVID-19, os níveis de produção dos biocombustíveis recuperaram os valores já alcançados em 2019. Foram registrados apenas para a produção global do biodiesel um aumento de 26% (45 bilhões de litros), o efeito do crescimento se deu pelo aumento na produção e uso na Ásia.

O principal incentivo ao uso de energias renováveis nos transportes são as medidas governamentais, esses mandatos e metas nacionais exigem a obrigatoriedade da mistura dos biocombustíveis com os combustíveis fósseis com a finalidade de reduzir os impactos gerados pelos derivados do petróleo. Cerca de 65 países incentivam a mistura dos biocombustíveis nos combustíveis fósseis (Figura 1). Os destaques nas alterações de níveis das misturas de biodiesel foram para Argentina - 10% para 5% e Província de Manitoba - 2% para 3,5% (REN21, 2022).

Figura 1– Mapa dos mandatos sobre a mistura de biocombustível global.



Fonte: Adaptado do REN21, 2022.

No Brasil, os primeiros registros relacionados ao incentivo da produção de biodiesel foram em 1975 através do Plano de Produção de Óleos Vegetais Para Fins Energéticos - PROÓLEO. O planejamento do PROÓLEO era incentivar o uso e consequentemente a produção do biodiesel com a concentração de 30% do biodiesel no óleo diesel até chegar na substituição total pelo biodiesel. A implementação do PROÓLEO não ocorreu, e os assuntos relacionados a inserção do biodiesel foram tratados pelo Programa Nacional do Álcool - PROÁLCOOL (CASTELLANELLI, 2008).

O interesse no biodiesel foi potencializado por parte do governo quando a Europa aumentou a produção e consumo na época, além disso, as autoridades constataram a possibilidade de gerar desenvolvimento nos aspectos econômicos, sociais e ambientais no país (CASTELLANELLI, 2008). A inserção do biodiesel na matriz energética brasileira foi reconhecida em 2005 pela Lei Nº 11.097. A lei Nº 11.097 prescreve a adição do biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final. O percentual obrigatório fixado na época era de 2% (B2) (BRASIL, 2005).

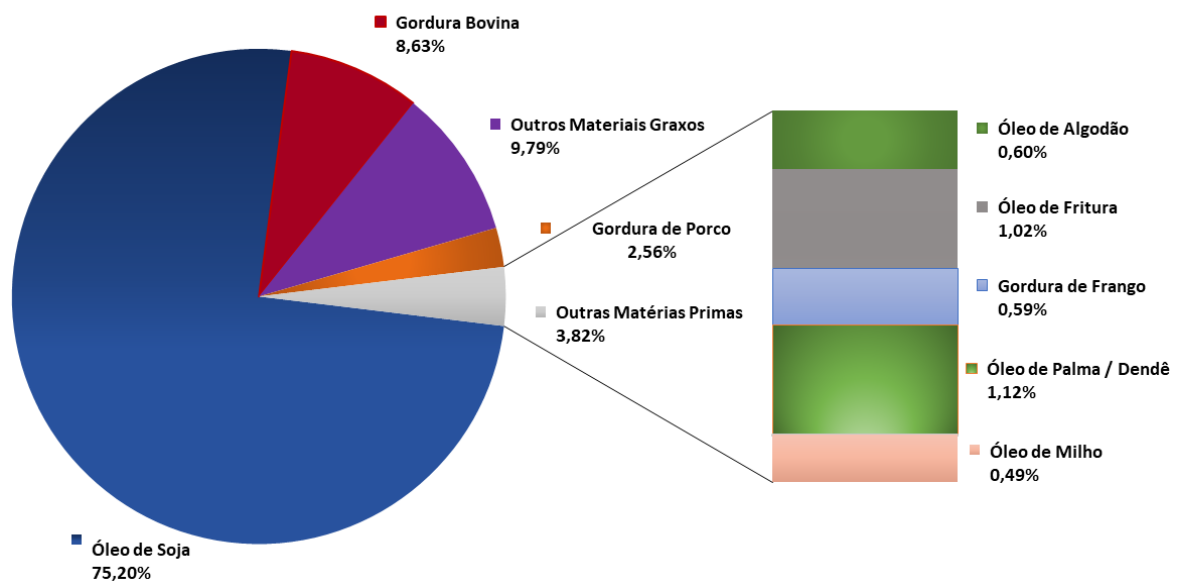
O Brasil é o segundo maior produtor mundial de biodiesel, em 2021 o volume produzido foi de 6,8 bilhões de litros apesar da redução do percentual da mistura de 12% (B12) para 10% (B10). O Conselho Nacional de Política Energética decidiu manter o percentual de 10% (B10) até março de 2023, a expectativa do percentual para o fim de 2023 é de 15% (B15) (REN21, 2022).

2.3 MATÉRIAS-PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO BIODIESEL

O biodiesel pode ser produzido a partir de óleos e gorduras de origem animal e vegetal. Os fatores considerados na escolha da matéria-prima são a disponibilidade, o percentual de óleo e a logística da coleta. Além da qualidade e rendimento do biodiesel serem influenciados pelo tipo de matéria-prima adotada, cerca de 95% dos custos da produção do biodiesel são relacionados às matérias-primas (AHN et al., 1995; ENCINAR et al., 2011).

O insumo predominante no perfil nacional para produção do Biodiesel é o óleo da soja com 75,20%, Figura 2. Através do gráfico disponibilizado pela ANP (2020) é possível observar a diversificação das matérias-primas adotadas no território brasileiro.

Figura 2 – Percentual das matérias-primas consumidas para produção de biodiesel.



Fonte: ANP, 2020.

2.3.1 ÓLEOS VEGETAIS

Os óleos vegetais destinados para a produção do biodiesel são óleos que fazem parte da categoria óleo fixo, os óleos fixos tem na sua composição os triacilgliceróis, reação química de três moléculas de ácidos graxos com uma molécula de glicerol (MORETTO; FETT, 1998). As oleaginosas que se destacam como matéria-prima são o dendê, babaçu, soja, girassol, colza, mamona e o coco (COSTA; OLIVEIRA, 2006).

Cada oleaginosa possui necessidades especiais relacionadas ao solo e clima, e algumas culturas conseguem se adaptar às novas condições expostas. Com isso, a produção de oleaginosas no Brasil possui uma diversidade, como mostra a Figura 3 (DIB, 2010).

Figura 3 – Produção de oleaginosa no Brasil.



Fonte: Dib, 2010.

