



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA BAHIA – IFBA
CAMPUS VITÓRIA DA CONQUISTA
DIRETORIA ACADÊMICA - DAC
COORDENAÇÃO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA - CLIQUI

ESTER DA CUNHA MEIRA SANTOS

**FATORES QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE BIODIESEL
UTILIZANDO ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS (OGRs):
UMA REVISÃO**

Vitória da Conquista – BA

2023

ESTER DA CUNHA MEIRA SANTOS

**FATORES QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE BIODIESEL
UTILIZANDO ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS (OGRs):
UMA REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação de Licenciatura em Química, como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia *campus* Vitória da Conquista.

Orientador: Professor Dr. Luiz Elói da Silva

Vitória da Conquista – BA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELA AUTORA

S237f Santos, Ester da Cunha Meira.

Fatores que afetam a produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais (OGRs): uma revisão / Ester da Cunha Meira Santos; orientador Luiz Eloi da Silva -- Vitória da Conquista: IFBA, 2023.

46 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1.Biodiesel. 2.Biocombustíveis. 3.Métodos de produção. 4.Óleos e gorduras residuais. I. Silva, Luiz Eloi da, orient. III. TÍTULO.

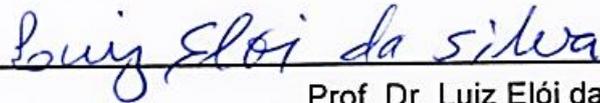
CDU: 54:662.7

ESTER DA CUNHA MEIRA SANTOS

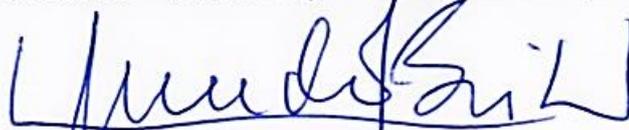
**FATORES QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE BIODIESEL
UTILIZANDO ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS (OGRs):
UMA REVISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação de Licenciatura em Química, como requisito para a obtenção do título de Licenciado em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia campus Vitória da Conquista, sob orientação do Prof. Dr. Luiz Elói da Silva.

Aprovado em **27 de julho de 2023**, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Elói da Silva
Orientador – IFBA campus Vitória da Conquista



Prof. Dr. Fernando de Azevedo Alves Brito
IFBA campus Vitória da Conquista



Prof. Me. Wdson Costa Santos
IFBA campus Vitória da Conquista

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, não posso deixar de expressar minha gratidão a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por me guiar e abençoar ao longo dessa jornada. Seu cuidado e proteção foram fundamentais para superar os obstáculos e chegar até aqui. Sou grata por sua presença constante em minha vida.

Apesar de incomum este agradecimento, agradeço a mim, por ter perseverado e acreditado em meu potencial. Pelas horas dedicadas aos estudos, pela determinação em enfrentar os desafios e pela coragem de seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Reconheço o meu esforço e me orgulho da pessoa em que me tornei e continuo tornando ao longo dessa jornada acadêmica. Este trabalho é o resultado do meu comprometimento e paixão pelo conhecimento e pelo curso de graduação que escolhi.

Aos membros da minha família, cujo apoio incondicional foi fundamental, sou grata por cada palavra de encorajamento, por cada abraço acolhedor e por acreditarem em mim desde o início. Vocês foram meu porto seguro, proporcionando a confiança necessária para enfrentar todos os desafios. Um agradecimento a toda a família Cunha e Meira Santos, em especial: Marlúcia (mãe), Sérgio Emílio (pai), Sérgio (irmão), Adalgiza (avó) e Eraclides (bisavó), Bruno e Fausto (tios), Pauliane (tia), Júlia e Luísa (minhas queridas priminhas), e minha gata Luna.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à família do meu namorado. Desde o momento em que fui acolhida em seu lar, fui recebida com carinho, afeto e generosidade. Vocês abriram as portas de suas vidas e corações para mim, e sou imensamente grata por isso. Agradeço por todo o apoio e encorajamento que me proporcionaram ao longo desse tempo. Agradeço por serem uma extensão do amor e apoio que recebo do meu namorado, e por fazerem parte da minha vida de uma maneira tão significativa. Em especial: Denise, Estefane, Tamires, dona Lau, seu Alziro e tia Neuza.

Agradeço aos amigos que a turma 2018.1 me proporcionou, por todos os bons momentos e conhecimentos compartilhados. Minha gratidão a Geisa, Esther, Carol, Dielson (*in memoriam*), Igor e Sara. Não posso deixar de citar aqueles que reivindicaram morada em meu coração; meu sincero agradecimento aos amigos Vinicius, Rafael e Ícaro, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando-me nas

dificuldades e celebrando conquistas. Agradeço à Rafinha, pelo apoio em minha vida e na vida de minha família; à Tia Ester, por todo apoio ao longo deste curso; e à minha querida amiga Micaela, ao seu filho Gael e à sua mãe Jackeline. A todos os meus amigos e amigas, muito obrigada! Vocês foram minha fonte de motivação e alegria, tornando essa caminhada mais leve e divertida. Agradeço também aos irmãos e irmãs da Igreja Batista Central, pelas palavras de fé e por todas as orações pela minha vida, saúde e conclusão do curso.

Externo meu mais profundo agradecimento ao meu namorado Richardson. Seu amor incondicional, apoio incansável e compreensão têm sido verdadeiros pilares fundamentais ao longo de toda essa jornada. Desde o início, você esteve presente ao meu lado, irradiando positividade e encorajamento em cada etapa do caminho. Seja nos momentos de triunfo ou nos desafios mais difíceis, você sempre esteve lá, motivando-me a superar meus limites e a buscar o meu melhor. Sua presença constante, suas palavras doces e sua dedicação genuína enchem meu coração de gratidão e amor. Sou infinitamente grata por ter a sorte de tê-lo ao meu lado, compartilhando sonhos, risos, lágrimas e crescimento. Sua presença é um presente valioso em minha vida, e sou grata por cada momento que compartilhamos juntos.

Aos funcionários do IFBA, que trabalham incansavelmente para garantir um ambiente propício à aprendizagem, meu reconhecimento. Agradeço pela dedicação em manter a infraestrutura funcionando, em oferecer suporte administrativo e em zelar pelo bem-estar de todos os estudantes. Em especial: Sabrina, Joab e Abmael.

A todos os meus professores da faculdade, dedico minha admiração e gratidão por todo o ensinamento compartilhado ao longo dessa jornada acadêmica. Agradeço especialmente aos professores Wdson, Fernando e ao meu orientador Luiz Elói, por terem me abraçado e guiado ao longo de toda esta trajetória. Seu comprometimento, paciência e orientação foram essenciais para o meu crescimento intelectual e profissional.

Sem a presença e o apoio de cada um, esta conquista não seria possível. Este trabalho é fruto do esforço coletivo, do incentivo mútuo e do amor compartilhado. Vocês fazem parte da minha história e carregarei cada gesto de amizade, carinho e ajuda no meu coração. Muito obrigada a todos por fazerem parte desta jornada inesquecível. Como bem disse Isaac Newton:

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

SANTOS, Ester da Cunha Meira. **Fatores que afetam a produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais (OGRs): uma revisão.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) 46 f. 2023. Curso de Licenciatura em Química. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2023.

RESUMO

O consumo e a produção em larga escala têm aumentado a demanda por energia no mundo. Atendendo a esta situação por décadas, foram utilizados combustíveis fósseis como o petróleo, carvão mineral e o gás natural, entretanto, o seu uso oferece riscos ambientais. Uma alternativa é o uso de biocombustíveis, que são combustíveis produzidos a partir da biomassa. Dentre estes, o biodiesel destaca-se como uma excelente alternativa, devido a sua renovabilidade e semelhança ao diesel de petróleo em sua estrutura e comportamento. O biodiesel pode ser produzido a partir de um processo conhecido como transesterificação, no qual os triglicerídeos presentes no óleo vegetal ou gordura animal reagem com um álcool de cadeia curta na presença de catalisadores. A produção e rendimento são afetados por alguns fatores, tais como: o tipo de óleo, álcool, catalisador e a técnica utilizada. Uma proposta para este processo é a substituição do óleo novo por óleos e gorduras residuais (OGRs), pois além de diminuir os custos do processo, possibilita soluções para o problema de descarte inadequado de óleos e gorduras. O objetivo desta pesquisa foi comparar, por meio da revisão de literatura, os diferentes métodos de produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais. Foram analisados três fatores que afetam o rendimento da produção de biodiesel utilizando OGRs: tipo de álcool, catalisador e técnicas de intensificação do processo. Por meio da escolha da base de dados Science Direct (Elsevier), foram analisados 60 documentos dos últimos 7 anos. Observou-se que 56 pesquisas utilizaram metanol devido a sua alta reatividade, tendo a maioria encontrado rendimento superior a 90%. Três pesquisas utilizaram o etanol, álcool considerado renovável, e todos encontraram rendimento superior a 94%. O butanol foi utilizado em um estudo e promoveu rendimento de 95,6%. Catalisadores básicos homogêneos resultaram em rendimentos entre 40 e 100%, catalisadores básicos heterogêneos entre 45,52 e 100%, e catalisadores ácidos heterogêneos entre 78 e 96%. Catalisadores enzimáticos obtiveram rendimento de 91,8 a 98,5%, trazendo a possibilidade de reciclagem destes

reagentes, o que reforça uma produção sustentável. Observou-se a grande utilização de métodos convencionais para a produção de biodiesel, tais como reatores equipados com agitadores mecânicos e magnéticos, placas e mantas de aquecimentos, e condensadores de refluxo. Estes métodos resultaram em rendimentos de 40 a 100% e tempos de reação entre 30 e 2880 minutos. Notou-se também a utilização de técnicas de intensificação do processo, com o uso de autoclaves, células eletrolíticas, micro-ondas, microrreatores, reatores ultrassônicos e produção assistida por irradiação UV. As técnicas de IP resultaram em rendimentos de 71,1 a 98,8% com tempos de reação entre 9,15 e 900 minutos. A escolha de cada uma dessas variáveis afetou significativamente a produção deste biocombustível, interferindo no tempo de reação e rendimento. Estudos sobre a relação das variáveis e do respectivo rendimento podem ser um dos tópicos de pesquisa desta área no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento científico e sustentável da produção de biodiesel.

Palavras-chave: produção de biodiesel; óleos e gorduras residuais; variáveis; revisão.

SANTOS, Ester da Cunha Meira. **Fatores que afetam a produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais (OGRs): uma revisão.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) 46 f. 2023. Curso de Licenciatura em Química. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2023.

ABSTRACT

Consumption and large-scale production have increased the demand for energy in the world. Given this situation for decades, fossil fuels such as oil, coal and natural gas were used, however, their use poses environmental risks. An alternative is the use of biofuels, which are fuels produced from biomass. Among these, biodiesel stands out as an excellent alternative, due to its renewability and similarity to petroleum diesel in its structure and behavior. Biodiesel can be produced from a process known as transesterification, in which triglycerides present in vegetable oil or animal fat react with a short-chain alcohol in the presence of catalysts. Production and yield are affected by some factors, such as: the type of oil, alcohol, catalyst and the technique used. A proposal for this process is the replacement of new oil by waste cooking oil (WCO), as in addition to reducing process costs, it enables solutions to the problem of improper disposal of oils and fats. The objective of this research was to compare, through a literature review, the different biodiesel production methods using residual oils and fats. Three factors that affect the yield of biodiesel production using OGRs were analyzed: type of alcohol, catalyst and process intensification techniques. By choosing the Science Direct database (Elsevier), 60 documents from the last 7 years were analyzed. It was observed that 56 studies used methanol due to its high reactivity, most of which found a yield greater than 90%. Three studies used ethanol, alcohol considered renewable, and all found a yield greater than 94%. Butanol was used in one study and promoted a yield of 95.6%. Homogeneous basic catalysts resulted in yields between 40 and 100%, heterogeneous basic catalysts between 45.52 and 100%, and heterogeneous acid catalysts between 78 and 96%. Enzymatic catalysts obtained a yield of 91.8 to 98.5%, bringing the possibility of recycling these reagents, which reinforces a sustainable production. There was a great use of conventional methods for the production of biodiesel, such as reactors equipped with mechanical and magnetic stirrers, heating plates and blankets, and reflux condensers. These methods

resulted in yields of 40 to 100% and reaction times between 30 and 2880 minutes. It was also noted the use of process intensification techniques, with the use of autoclaves, electrolytic cells, microwaves, microreactors, ultrasonic reactors and production assisted by UV irradiation. PI techniques resulted in yields of 71.1 to 98.8% with reaction times between 9.15 and 900 minutes. The choice of each of these variables significantly affected the production of this biofuel, interfering with reaction time and yield. Studies on the relationship between the variables and the respective yield can be one of the research topics in this area in Brazil, contributing to the scientific and sustainable development of biodiesel production.

Keywords: biodiesel production; waste cooking oil; variables; review.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
±	Mais ou menos
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
AM	Agitação mecânica
BaSnO ₃	Estanato de bário
BiFeO ₃	Ferrita de bismuto
B _n	Mistura de n% de biodiesel ao diesel de petróleo
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₄ H ₈ O	Tetraidrofurano
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CH ₃ O ⁻	Íon metóxido
CH ₃ OH	Metanol
CNPE	Conselho Nacional de Pesquisa Energética
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Cu(NO ₃) ₂	Nitrato de cobre (II)
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro (III)
Fe ₃ O ₄	Óxido de ferro (II, III)
GAC	Carvão ativado granular
GEE	Gases de efeito estufa
GO	Óxido de Grafeno
H ⁺	Cátion hidrogênio

H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H_3NSO_3	Ácido sulfâmico
$H_3PMo_{12}O_{40}$	Ácido fosfomolibdico
$H_3PW_{12}O_{40}$	Ácido 12-tungstofosfórico
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Intensificação do processo
K_2CO_3	Carbonato de potássio
K_2O	Óxido de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
La^{3+}	Cátion lantânio
$LaPO_4$	Fosfato de lantânio
m	Metro
$MgFe_2O_4$	Ferrita de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
$MgSO_4$	Sulfato de magnésio
mm	Milímetro
MME	Ministério de Minas e Energia
MoO_3	Trióxido de molibdénio
n°	Número
Na	Sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O_2	Oxigênio
OGRs	Óleos e gorduras residuais
OH^-	Ânion hidroxíla
R	Radical
SiO_2	Dióxido de silício

SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₄	Sulfato
Sr	Estrôncio
SrFe ₂ O ₄	Ferrita de estrôncio
SrO	Óxido de estrôncio
SrTiO ₃	Titanato de estrôncio
Ti	Titânio
TiO ₂	Dióxido de titânio
UBRABIO	União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene
UV	Ultravioleta
WCO	<i>Waste cooking oil</i>
WO ₃	Trióxido de tungstênio
Zn	Zinco
ZnO	Óxido de zinco
ZrO ₂	Dióxido de zircônio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reação de transesterificação	22
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critério de seleção e quantidade de documentos resultantes	20
Tabela 2: Variáveis relacionadas a produção de biodiesel com OGRs	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	METODOLOGIA	19
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
3.1	ENERGIA E SUSTENTABILIDADE	21
3.2	FATORES QUE INTERFEREM NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO OGRs.....	23
3.2.1	Impacto do tipo de álcool na produção de biodiesel	29
3.2.2	Efeito dos catalisadores sobre a produção de biodiesel	31
3.2.3	Técnicas de intensificação do processo	34
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento nos setores de tecnologia, energia e transporte aumentou a demanda por energia no mundo. Para atender à situação e realizar este fornecimento, os combustíveis fósseis adquiriram cada vez mais importância, pois ao serem queimados liberam grande quantidade de vapor por unidade de peso. A matriz energética mundial é majoritariamente composta por fontes não renováveis, tais como Petróleo, Carvão Mineral e Gás Natural (IEA, 2021). Seu uso tem nos oferecido um risco ambiental, devido à excessiva emissão de gases de efeito estufa em sua queima, o que aumenta o potencial do aquecimento global (KARMAKER *et al.*, 2020).

Diante disto, a busca por fontes renováveis aumentou e a produção de biocombustíveis tem ganhado um espaço muito importante. Destes, o biodiesel se destaca como uma boa alternativa ao diesel de petróleo devido à sua renovabilidade e pela semelhança em sua estrutura e comportamento. Além dessas vantagens, sua combinação com combustível diesel convencional ou sua utilização em motores a diesel gera uma significativa redução na quantidade de emissão de dióxido de carbono, monóxido de carbono e partículas suspensas do escapamento (MOHADESI *et al.*, 2020).

O Biodiesel pode ser produzido a partir de um processo conhecido como transesterificação, no qual os triglicerídeos presentes no óleo vegetal ou gordura animal reagem com um álcool de cadeia curta na presença de catalisadores. Este biocombustível pode ser utilizado puro ou misturado ao diesel de petróleo em diversas proporções (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

O Brasil ocupa a segunda colocação em produção de biodiesel no mundo, estando atrás apenas dos Estados Unidos. Nos anos de 2018 e 2019, o país testou a utilização de mistura de biodiesel em até 20%, para validação de seu uso em motores a diesel. O programa de testes foi considerado o maior do mundo, sendo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e contando com a participação de demais produtores deste biocombustível e representantes da indústria automotiva (UBRABIO, 2020).

A produção de biodiesel e seu rendimento são afetados por alguns fatores, tais como: o tipo de óleo, álcool, catalisador e a técnica usada para produção. A utilização de óleo de cultura comestível – soja, girassol, canola – é questionada nas pesquisas atuais, pois gera insegurança alimentar para as sociedades locais (GAUR *et al.*, 2020).

Nesta perspectiva, estudos a respeito da utilização de óleos e gorduras residuais (OGRs) têm crescido, pois além de reduzir o custo geral da produção por ser uma matéria-prima barata, sua utilização contribui para a solução do problema do descarte inadequado de óleo residual, atuando como um contribuinte econômico e ambiental para a produção deste biocombustível (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

Portanto, o objetivo desta pesquisa foi comparar por meio de revisão de literatura, os diferentes métodos de produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais. Foram analisados três fatores que afetam o rendimento da produção de biodiesel utilizando OGRs: tipo de álcool, catalisador e técnicas de intensificação do processo.

2 METODOLOGIA

Diante da delimitação da questão problema e do objetivo deste trabalho, foi estabelecido um protocolo de revisão de literatura, contemplando a escolha da base de dados, a descrição do método de busca e os critérios de seleção de estudos. A base de dados escolhida foi a Science Direct (Elsevier), considerando sua ampla cobertura.

Adotou-se como critério inicial de seleção a busca por palavras-chave comuns à pesquisa presentes nos artigos; as palavras escolhidas foram “*biodiesel production*” (produção de biodiesel) e “*waste cooking oil*” (óleo de cozinha reutilizado), utilizando também “*WCO*”, que é a sigla do último termo. As palavras-chave utilizadas estão em inglês, por ser a língua predominante na publicação de estudos nesta base. Foi necessária a utilização do termo “*AND*” na pesquisa avançada, para indicar a busca por artigos que possuam ambas as palavras citadas, e do termo “*OR*”, para indicar a busca tanto por documentos que utilizaram “*waste cooking oil*” quanto por documentos que substituíram o uso do termo completo por sua sigla “*WCO*”.

Somando-se a este critério, foram selecionados somente documentos do tipo artigos de pesquisa, artigos de dados, revisões e mini revisões dos últimos 7 anos, com o objetivo de obter o estado da arte desta área de pesquisa, recolhendo assim documentos publicados de 2017 até a presente data, julho de 2023.

Além disso, foi feita uma busca pelas palavras “*biodiesel production*” e “*waste cooking oil*” ou “*biodiesel production*” e “*WCO*” no título dos documentos. Esta busca por termos no título é importante, pois nem todos os artigos que possuíam o termo “*waste cooking oil*” utilizaram óleos e gorduras residuais, tendo a maioria somente citado a existência dessa possibilidade de produção. Sendo assim, foi necessária esta seleção, com o intuito de encontrar pesquisas que utilizaram óleos e gorduras residuais analisando os fatores que interferem em sua produção, considerando este reagente o ponto central do estudo. O cenário acima exposto fica evidente a partir da análise da Tabela 1, que mostra o detalhamento dos critérios e os respectivos resultados:

Tabela 1: Critério de seleção e quantidade de documentos resultantes.

Critério de seleção	Quantidade de documentos
Busca nos artigos pelos termos: <i>“biodiesel production” AND “waste cooking oil” OR “biodiesel production” AND “WCO”</i>	4.041
Busca por tipo de documento: <i>review, mini review, data article e research article</i>	3.395
Busca por ano de publicação: 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023	2.315
Busca pelos termos no título: <i>“biodiesel production” AND “waste cooking oil” OR “biodiesel production” AND “WCO”</i>	115

A partir da análise da tabela acima, observa-se que, a depender do critério de pesquisa, o número de artigos resultantes será diferente, variando de 4.041 a 115. Considerando o primeiro grupo de expressões utilizadas (*“biodiesel production” AND “waste cooking oil” OR “biodiesel production” AND “WCO”*), obteve-se 4.041 estudos. No segundo grupo, ao selecionar somente revisões, mini revisões, artigos de dados e artigos de pesquisa, reduziu-se a busca para 3.395 estudos. Ao adicionar como critério o recorte temporal, o número de documentos resultantes reduziu para 2.315. Por fim, ao especificar quais termos deveriam estar contidos nos títulos dos documentos, obteve-se 115 documentos que se enquadram nos critérios para compor o presente estudo.