2.3.2 GORDURAS DE ANIMAIS

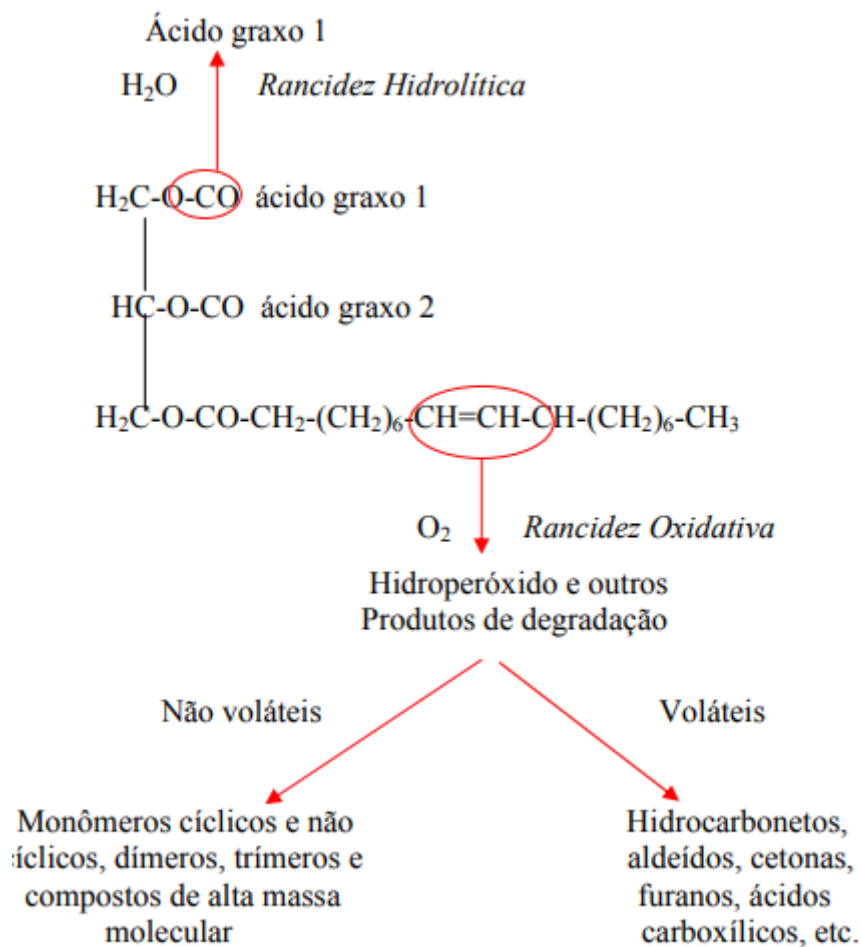
Os óleos e gorduras de animais tem na sua composição os triacilgliceróis, o que difere da estrutura desse material animal para os óleo e gorduras vegetais são a ordenação dos ácidos graxos junto com glicerol. As gorduras de animais que se destacam como matéria-prima para o biodiesel são o sebo bovino, os óleos de peixe e a banha de porco (PARENTE, 2003). O sebo bovino apresenta um elevado ponto de fusão em razão da sua composição de ácidos graxos saturados, o ácido graxo predominante no sebo bovino é o ácido esteárico (MORETO; FETT, 1998).

2.3.3 ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS

O Biodiesel pode ser produzido a partir dos óleos residuais, os óleos residuais são óleos vegetais que passaram pelo processo da fritura para a produção de alimentos nos ambientes residenciais, estabelecimentos comerciais e indústrias alimentícias. O rendimento da produção do biodiesel com esse tipo de matéria-prima é cerca de 88%, com isso, é possível constatar a eficiência do processo, além de garantir uma redução dos custos relacionados a matéria-prima, visto que a coleta dos óleos ocorre por doações (BOTELHO, 2012).

No processo da fritura, os agentes responsáveis pelas modificações das características físico-químicas do fluido são: a água, transferida através do contato com o alimento, tendo como ação as alterações hidrolíticas; e o oxigênio, resultando de alterações oxidativas, como é possível observar na Figura 4 (PLANK; LORBEER, 1994).

Figura 4 – processo hidrolítico e oxidativo dos óleos usados em frituras.



Fonte: Plank; Lorbeer, 1994.

A rancidez hidrolítica é favorecida através do contato com a água, o rompimento da ligação éster dos lipídios ocorre em razão da ação de determinadas enzimas e reações químicas no processo. Os efeitos no óleo deste mecanismo são alteração do sabor e odor indesejável. A rancidez oxidativa é considerada a principal responsável pela deterioração dos óleos. Este mecanismo inicia com a formação de radicais livres, que se juntam com o oxigênio e produzem peróxidos. Na fase da propagação, os peróxidos formados na fase inicial são acumulados, e ocasionam uma ação oxidativa nos lipídios insaturados. Por fim, na fase de terminação, os radicais livres da decomposição dos peróxidos se associam e formam compostos de baixos pesos moleculares. Os efeitos no óleo deste mecanismo são a coloração escura do óleo, aumento da acidez, odor indesejável e fluido viscoso (PEREDA et al., 2005). A forma da condução da fritura também interfere nas alterações dos óleos, na Tabela 2 é possível verificar os fatores e as suas respectivas ações.

Tabela 2 – Fatores da condução da fritura que influenciam nas alterações dos óleos.

Fator	Produto
Alimento com alto teor de água, açúcar e proteínas	Contaminação e degradação do óleo
Qualidade da frigideira inferior ao aço inox	Oxidação do óleo
Fritura descontínua	Reações oxidativas

Fonte: Lima; Gonçalves, 1995.

2.4 VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO BIODIESEL

Para inserção do combustível alternativo ao óleo diesel mineral, é necessário que o candidato atenda quatro aspectos relacionados às propriedades físicas e/ou químicas do combustível, sendo elas, a combustibilidade, impactos ambientais das emissões, compatibilidade ao uso e a compatibilidade ao manuseio (PARENTE, 2003).

2.4.1 COMBUSTIBILIDADE

A combustibilidade trata-se da capacidade do combustível de ocasionar a combustão, possibilitando a conversão de energia química para energia mecânica. A qualidade de combustão é quantificada através do número de cetano da substância. Para substâncias com o

menor tempo de autoignição, o número de cetano será alto e o combustível de boa qualidade. Já para substâncias com número de cetano pequeno, tende um maior tempo de autoignição e situações indesejáveis, como, falhas no motor, queima incompleta do combustível e temperatura altas no interior do cilindro (VAN GERPEN, 2006).

O biodiesel apresenta como composição química os ésteres alquílicos de ácidos graxos e longas estruturas moleculares de cadeias carbônicas lineares, com isso, o número de cetano do biodiesel é superior ao combustível convencional, e consequentemente a qualidade de ignição se torna superior. Dentro das opções de matéria-prima para a produção do biodiesel, os óleos de palma e o sebo bovino são superiores aos óleos vegetais insaturados, soja e girassol, relativamente ao número de cetano. Os óleos residuais provenientes de fritura, apresentam um número superior de cetano em comparação com os óleos virgens em razão do nível de saturação mais elevado (KNOTHE, 2006).