Organizou-se os artigos por ordem de relevância, e a partir da avaliação do objetivo e metodologia do presente trabalho, realizou-se a leitura do resumo dos 115 estudos e priorizou-se os documentos que abordavam diferentes fatores que afetam a produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais. Deste modo, para compor esta revisão de literatura, foram selecionados 60 dos 115 documentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

O rápido crescimento populacional dentro de um sistema baseado em consumo excessivo tem gerado uma enorme demanda de energia em todo o mundo. Essa energia é fornecida principalmente para geração de eletricidade, calor e combustível para transporte. Atendendo a esta demanda, a maioria das usinas no mundo têm utilizado petróleo, carvão e gás natural, pois a queima destes combustíveis libera uma grande quantidade de gás para movimentação de turbinas a vapor (KARMAKER *et al.*, 2020; SUBRAMANIAM; MASRON, 2020; PETRAKOPOULOU; ROBINSON; DELGADO, 2020). Estas fontes são recursos não-renováveis formados a partir do soterramento de matéria orgânica por milhões de anos, sendo assim nomeados de combustíveis fósseis (WU *et al.*, 2020).

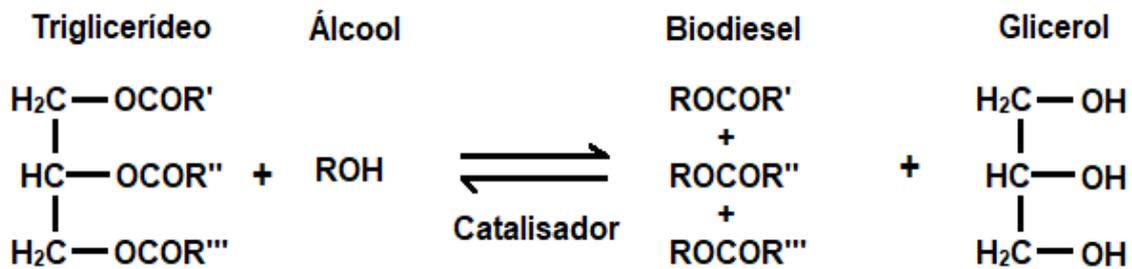
A combustão destas fontes é responsável pela produção excessiva de diversos gases de efeito estufa (GEE), incluindo dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (KARMAKER *et al.*, 2020). Esta emissão tem potencializado o aquecimento global, contribuindo com a desestabilização climática por meio das ondas de calor, secas e inundações (SUBRAMANIAM; MASRON, 2020). De 1990 a 2018, a emissão global de CO₂ por queima de combustível aumentou 63% (IEA, 2020), e uma projeção feita pela Administração de Informação de Energia alerta que até 2040 as emissões produzidas pelos países em desenvolvimento serão 127% maiores que as produzidas pelos países desenvolvidos (SUBRAMANIAM; MASRON, 2020).

O uso de fontes não renováveis e seus impactos ambientais têm motivado a busca por alternativas energéticas renováveis. Os biocombustíveis surgem como uma resposta necessária para este cenário, pois são produzidos a partir de biomassa (matéria orgânica de origem vegetal ou animal). Destes, o biodiesel se destaca como uma boa alternativa ao diesel de petróleo devido a sua similaridade química e auxilia na proteção do meio ambiente devido ao seu caráter atóxico, renovável e biodegradável, além de produzir menos emissões de GEE (SHARMA; KODGIRE; KACHHWAHA, 2020).

O biodiesel pode ser produzido a partir de um processo conhecido como transesterificação (Figura 1, sendo R', R'' e R''' as cadeias carbônicas do ácido graxo e R o grupo alquil do álcool.). Nesta reação, os triglicerídeos presentes no óleo vegetal

ou gordura animal reagem com um álcool de cadeia curta na presença de catalisadores, obtendo como produtos o biodiesel e o glicerol (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

Figura 1: Reação de transesterificação.



O biodiesel tem a capacidade de substituir total ou parcialmente o óleo diesel proveniente do petróleo, podendo servir como combustível em motores automotivos ou estacionários. Pode ser empregado em sua forma pura ou combinado com o diesel convencional em diversas proporções. Quando ocorre a adição de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo, essa mistura é denominada B2, e assim por diante, até alcançar o biodiesel completamente puro, identificado como B100 (VIERA *et al.*, 2009).

O Brasil é um dos países que adotou legalmente a obrigatoriedade da mistura dos combustíveis para comercialização em todo o território nacional. Segundo a Resolução nº 3 de 20 de março de 2023, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), estabeleceu-se os seguintes percentuais mínimos de adição obrigatória em volume: 12% de biodiesel ao diesel comum (B12) em 2023, 13% (B13) em 2024, 14% (B14) em 2025 e 15% (B15) em 2026.

Nos anos de 2018 e 2019, o Brasil realizou o maior programa de testes do mundo para validação do uso de mistura de biodiesel até 20% (B20) em motores a diesel. O programa contou com a participação da indústria automotiva e dos produtores de biodiesel, sendo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME. O país ocupa a segunda posição como o maior produtor deste biocombustível no mundo, atrás apenas dos Estados Unidos (UBRABIO, 2020).

Apesar da possibilidade de utilização dos mais diversos óleos vegetais comestíveis para esta produção, seu uso em larga escala oferece riscos econômicos, éticos e culturais para as sociedades locais, como a variação dos preços, baixa oferta e monocultura. A Índia, por exemplo, adotou medidas de proteção contra esse

problema por meio da nova política de biocombustíveis, que promove o cultivo de árvores e sementes oleaginosas não comestíveis para a produção de biodiesel (GAUR *et al.*, 2020).

Além da adoção destas medidas legais, uma alternativa também importante é implementar o uso de óleos e gorduras residuais como reagente para produção de biodiesel. Estas substâncias são comumente utilizadas para o preparo de alimentos em residências e comércios e seu descarte geralmente é feito nas pias, vasos sanitários ou ralos (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

Ao serem descartados nestes locais, os OGRs vão diretamente para a rede de esgoto, dificultando e encarecendo os serviços de tratamento de água. Além deste problema, quando o tratamento não é feito com o esgoto total, uma parcela da água contaminada é escoada e acaba entrando em contato com mananciais aquáticas, gerando uma camada de óleo sobre a água (fruto de sua insolubilidade e densidade); esta camada forma uma barreira que absorve uma parte da radiação solar e impede a penetração de O₂, fazendo com que nem a luz nem o oxigênio cheguem em partes mais profundas da água. Este fenômeno afeta a temperatura da água e perturba a vida marinha, a fotossíntese e o crescimento das plantas (SAKTI *et al.*, 2021).

Nesta perspectiva, o uso de óleos e gorduras residuais como reagente para a produção de biodiesel atua como um contribuidor econômico e ambiental, pois a utilização destes resíduos diminui o custo de produção e soluciona o problema de descarte inadequado (GAUR *et al.*, 2020). Sendo assim, é importante investir em pesquisas que investiguem e desenvolvam métodos de otimização da produção deste biocombustível utilizando OGRs, analisando as variáveis que interferem no rendimento, tais como o tipo de álcool, catalisador e técnica de intensificação do processo.

3.2 FATORES QUE INTERFEREM NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO OGRs

A Tabela a seguir apresenta as variáveis relacionadas a produção de biodiesel utilizando OGRs, tais como o tipo de álcool, catalisador, técnica e tempo de produção, e os respectivos rendimentos obtidos pelos pesquisadores.

Tabela 2: Variáveis relacionadas a produção de biodiesel com OGRs.

Referência	Álcool	Catalisador	Tipo de catálise	Técnica para produção	Tempo de produção (minutos)	Rendimento (%)
ABDULLAH <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Nanocatalisador produzido da casca de palmiste impregnado com K_2CO_3 e $Cu(NO_3)_2$ em suporte poroso de carvão ativado	Heterogênea	Placa de aquecimento e Agitador Magnético	120	95,36 ± 1,4 (média de 82,5 ± 2,5 após 5 reciclagens do catalisador)
AMENAGHAWON <i>et al.</i> , 2022	Metanol	Catalisador de base biológica, formado por CaO, K_2O e SiO_2 , derivado de cascas de caranguejo e banana-da-terra	Heterogênea	Condensador de refluxo, placa de aquecimento e agitador magnético	149,94	93 (média acima de 80 após 6 reciclagens do catalisador)
ATTARI; MAYVAN; ALISARAEI, 2022	Metanol	Óxido de Cálcio (CaO) derivado de resíduos de casca de ovo de galinha	Heterogênea	Reator ultrassônico	39,84	98,62
BINHAYEEDING <i>et al.</i> , 2020	Metanol	Lipases de <i>Candida rugosa</i> e <i>Rhizomucor miehei</i>	Enzimática	Agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	1440	96,5
BORA <i>et al.</i> , 2022	Metanol	Nanocatalisador de $MgO/MgSO_4$	Heterogênea	Agitador Magnético e Reator ultrassônico	46	98,8
BORAH <i>et al.</i> , 2019	Metanol	Nanocatalisador de CaO derivado de casca de ovo dopados com zinco (Zn)	Heterogênea	Condensador de refluxo, agitador magnético e termômetro	240	96,74
CHEN <i>et al.</i> , 2017	Metanol	Biocatalisador de células inteiras de <i>Pseudomonas mendocina</i>	Enzimática	Reator de leito fluidizado magneticamente	2880	91,87 (média de 87,5 após 10 reciclagens do catalisador)
CHOLAPANDIAN; GURUNATHAN; RAJENDRAN, 2022	Metanol	Nanocatalisador de óxido de cálcio (CaO) derivado de folhas de <i>Acalypha indica</i>	Heterogênea	Placa de aquecimento e Agitador Magnético	70	94,74
CHUNG <i>et al.</i> , 2019	Metanol	Resíduos de óxido de cálcio (CaO) derivados de casca de ovo de galinha	Heterogênea	Reator (não especificado o tipo)	120	70

COSTA <i>et al.</i> , 2020	Etanol	Lipases de <i>Geotrichum candidum</i> e <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Enzimática	Reator de vidro encamisado com agitador mecânico	80	94,1 ± 0,5
DHARMALINGAM <i>et al.</i> , 2023	Metanol	Biocatalisador derivado de resíduos vegetais de brócolis, couve-flor e repolho Napa, impregnado com hidróxido de potássio	Heterogênea	Agitador e placa de aquecimento	120	94,7
ELDIEHY <i>et al.</i> , 2022	Metanol	Catalisador a base de resíduos de folhas de batata-doce calcinadas	Heterogênea	Aquecido (não especificado o tipo de aparelho)	120	98
FIGUEROA <i>et al.</i> , 2020	Metanol	CaO	Heterogênea	Reator Robinson-Mahoney	120	98,5
GAO <i>et al.</i> , 2019	Butanol	Ácido sulfâmico	Heterogênea	Reator e agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	120	95,6
GARDY <i>et al.</i> , 2018	Metanol	Sólido ácido magnético SO ₄ /Fe-Al-TiO ₂	Heterogênea	Reator de vidro e agitador mecânico	150	96
GONÇALVES <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Óxido de molibdênio (MoO ₃) suportado em ferrita de estrôncio (SrFe ₂ O ₄)	Heterogênea	Multirreator com controle de temperatura e agitação fixa	240	95,4
GOURAN; AGHEL; NASIRMANESH, 2021	Metanol	Farelo de trigo calcinado e óxido de cálcio (CaO)	Heterogênea	Reator e agitador magnético de placa quente	114,21	93,6
GUO <i>et al.</i> , 2021	Etanol	Fotocatalisador La ³⁺ /ZnO-TiO ₂ e NaOH	Heterogênea e Homogênea	Reator equipado com agitador magnético assistido por irradiação ultravioleta (UV)	180	96,14 (média acima de 87 após 5 reciclagens do catalisador)
GUPTA; RATHOD, 2018	Metanol	Digliceróxido de cálcio (derivado de CaO)	Heterogênea	Micro-ondas	15	94,86
HALWE <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Hidróxido de Potássio anidro (KOH)	Homogênea	Reator de Cavitação Hidrodinâmica	40	97

HELMİ <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Ácido fosfomolibdico auxiliado com Óxido de grafeno (GO)	Heterogênea	Agitador magnético e célula eletrolítica	900	90,39
HELMİ; HEMMATI, 2021	Metanol	Catalisador magnético a base de NaOH/Quitosana-Fe ₃ O ₄	Heterogênea	Célula eletrolítica	270	92
IBRAHİM <i>et al.</i> , 2022	Metanol	Nanocatalisador magnético de CaO-Fe ₂ O ₃ suportado em carvão ativado	Heterogênea	Reator em batelada equipado com um condensador de refluxo e agitador magnético	180	98,3 (média acima de 80 após 6 reciclagens do catalisador)
JAMIL <i>et al.</i> , 2020	Metanol	Estruturas organometálicas a base de Cobre e Cálcio, KOH e H ₂ SO ₄	Heterogênea e Homogênea	Manta de aquecimento equipada com agitador magnético	60	78,3; 78; 85,0 ± 0,8
JUME <i>et al.</i> , 2020	Metanol	Óxido de grafeno dopado com nanopartículas de SrO e ZrO ₂	Heterogênea	Autoclave cilíndrica	90	91
JUME <i>et al.</i> , 2022	Metanol	SrTiO ₃ dopado com óxido de ferro à base de óxido de grafeno	Heterogênea	Condensador de refluxo, agitador e placa de aquecimento	180	96
KAMARONZAMA N <i>et al.</i> , 2020a	Metanol	Níquel dopado em casca de ovo de galinha calcinada	Heterogênea	Agitador magnético	120	75,32 a 100
KAMARONZAMA N <i>et al.</i> , 2020b	Metanol	Casca de ovo de galinha calcinada e não calcinada	Heterogênea	Agitador magnético	120	45,52
KHAN <i>et al.</i> , 2020	Metanol	Hidroxiapatita extraída de resíduos de ossos de avestruz	Heterogênea	Agitador magnético	240	90,56
MALEKI; ESMAEILI, 2023	Metanol	Nanocatalisador magnético a base de Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ e ZnO	Heterogênea	Reator ultrassônico	30,13	97,23 (88,36 após 7 reciclagens do catalisador)

MANSIR <i>et al.</i> , 2018	Metanol	Óxidos de metal de transição (WO ₃ , ZrO ₂ , MoO ₃ etc.) auxiliados com CaO extraído da casca de ovo	Heterogênea	Agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	60 a 1200	80 a 100
MARTÍN <i>et al.</i> , 2018	Metanol	Hidróxido de sódio (NaOH)	Homogênea	Reator de fluxo oscilatório e reator de tanque agitado	30 e 60	72,50 e 63,50
MAWLID; ABDELHADY; DEAB, 2022	Metanol	Nanocatalisador magnético composto de SrO/MgFe ₂ O ₄	Heterogênea	Placa de aquecimento e Agitador Magnético	180	96,8 (média de 92,6 após 3 reciclagens do catalisador)
MILANO <i>et al.</i> , 2018	Metanol	KOH	Homogênea	Micro-ondas	9,15	97,65
MOHADESI <i>et al.</i> , 2020	Metanol	KOH/Zeólita Clinoptilolita	Heterogênea	Microrreator	13,4	97,45
MOYO <i>et al.</i> , 2021	Metanol	KOH adsorvido em carvão ativado granular (GAC) confinado em membrana de TiO ₂ /Al ₂ O ₃	Heterogênea	Reator de membrana de leito compactado	60	92,6 e 94,03
NAEEM <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Sólido básico de sódio (Na) impregnado de dióxido de Titânio (TiO ₂) revestido com dióxido de silício (SiO ₂)	Heterogênea	Reator com frasco de três gargalos dotado de condensador bulbo	120	98
NIYAS; SHAIJA, 2023	Metanol	KOH	Homogênea	Reator de fluxo oscilatório de frasco rotativo movido a energia solar	30	93,72
OUTILI <i>et al.</i> , 2020	Metanol	KOH	Homogênea	Agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	30	100
OZOR; AIGBODION; SUKDEO, 2023	Metanol	CaO calcinado derivado de concha de ostra	Heterogênea	Condensador de refluxo e agitador magnético	180	97,8
PUTRA <i>et al.</i> , 2018	Metanol	CaO/SiO ₂ derivado de casca de ovo e argila de turfa	Heterogênea	Reator (não especificado o tipo)	60	91

PUTRA; NATA; IRAWAN, 2020	Metanol	CaO extraído da casca de ovo/Sílica	Heterogênea	Reator (não especificado o tipo)	30 a 120	Não especificado
RABIE <i>et al.</i> , 2019	Metanol	Catalisador produzido a partir de diatomita purificada suportada por composto de óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO)	Heterogênea	Agitador magnético, aquecedor digital e condensador de resfriamento de água	120	96,47
RAVELO; RODRIGUEZ, 2018	Metanol	NaOH	Homogênea	Agitação magnética	60	40 a 81
RAZUKI <i>et al.</i> , 2023	Metanol	Nanocatalisador de ferrita de bismuto (BiFeO ₃)	Heterogênea	Aquecido (não especificado o tipo de aparelho)	120	98
REZANIA <i>et al.</i> , 2021	Metanol	Espuma de fosfato de lantânio (LaPO ₄)	Heterogênea	Agitador e condensador de refluxo	120	91
ROY <i>et al.</i> , 2020	Metanol	Estanato de bário (BaSnO ₃)	Heterogênea	Agitador e condensador de refluxo	25	98
SAADI; MATHAN; HE, 2020	Etanol	Mistura de óxidos de estrôncio (SrO), zinco (ZnO) e alumínio (Al ₂ O ₃)	Heterogênea	Reator equipado com um condensador de resfriador de água e termopar	300	95,7
SAHABDHEEN; ARIVARASU, 2020	Metanol	Nanopartículas do ácido 12-tungstosfórico	Heterogênea	Agitador mecânico	300	91
SAHANI; ROY; SHARMA, 2020	Metanol	Óxido de metal misto Sr-Ti	Heterogênea	Reator e agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	80	98
SAHAR <i>et al.</i> , 2018	Metanol	KOH	Homogênea	Reator em batelada	50	94
SHARMA <i>et al.</i> , 2018	Metanol	KOH e CaO	Homogênea e Heterogênea	Micro-ondas	9 e 10	93,87 e 90,37
SREE <i>et al.</i> , 2021	Metanol	NaOH, CaO e casca de ovo de galinha calcinada	Heterogênea e Homogênea	Agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	90	90

SUZIHAQUE <i>et al.</i> , 2022	Metanol	NaOH	Homogênea	Placa de aquecimento e Agitador Magnético	120	91,45 a 93,37
TOPARE; PATIL; KHEDKAR, 2021	Metanol	CaO	Heterogênea	Reator ultrassônico	60	93
WEI <i>et al.</i> , 2023	Metanol	Lipases de <i>Rhizomucor miehei</i> e <i>Aspergillus oryzae</i>	Enzimática	Reator e agitador (não foi citado pelo autor o tipo de agitador)	1440	98,5
XIA <i>et al.</i> , 2022	Metanol	Catalisador magnético à base de Co/Fe–Ca derivado de resíduos de conchas	Heterogênea	Célula Eletrolítica	50	92,12
YUSUFF; GBADAMOSI; POPOOLA, 2021	Metanol	Terra de formigueiro modificada com zinco	Heterogênea	Condensador e agitador magnético	Não especificado	83,16
ZHANG <i>et al.</i> , 2023	Metanol	Nitreto de Carbono gráfico suportado por Molibdênio	Heterogênea	Autoclave	720	71,1
ZIK; SULAIMAN; JAMAL, 2020	Metanol	CaO/Celulose nanocristalina auxiliados com álcool polivinílico	Heterogênea	Reator de leito compactado	240	98,4

Os diferentes fatores contidos nesta tabela, que afetam a produção de biodiesel utilizando óleos e gorduras residuais, serão discutidos a partir dos tópicos seguintes.

3.2.1 Impacto do tipo de álcool na produção de biodiesel

Como regente na produção de biodiesel é preciso utilizar um álcool de cadeia curta, e os mais apropriados são o metanol, etanol, propanol e butanol. Dentre estes, os mais utilizados são o metanol (CH₃OH) e o etanol (C₂H₅OH) (MOHADESI *et al.*, 2020).

O uso do metanol tem sido preferido por alguns pesquisadores por ser uma substância mais simples e geralmente mais barata que o etanol. O metanol possui maiores vantagens físicas e químicas no processo, tais como: ponto de nuvem e ponto de fluidez elevados, biodiesel resultante com menor viscosidade e não forma azeótropos no processo (ATHAR; ZAIDI, 2020; BINHAYEEDING *et al.*, 2020;

RAVELO; RODRIGUEZ, 2018; MOHADESI *et al.*, 2020;). Dos 60 artigos analisados, 56 relataram uso do metanol, encontrando rendimentos variando na faixa de 40 a 100%. Destes, a maioria encontrou rendimento superior a 90%, o que justifica a utilização deste álcool nos processos, demonstrando a alta reatividade do metanol.