Outro fator importante da combustibilidade é o poder calorífico, essa medida trata-se da quantidade de energia liberada no processo da combustão. É de suma importância a quantidade do poder calorífico do combustível, pois é através desse dado que é possível dimensionar o consumo, isto é, quanto maior o poder calorífico maior será a energia do combustível. O poder calorífico é relacionado a densidade, portanto, existem diferentes valores por efeito da diversidade das matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel. Apesar da diversificação dos poderes caloríficos das matérias-primas, quando comparado com o óleo diesel derivado do petróleo o poder calorífico do biodiesel é 9% inferior (ABROBIO, 2007; PERES *et al.*, 2007).

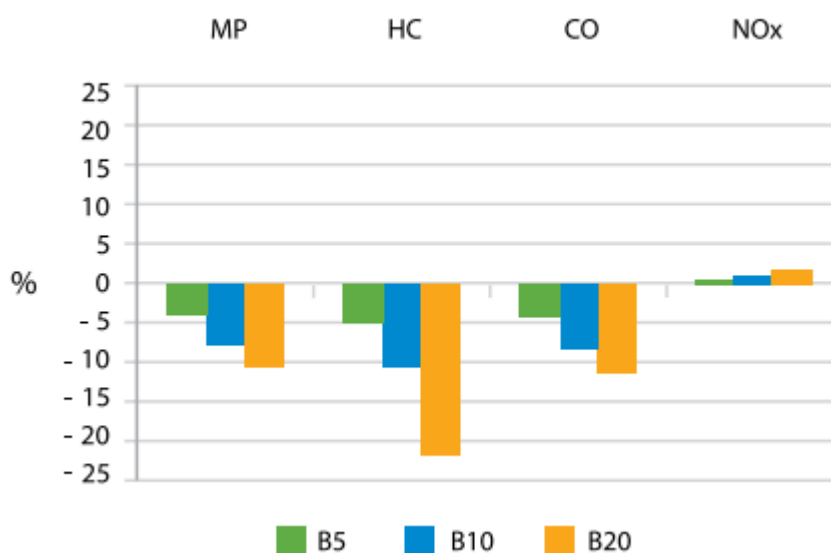
A viscosidade é uma propriedade que interfere na combustibilidade da substância, a propriedade trata-se da capacidade do líquido em escoar mesmo com o atrito interno das moléculas de uma parte do líquido como obstáculo (KNOTHE, 2006). Combustíveis com alta viscosidade apresentam queima incompleta na câmara de combustão, fumaça preta, depósitos e gomas (VAN GERPEN, 2006). Embora a viscosidade dos óleos vegetais apresenta valores altos, o biodiesel resultante dos óleos vegetais possui valores reduzidos relativamente aos óleos vegetais de origem. O mesmo fenômeno acontece com o biodiesel oriundo de óleos residuais, além disso, os valores são bem próximos da viscosidade do óleo diesel mineral (KNOTHE, 2006).

2.4.2 IMPACTOS RELACIONADO AS EMISSÕES

O uso dos combustíveis e biocombustíveis geram impactos ambientais, o que difere um do outro é a proporção dos danos causados ao meio ambiente, motor e a saúde humana. No caso do óleo diesel, um dos maiores responsáveis pelos danos é o teor de enxofre. No processo da combustão, o ácido sulfúrico é formado através da junção do trióxido de enxofre com a água, tendo como resultado corrosões nas partes metálicas do motor, sendo elas, mancais, guias de válvulas e entre outros. O aumento da reação ocasiona um aumento nas emissões de material particulado e poluentes primários, substâncias que interfere na saúde humana. No meio ambiente, a chuva ácida é formada através da junção do dióxido de enxofre e a umidade atmosférica, o resultado dessa reação é a acidificação do solo e da água (CNT, 2023).

A utilização do biodiesel de forma parcial ou total garante uma redução nas emissões dos poluentes atmosféricos, por se tratar de uma substância livre de metais e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Na Figura 5, é possível visualizar os efeitos das reduções das emissões conforme as concentrações de adição do biodiesel (EPA, 2002).

Figura 5 – Efeito da adição de biodiesel nas emissões.



Fonte: Epa, 2002.

Conforme apresentado na Figura 5, o uso do B5 gera uma redução de 5% na emissão de hidrocarbonetos (HC), em 4% na emissão de monóxido de carbono (CO), 4% na emissão de materiais particulados (MP) e um pequeno incremento nas emissões do óxido de nitrogênio

(NO_x). No uso do B10, a redução atingi níveis superiores em relação ao B5, sendo eles, 8% na emissão de hidrocarbonetos (HC), cerca de 10% na emissão de monóxido de carbono (CO), 9% na emissão de materiais particulados (MP) e um pequeno incremento nas emissões do óxido de nitrogênio (NO_x). As reduções no B20 foram as mais expressivas, na emissão de hidrocarbonetos (HC) o valor foi próximo 21%, na emissão de monóxido de carbono (CO) a porcentagem é cerca de 11%, na emissão de materiais particulados (MP) a porcentagem é cerca de 10% e um incremento pequena nas emissões do óxido de nitrogênio (NO_x) (EPA, 2002).

2.4.3 COMPATIBILIDADE AO USO

A compatibilidade refere-se ao desempenho do motor e do sistema de injeção, isto é, lubricidade e fluxo a frio do combustível. A lubricidade nos motores Diesel ocorre por efeito do próprio combustível. No óleo diesel, o responsável pela lubrificação natural é o enxofre presente na substância, vale ressaltar que esse elemento contribui com as ações corrosivas e emissões de poluentes (PARENTE, 2003).

De acordo com Holanda (2004, p.112) “O poder de lubrificação do motor do biodiesel é muito superior ao diesel convencional”. Além da superioridade na lubrificação, o biodiesel é livre na sua composição de enxofre. Na forma parcial do biodiesel, ou seja, mistura do biodiesel e diesel convencional, o desempenho da lubrificação é observado a partir de concentração B2 (HOLANDA, 2004).

O fluxo a frio do combustível trata-se do desempenho da operação do líquido em determinadas temperaturas, ou seja, capacidade de deter o entupimento dos filtros em razão da solidificação do combustível. A formação dos cristais do óleo diesel mineral, início do processo da solidificação, ocorre em temperaturas próximas a -15°C. Já no biodiesel, a temperatura varia conforme a composição da matéria-prima (KNOTHE, 2006).

A cristalização do biodiesel derivado dos óleos vegetais ocorre em temperatura próxima de 0°C, já o biodiesel de origem de gordura animal, tem registro de temperaturas próximas a 15°C. Os óleos residuais provenientes de fritura são passíveis a solidificação em baixas temperaturas por efeito do nível de saturação elevado em comparação aos óleos vegetais virgens (KNOTHE, 2006; VAN GEROEN, 2006).