O uso do metanol em processos que possuem somente o hidróxido de potássio (KOH) como catalisador básico facilita a solubilidade na mistura, o que favorece a reação direta e aumenta o rendimento do éster metílico (MILANO *et al.*, 2018). Dos artigos analisados, 6 utilizaram metanol e KOH (HALWE *et al.*, 2021; MILANO *et al.*, 2018; NIYAS; SHAIJA, 2023; OUTILI *et al.*, 2020; SAHAR *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2018), obtendo rendimentos variados de 93,72 a 100%. Apesar das vantagens apresentadas, existe também desvantagem no uso do metanol, como o fato de ser uma substância altamente tóxica (COSTA *et al.*, 2020).

O etanol tem sido preferido por pesquisadores que buscam uma produção de biodiesel menos danosa ao meio ambiente e aos produtores, pois é menos tóxico, renovável e sustentável, podendo ser totalmente obtido a partir de matérias-primas agrícolas, diferente do metanol, que pode ser produzido por meio de gases de origem fóssil (ATHAR; ZAIDI, 2020; COSTA *et al.*, 2020).

Dos artigos analisados, 3 relataram o uso do etanol (COSTA *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2021; SAADI; MATHAN; HE, 2020), obtendo rendimentos de 94,1; 96,14 e 95,7 respectivamente. Estas produções demonstram que, embora o etanol não seja priorizado nos processos industriais, seu uso não necessariamente resulta em rendimentos menores, obtendo conversões satisfatórias para a produção deste biocombustível.

Apesar da rota metílica ser a mais usual na maioria dos países, o Brasil possui alguns fatores que influenciam positivamente a sua capacidade de substituição pela rota etílica. De acordo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), o país alcançou recorde na produção de etanol, tendo produzido 35,6 bilhões de litros na safra 2019/20. Este álcool já é utilizado como biocombustível no país, sendo fornecido nos postos de abastecimento e sua produção extensiva possibilita o atendimento às usinas de biodiesel (CONAB, 2020).

O etanol pode ser produzido a partir de diferentes culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar e o milho. A partir dos resíduos descartados no processo de produção do etanol de primeira geração (produto da utilização do caldo ou melaço da cana-de-açúcar), é possível produzir o etanol de segunda geração (utilizando o bagaço da

cana, por exemplo), o que aumenta a característica sustentável deste álcool (CARPIO; SIMONE DE SOUZA, 2017). Para evitar o risco de monocultura destes cultivos e outros impactos correlacionados, como a flutuação de preços, é possível investir na produção do etanol de segunda geração, tecnologia existente no país (CONAB, 2020).

Não foi relatado o uso de propanol em nenhum dos artigos analisados. O uso do butanol foi relatado em um documento, que aborda este álcool como promissor, tendo em vista que o butanol é um álcool de base biológica, podendo ser produzido pela fermentação da biomassa. O uso do butanol promoveu rendimento de 95,6% (GAO *et al.*, 2019).

3.2.2 Efeito dos catalisadores sobre a produção de biodiesel

Toda reação química possui uma energia de ativação, que é a energia mínima necessária para ocorrer uma reação. Quando determinadas produções demandam muito tempo de reação em laboratório, o mais usual nestes processos é a utilização de catalisadores. O catalisador é uma substância química que aumenta a velocidade de uma reação diminuindo sua energia de ativação, sendo consumida durante o processo e produzida ao final deste. Este ato, nomeado de catálise, contribui com a produção de biodiesel ao aumentar a taxa de reação de transesterificação (GAUR *et al.*, 2020).

Os catalisadores são classificados com base em sua natureza química, podendo ser um ácido, base ou enzima. De acordo à sua composição e ao seu comportamento, são listados como homogêneos (quando os reagentes e os catalisadores se encontram juntos, na mesma fase), heterogêneos (reagentes e catalisadores se encontram separados, em fases diferentes) ou enzimáticos (quando as enzimas atuam como catalisadores biológicos). Essas classificações são de extrema importância, pois apesar do resultado esperado ser o aumento da velocidade de reação, cada catalisador gera um impacto diferente ao processo (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

Os catalisadores básicos compõem a maioria das produções industriais e laboratoriais, sendo mais comumente utilizados. Como catalisadores básicos homogêneos, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) foram empregados em 6 e 10 documentos, respectivamente, utilizando essas substâncias sozinhas ou auxiliando outros catalisadores. Foram encontrados rendimentos

variando de 40% a 96,14% utilizando NaOH, e de 78,3% a 100% utilizando KOH (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018; GUO *et al.*, 2021; JAMIL *et al.*, 2020; OUTILI *et al.*, 2020).

O catalisador básico heterogêneo mais comum é o óxido de cálcio (CaO), com seu uso aplicado em 21 artigos. Encontrou-se também o uso de: óxido de magnésio (MgO), composto óxido de grafeno (GO) dopado com nanopartículas de óxido de estrôncio (SrO) e dióxido de zircônio (ZrO₂) (GO@ZrO₂-SrO), sódio (Na) impregnado de dióxido de Titânio (TiO₂) revestido com dióxido de silício (SiO₂) (Na-SiO₂@TiO₂), espuma de fosfato de lantânio (LaPO₄), óxido de molibdênio (MoO₃) suportado em ferrita de estrôncio (SrFe₂O₄), estanato de bário (BaSnO₃), além do uso dos minérios diatomita e clinoptilolita. O uso de CaO resultou em rendimentos de 70 a 98,62%, de MgO em 96,47%, de GO@ZrO₂-SrO em 91%, de Na-SiO₂@TiO₂ em 98%, LaPO₄ em 91%, MoO₃ suportado em SrFe₂O₄ em 95,4%, BaSnO₃ em 98%, diatomita em 96,47% e clinoptilolita em 97,45% (JUME *et al.*, 2020; NAEEM *et al.*, 2021; PUTRA; NATA; IRAWAN, 2020; RABIE *et al.*, 2019; FIGUEROA *et al.*, 2020; SREE *et al.*, 2021; ZIK; SULAIMAN; JAMAL, 2020; GONÇALVES *et al.*, 2021; REZANIA *et al.*, 2021; ROY *et al.*, 2020; MOHADESI *et al.*, 2020; RABIE *et al.*, 2019).

Alguns catalisadores básicos utilizados foram sintetizados a partir de resíduos. Materiais residuais de origem biológica são fontes importantes de carbonatos e óxidos de elementos como cálcio e potássio, que podem ser usados na preparação de catalisadores básicos heterogêneos para produção de biodiesel (AMENAGHAWON *et al.*, 2022). Temos como exemplo a síntese a partir das cascas de banana, palmiste, ovo de galinha, ossos de avestruz, cascas de caranguejo, conchas, resíduos vegetais de folhas de *Acalypha indica* e batata-doce, brócolis, couve-flor, repolho, trigo e argila de turfa (ABDULLAH *et al.*, 2021; BORAH *et al.*, 2019; KAMARONZAMAN *et al.*, 2020a; KHAN *et al.*, 2020; MANSIR *et al.*, 2018; PUTRA; NATA; IRAWAN, 2020; SREE *et al.*, 2021; CHUNG *et al.*, 2019; GOURAN; AGHEL; NASIRMANESH, 2021; XIA *et al.*, 2022; OZOR; AIGBODION; SUKDEO, 2023; AMENAGHAWON *et al.*, 2022; ATTARI; MAYVAN; ALISARAEI, 2022; DHARMALINGAM *et al.*, 2023; ELIDIEHY *et al.*, 2022; PUTRA *et al.*, 2018).

Estas sínteses obtiveram rendimentos que variam entre 45,52 a 100%, e são importantes para as produções de biodiesel, pois reforçam as pesquisas sobre utilização de resíduos para reduzir o custo de produção e aumentam as possibilidades

de fabricação de biocombustível 100% renovável (KAMARONZAMAN *et al.*, 2020a; KHAN *et al.*, 2020).

Encontrou-se o uso incomum de terra de formigueiro como fonte para a síntese de um novo catalisador básico heterogêneo. Formigueiro é argila ou composto de argila e outros materiais que se formam nas entradas das habitações subterrâneas das colônias de formigas. É um material que exibe uma vasta variabilidade nas propriedades físicas e na composição química (como a presença de sílica, alumina e outros óxidos). O uso do catalisador de terra de formigueiro modificada com zinco obteve rendimento de 83,16% (YUSUFF; GBADAMOSI; POPOOLA, 2021).

Uma vantagem no uso de catalisadores básicos para produção é que estes catalisadores reagem rapidamente, auxiliando na redução da energia de ativação da reação. Uma desvantagem para a produção é que os ésteres produzidos e os ácidos graxos livres podem se misturar com os catalisadores básicos, produzindo água e sabão (saponificação), o que demanda mais tempo de produção para separação destas substâncias (KAMARONZAMAN *et al.*, 2020a; SREE *et al.*, 2021).

Encontrou-se o uso de catalisadores anfóteros, também conhecidos como bifuncionais, em 6 estudos. Os catalisadores bifuncionais heterogêneos são catalisadores sólidos que possuem características ácidas e básicas, que permitem que estes conduzam a reação de transesterificação e esterificação simultaneamente (SAADI; MATHAN; HE, 2020). Estas produções foram realizadas a partir de ferrita de magnésio ($MgFe_2O_4$), ferrita de bismuto ($BiFeO_3$), e misturas como: óxidos de estrôncio (SrO), zinco (ZnO) e alumínio (Al_2O_3); óxidos de metais de transição (WO_3 , ZrO_2 , MoO_3 etc.); óxido de magnésio (MgO) e sulfato de magnésio ($MgSO_4$); óxido de cálcio (CaO) e óxido de ferro (Fe_2O_3). Consequentemente, esta característica aumenta a capacidade do catalisador na reação de transesterificação. Os rendimentos obtidos variaram de 80 a 100% (MANSIR *et al.*, 2018; MAWLID; ABDELHADY; DEAB, 2022; RAZUKI *et al.*, 2023; SAADI; MATHAN; HE, 2020; BORA *et al.*, 2022; IBRAHIM *et al.*, 2022).

Entre os 60 trabalhos analisados, 7 utilizaram catalisador ácido, estando a catálise heterogênea presente em todos estes. Encontrou-se o uso de ácido sulfâmico (H_3NSO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) no auxílio do uso de estrutura organometálica a base de cálcio, óxido metálico sulfatado ($SO_4/Fe-Al-TiO_2$), óxido de molibdênio (MoO_3) suportado em ferrita de estrôncio ($SrFe_2O_4$). Novos catalisadores foram sintetizados, como o ácido fosfomolibdico ($H_3PMo_{12}O_{40}$) auxiliado com óxido de grafeno, e a síntese

de nanopartículas do ácido 12-tungstofosfórico ($H_3PW_{12}O_{40}$). Os rendimentos obtidos variaram de 78 a 96% (JAMIL *et al.*, 2020; HELMI *et al.*, 2021; SAHABDHEEN; ARIVARASU, 2020; GARDY *et al.*, 2018; GONÇALVES *et al.*, 2021; GAO *et al.*, 2019; PUTRA *et al.*, 2018).