2.4.4 COMPATIBILIDADE AO MANUSEIO

A compatibilidade ao manuseio descreve a logística relacionada ao armazenamento, transporte, distribuição e segurança na operação do combustível. A propriedade relativa ao manuseio é o ponto de fulgor (PARENTE, 2003).

O ponto de fulgor trata-se da temperatura mínima que o fluido com o ar inicia a combustão na presença de uma fonte de calor. É de suma importância ter conhecimento da temperatura correspondente de cada combustível para destinar um tratamento seguro na produção, ou seja, evitando incêndio no local de armazenamento e no transporte até as bombas de combustíveis. O ponto de fulgor do óleo diesel mineral é de cerca de 60 °C e o do biodiesel é superior a 150 °C, com isso é possível garantir uma segurança no manuseio dos dois fluidos, visto que as temperaturas são superiores à temperatura ambiente (PARENTE, 2003).

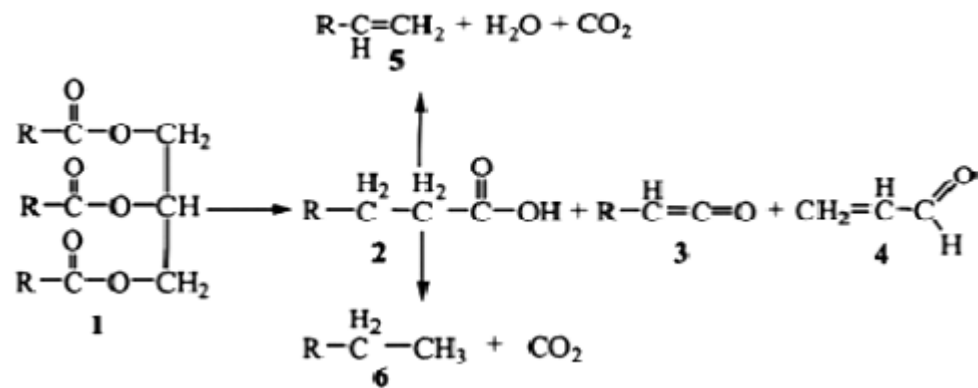
2.5 TECNOLOGIA PARA A PRODUÇÃO DO BIODIESEL

Após a escolha da matéria-prima, o próximo passo refere-se a tecnologia adotada para a obtenção do biodiesel. Existem 3 principais métodos para essa finalidade, sendo eles, pirólise, esterificação e transesterificação. O principal objetivo é reduzir o índice de viscosidade da matéria-prima, isto é, transformando os triglicerídeos e/ou ácidos graxos em um fluido com um alto desempenho de lubricidade e uma vida útil do motor estendida (GOMES, 2009).

2.5.1 PIRÓLISE

O processo da pirólise, conhecida também como craqueamento térmico, consiste na transformação de uma substância em outra na presença do calor. A transformação ocorre graças a quebra de moléculas em temperaturas superiores a 450 °C (GOMES, 2009). Na Figura 6 é possível observar o mecanismo da pirólise de óleos e gorduras.

Figura 6 – pirólise de óleos e gorduras.



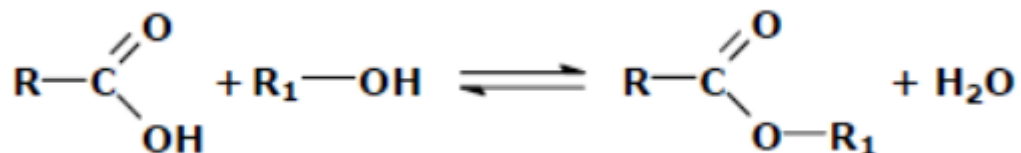
Fonte: Gomes, 2009.

Com a quebra da molécula com o auxílio do aquecimento (1), o próximo passo da reação é o surgimento de ácidos carboxílicos (2), cetenos (3) e acroleína (4). Além dessas substâncias, surgem a possibilidade da formação de hidrocarboneto com insaturação, água e CO_2 (5) ou hidrocarboneto sem insaturação terminal e CO_2 (6). As vantagens da utilização desse processo são os resultados próximos da viscosidade do óleo diesel mineral, a rapidez e simplicidade do processo. Já em contrapartida, o gargalo do processo é o seu alto custo e formação de moléculas oxigenadas com alto teor de acidez (GOMES,2009).

2.5.2 ESTERIFICAÇÃO

A esterificação é a reação química de um ácido carboxílico com um álcool que tem como produto ésteres e água, Figura 7.

Figura 7 - Reação de Esterificação.



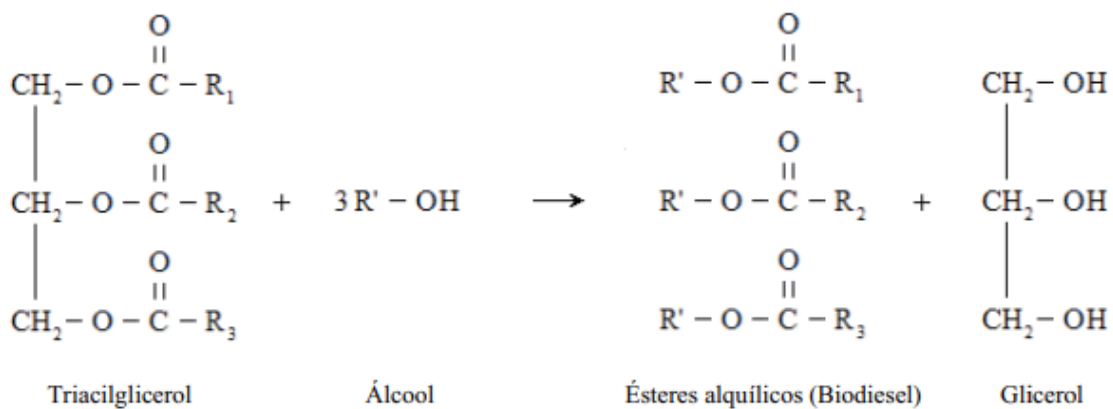
Fonte: Berrios et al., 2010.

É recomendado a utilização dessa tecnologia para etapas que antecedem a transesterificação em razão da redução de acidez promovida pelo mecanismo da reação e/ou como rota principal na produção de biodiesel derivada de matéria-prima com altas concentrações de ácidos graxos. A vantagem da esterificação é a não formação de sabão e glicerina, e a familiaridade com matérias-primas complexas, isto é, sem a necessidade de intermédio de técnicas para o manuseio de alguns insumos. Por se tratar de uma reação reversível, a desvantagem do processo são os possíveis surgimentos de reações de hidrólise (BERRIOS et al., 2010).