A vantagem dos catalisadores ácidos é que, no seu uso, não existe formação de sabão; entretanto, a sua taxa de reação é extremamente baixa, podendo gerar um aumento no tempo de produção (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018).

Os catalisadores enzimáticos possuem a vantagem de serem reciclados e reutilizados em outras produções, porém, sua obtenção ou fabricação é cara, o que aumenta os custos gerais de produção, dificultando a aceitação do biodiesel para comercialização (RAVELO; RODRIGUEZ, 2018). A utilização de Lipases (enzimas que atuam sobre lipídios) foi optada por 4 pesquisadores, tendo sido obtidas a partir de alguns fungos e bactérias, como: *Candida rugosa* e *Rhizomucor miehei*, *Geotrichum candidum* e *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas mendocina*, *Rhizomucor miehei* e *Aspergillus oryzae*. Os rendimentos obtidos variaram de 91,8 a 98,5% (BINHAYEEDING *et al.*, 2020; COSTA *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2017; WEI *et al.*, 2023).

Como relatado na tabela 2, GUO *et al.* (2021) utilizou fotocatalisador heterogêneo a base de $La^{3+}/ZnO-TiO_2$. Uma reação fotoquímica é uma reação química induzida por luz (visível ou invisível), e um fotocatalisador é um catalisador que tem sua atividade induzida pela presença de luz. Sua utilização resultou em rendimento de 96,14%, com média superior a 87% após 5 reciclagens do fotocatalisador (GUO *et al.*, 2021).

3.2.3 Técnicas de intensificação do processo

A difícil miscibilidade do álcool no óleo limita a transferência de massa, produção e rendimento do biodiesel (MOHADESI *et al.*, 2020). Para superar estes problemas e fazer deste biocombustível uma alternativa cada vez mais viável, torna-se importante o estudo sobre a tecnologia usada para a produção. A agitação mecânica (AM) é uma técnica convencional de produção, que requer maior tempo de reação, alta quantidade de reagente e conseqüentemente maior energia de ativação. Como alternativa a esta tecnologia e demais métodos convencionais, são aplicadas técnicas de intensificação do processo (IP), que são energeticamente mais eficientes,

reduzem o intervalo de purificação do produto e eliminam a resistência à transferência de massa (SHARMA; KODGIRE; KACHHWAHA, 2020).

Nos 60 estudos analisados, observou-se o uso de técnicas convencionais em 46 destes, tais como: uso de diferentes reatores com agitadores magnéticos, agitadores mecânicos, condensador de refluxo, placas e mantas de aquecimento. Estes processos demonstram certa eficiência, pois a constante mistura das substâncias e o fornecimento de calor para o meio possibilitam a agitação das moléculas, o que conseqüentemente aumenta a reatividade. Seguindo estes métodos, foram observados rendimentos variados de 40 a 100%, e tempos de reação entre 30 e 2880 minutos (equivalente a 48 horas de produção) (MANSIR *et al.*, 2018; RAVELO; RODRIGUEZ, 2018; KAMARONZAMAN *et al.*, 2020b; OUTILI *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2017). Apesar do uso de reator acompanhado de aquecimento ser uma técnica convencional, um estudo substituiu o aquecimento produzido por equipamentos pelo aquecimento por energia solar, obtendo rendimento de 93,72% em 30 minutos de reação (NIYAS; SHAIJA, 2023).

Em contrapartida, foram relatados também os usos de diversos aparelhos que contribuem para as técnicas de intensificação do processo em 14 das 60 pesquisas, buscando-se aumentar a taxa de reação de mistura e o rendimento do biodiesel, tais como: autoclaves, células eletrolíticas, micro-ondas, microrreatores, reatores ultrassônicos e produção assistida por irradiação UV (GUO *et al.*, 2021; HELMI *et al.*, 2021; JUME *et al.*, 2020; MILANO *et al.*, 2018; MOHADESI *et al.*, 2020; SHARMA *et al.*, 2018; TOPARE; PATIL; KHEDKAR, 2021).

Autoclave é um equipamento fechado projetado para esterilizar ferramentas a alta temperatura, usando vapor de água sob pressão. Este aparelho foi utilizado para intensificação da produção de biodiesel, pois o aumento da pressão e da temperatura ocasionam em maior agitação das moléculas, conseqüentemente aumentando a reatividade e facilitando a mistura. É um aparelho eficiente como técnica de IP, entretanto, requer manutenção regular e consome grande quantidade de eletricidade, o que pode encarecer os custos da produção em larga escala (MANSIR *et al.*, 2018). Este equipamento foi utilizado em 2 produções e resultou em biodiesel com 71,1 e 91% de rendimento, nos tempos de reação de 720 e 90 minutos respectivamente (ZHANG *et al.*, 2023; JUME *et al.*, 2020).

A célula eletrolítica é um equipamento que realiza eletrólise, ou seja, utiliza corrente elétrica para decompor corpos ionizados (separar moléculas que adquirem

carga positiva ou negativa ao perder ou ganhar elétrons, respectivamente). Este aparelho foi usado para preparar a mistura de reação incluindo óleo, metanol, tetraidrofurano (C_4H_8O) como cossolvente para metanol, catalisador e água, funcionando como técnica de IP da seguinte forma: no processo de eletrólise da água são produzidos H^+ e OH^- , os íons OH^- atacam as moléculas de metanol (CH_3OH) e produzem íons metóxido (CH_3O^-), que atacam as moléculas de triglicerídeos do óleo e produzem biodiesel e água. Uma das vantagens desta técnica é que a transesterificação pode ser realizada a temperatura ambiente. Este equipamento foi utilizado em 3 produções e seu uso resultou em biodiesel com 90,39; 92 e 92,12% de rendimento, com tempos de reação de 900, 270 e 50 minutos respectivamente (HELMI *et al.*, 2021; HELMI; HEMMATI, 2021; XIA *et al.*, 2022).

O micro-ondas é um equipamento que transforma energia elétrica em micro-ondas eletromagnéticas, que são irradiadas na matéria que se encontra dentro deste aparelho. Por meio da absorção destas ondas, a matéria adquire energia, e conseqüentemente calor. A direção das moléculas polares (como a água) sofrem mudança, resultante da presença do campo magnético, o que aumenta o atrito interno entre as moléculas e sua temperatura. Este aumento de atrito e temperatura refletem em maior reatividade, tornando o equipamento eficiente como técnica de IP (YALCIN, 2021). O uso do micro-ondas foi relatado em 3 dos 60 documentos, resultando em: rendimento de 90,37% (usando CaO como catalisador) em 10 minutos e 93,87% (usando KOH como catalisador) em 9 minutos de reação (SHARMA *et al.*, 2018); 94,86% em 15 minutos (GUPTA; RATHOD, 2018); e 97,65% em 9,15 minutos (MILANO *et al.*, 2018).

Os microrreatores recebem este nome pois são reatores químicos de pequenas proporções. Estes equipamentos ajudam a fornecer uma alta relação de superfície de contato em razão do volume utilizado, misturando álcool e óleo em canais ou tubos de micro tamanho (GAUR *et al.*, 2020). O contato contínuo entre as substâncias proporciona um aumento na reatividade, e conseqüentemente no rendimento. Estes aparelhos não possuem um modelo único, sendo desenvolvidos e utilizados em diversos formatos (SANTANA; JÚNIOR; TARANTO, 2019). O uso de microrreator foi relatado por um documento presente na revisão, consistindo em duas partes: um microagitador e um microtubo. Inicialmente os reagentes foram separados em dois tanques, o primeiro contendo a mistura de catalisador (KOH/Z éólita Clinoptilolita) e óleo residual, e o segundo contendo o álcool (metanol). As substâncias foram

liberadas na saída de cada tanque com o uso de uma bomba peristáltica, sendo divididas em 50 correntes de fluxo contínuo. Cada fluxo era direcionado a um microagitador, e na saída entravam nos microtubos (com diâmetro de 0,8mm e comprimento de 5 m), sendo escoados para um recipiente, obtendo-se o biodiesel e o glicerol. O microrreator demonstrou eficiência como técnica de IP, obtendo biodiesel com rendimento de 97,45% com tempo de reação de 13,4 minutos (MOHADESI *et al.*, 2020).

Os reatores ultrassônicos liberam ondas ultrassônicas (cuja frequência das ondas é superior à frequência do som audível) na matéria em análise. A absorção destas ondas aumenta a energia local, o que conseqüentemente aumenta a temperatura do meio. Durante a ultrassonificação ocorre a criação, expansão e colapso de bolhas de gás ou vapor no meio líquido, o que contribui para a mistura do álcool em óleo. Este processo aumenta a transferência de massa e calor, aumentando a taxa de reação (GAUR *et al.*, 2020). Dos estudos analisados, 4 relataram a produção de biodiesel assistida por ultrassom, mostrando a eficiência desta técnica ao obter rendimentos de 93; 97,23; 98,62 e 98,8%, em tempos de reação de 60; 30,13; 39,84 e 46 minutos (TOPARE; PATIL; KHEDKAR, 2021; MALEKI; ESMAEILI, 2023; ATTARI; MAYVAN; ALISARAEI, 2022; BORA *et al.*, 2022).

No estudo de GUO *et al.* (2021), foi observado que o fotocatalisador utilizado não obteve reação sem a presença de iluminação, isto é, a conversão de óleo em biodiesel é quase zero. Os estudos demonstram que a iluminação contínua aumentaria a reação do fotocatalisador, entretanto, pela presença de catalisador básico, o aumento exagerado de iluminação resulta no risco de ocorrência de muita saponificação, o que prejudica o processo. Sendo assim, o autor usou radiação ultravioleta (UV) controlada para intensificação do processo, obtendo rendimento de 96,14% em um tempo de reação de 180 minutos (GUO *et al.*, 2021).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Óleos e gorduras residuais são reagentes que possibilitam a busca por uma produção de biodiesel cada vez mais sustentável. O uso de OGRs reduz o custo de produção e viabiliza a solução do problema de descarte inadequado destes resíduos. O biodiesel pode ser utilizado puro ou misturado ao diesel convencional, como é o caso do Brasil, que prevê a mistura por lei. É essencial para a eficiência da produção deste biocombustível a seleção cuidadosa do tipo de álcool, catalisador e técnica.

As pesquisas utilizaram majoritariamente o metanol e obtiveram em sua maioria rendimentos superiores a 90%. Apesar da pouca utilização, o uso do etanol ocasionou em rendimentos acima de 94%. O butanol promoveu rendimento de 95,6%. O uso do metanol é mais aplicado na produção de biodiesel por sua alta reatividade; entretanto, sua toxicidade faz com que a substituição pelo etanol seja mais segura e sustentável.