2.5.3 TRANSESTERIFICAÇÃO

A transesterificação consiste na interação dos triacilglicerol com um álcool, gerando como produto e coproduto os ésteres etílicos e o glicerol, Figura 8.

Figura 8- Reação de Transesterificação.



Fonte: Dib, 2010.

No mecanismo da reação química da transesterificação, os teores de triacilglicerol e quantidade de produto dependem do tipo de matéria-prima e o tratamento adotado para o insumo. Ainda na Figura 8, os radicais representados como R1, R2 e R3 são correspondentes as cadeias de ácido graxos ligados ao glicerol, por exemplo, palmítico, esteárico, oléico, linoléico e linolênico, já o radical R' representa a cadeia de hidrocarboneto do álcool (DIB,

2010). A transesterificação pode ser influenciada por 4 variáveis de operação, sendo elas, a temperatura e tempo da reação, proporção de álcool e óleo, tipo de matéria-prima e o tipo de catalisador.

As temperaturas adotadas na operação são temperaturas próximas a temperaturas de ebulição do álcool utilizado na reação, entretanto estudos apontam um bom rendimento da reação em temperaturas próximas à temperatura ambiente. Por efeito do tipo de álcool utilizado no processo, a proporção molar álcool:triacilgliceróis é definida através do tipo de álcool inserido, desta forma, para reação com etanol a proporção deve ser maior do que com o metanol em razão deste álcool ser menos reativo. No ponto de vista da matéria-prima escolhida, os teores de água e de ácidos graxos livres interferem com o surgimento de outras reações indesejáveis e competitivas (FREEDMAN *et al.*, 1984).

A seleção do catalisador interfere no desempenho da produção, isto é, no custo e velocidade da reação. Os requisitos adotados para a seleção do tipo de catalisador é a composição química do óleo derivado da matéria-prima escolhida. Os catalisadores mais utilizados são os biocatalisadores, catalisadores homogêneos e catalisadores heterogêneos (ORSI, 2021).

Os biocatalisadores, conhecidos também como lipases, são processos enzimáticos com a finalidade de eliminar os ácidos graxos livres, substância indesejável na produção do biodiesel. A eliminação ocorre graças a hidrólise do óleo e gorduras. As vantagens deste tipo de catalisador são a redução de subprodutos e resíduos, além de condições de operação moderadas, sendo elas, a temperatura e pressão. A desvantagem no âmbito industrial é o alto custo por efeito da tecnologia utilizada para isolar e purificar esse material (ORSI, 2021).

Em razão da diferença de estado dos catalisadores heterogêneos, é possível reaproveitar o catalisador, visto que a separação deste material é mais simples em relação ao uso do catalisador homogêneo, além de suspender a etapa da lavagem do biodiesel. No âmbito industrial, o rendimento do biodiesel é superior em comparação ao homogêneo. Apesar das vantagens mencionadas, as desvantagens do uso deste material são o consumo de energia e os altos custos no processo. É comumente mais utilizado os catalisadores heterogêneos básico em virtude da ativação do catalisador em temperaturas próximas a da evaporação do metanol (ORSI, 2021).

Os catalisadores homogêneos são os catalisadores mais utilizados na produção do biodiesel devido à rapidez na transformação dos triglicerídeos em ésteres, além disso, é possível obter uma alta eficiência com uma certa rapidez e simplicidade na execução (ORSI, 2021).

Para matéria-prima com altos índices de acidez, o recomendado é a utilização de catalisadores homogêneos ácidos, visto que o catalisador não tem distinção de insumos com ácidos graxos livre na sua composição. As desvantagens da utilização deste material são as ocorrências de corrosão nos equipamentos, formação de subprodutos e variáveis de operações altas. Os ácidos mais utilizados são o sulfúrico, clorídrico e o sulfônico (LOTERO *et al.*, 2005; ORSI, 2021).

Dentro dos catalisadores homogêneos mais utilizados, os catalisadores básicos possuem destaque em virtude da rapidez e ações corrosivas reduzidas. Além destes pontos, as condições de operações são moderadas e econômicas (ORSI, 2021).

3 METODOLOGIA

Para validar o desempenho da produção do biodiesel derivado de óleos residuais, isto é, rendimento mínimo de 96,7% de ésteres, parâmetro estabelecido pela resolução n.º 45/2014, análises estabelecidas pela ANP foram executadas. As análises realizadas foram: viscosidade, densidade e índice de acidez. Os experimentos foram realizados no Laboratório Multidisciplinar do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA).

3.1 COLETA DA AMOSTRA

O óleo residual deste trabalho foi fornecido pelo restaurante universitário situado no campus de Engenharias e Ciências Agrárias. O RU oferece apenas almoço para os seguintes públicos: discente de graduação e pós-graduação, servidores, terceirizados e visitantes. A escolha do local da doação do óleo residual deste trabalho teve os seguintes critérios: a destinação de 6 litros de óleos que o restaurante consome por semana, e a logística do transporte da amostra até o laboratório, visto que o laboratório e o RU são situados na mesma unidade acadêmica.

3.2 PRÉ-TRATAMENTO

Com o óleo devidamente armazenado nas instalações do laboratório multidisciplinar, o primeiro passo foi se certificar que o óleo não tinha partículas em suspensão e encaminhar para a filtração deste fluido. A filtração do óleo ocorreu com o auxílio de um funil em razão da viabilidade econômica no processo. Após o processo inicial da filtração, o óleo foi direcionado até a estufa com a finalidade de realizar a secagem da amostra. Na Figura 9 é possível visualizar o óleo no processo da secagem.

Figura 9 - Óleo na estufa.



Fonte: A autora, 2022.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL

3.3.1 ÍNDICE DE ACIDEZ

O índice de acidez corresponde com a quantidade de hidróxido de potássio ou sódio capaz de neutralizar os ácidos graxos livres da substância. O óleo analisado deve apresentar um baixo teor de acidez dado que o aumento da vida útil do motor é relacionado a essa variável. Os impactos negativos de altos índices de acidez são: deterioração do produto e corrosão das peças metálicas (BRASIL, 2021; SILVA, 2008).

O procedimento seguiu as orientações de Adolf Lutz (2008). A metodologia descrita pelo pesquisador consiste o hidróxido de sódio 0,1 M como titulante. Inicialmente o óleo acondicionado no Erlenmeyer foi aferido para corresponder 2 g. Após a medição, foi adicionado 25 mL de solução de éter etílico – etanol (2:1) no Erlenmeyer do óleo, e duas gotas do indicador fenolftaleína. A solução de hidróxido de sódio 0,1 M foi acrescentada através da torneira da bureta para garantir o registro visual da coloração rósea com o máximo de precisão possível. O índice de acidez foi calculado através da Equação 1.

$$I.A = \frac{V.f.M.28,2}{m} \quad (1)$$

Onde:

$I.A$ = Índice de acidez;

V = volume da solução de hidróxido de sódio, em mL;

f = Fator da solução do hidróxido de sódio;

M = Molaridade do hidróxido de sódio;

m = massa da amostra, g.