Catalisadores básicos homogêneos resultaram em rendimentos variados entre 40 e 100% e catalisadores básicos heterogêneos promoveram rendimentos de 45,52 a 100%. O uso de catalisadores ácidos heterogêneos promoveu rendimentos variados entre 78 e 96%. Catalisadores enzimáticos obtiveram rendimento de 91,8 a 98,5%, trazendo a possibilidade de reciclagem destes reagentes, o que reforça uma produção sustentável.

Observou-se a grande utilização de métodos convencionais nas produções, como reatores equipados com agitadores mecânicos e magnéticos, placas e mantas de aquecimentos, e condensadores de refluxo. Estes métodos resultaram em rendimentos de 40 a 100% e tempos de reação entre 30 e 2880 minutos. Em contrapartida, notou-se a utilização de técnicas de intensificação do processo, com o uso de autoclaves, células eletrolíticas, micro-ondas, microrreatores, reatores ultrassônicos e produção assistida por irradiação UV. As técnicas de IP resultaram em rendimentos de 71,1 a 98,8%, com tempos de reação entre 9,15 e 900 minutos.

Assim, com base na presente revisão, pode-se concluir que a escolha do tipo de álcool, catalisador e técnica afeta significativamente a produção de biodiesel, interferindo no tempo de reação e rendimento. Nesta perspectiva, estudos sobre as variáveis e suas diferentes combinações podem ser um dos tópicos de pesquisa desta área no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento científico da produção deste biocombustível, em busca de fontes energéticas renováveis e sustentáveis, que viabilizem a redução de problemas ambientais como o aquecimento global.

5 REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, R. F.; RASHID, U.; IBRAHIM, M. L.; HAZMI, B.; ALHARTHI, F. A.; NEHDI, I. A. Bifunctional nano-catalyst produced from palm kernel shell via hydrothermal-assisted carbonization for biodiesel production from waste cooking oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110638>
- AMENAGHAWON, A. N.; OBAHIAGBON, K.; ISESELE, V.; USMAN, F. Optimized biodiesel production from waste cooking oil using a functionalized bio-based heterogeneous catalyst. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100501>
- ATHAR, M.; ZAIDI, S. A review of the feedstocks, catalysts, and intensification techniques for sustainable biodiesel production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104523>
- ATTARI, A.; MAYVAN, A. A.; ALISARAEI, A. T. Process optimization of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste cooking oil using waste chicken eggshell-derived CaO as a green heterogeneous catalyst. **Biomass and Bioenergy**, v. 158, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106357>
- BINHAYEEDING, N.; KLOMKLAO, S.; PRASERTSAN, P.; SANGKHARAK, K. Improvement of biodiesel production using waste cooking oil and applying single and mixed immobilised lipases on polyhydroxyalkanoate. **Renewable Energy**, v. 162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.009>
- BORA, A. P.; KONDA, L. D. N. V. V.; PASUPULETI, S.; DURBHA, K. S. Synthesis of MgO/MgSO₄ nanocatalyst by thiourea–nitrate solution combustion for biodiesel production from waste cooking oil. **Renewable Energy**, v. 190, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.127>
- BORAH, M. J.; DAS, A.; DAS, V.; BHUYAN, N.; DEKA, D. Transesterification of waste cooking oil for biodiesel production catalyzed by Zn substituted waste egg shell derived CaO nanocatalyst. **Fuel**, v. 242, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.060>
- BRASIL. **Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016**. Dispõe sobre os percentuais de adição de biodiesel comercializado em território nacional. Brasília - DF, 2016. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13263.htm. Acesso em 02 de julho de 2023.
- BRASIL. **Resolução nº 3, de 20 de março de 2023**. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional, e dá outras providências. Brasília - DF, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>. Acesso em 02 de julho de 2023.
- CARPIO, L. G. T.; SOUZA, F. S. Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions. **Renewable Energy**, v. 111, 2017. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.015>

CHEN, G.; LIU, J.; YAO, J.; QI, Y.; YAN, B. Biodiesel production from waste cooking oil in a magnetically fluidized bed reactor using whole-cell biocatalysts. **Energy Conversion and Management**, v. 138, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.036>

CHOLAPANDIAN, K.; GURUNATHAN, B.; RAJENDRAN, N. Investigation of CaO nanocatalyst synthesized from *Acalypha indica* leaves and its application in biodiesel production using waste cooking oil. **Fuel**, v. 312, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122958>

CHUNG, Z. L.; TAN, Y. H.; CHAN, Y. S.; KANSEDO, J.; MUBARANK, N. M.; GHANSEMI, M.; ABDULLAH, M. O. Life cycle assessment of waste cooking oil for biodiesel production using waste chicken eggshell derived CaO as catalyst via transesterification. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101317>

CONAB. **País confirma recorde na produção de etanol: 35,6 bilhões de litros na safra 2019/20**. CONAB, 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3342-pais-confirma-recorde-historico-na-producao-de-etanol-35-6-bilhoes-de-litros-na-safra-2019-20>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.

COSTA, M. J.; SILVA, M. R. L.; FERREIRA, E. E. A.; CARVALHO, A. K. F.; BASSO, R. C.; PEREIRA, E. B.; CASTRO, H. F.; MENDES, A. A.; HIRATA, D. B. Enzymatic biodiesel production by hydroesterification using waste cooking oil as feedstock. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 157, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108131>

DHARMALINGAM, B.; BALAMURUGAN, S.; WETWATANA, U.; TONGNAN, V.; SEKHAR, C.; PARAMASIVAM, B.; CHEENKACHORN, K.; TAWAI, A.; SRIARIYANUM, M. Comparison of neural network and response surface methodology techniques on optimization of biodiesel production from mixed waste cooking oil using heterogeneous biocatalyst. **Fuel**, v. 340, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127503>

ELDIEHY, K. S. H.; DAIMARY, N.; BORAH, D.; SARMAH, D.; BORA, U.; MANDAL, M.; DEKA, D. Towards biodiesel sustainability: Waste sweet potato leaves as a green heterogeneous catalyst for biodiesel production using microalgal oil and waste cooking oil. **Industrial Crops & Products**, v. 187, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115467>

FIGUEROA, E. S.; CERVANTES, V. Y. M.; SOLARES, M. G.; ALTAMIRANO, R. H.; ARENAS, J. V. Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using CaO as catalyst in a Robinson-Mahoney type reactor. **Fuel**, v. 282, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118853>

GAO, Y.; CHEN, Y.; GU, J.; XIN, Z.; SUN, S. Butyl-biodiesel production from waste cooking oil: Kinetics, fuel properties and emission performance. **Fuel**, v. 236, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.015>

GARDY, J.; OSATIASHTIANI, A.; CÉSPEDES, O.; HASSANPOUR, A.; LAI, X.; LEE,

A. F.; WILSON, K.; REHAN, M. A magnetically separable $\text{SO}_4/\text{Fe-Al-TiO}_2$ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 234, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.046>

GAUR, A.; MISHRA, S.; CHOWDHURY, S.; BAREDAR, P.; VERMA, P. Materials Today: Proceedings A review on factor affecting biodiesel production from waste cooking oil: An Indian perspective. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.432>

GONÇALVES, M. A.; MARES, E. K. L.; ZAMIAN, J. R.; FILHO, G. N. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using magnetic acid heterogeneous catalyst $\text{MoO}_3/\text{SrFe}_2\text{O}_4$. **Fuel**, v. 304, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121463>

GOURAN, A.; AGHEL, B.; NASIRMANESH, F. Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. **Fuel**, v. 295, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120542>

GUO, M.; JIANG, W.; CHEN, C.; QU, S.; LU, J.; YI, W.; DING, J. Process optimization of biodiesel production from waste cooking oil by esterification of free fatty acids using $\text{La}^{3+}/\text{ZnO-TiO}_2$ photocatalyst. **Energy Conversion and Management**, v. 229, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113745>

GUPTA, A. R.; RATHOD, V. K. Calcium diglyceroxide catalyzed biodiesel production from waste cooking oil in the presence of microwave: Optimization and kinetic studies. **Renewable Energy**, v. 121, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.027>

HALWE, A. D.; DESHMUKH, S. J.; KANU, N. J.; GUPTA, E.; TALE, R. B. Optimization of the novel hydrodynamic cavitation based waste cooking oil biodiesel production process parameters using integrated L_9 Taguchi and RSM approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.484>

HELMI, M.; HEMMATI, A. Synthesis of magnetically solid base catalyst of $\text{NaOH/Chitosan-Fe}_3\text{O}_4$ for biodiesel production from waste cooking oil: Optimization, kinetics and thermodynamic studies. **Energy Conversion and Management**, v. 248, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114807>

HELMI, M.; TAHVILDARI, K.; HEMMATI, A.; AZAR, P. A.; SAFEKORDI, A. Phosphomolybdic acid/graphene oxide as novel green catalyst using for biodiesel production from waste cooking oil via electrolysis method: Optimization using with response surface methodology (RSM). **Fuel**, v. 287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119528>

IBRAHIM, N. A.; RASHID, U.; HAZMI, B.; MOSER, B. R.; ALHARTHI, F. A.; ROKHUM, S. L.; NGAMCHRUSSRIVICHAI, C. Biodiesel production from waste cooking oil using magnetic bifunctional calcium and iron oxide nanocatalysts derived from empty fruit bunch. **Fuel**, v. 317, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123525>

IEA. **Total CO₂ emissions, World 1990-2018**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=TotCO2>. Acesso em: 10 de fev. de 2021.

IEA. **World total energy supply by source**. International Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply>. Acesso em: 02 de julho de 2023.

JAMIL, U.; KHOJA, A. H.; LIAQUAT, R.; NAQVI, S. R.; OMAR, W. N. N. W.; AMIN, N. A. S. Copper and calcium-based metal organic framework (MOF) catalyst for biodiesel production from waste cooking oil: A process optimization study. **Energy Conversion and Management**, v. 215, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112934>

JUME, B. H.; AHRANJANI, P. J.; SAEI, S. F.; MAHMOOD, F. M. Z.; VASSEGHIAN, Y.; REZANIA, S. Strontium titanium trioxide doped magnetic graphene oxide as a nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102619>

JUME, B. H.; GABRIS, M. A.; NODEH, H. R.; REZANIA, S.; CHO, J. Biodiesel production from waste cooking oil using a novel heterogeneous catalyst based on graphene oxide doped metal oxide nanoparticles. **Renewable Energy**, v. 162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.046>

KAMARONZAMAN, M. F. F.; KAHAR, H.; HASSAN, N.; HANAFI, M. F.; SAPAWE, N. Biodiesel production from waste cooking oil using nickel doped onto eggshell catalyst. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.159>

KAMARONZAMAN, M. F. F.; KAHAR, H.; HASSAN, N.; HANAFI, M. F.; SAPAWE, N. Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using eggshell catalyst. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.080>

KARMAKER, A. K.; RAHMAN, M.; HOSSAIN, A.; AHMED, R. Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118645>

KHAN, H. M.; IQBAL, T.; ALI, C. H.; JAVAID, A.; CHEEMA, I. I. Sustainable biodiesel production from waste cooking oil utilizing waste ostrich (*Struthio camelus*) bones derived heterogeneous catalyst. **Fuel**, v. 277, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118091>

MALEKI, B.; ESMAEILI, H. Application of Fe₃O₄/SiO₂@ZnO magnetic composites as a recyclable heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oil: Response surface methodology. **Ceramics International**, v. 49, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.344>

MANSIR, N.; TEO, S. W.; RASHID, U.; SAIMAN, M. I.; TAN, Y. P.; ALSULTAN, G.