3.3.2 DENSIDADE

A preparação do teste iniciou com o ajuste na temperatura para 20 °C de um Erlenmeyer composto de água e gelo, esse mecanismo foi executado para fornecer um controle térmico no béquer com o óleo, deste modo, o béquer com a amostra ficou flutuando no Erlenmeyer com água. As medidas da densidade da amostra foram registradas através do visor do densímetro em contato direto com o óleo.

A densidade é de suma importância para o processo de combustão, o resultado dessa variável interfere na partida e pressão da injeção, além de estar relacionado com o número de cetano e calor de combustão, características de desempenho do motor (BAHADUR *et al.*, 1995).

Figura 10 - Controle térmico da amostra.



Fonte: A autora, 2022.

3.3.4 VISCOSIDADE CINEMÁTICA

Segundo Rosas (2008, p. 57) “A viscosidade é a medida da resistência de um fluido à deformação causada por uma tensão cisalhante.” Valores altos de viscosidade interfere no sacrifício da bomba injetora, isto é, o componente acaba trabalhando o dobro para promover a circulação do fluido. Além disso, a eficiência da automação dos bicos injetores é reduzida em razão dos resíduos presentes no fluido. Para valores de viscosidades baixas, a interferência ocorre nos vazamentos no sistema de alimentação. Os valores da viscosidade do biodiesel apresentam resultados superiores em relação ao Diesel A (aquele que não tem adição de biodiesel), e resultados inferiores aos óleos vegetais (BRASIL, 2021).

O viscosímetro utilizado foi o Ostwald de 200. O banho foi preparado para temperatura de 40 °C, temperatura definida pela resolução ANP nº45/2014 para esse parâmetro. Após atingir a temperatura estabelecida, foi adicionado 8 mL de amostra na maior entrada do viscosímetro. Na entrada inferior foi adicionado um pepitador visando encaminhar a amostra para o menisco superior. O tempo foi registrado a partir do momento que a amostra começou a escoar do menisco superior até o menisco inferior. O cálculo adotado para determinar a viscosidade do óleo residual é descrito logo abaixo, equação 2.

$$U = t \cdot K \quad (2)$$

Onde:

U = Viscosidade em cst;

t = Média dos tempos em segundos;

K = Constante do viscosímetro, para o viscosímetro de 200 o K é 0,1123 mm²/s².

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental (PE) trata-se de um roteiro de experimentos que promove combinações das variáveis operacionais através de critérios científicos. Por meio da elaboração do planejamento, é possível determinar a variável que mais influência sobre o rendimento do biodiesel. As configurações do planejamento experimental com os óleos residuais como

matéria-prima para o biodiesel foi: fatorial completo com 2 níveis e 3 variáveis. Os parâmetros fixos e variáveis adotados neste trabalho teve como base estudos presentes na literatura. Na Tabela 3 descreve os parâmetros fixos adotados nos ensaios.

Tabela 3 - Parâmetros fixos adotados nos ensaios.

Parâmetros Fixos	
Razão molar óleo/álcool	1/8
Quantidade de catalisador	1,5% da massa do óleo
Tempo de reação	60 min.

Fonte: A autora, 2022.

As variáveis estudadas no planejamento foram: o tipo de álcool; o tipo de catalisador e a temperatura, Tabela 4. As alternativas de cada parâmetro foram selecionadas conforme as características de cada substância, exemplificando, no fator do tipo de álcool a seleção teve como critério o etanol por ser derivado de uma fonte renovável, e o metanol por ser o álcool mais utilizado nas usinas produtoras de biodiesel, detendo de um excelente acervo de resultados. No fator tipo de catalisador, o KOH e o NaOH foram selecionados por se tratar de bases fortes e efetivos. Já no ponto de vista da temperatura, foi selecionada a temperatura ambiente pelas razões relacionadas a redução dos custos do processo e uma temperatura superior para examinar as possíveis mudanças.

Tabela 4 - Níveis do planejamento experimental

Nível	Álcool	Catalisador	Temperatura
-1	Metanol	NaOH	28 °C
+1	Etanol	KOH	50 °C

Fonte: A autora, 2022.

3.5 REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

O instrumento utilizado para a execução dos ensaios foi um agitador magnético, um béquer e uma chapa aquecedora. O catalisador e o álcool selecionados na rodada da execução, seleção

pré-estabelecida pelo planejamento experimental, foram adicionados as duas substâncias no béquer e quando a homogeneidade foi atingida, o óleo foi acrescentado ao compartimento na temperatura pré-estabelecida no PE. Após o tempo de 60 min da reação, a amostra foi inserida no funil de separação com a finalidade de desassociar com a glicerina produzida, Figura 11. Por fim, o biodiesel foi direcionado para a estufa para reduzir a possível umidade presente na amostra. A determinação do rendimento de cada ensaio foi determinada via cromatografia gasosa através do cromatógrafo SHIMADU modelo CG-Plus.

Figura 11 - separação do biodiesel com a glicerina



Fonte: A autora, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar os efeitos individuais e interações das variáveis sobre o rendimento do biodiesel derivado do óleo residual, uma matriz de planejamento experimental 2^3 foi confeccionada, Tabela 5. O planejamento fatorial 2^3 concede 8 combinações, ou seja, 8 experimentos com todas as interações possíveis para a configuração. Os experimentos foram executados em duplicidade com a finalidade de validar os resultados obtidos.

Tabela 5 - Matriz de planejamento fatorial 2^3

Experimento	Álcool	Catalisador	Temperatura	R1 (%)	R2 (%)	RM (%)
1	-1	-1	-1	90,4	91,0	90,7
2	+1	-1	-1	64,2	65,1	64,7
3	-1	+1	-1	91,2	90,9	91,1
4	+1	+1	-1	68,1	68,8	68,5
5	-1	-1	+1	97,8	97,1	97,5
6	+1	-1	+1	78,1	77,2	77,7
7	-1	+1	+1	99,2	98,7	98,9
8	+1	+1	+1	79,9	78,2	79,1

Fonte: A autora, 2023.

A partir dos dados da Tabela 5 é possível observar que entre 8 experimentos executados, apenas 2 alcançaram o rendimento estabelecido pela ANP, sendo eles, o experimento 5 e 7. O maior rendimento adquirido foi o experimento 7 com as seguintes combinações: metanol, KOH e 50 °C, e o pior rendimento foi de 64,7% com as seguintes combinações: etanol, NaOH, e 28 °C. Ainda na Tabela 5, é possível extrair as informações dos efeitos individuais e as interações das variáveis. A Tabela 6 apresenta com mais detalhes os valores encontrados de cada efeito.