A.; YAP, Y. H. T. Modified waste egg shell derived bifunctional catalyst for biodiesel production from high FFA waste cooking oil. A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.098>

MARTÍN, J. F. G.; BARRIOS, C. C.; ÁLVAREZ, F. J. A.; SÁEZ, A. D.; MATEOS, P. A. Biodiesel production from waste cooking oil in an oscillatory flow reactor. Performance as a fuel on a TDI diesel engine. **Renewable Energy**, v. 125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.002>

MAWLID, O. A.; ABDELHADY, H. H.; DEAB, M. S. E. Boosted biodiesel production from waste cooking oil using novel SrO/MgFe₂O₄ magnetic nanocatalyst at low temperature: Optimization process. **Energy Conversion and Management**, v. 273, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116435>

MILANO, J.; ONG, H. C.; MASJUKI, H. H.; SILITONGA, A. S.; CHEN, W. H.; KASUMO, F.; DHARMA, S.; SEBAYANG, A. H. Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil- *Calophyllum inophyllum* oil via response surface methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 158, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.027>

MOHADESI, M.; AGHEL, B.; MALEKI, M.; ANSARI, A. The use of KOH/Clinoptilolite catalyst in pilot of microreactor for biodiesel production from waste cooking oil. **Fuel**, v. 263, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116659>

MOYO, L. B.; IYUKE, S. E.; MUVHIIWA, R.F.; SIMATE, G. S.; HLABANGANA, N. Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production parameters from waste cooking oil using a membrane reactor. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 35, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.10.002>

NAEEM, A.; KHAN, I. W.; FAROOQ, M; MAHMOOD, T.; DIN, I. U.; GHAZI, Z. A.; SAEED, T. Kinetic and optimization study of sustainable biodiesel production from waste cooking oil using novel heterogeneous solid base catalyst. **Bioresource Technology**, v. 328, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124831>

NIYAS, M. M.; SHAIJA, A. Biodiesel production from coconut waste cooking oil using novel solar powered rotating flask oscillatory flow reactor and its utilization in diesel engine. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 40, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101794>

OUTILI, N.; KERRAS, H.; NEKKAB, C.; MEROUANI, R.; MENIAI, A. H. Biodiesel production optimization from waste cooking oil using green chemistry metrics. **Renewable Energy**, v. 145, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.152>

OZOR, P. A.; AIGBODION, V. S.; SUKDEO, N. I. Modified calcium oxide nanoparticles derived from oyster shells for biodiesel production from waste cooking oil. **Fuel Communications**, v. 14, 2023. Disponível em: Fuel Communications

PETRAKOPOULOU, F.; ROBINSON, A.; DELGADO, M. O. Impact of climate change on fossil fuel power-plant efficiency and water use. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122816>

PUTRA, M. D.; IRAWAN, C.; UDIANTORO; RISTIANINGSIH, Y. A cleaner process for biodiesel production from waste cooking oil using waste materials as a heterogeneous catalyst and its kinetic study. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.010>

PUTRA, M. D.; NATA, I. F.; IRAWAN, C. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalyst: Biodiesel product data and its characterization. **Data in Brief**, v. 28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104879>

RABIE, A. M.; SHABAN, M.; ABUKHADRA, M. R.; HOSNY, R.; AHMED S. A.; NEGM, N. A. Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Journal of Molecular Liquids**, v. 279, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.096>

RAVELO, V. C.; RODRIGUEZ, J. S. Biodiesel production as a solution to waste cooking oil (WCO) disposal. Will any type of WCO do for a transesterification process? A quality assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 228, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.106>

RAZUKI, A.; KAUS, N. H. M.; SAGADEVANN, S.; SALAEH, S.; IBRAHIM, M. L.; ABDULLAH, M. M. A. B. Revolutionizing biodiesel production: A breakthrough synthesis and characterization of bismuth ferrite nanocatalysts for transesterification of palm and waste cooking oil. **Fuel**, v. 346, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128413>

REZANIA, S.; KORRANI, Z. S.; GABRIS, M. A.; CHO, J.; YADAV, K. K.; PINTO, M. M. S. C.; ALAM, J.; AHAMED, M.; NODEH, H. R. Lanthanum phosphate foam as novel heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Renewable Energy**, v. 176, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.060>

ROY, T.; SAHANI, S.; MADHU, D.; SHARMA, Y. C. A clean approach of biodiesel production from waste cooking oil by using single phase BaSnO₃ as solid base catalyst: Mechanism, kinetics & E-study. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121440>

SAADI, A. A.; MATHAN, B.; HE, Y. Biodiesel production via simultaneous transesterification and esterification reactions over SrO–ZnO/Al₂O₃ as a bifunctional catalyst using high acidic waste cooking oil. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.08.018>

SAHABDHEEN, A. B.; ARIVARASU, A. Synthesis and characterization of reusable heteropoly acid nanoparticles for one step biodiesel production from high acid value waste cooking oil - Performance and emission studies. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.249>

SAHANI, S.; ROY, T.; SHARMA, Y. C. Smart waste management of waste cooking

oil for large scale high quality biodiesel production using Sr-Ti mixed metal oxide as solid catalyst: Optimization and E-metrics studies. **Waste Management**, v. 108, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.036>

SAHAR; SADAF, S.; IQBAL, J.; ULLAH, I.; BHATTI, H. N.; NOUREN, S.; REHMAN, H. U.; NISAR, J.; IQBAL, M. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>

SAKTI, S. C. W.; WIJAYA, R. A.; INDRASARI, N.; FAHMI, Z.; WIDATI, A. A.; ABDULLLOH; NURYONO; CHEN, C. H. Magnetic hollow buoyant alginate beads achieving rapid remediation of oil contamination on water. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104935>

SANTANA, H. S.; JUNIOR, J. L. S.; TARANTO, O. P. Development of microreactors applied on biodiesel synthesis: From experimental investigation to numerical approaches. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 69, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.09.021>

SHARMA, A.; KODGIRE, P.; KACHHWAHA, S. S. Investigation of ultrasound-assisted KOH and CaO catalyzed transesterification for biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil: Process optimization and conversion rate evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120982>

SHARMA, A.; KODGIRE, P.; KACHHWAHA, S. S.; RAGHAVENDRA, H. B.; THAKKAR, K. Application of Microwave Energy for Biodiesel Production using Waste Cooking Oil. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, 2018. Disponível em: <https://doi.org.ez357.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.matpr.2018.11.036>

SREE, J. V.; CHOWDARY, B. A.; KUMAR, K. S.; ANBAZHAGAN; M. P.; SUBRAMANIAN, S. Optimization of the biodiesel production from waste cooking oil using homogeneous catalyst and heterogeneous catalysts. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.332>

SUBRAMANIAM, Y.; MASRON, T. A. The impact of economic globalization on biofuel in developing countries. **Energy Conversion and Management: X**, v. 10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100064>

SUZIHAQUE, M. U. H.; SYAZWINA, N.; ALWI, H.; IBRAHIM, U. K.; ABDULLAH, S.; HARON, N. A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). **Materialstoday: PROCEEDINGS**, V. 63, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.526>

TOPARE, N. S.; PATIL, K. D.; KHEDKAR, S. V. Effects of operating parameters on biodiesel production from waste cooking oil under ultrasonic irradiation. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.379>

UBRABIO. **Biodiesel**: aumento da mistura para 12% começa em 1 de março; mais economia para o Brasil. UBRABIO, 2020. Disponível em: <https://ubrablo.com.br/2020/02/21/b12-mais-biodiesel-e-mais-brasil/>. Acesso em: 10 de fevereiro. de 2021.

VIERA, M. S.; BOHRER, S. D.; ROTTA, R. E.; GERBASE, A. E.; FERRÃO, M. F. **Aplicação do método da adição padrão para a quantificação de biodiesel em blendas comerciais de biodiesel/diesel**. XXIX ENEGEP. Salvador – BA, 2009.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/282442116_Aplicacao_do_Metodo_da_Adiacao_Padiao_para_a_Quantificacao_de_Biodiesel_em_Blendas_Comerciais_de_BiodieselDiesel. Acesso em 02 de julho de 2023.

WEI, H.; WANG, Q.; ZHANG, R.; LIU, M.; ZHANG, W. Efficient biodiesel production from waste cooking oil by fast co-immobilization of lipases from *Aspergillus oryzae* and *Rhizomucor miehei* in magnetic chitosan microcapsules. **Process Biochemistry**, v. 125, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.12.025>

WU, C.; ZHANG, M.; XIONG, D.; TUO, J.; MA, W.; QIAN, Y. Gas generation from Jurassic coal measures at low mature stage and potential gas accumulation in the eastern Junggar Basin, China. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 84, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103692>

XIA, S.; HU, Y.; CHEN, C.; TAO, J.; YAN, B.; LI, W.; ZHU, G.; CHENG, Z.; CHEN, G. Electrolytic transesterification of waste cooking oil using magnetic Co/Fe–Ca based catalyst derived from waste shells: A promising approach towards sustainable biodiesel production. **Renewable Energy**, v. 200, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.071>

YALCIN, E. Effects of microwave and induction heating on the mechanical and self-healing characteristics of the asphalt mixtures containing waste metal. **Construction and Building Materials**, v. 286, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122965>

YUSUFF, A. S.; GBADAMOSI, A. O.; POPOOLA, L. T. Biodiesel production from transesterified waste cooking oil by zinc-modified anthill catalyst: Parametric optimization and biodiesel properties improvement. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104955>

ZHANG, W.; WANG, C.; LUO, B.; HE, P.; LI, L.; WU, G. Biodiesel production by transesterification of waste cooking oil in the presence of graphitic carbon nitride supported molybdenum catalyst. **Fuel**, v. 332, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126309>

ZIK, N. A. F. A.; SULAIMAN, S.; JAMAL, P. Biodiesel production from waste cooking oil using calcium oxide/nanocrystal cellulose/polyvinyl alcohol catalyst in a packed bed reactor. **Renewable Energy**, v. 155, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.144>