Tabela 6 - Efeitos dos fatores do planejamento experimental.

Fator	Efeito
Efeitos Principais	
Álcool	-22,07
Catalisador	1,77
Temperatura (°C)	9,5
Interações de dois fatores	
Álcool – Catalisador	1,2
Álcool – Temperatura	2,22
Catalisador – Temperatura	-0,325
Interações entre os três fatores	
Álcool – Catalisador – Temp.	-0,875

Fonte: A autora, 2023.

De acordo com os dados da Tabela 6, a elevação da temperatura de 28 °C para 50 °C proporcionou uma eficiência no processo de (9,5%). No ponto de vista da interação de dois fatores, o maior ganho foi na interação álcool e temperatura (2,22%). A maior redução no rendimento ocorreu através da troca do metanol para o etanol (-22,07%), isto é, a substituição tornou o processo ineficiente. Além disso, a interação entre os três fatores apresentou uma redução no rendimento em torno de (-0,875%).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO E BIODIESEL

O óleo residual apresentou um alto índice de acidez em comparação com o valor de referência da ANP. Segundo BRASIL (2021) a razão do índice superior do óleo residual é associada ao processo de fritura e as reações químicas ocorridas durante o aquecimento do óleo, por exemplo, hidrólise, oxidação e polimerização. Além disso, a forma de armazenamento e manuseio também são candidatos a responsáveis dos altos índices de acidez. A análise do índice de acidez do óleo foi executada com a finalidade de qualificar a matéria-prima do biodiesel produzido. Os testes de acidez foram realizados com os experimentos do planejamento experimental que atingiram o rendimento estabelecido pela ANP. Diferente do valor do óleo, o índice de acidez teve um resultado dentro do limite permitido em razão da eficiência da transesterificação, Tabela 7.

Tabela 7 - Valores dos índices de acidez do óleo e biodiesel

Valor de Referência	Óleo residual	Biodiesel
< 0,50 KOH/g	1,13	0,31

Fonte: A autora, 2023.

4.3 VISCOSIDADE CINEMÁTICA DO ÓLEO E BIODIESEL

A Tabela 8 mostra os valores da viscosidade obtidos nos testes do óleo e biodiesel. O valor superior do óleo pode ser associado a composição em ácidos graxos da amostra, além, da contaminação no manuseio e armazenamento do líquido. Para os experimentos do PE que atenderam o rendimento, a média do valor apresentou um resultado satisfatório da reação da transesterificação, visto que a viscosidade encontra-se dentro do limite estabelecido.

Tabela 8 - Resultado da viscosidade do óleo e biodiesel

Valor de Referência	Óleo residual	Biodiesel
3 a 6 mm²/s	37,66	4,92

Fonte: A autora, 2023.

4.4 DENSIDADE DO ÓLEO E BIODIESEL

A densidade do óleo residual apresentou um valor da densidade superior que o estabelecido pela resolução, esse resultado pode ser associado às partículas e impurezas presentes na amostra, além das reações ocorridas no processo da fritura. O resultado da densidade do biodiesel encontra-se dentro do limite estabelecido pela ANP.

Tabela 9 - Resultado da densidade do óleo e biodiesel

Valor de Referência	Óleo residual	Biodiesel
850 a 900 kg/m³	915	861

Fonte: A autora, 2023.

5 CONCLUSÃO

As alternativas de reaproveitamento do óleo residual têm como papel principal reduzir os impactos ambientais e financeiros gerados pelo descarte inapropriado do líquido. A utilização do óleo residual como matéria-prima para a produção de biodiesel além de destinar uma nova função para o resíduo, apresenta uma boa viabilidade técnica.

Para avaliar as condições que favorecem um maior rendimento no processo, o planejamento experimental foi executado. Dos 8 experimentos realizados, duas configurações de combinações atenderam o rendimento mínimo de 96,7%, o destaque na combinação foi com as seguintes variáveis: metanol, KOH e temperatura de 50°C, gerando um rendimento de 98,9%. A combinação que apresentou o pior resultado foi a do etanol, NaOH e temperatura de 28 °C. A elevação da temperatura foi o efeito individual que mais gerou uma eficiência no processo (9,5%), já a modificação do metanol para o etanol apresentou um impacto negativo de - 22,07%.

Conforme os resultados de caracterização do óleo residual, o índice de acidez teve um resultado alto em razão do seu processo de fritura e armazenamento, em contrapartida, o índice de acidez do biodiesel do óleo residual apresentou um resultado satisfatório. Nos parâmetros da viscosidade e densidade, o óleo residual teve um resultado superior ao estabelecido, esses resultados são relacionados ao processo da fritura do óleo, já o biodiesel desse mesmo material teve o resultado dentro do limite estabelecido. Devido às limitações laboratoriais, algumas caracterizações físico-químicas do biodiesel puro não foram realizadas, sendo elas, ponto de fulgor, estabilidade à oxidação a 110°C, glicerina livre, índice de saponificação, índice de peróxidos, resíduo de carbono e teor de água.

Com os fatos mencionados acima, é possível concluir que os parâmetros analisados no biodiesel estão de acordo com os limites estabelecidos pela ANP. Desta forma, o potencial do óleo residual como matéria-prima para o biodiesel apresenta resultados satisfatórios em relação aos custos da matéria-prima, baixo valor comercial do insumo, além da eficiência na produção do biocombustível.

6. REFERÊNCIAS

ABIOVE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 05 jan. 2022

ABROBIO (ed.). **Biodiesel e suas propriedades**. 2017. Disponível em: <https://aprobio.com.br/noticia/biodiesel-e-suas-propriedades#:~:text=O%20poder%20calor%C3%ADfico%20do%20biodiesel,petr%C3%B3leo%20classificado%20como%20N%C3%BAmero%202..> Acesso em: 23 jan. 2023.

AHN, E. et al. A Low-Waste Process for the Production of Biodiesel. *Separation Science and Technology*, v. 30, n. 7-9, p. 2021–2033, 1995.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) (2020). **Percentual das matérias-primas utilizadas para produção de biodiesel**. Disponível em: <https://www.anp.gov.br>. Acesso em: 10/01/2023.

BAHADUR, N. P., BOOCOOCK, D. G. B., KONAR, S. K. **Liquid Hydrocarbons from Catalytic Pyrolysis of Sewage Sludge Lipid and Canola Oil: Evaluation of Fuel Properties**. *Energy & Fuels*, v. 2, p. 248-256, 1995.

BALAT, M.; BALAT, H., Progress in biodiesel processing. *Applied Energy* **2010**, 87, (6), 1815-1835.

BOTELHO, C. A. V. A. **Viabilidade técnica e aspectos ambientais do biodiesel etílico de óleos e gorduras de fritura residuais**. São Paulo: Dissertação (Defesa de Mestrado), Universidade de São Paulo, 2012.

BERRIOS, M. et al. Study of esterification and transesterification in biodiesel production from used frying oils in a closed system. **Chemical Engineering Journal**, v. 160, n. 2, p. 473–479, 2010.

BRASIL. Lei Nº 11.097, de janeiro 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências.

BRASIL. ANP. Nota Técnica nº 10 de 16 de novembro de 2021. Análise de Impacto Regulatório-Especificações Nacionais do Biodiesel (B100). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos/1607120-especificacoes-nacionais-do-biodiesel-b100.pdf> . Acesso em: 07/02/2023.

CASTELLANELLI, Carlo Alessandro. **ESTUDO DA VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL, OBTIDO ATRAVÉS DO ÓLEO DE FRITURA USADO, NA CIDADE DE SANTA MARIA - RS**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de

Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8059/CARLOALESSANDROCASTELLANELLI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 jan. 2023.

CNT (org.). **Os impactos da má qualidade do óleo diesel brasileiro**. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/bitstream/123456789/161/1/Cartilha%20-%20Os%20impactos%20da%20m%C3%A1%20qualidade%20do%20%C3%B3leo%20diesel%20brasileiro.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2023.

COSTA, B. J.; OLIVEIRA, S. M. M. **Dossiê técnico: óleo de soja**. Curitiba: [S.n.], 2006. 27 p. Disponível em: <https://www.sbrt.ibict.br>. Acesso em: 10/01/2023.

D'ARCE, M. A. B. R. *Matérias-primas oleaginosas e biodiesel*. ESALQ/USP, setor de açúcar e álcool, 2005.

DIB, Fernando Henrique. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEO RESIDUAL RECICLADO E REALIZAÇÃO DE TESTES COMPARATIVOS COM OUTROS TIPOS DE BIODIESEL E PROPORÇÕES DE MISTURA EM UM MOTO-GERADOR**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2010. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88869/dib_fh_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10/01/2023.

ENCINAR, J. M.; SÁNCHEZ, N.; MARTÍNEZ, G.; GARCÍA, L., Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresource Technology* **2011**, 102, (23), 10907-10914.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, Draft Technical Report, EPA420-P-02001, (2002).

FREEDMAN, B; MOUNTS, T. L.; PRYDE E. H. (1984). Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, n. 61, p.1638-1643, 1984.

GOMES, Michelle Mendes da Rocha. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA ESTERIFICAÇÃO DOS ÁCIDOS GRAXOS OBTIDOS POR HIDRÓLISE DE ÓLEO DE PEIXE**. 2009. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/biodiesel-de-oleo-residual-de-peixe.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023.

HOLANDA, A. (2004). **Biodiesel e inclusão social**. Coordenação de Publicações. Brasília: Câmara dos Deputados, Série Cadernos de Altos Estudos nº1, 2004.

KNOTHE, G. (2006b). A Viscosidade do Biodiesel. In: KNOTHE et al. **Manual de biodiesel**. Tradução Luiz Pereira Ramos. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

KNOTHE, G. A História dos Combustíveis Derivados de Óleos Vegetais. In: KNOTHE et al. **Manual de biodiesel**. Tradução Luiz Pereira Ramos. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LIMA, J.R; GONÇALVES, L.A.G. O processo de fritura: Alterações observadas em óleos e gorduras. Boletim SBCTA, 29(2): 179-185, Campinas. São Paulo, 1995.

LOTERO, E., Y. LIU, D.E. LOPEZ, K. SUWANNAKARN, D.A. BRUCE, and J.G.J. GOODWIN, Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis, *Ind. Eng. Chem. Res.* 44:5353–5363 (2005).

MENDONÇA, Marcio Antônio. **Avaliação das alterações físico-químicas em óleos submetidos ao processo de fritura em unidades de produção de refeição em Brasília – DF**. 2007. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia dos Alimentos, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/196/1/2007_MarcioAntonioMendonca.pdf. Acesso em: 05 jan. 2023.

MORETTO, E; FETT, R. (1998) **Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos**. São Paulo: Livraria Valera. 1998.

MORETTO, E; FETT, R. (1998) **Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos**. São Paulo: Livraria Valera. 1998.

NATIONAL BIODIESEL BOARD; In: *Anais do Congresso Internacional de Biocombustíveis Líquidos*; Instituto de Tecnologia do Paraná; Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior; Curitiba, PR, 19 a 22 de julho, p. 42; 1998.

ORSI, Helena Medeiros. **Tecnologias de Produção de Biodiesel: Uma Revisão**. 2021. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/15395/Tecnologias%20de%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Biodiesel%20-%20Uma%20Revis%C3%A3o%20-TG%20Helena%20Medeiros%20Orsi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 jan. 2023.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**, Fortaleza: [S.n.], 2003. 66 p. Disponível em: <http://www.tecbio.com.br/artigos/Livro-Biodiesel.pdf> . Acesso em: 11/01/2023.

PEREDA, J.A.O.; RODRIGUEZ, M.I.C.; ALVAREZ, L.F.; SANZ, M.L.G.; MIGUILLON, G.D.G.F.; PERALES, L.L.H.; CORTECERO, M.D.S. Tecnologia de Alimentos. Volume 01. p.33-49. Componentes dos alimentos e processos. Artmed, 2005.

PERES, S.; SCHULER, A.; ALMEIDA, C.; CAMPOS, R.; LUCENA, A. Caracterização e determinação do poder calorífico e do número de cetano de vários tipos de biodiesel através de cromatografia. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2., Brasília, 2007. **Anais ...** Brasília: RBTB, 2007.

PLANK, C.; LORBEER, E.; *J. Chromatogr.* 1994, 683, 95.

RAMOS, L. P.; KUCEK, K. T.; DOMINGOS, A. K.; WILHELM, H. M., Biodiesel: Um Projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil. Revista Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento **2003**, 31, 28-37.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN21)
Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf. Acesso em 09/01/2023

SILVA, Laelson de Lira. **ESTUDOS DE ÓLEOS RESIDUAIS ORIUNDOS DE PROCESSO DE FRITURA E QUALIFICAÇÃO DESSES PARA OBTENÇÃO DE MONOÉSTERES (BIODIESEL)**. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/jspui/bitstream/riufal/409/1/Estudos%20de%20%C3%B3leos%20residuais%20oriundos%20de%20processo%20de%20fritura%20e%20qualifica%C3%A7%C3%A3o%20desses%20para%20obten%C3%A7%C3%A3o%20de%20mono%C3%A9steres%20%28Biodiesel%29.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

VAN GERPEN, J. (2006). Conceitos Básicos Sobre Motores Diesel e Seus Combustíveis. In: KNOTHE et al. **Manual de biodiesel**. Tradução Luiz Pereira Ramos. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.